



005122
14
29.

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

**ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES
ACATLAN**

07 JUL 7 AM 10 22

**ESTUDIO ESTADISTICO DE LA VARIACION
TEMPORAL DE LAS PARTICULAS SOLIDAS EN LA
ATMOSFERA DE LA ZMCM (PST, PM₁₀ Y Pb)**

TESIS PROFESIONAL

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

**LICENCIADA EN MATEMATICAS APLICADAS
Y COMPUTACION**

PRESENTA:

MARIA MAGDALENA CUEVAS MARTINEZ

GENERACION

92 - 96

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

AGOSTO, 97.





Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Estudio estadístico de la
variación temporal de las
partículas sólidas en la
atmósfera de la ZMCM
(PS_T , PM_{10} y Pb)

Dedico este trabajo a

Mis padres

Por todo su cariño y comprensión. Gracias por haber sido, ser y continuar siendo el impulso más grande que tengo en la vida.
LOS ADORO.

Mis hermanos

Eric, Artemio, Jorge A. y Nimcy. Por su apoyo incondicional que he recibido en todo momento.
SIEMPRE JUNTOS.

Mi tía Rosalina

TE EXTRAÑO

Mi abue

Porque en mi nombre llevo tu recuerdo y el cariño incalculable que siempre te he tenido.
Gracias por estar siempre a mi lado.
TE QUIERO MUCHÍSIMO.

A Miguel Angel

Quiero expresar mi reconocimiento y agradecimiento

*A la Universidad Nacional Autónoma de México
por haberme formado como profesionista.*

*Al Instituto Mexicano del Petróleo
Gerencia Ciencias del Ambiente
por las facilidades otorgadas para el desarrollo de este trabajo.*

A mis compañeras del IMP.
Gracias por sus observaciones y comentarios

*A todos los profesores conscientes de su labor
en especial a*

*la Act. Ma. Del Carmen González Videgaray, y a
la Ing. Beatriz Clavel Díaz*

GRACIAS POR CREER EN MAC

*A todos mis amigos que siempre han sido
incondicionales para conmigo*

A Gustavo

Agradezco el valioso asesoramiento de

*la Act. Ma. Del Carmen González Videgaray,
y
la Biol. Ma. Magdalena Nava Nava.*

Integrantes del sínodo:

**Mtro. Víctor J. Palencia Gómez
Act. Ma. Del Carmen González Videgaray
Ing. Reyes Laurencio García Moncada
Ing. Nora del C. Goris Mayans
Lic. Ma. Del Carmen Villar Patiño**

Contenido

Introducción

i

Primera parte: Marco conceptual

Capítulo 1	Por qué contaminación ambiental en la ZMCM	1
1.1	Características específicas de la ZMCM	1
1.1.1	Condiciones meteorológicas y físico geográficas del Valle de México	1
1.1.2	Características socioeconómicas de la ZMCM	4
1.2	El aire y sus contaminantes	4
1.2.1	Métodos para medir la calidad del aire	6
1.2.2	Criterios para medir la calidad del aire	7
1.2.3	Principales contaminantes que afectan la ZMCM	9
1.3	Principales fuentes de contaminación	10
1.4	Efectos de la contaminación atmosférica	14
1.4.1	Efectos de la contaminación del aire sobre las propiedades atmosféricas	14
1.4.2	Efectos de la contaminación del aire sobre materiales	14
1.4.3	Efecto de la contaminación del aire sobre la vegetación	14
1.4.4	Efectos de la contaminación del aire sobre la salud humana	15
1.5	Inventario de emisiones	16
1.6	Acciones institucionales para el control de la contaminación atmosférica	17
Capítulo 2	Material particulado y plomo atmosférico	21
2.1	Partículas suspendidas totales	21
2.1.1	Aspectos generales	21
2.1.2	Características	21
2.1.3	Muestreo de material particulado	24
2.1.4	Fuentes de partículas suspendidas totales	24
2.1.5	Las partículas fracción fina y fracción gruesa	27
2.1.6	Efectos de las partículas atmosféricas	27
2.1.7	Acciones realizadas para la reducción y control de las PST	29
2.2	Contaminación por plomo	30
2.2.1	Generalidades	30
2.2.2	Fuentes de plomo	31
2.2.3	Medición del plomo en la Zona Metropolitana	36
2.2.4	Efectos de la contaminación por plomo en la ZMCM	36
2.2.5	Acciones realizadas para la reducción y control del plomo	37

Capítulo 3	Conceptos generales	41
3.1	Esquema de planeación	41
3.1.1	Antecedentes	41
3.1.2	La empresa vista como una organización	41
3.2	Necesidad de tomar decisiones	42
3.2.1	Planeación de los medios	43
3.3	Uso de modelos en la evaluación de los medios	44
3.3.1	Tipos de modelos	44
3.3.2	Utilidad de los modelos en la evaluación de los medios	45
3.4	Pronósticos	46
3.4.1	Elaboración de pronósticos	46
3.4.2	Criterios para seleccionar técnicas apropiadas de pronósticos	48
3.4.3	Marco de trabajo para los pronósticos	49
3.4.4	Métodos de pronósticos; definición, ventajas y desventajas	51
3.5	Series de tiempo	56
3.5.1	Objetivos del análisis de series de tiempo	57
3.5.2	Componentes de una serie de tiempo	57
3.5.3	Series de tiempo vistas como procesos estocásticos	58
3.5.4	Series de tiempo discretas	58

Segunda parte: Metodología de estudio

Capítulo 4	Metodología de los modelos a usar	61
4.1	Análisis de correlación lineal	61
4.1.1	Correlación contra regresión	61
4.1.2	Coefficiente de determinación r^2 : medida de la bondad de ajuste	61
4.1.3	Coefficiente de correlación, r	64
4.2	Metodología de series de tiempo Box-Jenkins	67
4.2.1	Antecedentes	67
4.2.2	Construcción de modelos	67
4.2.3	Modelos parsimoniosos	69
4.2.4	Operadores y polinomios de retraso	70
4.2.5	Procesos estocásticos lineales	71
4.2.6	Procesos estacionarios	72
4.2.7	Identificación del modelo	74
4.2.8	Estimación de parámetros	84
4.2.9	Verificación del modelo	87
4.2.10	Análisis de series de tiempo estacionales	92
4.2.11	Modelos multiplicativos estacionales	94
4.2.12	Pronósticos con modelos ARIMA	95

Tercera parte: Análisis de resultados

Capítulo 5 Análisis de las concentraciones atmosféricas de PST, PM ₁₀ y Pb	101
5.1 Características de los puntos de monitoreo participantes	101
5.2 Variación temporal de los contaminantes PST, PM ₁₀ y Pb	104
5.2.1 Tendencias históricas de las Partículas Suspendidas Totales (PST)	104
5.2.2 Generalidades de las Partículas Suspendidas Totales (PST)	110
5.2.3 Tendencias históricas de las Partículas Menores a diez micrómetros (PM ₁₀)	112
5.2.4 Generalidades de las Partículas Menores a diez micrómetros (PM ₁₀)	116
5.2.5 Tendencias históricas del Plomo (Pb)	118
5.2.6 Generalidades del Plomo (Pb)	123
5.3 Análisis de correlación lineal entre los contaminantes en estudio	126
5.3.1 Relación lineal entre PST y PM ₁₀	126
5.3.2 Relación lineal entre PST y Pb	128
Capítulo 6 Modelos ARIMA y proyecciones futuras de los contaminantes PST, PM ₁₀ y Pb	131
6.1 Introducción	131
6.2 Construcción de los modelos ARIMA	132
6.2.1 Generalidades en el análisis	132
6.2.2 Modelos multiplicativos	133
6.2.3 Modelos ARIMA para partículas suspendidas totales	135
6.2.4 Modelos ARIMA para partículas menores a diez micras	151
6.2.5 Modelo ARIMA para el plomo	167
6.3 Generalidades de los modelos ARIMA	183
6.3.1 Características por punto de monitoreo	183
6.3.2 Características específicas por contaminante analizado	185
6.3.3 Tendencia de los pronósticos	186
Conclusiones	187
Referencias Bibliográficas	191
Glosario	195
Anexos A	201
Anexo B	203

Introducción

Los ecosistemas que constituyen el llamado Valle de México y sus alrededores montañosos han sufrido profundas transformaciones a lo largo de más de seis siglos. Los lagos, bosques y pastizales que constituían el paisaje original de esta cuenca han sido sustituidos por áreas agrícolas, industriales, casas, edificios y obras de infraestructura.

Vista como una gran urbanización, uno de los problemas con mayor importancia para esta área es la *Contaminación Ambiental*, dentro de la cual destacan ciertos contaminantes atmosféricos por lo nocivo que son para la vida humana.

La lucha contra la contaminación atmosférica es muy reciente en el Valle de México. Hasta finales de 1986 se contó con una Red Automática de Monitoreo Atmosférico y después de la primera mitad de 1987 se obtuvieron datos representativos sobre los niveles de contaminación en el aire; es decir, hasta entonces, los datos fueron certificados por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA) al cumplir mínimo con el 75% de registros para representar un período específico (día, semana, etc.).

Anteriormente, esta ciudad enfrentaba de manera primordial el problema del *ozono*, el cual dentro de la familia de contaminantes atmosféricos era el que dominaba a esta cuenca; sin embargo ahora como segundo problema, se tiene la contaminación causada por *materia particulada*.

Este trabajo presenta un análisis estadístico de las partículas suspendidas en la atmósfera de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM), las cuales han sido estudiadas como tres grupos. El primero pertenece al total de partículas suspendidas (PST); el segundo a las partículas que de acuerdo a su diámetro son menores de diez micrómetros (PM_{10}) y por último se analiza la contaminación por plomo (Pb), el cual es uno de los contaminantes que más se ha investigado debido al daño que causa a la salud de la población, por lo que se ha trabajado notoriamente para disminuir sus concentraciones atmosféricas.

La ZMCM se divide en cinco importantes áreas: noroeste, noreste, centro, suroeste y sureste; dentro de estas áreas se tienen diversos puntos de monitoreo distribuidos de tal forma que les representen adecuadamente. Para efectos del desarrollo de este trabajo, fueron elegidos los cinco puntos de muestreo más significativos en toda la ZMCM, donde se tiene que para la parte noroeste se analiza a *Tlalnepantla*, para la parte noreste a *Xalostoc*, dentro de la parte centro a *Merced*, en la parte suroeste al *Pedregal* y por último en la parte sureste a *Cerro de la Estrella*.

Los métodos estadísticos que se aplican para analizar los contaminantes en estudio son dos; el primero, es un análisis correlativo, con el cual se pretende encontrar el grado de asociación lineal existente entre las *partículas suspendidas en la atmósfera con las partículas menores a diez micrómetros y las partículas suspendidas en la atmósfera con el plomo*; el segundo involucra procesos estocásticos, en éste se analiza el comportamiento de los tres grupos de contaminantes en estudio (PST, PM_{10} y Pb) con la metodología Box-Jenkins.

El análisis de variación temporal aunado con el correlativo, proporcionaron elementos para identificar la eficiencia de las estrategias implementadas a través del tiempo para abatir la contaminación por partículas. Para

finalizar, se obtuvieron proyecciones futuras del comportamiento de los contaminantes en un tiempo correspondiente a doce meses, a través de los modelos ARIMA.

En el primer capítulo se describe brevemente la contaminación atmosférica en la ZMCM; donde se abordan los términos generales de contaminación y las principales características que han originado la persistencia de una cuenca con altos índices de contaminación ambiental.

En el capítulo dos, *Partículas Suspendidas Totales y Plomo Atmosférico*, se explica el fenómeno de contaminación por partículas y plomo desde sus fuentes, hasta sus repercusiones en la salud. A pesar de que la contaminación por plomo atmosférico en los últimos años se ha mantenido bajo la norma; es de gran importancia mostrar un análisis que ayude a corroborar los resultados que se han presentado como reflejo de las medidas para disminuir este contaminante.

En el capítulo tres se presentan los conceptos involucrados en todo proceso de planeación, destacando como parte importante la toma de decisiones, la cual indica la necesidad del conocimiento de proyecciones futuras, para que esta información contribuya a elegir los mejores caminos que nos lleven a decisiones eficientes y eficaces.

Dentro del capítulo cuatro se describen las metodologías a través de las cuales se desarrolla el análisis de este trabajo; la primera corresponde al análisis de correlación lineal y la segunda a la metodología Box-Jenkins.

Capítulo cinco, en éste se presentan los resultados obtenidos al analizar la variación temporal de las series de tiempo y al aplicar correlación lineal entre PST con PM_{10} , y PST con Pb.

El último capítulo corresponde al capítulo seis, donde se hace uso específicamente de la metodología Box-Jenkins, a través de la cual se obtienen los modelos ARIMA para cada serie en estudio, posteriormente se presenta una evaluación exhaustiva de los modelos elegidos. Para finalizar este capítulo, se obtienen pronósticos que muestran la tendencia del comportamiento de los contaminantes en un mediano plazo.

Capítulo 1

Por qué contaminación ambiental en la ZMCM

1.1 Características específicas de la ZMCM

• Antecedentes

En México la contaminación del aire se manifiesta a finales de los años treinta, cuando la lucha por la tierra se concluía con el reparto masivo realizado por el entonces presidente Lázaro Cárdenas y es cuando se inicia el crecimiento del sector industrial; además se agrega que en las posteriores décadas se conforman las grandes ciudades con sus correspondientes áreas metropolitanas.

El crecimiento de algunas ramas industriales fue orientado básicamente a cubrir la demanda interna de productos. Este crecimiento industrial, en paralelo a la marginación del sector rural, fue notable a partir de los años cincuenta y trajo como resultado un proceso de urbanización que se ubicó en ciertas regiones y que se constituyeron en fuentes de atracción de la mano de obra migrante. Así destaca primero la ciudad de México, donde se concentra no solamente la industria y los servicios principales, sino también la administración, la cultura, la educación, y capas de población que van engrosando lo que hoy se conoce como economía informal; le siguen después, la zona industrial del estado de México, aledaño al Distrito Federal, Monterrey, Guadalajara y Puebla⁽³⁰⁾.

Los polos concentradores de población, de actividad industrial y de servicio, ocurrieron sin contar para su mejor logro con los mínimos planes de ordenamiento. Así, a la creciente urbanización que registró el país, se agregó la concentración en ciertas áreas, algunas de las cuales adquieren en unos cuantos años enorme magnitud. Basta señalar, nuevamente, el caso de la ciudad de México y los municipios que lo rodean y forman su Área Metropolitana; donde las condiciones atmosféricas son poco recomendables la mayor parte del año en términos de salud y bienestar de la población.

1.1.1 Condiciones meteorológicas y físico geográficas del Valle de México

La Ciudad de México es actualmente una de las ciudades más pobladas del mundo; en los últimos años, ésta se ha convertido en una Zona Metropolitana con más de quince millones de habitantes, según el último censo, expandiéndose sobre el Valle de México y las montañas que la rodean. La contaminación del aire, es consecuencia tanto de factores urbanos, de transporte, de tecnologías y de producción, como de las múltiples alteraciones ecológicas que ha sufrido el Valle en este acelerado proceso de urbanización y asentamientos humanos⁽²⁹⁾.

Las características físicas del Valle de México han determinado tanto la evolución como el desarrollo de la Ciudad de México y su Zona Metropolitana, es por ello que con base en éstas se pueden explicar y a la vez

generar, muchos problemas que en la actualidad se originan en áreas como transporte, vivienda, contaminación ambiental y otras.

Las características orográficas y climáticas del Valle de México, han determinado la dispersión y transformación de los contaminantes en el aire, es por ello que estos proporcionan información que se ocupa como puntos de referencia al realizar esfuerzos para reducir la contaminación.

Las características físicas más importantes comprenden ⁽⁷⁾:

- Una altitud de 2 240 metros sobre el nivel del mar con una cuenca lacustre cerrada por grandes cadenas montañosas.
- Un clima templado con precipitaciones anuales superiores a los 700 mm en las zonas montañosas del sur y temperaturas que oscilan entre los 10 y 27 grados centígrados en la ciudad.
- Vientos dominantes provenientes del noreste, con velocidades medias superficiales del orden de 2 m/seg.
- Se presentan inversiones térmicas durante todos los meses del año, aunque con mayor frecuencia en los meses invernales en la mayor parte de la mañana.
- La latitud y altitud en la que se encuentra la Ciudad de México determina un alto nivel de radiación solar que facilita una gran formación de contaminantes fotoquímicos.

Dentro de las características orográficas del Valle de México se mencionan las siguientes ⁽²⁰⁾:

El Valle de México se caracteriza por ser una cuenca lacustre naturalmente cerrada por grandes cadenas montañosas de origen volcánico.

Al oriente del centro de la ciudad, el Valle está limitado por la sierra Nevada, donde sobresalen los volcanes Popocatepetl e Iztaccíhuatl, con alturas superiores a los 5 200 metros.

Al poniente, la sierra de las Cruces separa al Valle de México del Valle de Toluca con montañas que alcanzan los 3 000 metros de altura. Al sur, las serranías del cerro del Ajusco y el Chichinautzin, de formación geológica reciente cierran el Valle con prominencias que alcanzan los 4 000 metros. Entre la sierra de Chichinautzin y la sierra Nevada, se ubica el llamado Sifón de Yautepec, cuya topografía no es tan accidentada y permite ocasionalmente el paso de los vientos provenientes del norte hacia el Valle de Cuautla. Al norte, la sierra de Tezontlalpan y la sierra de Pachuca.

En el interior del Valle, las sierras de Guadalupe en el norte y la de Santa Catarina en el oriente, actualmente rodeadas por la mancha urbana, confinan el núcleo de la ZMCM en una microcuenca atmosférica e hidrológica de características ecológicas únicas.

☉ *Clima, precipitación y vientos* ⁽²⁰⁾

El Valle de México y su área ecológica de influencia, donde se incluyen a las sierras mencionadas anteriormente, gozan de un clima templado con precipitaciones anuales superiores a 700 mm en las zonas montañosas del sur y temperaturas medias que oscilan entre 10 y 27 grados centígrados.

1.1 *Características específicas de la ZMCM*

La época de lluvias inicia en abril y termina en octubre, durante los meses de junio, julio y agosto se presentan precipitaciones intensas y casi diarias, lo que contribuye a la limpieza de la atmósfera.

A través del día y durante todo el año, los vientos dominantes provienen del noreste, con velocidades medias superficiales del orden de 2 m/seg. En las noches, los vientos fríos de las montañas descienden hacia el Valle.

En la época de secas, durante los primeros meses del año, vientos vespertinos que provienen del noreste, viajan con partículas de las áreas desprovistas de vegetación y pavimento provocando tolvaneras locales. Durante esta época, vientos del norte y ocasionalmente del sur, limpian la atmósfera a medio día, estableciendo mejores condiciones de visibilidad.

Las características del Valle de México han dado como resultado que éste sea altamente susceptible al estancamiento y acumulación de los contaminantes atmosféricos. Además, la extensión de la mancha urbana y el consumo de energéticos, han modificado sensiblemente el microclima del Valle. Actualmente, las islas de calor de la ciudad difieren hasta 12 grados centígrados entre la ciudad y las áreas suburbanas y rurales de la periferia, lo que provoca movimientos ascendentes de aire contaminado en el centro del Valle, mismo que tiene la oportunidad de dispersarse o descender en los alrededores inmediatos de la ciudad.

Las inversiones térmicas se presentan en todos los meses del año. Sin embargo, la frecuencia de su ocurrencia y duración es mayor en los meses invernales, mismos en los que se llega a tener un espesor máximo de mezclado de 550 metros de altura en los días más graves. Las inversiones térmicas se rompen, generalmente, durante las primeras horas del día debido a la acción del sol, el cual calienta el aire superficial de la ciudad provocando un movimiento ascendente que permite la dispersión del contaminante.

La radiación solar facilita la reacción de los contaminantes en la atmósfera. En el Valle de México, se recibe la mayor radiación solar en los meses de diciembre a febrero, en el resto del año y durante la época de lluvias, la nubosidad bloquea el paso del sol, lo cual no impide que al mediodía y con nubes dispersas, la radiación solar sea suficiente para la formación de compuestos fotoquímicos que contaminan el ambiente.

• *Vegetación del Valle de México*

La calidad del aire se relaciona, en forma positiva con la presencia de la vegetación, debido a que esta última ocasiona que los efectos de los contaminantes no afecten bruscamente al ambiente.

Dentro del Valle de México, la expansión de la mancha urbana y las actividades productivas han causado la transformación del paisaje, así como también han provocado que desaparezca aproximadamente el 73% de los bosques y diversos ecosistemas que antiguamente estaban constituidos por pastizales, tulares, áreas agrícolas, lagos y ríos.

Los lagos que constituían el Valle de México, han ido desapareciendo, quedando únicamente reminiscencias de los mismos en lo que hoy es el ex-vaso del lago de Texcoco, Xochimilco, Zumpango y Chalco.

La deforestación y la ausencia de criterios ambientales en el proceso de urbanización han ocasionado la disminución muy rápida de áreas verdes en la ciudad. Para 1986, la superficie de áreas verdes de la ciudad, considerando los parques nacionales ubicados dentro del D.F., era de 7.3 metros cuadrados por habitante, mientras que la recomendación de la O.N.U. es de 16⁽⁶⁾.

1.1.2 Características socioeconómicas de la ZMCM

La Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM) se define como el espacio territorial comprendido dentro de los límites del Distrito Federal y los dieciocho municipios del Estado de México conurbados al mismo. De acuerdo con imágenes de satélite, su extensión se estima en 3 230 kilómetros cuadrados, de los cuales 39% (1 260 km²) corresponden a la mancha urbana ⁽²⁰⁾.

En esta zona habita más de la quinta parte de la población nacional, se genera el 36% del PIB del país y se consume el 17% de la energía producida. La población registrada en el censo de 1990 para la ZMCM es de 14 millones 987 mil habitantes. El 55% vive en el Distrito Federal y el 45% en los municipios conurbados del Estado de México ⁽⁷⁾.

Las proyecciones indican que la población continuará creciendo con una tasa anual de 1.4% llegando a más de 20 millones de habitantes para el año 2010. La población del Estado de México crecerá más rápido y con un nivel inicial de infraestructura y servicios menor al del Distrito Federal.

La extensión de la mancha urbana obliga a sus pobladores a transportarse a grandes distancias para cumplir con sus actividades cotidianas. Se estima que diariamente se realizan 29.5 millones de viajes, los cuales se hacen en 2 millones 372 mil autos privados, 56 mil 500 taxis, 69 mil 560 combis y microbuses, 10 mil 950 autobuses urbanos, 8 líneas del METRO con 2 205 vagones, una línea de tren ligero y 450 trolebuses ⁽⁷⁾.

Existen más de 30 mil industrias, de las cuales 72% se localizan en el Distrito Federal y el restante en los municipios conurbados ⁽²⁰⁾, y 12 mil establecimientos de servicio. Entre las industrias del Valle, 250 manejan residuos peligrosos y 4 mil poseen procesos de combustión o de transformación con emisiones significativas al aire. La intensidad del uso del suelo y la enorme cantidad de actividades que se realizan en la ZMCM y sus alrededores, mantienen una tendencia creciente de emisión de contaminantes a la atmósfera que deterioran la calidad del aire y los ecosistemas que componen el Valle de México y ponen en riesgo la salud de sus habitantes ⁽⁸⁾.

1.2 El aire y sus contaminantes

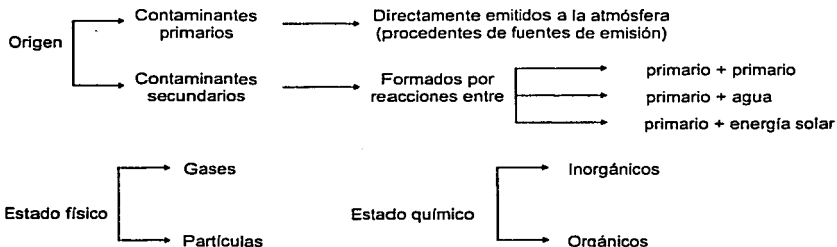
El aire atmosférico es una mezcla de gases que ha evolucionado durante miles de millones de años hasta llegar a la composición actual. Sus componentes naturales son nitrógeno, oxígeno y algunos gases inertes o nobles. Otros componentes como el bióxido de carbono y el vapor de agua son variables, según el lugar y el tiempo. Los componentes naturales del aire son esenciales para llevar a cabo los diferentes procesos biológicos, físicos y químicos necesarios para mantener la vida en el planeta.

Es importante mencionar que en realidad el aire puro no existe, debido al intercambio constante de materia que hay entre los seres vivos, la hidrosfera, la atmósfera y la litosfera. La contaminación del aire tiene una larga historia, que ya habla del uso de los combustibles fósiles como su causa. Posteriormente, el invento de la máquina de vapor marcó el inicio de la revolución Industrial, y en los años siguientes habría de llenar primero Londres y después otros lugares de Europa y América, de fábricas que arrojaban humo ⁽³⁴⁾.

Principales componentes del aire	
Componente	Volumen %
Nitrógeno, (N ₂)	78.03000
Oxígeno, (O ₂)	20.99000
Argón, (Ar)	00.94000
Bióxido de Carbono, (CO ₂)	00.03500
Neón, (Ne)	00.00240
Otros gases inertes	00.00240
Hidrógeno (H ₂)	00.00005

Fuente: Tecnológico de Monterrey Campus Estado de México. Diplomado en tecnología y administración ambiental seminario II, efectos de los contaminantes. Programas de educación continua. México 1996.

La Contaminación Atmosférica es la presencia del aire de toda materia o energía en cualquiera de sus estados físicos y formas, que al incorporarse y actuar en la atmósfera altera o modifica su composición y condición natural. Estas se clasifican bajo diferentes criterios, entre los cuales se encuentran, por su origen, por su estado físico, o por su estado químico entre otros:



Fuente: SEDUE, Subsecretaría de ecología, Coordinación de asesores y Asesoría técnica; Índice Metropolitano de Calidad del Aire; boletín informativo.

Dentro de los contaminantes primarios se encuentran: Monóxido de Carbono (CO), Bióxido de azufre (SO₂), Trióxido de azufre (SO₃), Bióxido de Nitrógeno (NO₂), Monóxido de Nitrógeno (NO), Hidrocarburos no saturados y aromáticos, Macropartículas (sólidas y líquidas) y por último el bióxido de carbono (CO₂). Como contaminantes secundarios podemos mencionar a los compuestos de azufre, carbono y nitrógeno; y como el más importante al ozono (O₃).

Tan pronto como son introducidos en el aire, los contaminantes quedan sometidos al proceso general de dispersión ejercida por la atmósfera. Simultáneamente, con su transporte en el viento y su mezcla turbulenta tienen lugar una serie de reacciones químicas que transforman los contaminantes primarios en secundarios. Los aspectos atmosféricos de la contaminación del aire se pueden dividir según los factores siguientes⁽³²⁾:

1. La química del aire.

I. 2 El aire y sus contaminantes

6

2. La meteorología.
3. El transporte y la dispersión de los contaminantes.

La *química del aire* comprende el estudio de los procesos de transformación ejercidos sobre los contaminantes atmosféricos. La *meteorología* es el estudio de la dinámica de la atmósfera, en particular con respecto a la cantidad de movimiento y a la energía. La parte de la atmósfera que rige al *transporte y la dispersión* es la llamada capa límite planetaria, esta capa representa el límite de influencia de la superficie de la tierra en las estructuras de los vientos en la atmósfera. Uno de los principales objetos de la meteorología aplicada a la contaminación del aire es la predicción de la dispersión de los contaminantes. Dicha dispersión depende de: la naturaleza física del contaminante (gas o partícula), velocidad y dirección del viento, estabilidad y dirección del viento, estabilidad atmosférica, nivel de turbulencia, condiciones de emisión (velocidad de salida, temperatura, etc.) y por último la configuración de la fuente de emisión (chimenea, autopista, etc.).

1.2.1 Métodos para medir la calidad del aire

Los efectos de la contaminación atmosférica se presentan de varias formas, y si sólo se tuviera información a través de la observación, no se podría determinar en todos los casos a qué contaminante se le atribuyen dichos efectos. De ahí la importancia de contar con un equipo analítico, cualitativo y cuantitativo que nos proporcione el nombre y la concentración en el ambiente del contaminante.

El monitoreo del aire consta de dos procesos: *el muestreo y el análisis de contaminantes atmosféricos*. El primero es el proceso por el cual las muestras se colectan, mientras que el segundo involucra métodos para determinar las concentraciones de los contaminantes en una muestra de aire.

El sistema de monitoreo atmosférico de la ZMCM se compone de cinco elementos, siendo el principal la Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA), mientras que las Estaciones Piloto, las Unidades Móviles de Monitoreo Atmosférico, la Red Manual y la Red Meteorológica son los elementos que la complementan o apoyan.

La *RAMA* se instaló con el objeto de conocer la calidad del aire en una región tan amplia como lo es la ZMCM, ésta funciona a partir de 1986 y mide contaminantes gaseosos; al igual que la Red Manual opera conforme a los criterios establecidos por la Organización Mundial de la Salud y las agencias de protección ambiental de los Estados Unidos y Alemania. La RAMA cuenta con un centro de cómputo que enlaza telefónicamente 32 estaciones distribuidas en la ZMCM; opera los 365 días del año y las 24 horas del día en forma continua, los contaminantes y parámetros meteorológicos que registra se presentan en el anexo A.

La *Red Manual de Monitoreo Atmosférico* mide la concentración de partículas suspendidas totales (PST), partículas menores a diez micras (PM_{10}) y metales pesados, funciona realizando muestreos durante un periodo de 24 horas cada seis días, excepto en invierno, tiempo en que se incrementa la frecuencia de muestreo a una vez cada tres días. Actualmente cuenta con 19 estaciones; cinco de éstas también miden la fracción respirable e identifican y cuantifican los metales presentes en las PST.

La *Red Meteorológica* tiene como objetivo proporcionar información que ayuda a pronosticar los niveles de la calidad del aire; los datos generados son determinantes en la elaboración del pronóstico de la calidad del aire, cuyo fin es analizar la estabilidad o el desplazamiento de los contaminantes en una, veinticuatro ó cuarenta y ocho

horas de antelación; consta de diez estaciones con sensores de velocidad y dirección del viento, medidores de humedad relativa y temperatura.

Las *unidades móviles de monitoreo atmosférico* están equipadas de manera similar a las estaciones de la RAMA pero cubren funciones y objetivos diferentes, entre los que destaca la evaluación del nivel de desempeño de la instrumentación de estaciones fijas, validación de información y los estudios iniciales o determinantes para la ubicación de sitios de monitoreo.

En el caso de las *Estaciones Piloto*, su objetivo principal es el vigilar y validar el desempeño de la totalidad del sistema al funcionar en forma paralela pero independiente de la Red automática de Monitoreo Atmosférico.

Para poder garantizar la calidad y validez de los datos obtenidos en la RAMA, se cuenta con un *Programa de Aseguramiento de la Calidad*, cuyo propósito es el de verificar que la información sea precisa, para proporcionar al sistema mayor confiabilidad. Este programa consiste en auditorías de ejecución y auditorías al sistema que se aplican a diferentes etapas de la metodología de evaluación de los contaminantes. El Instituto Nacional de Ecología (INE) es el encargado de realizar estas auditorías a los sistemas, y a su vez, es auditado por agencias extranjeras, principalmente por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos.

1.2.2 Criterios para medir la calidad del aire

Con base en las normas nacionales los contaminantes atmosféricos que se consideran son: ozono, bióxido de azufre, monóxido de carbono, partículas suspendidas totales, partículas menores a diez micras, plomo y óxidos de nitrógeno.

Los contaminantes anteriormente mencionados son conocidos como *contaminantes criterio* ⁽¹⁶⁾; para ellos existe una norma de calidad del aire, cuya finalidad es proteger la salud humana, el bienestar, los ecosistemas en todo su contexto (flora y fauna), así como los bienes materiales. Esta norma de calidad se genera a partir de los criterios de calidad del aire, los cuales son documentos que contienen la información más reciente y completa de cada contaminante en lo relativo a sus características físicas y químicas, metodología de análisis, efectos en la salud humana, en la flora, la fauna, los materiales, etc. Las normas mexicanas se establecieron fundamentalmente tomando en cuenta los criterios y estándares adoptados en otros países del mundo ⁽¹⁷⁾.

Existen en nuestro país normas de calidad del aire, es decir, cantidades máximas de contaminantes permitidos en el ambiente que no causan daños a la salud de la población o al medio. Estas normas se expresan a través de valores IMECA, *Índice Metropolitano de la Calidad del Aire*, valor numérico que permite relacionar el grado de contaminación atmosférica con los posibles efectos en la salud, en una forma accesible a la población. El IMECA se basa en valores obtenidos a partir de las normas mexicanas de calidad del aire y de niveles de contaminación para los que se sabe que ocurren daños significativos a la salud.

Actualmente, el Sector Salud tiene a su cargo la ratificación o rectificación de estos criterios y la adición de otros que, como en el caso del plomo y la fracción respirable de las partículas suspendidas, se evalúan con base en la experiencia internacional. El IMECA tiene como objetivos principales:

- Mantener informada a la población sobre la calidad del aire en la zona metropolitana.
- Observar el comportamiento o las tendencias de la contaminación atmosférica en zonas metropolitanas.
- Comparar la calidad del aire entre zonas metropolitanas que utilicen índices similares.

Normas de calidad del aire vigentes a partir de enero de 1995 correspondientes al IMECA 100

Contaminante	Concentración partes por millón (PPM) Cantidad promedio	Concentración microgramos por metro cúbico ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) Cantidad promedio	Promedio anual microgramos por metro cúbico ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Monóxido de Carbono (CO)	11 ppm como promedio móvil de 8 horas	12 595 en 8 horas	
Ozono (O_3)	0.11 ppm como promedio de una hora	216 en 1 hora	
Dióxido de Nitrógeno (NO_2)	0.21 ppm como promedio de un hora	395 en 1 hora	
Dióxido de Azufre (SO_2)	0.13 ppm como promedio móvil de 24 horas	341 en 24 horas	79 media aritmética anual
Partículas Suspendidas Totales (PST)		260 $\mu\text{m}/\text{m}^3$ como muestreo de 24 horas	75 media aritmética anual
Partículas Suspendidas Fracción Respirable (PM_{10})		150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ como promedio móvil de 24 horas	50 media aritmética anual
Plomo (Pb)		1.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ promedio trimestral	

Fuente: Valores publicados por la Secretaría de Salud en el Diario Oficial de la Federación. 3 de diciembre de 1994.

Equivalencia del IMECA en salud

IMECA	Calidad	Descripción
0 - 100	Satisfactoria	Todos los compuestos contaminantes se encuentran en una concentración que es menor que la norma y no se perciben efectos adversos. Situación favorable para la realización de todo tipo de actividades físicas.
101 - 200	No satisfactoria	Aire insalubre. Se agravan molestias e intolerancia en la población sensible; en personas sanas pueden aparecer síntomas. Se deben reducir las actividades al aire libre.
201 - 300	Mala	Aumento de molestias e intolerancia relativa al ejercicio en personas con padecimientos respiratorios y cardiovasculares; aparición de ligeras molestias en la población en general.
301 - 400	Muy mala	Situación peligrosa. Alarma a la población, se agravan los síntomas de la población sana y en la sensible se presentan problemas graves.
401 - 500	Muy mala	Muerte de personas enfermas y ancianos. Población sana con síntomas que afectan sus actividades normales.
Mayor de 500	Muy mala	Peligro potencial para toda la población.

Fuente: Tecnológico de Monterrey Campus Estado De México. Diplomado en tecnología y administración ambiental seminario II, efectos de los contaminantes. Programas de educación continua. México 1996.

1.2 El aire y sus contaminantes

El IMECA se calcula con los valores de concentración pertenecientes a los contaminantes que se registran en cada una de las estaciones que conforman la RAMA, dichas estaciones se encuentran distribuidas en el área metropolitana. Dentro del anexo A se muestran las estaciones de monitoreo existentes en la ZMCM, así como la zona a la que pertenecen y los parámetros que se muestrean.

La concentración de contaminación atmosférica suele expresarse en dos tipos de unidades. La primera empleada para contaminantes gaseosos es la de partes por millón en volumen y cuyo símbolo es ppm, el uso de partes por millón como unidad de medida se debe principalmente a las dificultades surgidas con el manejo de porcentajes tan pequeños como éstos. La segunda unidad de medida de concentración utilizada está basada en el peso del contaminante por unidad de volumen de aire, expresado en microgramos por metro cúbico, y cuya simbología es $\mu\text{g}/\text{m}^3$, se utiliza esta medida para el material particulado y en ocasiones también para los gases.

1.2.3 Principales contaminantes que afectan la ZMCM

En la atmósfera de la ZMCM se encuentra presente una amplia variedad de contaminantes. Entre éstos, los más importantes para evaluar la calidad del aire son las siguientes :

☉ *Dióxido de Azufre (SO_2)*

El SO_2 proviene, sobre todo, de la quema de combustibles que contienen azufre, principalmente combustóleo y diesel, además de producirse en los procesos de refinación del petróleo.

La importancia de este contaminante va más allá de su concentración como tal en la atmósfera. Una vez en el aire, se transforma en sulfatos a través de reacciones que involucran la formación de ácido sulfúrico, por lo que ayuda en forma importante a la contribución de lluvia ácida.

Los sulfatos incrementan la concentración de partículas suspendidas en el aire y contribuyen sensiblemente a la disminución de la visibilidad. A este respecto, en la ZMCM se han encontrado evidencias de que el contenido de sulfatos es relativamente alto en el norte de la ciudad y que la lluvia presenta en ocasiones niveles ligeramente ácidos ⁽⁹⁾.

☉ *Monóxido de Carbono (CO)*

El origen más importante del monóxido de carbono en el aire es la combustión incompleta que se efectúa en los vehículos, lo cual se agudiza en la ZMCM debido al menor contenido de oxígeno en su atmósfera, (-23%) comparado con el que existe a nivel del mar ⁽⁹⁾.

Su emisión depende principalmente del estado de afinación de los motores y, en un futuro próximo, también de la cobertura y buen funcionamiento de dispositivos de control, como los convertidores catalíticos. La magnitud de CO que se arroja a la atmósfera está determinada fundamentalmente por la tecnología, estado de funcionamiento de los vehículos, las características de los combustibles, las condiciones del sistema vial, los patrones de tránsito vehicular y las modalidades del transporte que prevalecen en la ciudad.

☛ *Óxidos de Nitrógeno (NO_x)*

Los óxidos de nitrógeno se forman durante la combustión como producto de la oxidación de nitrógeno atmosférico y, en un menor grado, del nitrógeno orgánico contenido en los combustibles.

Sin embargo, los óxidos de nitrógeno tienen otras implicaciones desde el punto de vista de la calidad del aire. En primer lugar, son los precursores básicos del ozono, el cual representa uno de los más serios problemas de contaminación en la ZMCM. Por otra parte, pueden oxidarse en la atmósfera dando lugar a la formación de ácidos y finalmente de sales de nitrato que, al igual que los sulfatos, son partículas que intervienen en la disminución de la visibilidad.

☛ *Ozono (O₃)*

El ozono es un contaminante secundario, es decir, que no se emite directamente, sino que se forma a partir de reacciones muy complejas en las que participan los óxidos de nitrógeno y los hidrocarburos, en presencia de luz solar.

☛ *Partículas Suspendidas Totales (PST)*

En la atmósfera de la ZMCM se encuentran presentes en suspensión partículas de muy diversa composición y tamaño. Entre estas se incluyen las llamadas partículas naturales (integradas por suelos, partículas de origen biológico y basuras), las partículas que provienen de los procesos de combustión y las que se forman en la atmósfera como resultado de la transformación de otros contaminantes, entre ellos encontramos a los nitratos y los sulfatos.

☛ *Plomo (Pb)*

En el aire, el plomo se encuentra en estado sólido y forma parte de las partículas suspendidas. Su principal fuente de emisión son los automóviles, debido al uso de gasolinas que contienen tetraetilo de plomo (TEP), el cual se usa como antidetonante. Es importante destacar que la concentración de plomo en el aire ha disminuido notoriamente como consecuencia de sucesivas reformulaciones de la gasolina, en la cual se ha variado su contenido de TEP desde valores superiores a los 3 ml/gal (mililitro por galón) a menos de 0.21 ml/gal en la actualidad¹⁷.

1.3 Principales fuentes de contaminación

La contaminación del aire puede ser definida como cualquier condición atmosférica en la que ciertas sustancias alcanzan concentraciones lo suficientemente elevadas sobre su nivel ambiental normal como para producir un efecto mensurable en el hombre, los animales, la vegetación o los materiales.

La calidad del aire es un elemento esencial para la salud y bienestar tanto humano como el de los ecosistemas. Diversos fenómenos naturales, tales como el vulcanismo y los incendios forestales o la erosión ocasionada por el viento, alteran dicha calidad al introducir un variado número de contaminantes. Pero la dimensión de esta contribución a la contaminación severa del aire que caracteriza, sobre todo, a las áreas urbanas altamente industrializadas y con una gran densidad vehicular, es menor en general comparada con la contribución de las actividades humanas, ya sean domésticas, industriales, agrícolas o de otra índole.

Más aún, este tipo de contaminación ha mostrado no tener fronteras, en forma tal que los contaminantes generados en un país pueden tener impactos indeseables en países vecinos, e incluso, contribuir al deterioro de la capa de ozono que protege a la Tierra de la radiación ultravioleta solar, o bien provocar el denominado efecto de invernadero que está ocasionando el calentamiento del planeta. Esto muestra las implicaciones internacionales del problema que explica el por qué se han suscrito convenios multinacionales tendentes a prevenir, reducir y controlar las emisiones que ocasionan tales fenómenos de carácter global.

La contaminación del aire en la ciudad de México no puede ser explicada fácilmente a través de un análisis causa-efecto; por el contrario, es un fenómeno complejo que depende de las siguientes variaciones ⁽⁶⁾:

- Cantidad de energéticos consumidos (gasolina, diesel, combustóleo, gas y otros).
- Calidad y tipo de los combustibles empleados.
- Tipo, estado y operación de los equipos de combustión y de los procesos industriales prevalecientes.
- Existencia y operación de tecnologías de control de combustión y de emisiones tanto en vehículos como en plantas industriales y de servicios.
- Estado de la cubierta vegetal (o de otro tipo) y, la textura y granulometría de los suelos en zonas suburbanas y no urbanas que rodean a la ciudad (generadores de partículas y polvos).
- Condiciones meteorológicas del área (temperatura, presión, humedad, estabilidad, vientos dominantes, etc.).
- Físicoquímica atmosférica, la cual define los procesos y productos de interacción entre los diferentes contaminantes y los componentes del aire, así como su remoción de la atmósfera.

Como se puede observar, las cinco primeras variables son consecuencias de diferentes factores económicos y normativos; sin embargo las últimas dos se determinan de manera exógena a la actividad humana. Además la calidad del aire también se vincula con las siguientes características naturales:

1. Ubicación y condiciones meteorológicas del Valle de México y las sierras que lo rodean.
2. La interacción entre los diferentes contaminantes y los componentes del aire que modifican la química atmosférica.

Se debe aceptar que la contaminación atmosférica no tiene solución en el corto plazo, por el hecho de que contribuyen diversos factores como el parque vehicular obsoleto en su inmensa mayoría, el cual no podrá ser reemplazado por modelos ecológicamente más avanzados inmediatamente. A la par, un sistema de transporte público que no desalienta el uso del vehículo particular. También una industria obsoleta en distintos aspectos; y en no menor proporción, la lentitud con la que el sector gubernamental respondió para buscar soluciones viables a tiempo.

A la contaminación causada por la industria se le sumó poco después la proveniente de los vehículos automotores, que en unas cuantas décadas inundaron las calles de las grandes ciudades. Los combustibles que ponen en marcha camiones de carga y pasajeros, motocicletas, unidades de servicio, etc. generan entre otras sustancias, monóxido de carbono, óxido de nitrógeno, plomo, benceno, tolueno, xileno, dibromuro de etileno, diversas partículas y ozono. A los anteriores se agrega el bióxido de azufre proveniente de los vehículos que

utilizan diesel. En pocos años, estos contaminantes se convirtieron en preocupación debido a los daños que ocasionan en la salud. El deterioro se manifestó tanto en las ciudades europeas como en las de EE.UU. y en las últimas décadas se agregaron las principales ciudades del Tercer Mundo.

Es importante señalar que la contaminación proveniente de la industria y el transporte en ciertos lugares adquirió grandes proporciones debido a las condiciones climáticas imperantes en un momento determinado y por la ubicación geográfica de las ciudades o zonas industriales.

A los contaminantes provenientes de la actividad industrial y del funcionamiento vehicular se sumaron recientemente otros de enorme peligrosidad para la salud del ambiente entre los que destacan contaminantes químicos tóxicos, los cuales crecen ante la aparición de nuevos procesos tecnológicos para elaborar productos químicos y petroquímicos.

Principales fuentes de contaminantes primarios	
Contaminante	Principales fuentes
Monóxido de Carbono CO	Uso de combustibles fósiles
Bióxido y trióxido de azufre SO ₂ , SO ₃	Combustión de carbón y combustibles que contiene azufre
Monóxido y bióxido de Nitrógeno NO ₂ , NO	Plantas generadoras de energía eléctrica (Combustión a alta temperatura de combustibles fósiles)
Hidrocarburos no saturados y aromáticos	Uso de petróleo, gas natural y carbón
Macropartículas	Actividades industriales, de transporte, de combustión y causas naturales
Bióxido de Carbono	Sobreutilización de combustibles fósiles y de carbón

Fuente: Tecnológico de Monterrey Campus Estado de México. Diplomado en tecnología y administración ambiental seminario II, efectos de los contaminantes. Programas de educación continua. México 1996.

Sabemos que el origen de la contaminación del aire es la fuente de emisión. Las fuentes de emisión más importantes son ⁽⁸⁾:

➤ *Industria*

En la Ciudad de México hay más de 30 mil establecimientos industriales, de los cuales alrededor de 4 mil contribuyen significativamente a la emisión de contaminantes, debido a su tamaño, procesos de transformación y combustión. Al respecto destacan las siguientes ramas: química (incluyendo pintura y solventes), fundición de hierro y acero, textil, de minerales no metálicos, hulera, papelera, alimenticia, vidriera, de plásticos, metal mecánico, asfalto, grasas y aceites y cementera.

1.3 Principales fuentes de contaminación

En general, la obsolescencia y poco control de los procesos de combustión, el empleo de combustibles con contenido de azufre y el uso de solventes, causan las mayores emisiones de contaminantes a la atmósfera.

● *Establecimiento de servicios*

Se estima que en la ZMCM operan 12 mil establecimientos de servicios que poseen procesos de combustión e incineración. De acuerdo con la magnitud y tipo de calderas, cada giro emplea diversos combustibles; los baños públicos, panificadoras, hoteles, deportivos y hospitales utilizan combustóleo preferentemente. Algunos hoteles consumen diesel, las tintorerías usan principalmente petróleo diáfano, mientras los expendios de alimentos consumen gas L.P.

● *Generación de energía eléctrica*

Las centrales termoeléctricas Jorge Luque y Valle de México producen en conjunto más del 9% del total de los contaminantes emitidos por el conjunto de industrias y establecimientos comerciales y de servicio (fuentes fijas). Sus emisiones de SO₂ han disminuido en 80% con la sustitución de combustóleo por gas natural. No obstante, las emisiones de NO_x siguen siendo importantes porque estas se generan en todo proceso de combustión.

● *Producción, almacenamiento y distribución de combustibles*

Este rubro genera alrededor del 14% de la contaminación proveniente de fuentes fijas. Casi la tercera parte de estas emisiones están constituidas por hidrocarburos, y alrededor de la sexta parte por SO₂. Los vapores de gasolinas y combustibles en general son especialmente nocivos a la salud. Las principales fuentes de hidrocarburos crudos provienen de centros de proceso, distribución, transporte y almacenamiento.

● *Transporte*

Las emisiones vehiculares representan el 76% del total de contaminantes emitidos en la atmósfera de la Ciudad de México. Los autos particulares emiten poco menos de la mitad de los contaminantes de origen vehicular y al emplear gasolina generan además óxidos de plomo, de azufre y partículas.

Por otra parte, los taxis, combis y minibuses emiten en conjunto el 24% de las emisiones vehiculares, representando el grupo de transporte colectivo con mayor aportación contaminante por cada viaje realizado. Los camiones de carga de gasolina emiten más del 26% de los contaminantes de origen vehicular. Los camiones de carga de diesel registrados en la ciudad representan alrededor del 2% de la contaminación emitida por vehículos automotores. Sin embargo su contribución en SO₂ y partículas es muy elevada.

● *El uso del suelo*

La deforestación, la desecación de cuerpos de agua y el decaimiento de prácticas agropecuarias, han propiciado que los suelos deshidratados y desprovistos de una cubierta vegetal permanente estén sujetos a la acción erosiva del viento, generando la emisión de partículas en suspensión, principalmente en la época de estiaje. Su influencia sobre la contaminación del aire alcanza el 42% del total de partículas.

1.4 Efectos de la contaminación atmosférica

Existe evidencia real de que la contaminación atmosférica afecta la salud de las personas y de los animales, daña la vegetación, ensucia y deteriora los materiales, afecta el clima, reduce la visibilidad y la radiación solar, perjudica los procesos de producción, aumenta los riesgos y, en general, dificulta el disfrute de la vida y de las cosas. Aunque algunos de estos efectos son específicos y mensurables, como en el caso de los daños causados en la vegetación y en los materiales, y en la reducción de visibilidad, la mayoría de ellos son difíciles de medir, como en el caso de los daños causados a la salud de las personas y de los animales, y los obstáculos que presenta para una vida confortable. En esta sección se presentarán algunos de los efectos importantes demostrados de la contaminación del aire ⁽³²⁾.

1.4.1 Efectos de la contaminación del aire sobre las propiedades atmosféricas

Los contaminantes del aire pueden afectar las propiedades atmosféricas de la siguiente manera:

1. Reducción de la visibilidad.
2. Formación de neblina.
3. Reducción de la radiación solar.
4. Alteración de las temperaturas y de la distribución de los vientos.

Tal vez el efecto más visible de la contaminación del aire sobre las propiedades de la atmósfera es la reducción de la visibilidad que acompaña frecuentemente al aire contaminado. La limitación de la visibilidad da lugar a situaciones de peligro; esta es causada principalmente por la dispersión de la luz, la cual consiste en la desviación de las trayectorias luminosas producida por la presencia en el aire de partículas en suspensión.

1.4.2 Efectos de la contaminación del aire sobre materiales

Los contaminantes atmosféricos pueden afectar los materiales; bien ensuciándolos o deteriorando su composición química. Elevadas concentraciones de humos y de partículas están asociadas con el ensuciamiento de la ropa y de las estructuras, y partículas ácidas o alcalinas, en particular las que contienen azufre, corroen materiales tales como la pintura, las obras de fábrica, los contactos eléctricos y los tejidos. El ozono es particularmente eficaz en deterioro de caucho ⁽¹⁹⁾.

1.4.3 Efecto de la contaminación del aire sobre la vegetación

Los contaminantes atmosféricos también causan daños en la vegetación; los daños a los bosques son muy importantes así como la disminución de la productividad en zonas de cultivo. Los daños se deben principalmente al efecto de la precipitación o lluvia ácida y a los oxidantes fotoquímicos. Una característica importante de estas formas de contaminación es que sus impactos van más allá de la escala local, afectando amplias regiones que en ocasiones rebasan las fronteras del país generador de los contaminantes.

Los contaminantes reconocidos como fitotóxicos (sustancias dañinas para la vegetación) son el dióxido de azufre, el nitrato peroxiacetilo (un producto de la oxidación en el smog fotoquímico) y el etileno. El cloro, el cloruro de hidrógeno, el amoníaco y el mercurio son menos tóxicos. En general, los contaminantes gaseosos penetran en la planta por el estoma, junto con el aire necesario, durante el proceso normal de respiración de la planta. Una vez

en la hoja de la planta, los contaminantes destruyen la clorofila e interrumpen la fotosíntesis. Los daños varían desde una reducción en el crecimiento de la planta hasta su muerte.

1.4.4 Efectos de la contaminación del aire sobre la salud humana

El efecto más controvertido y tal vez el más importante de la contaminación atmosférica, es precisamente el causado sobre la salud humana. Estos, pueden ir desde la simple irritación a las vías respiratorias hasta enfermedades agudas, en función de la magnitud de los niveles de concentración y de los periodos de exposición de la población afectada. A continuación se mencionan algunos de los efectos de mayor interés que causan los contaminantes sobre la salud:

☉ *Dióxido de Azufre, SO₂*

El dióxido de azufre es un irritante respiratorio muy soluble, por lo que la mayor parte de lo que se inhala se absorbe en la nariz y en la vías respiratorias superiores, siendo muy escasa la cantidad que llega a los pulmones. En una atmósfera con partículas suspendidas, el dióxido de azufre puede resultar perjudicial, al ser transportado por éstas hasta los tejidos de los pulmones (efecto sinérgico).

☉ *Dióxido de Nitrógeno, NO₂*

Estudios de salud ocupacional han demostrado que el dióxido de nitrógeno puede ser fatal a concentraciones elevadas. A niveles de concentración media, puede irritar los pulmones, causar bronquitis y neumonía, y disminuir la resistencia a infecciones respiratorias tales como la influenza.

☉ *Hidrocarburos*

La importancia de los hidrocarburos, estriba en su contribución a la formación del ozono y por lo tanto, a sus efectos. Además, ciertos hidrocarburos cíclicos aromáticos presentes en las gasolinas de alto octano, como el benceno, resultan particularmente tóxicos.

☉ *Material particulado*

La contaminación por partículas puede causar el deterioro de la función respiratoria en el corto plazo. En el largo plazo contribuye a enfermedades crónicas. Las partículas finas, de un tamaño menor a diez micras conocidas como PM₁₀, son nocivas porque afectan directamente a los pulmones. Entre los grupos poblacionales más sensibles a los efectos de las partículas finas respirables, están las personas con influenza, enfermedades crónicas respiratorias y cardiovasculares, los niños y los ancianos. Otros grupos considerados sensibles son los fumadores y los atletas debido a su respiración forzada durante el ejercicio.

☉ *Monóxido de Carbono, CO*

Al ser inhalado, el CO interfiere en el transporte del oxígeno (O₂) a los tejidos, porque la hemoglobina tiene una afinidad 200 veces mayor por el CO que por el O₂. De esta manera, el CO reacciona con la hemoglobina formando carboxihemoglobina (COHB), lo que limita la distribución de oxígeno al cuerpo. A niveles altos de CO en el aire se deteriora la percepción visual, la destreza manual y las habilidades para aprender.

Las personas con afecciones del corazón y circulatorios, con enfermedades pulmonares crónicas, así como los ancianos e infantes, y las personas jóvenes con tipo de hemoglobina anormales que afectan la capacidad de transporte de oxígeno en la sangre, son poblaciones sensibles al CO. La exposición a bajos niveles de monóxido de carbono puede ser perjudicial cuando la gente toma medicamentos, ingiere bebidas alcohólicas o vive en altitudes elevadas.

☉ *Ozono, O₃*

Altas concentraciones de ozono puede provocar cambios transitorios medibles en la función pulmonar y afección de las vías respiratorias en personas sanas que realizan ejercicio y actividades recreativas en exteriores. Los efectos del ozono son potenciados por la presencia de otras variables ambientales.

☉ *Plomo, Pb*

El plomo es uno de los metales pesados más difusamente distribuidos en toda la superficie de la tierra, y el riesgo de exposición de la población es muy variado. La forma química del plomo es un factor importante que afecta el comportamiento biológico en el cuerpo humano; los compuestos del plomo orgánico son absorbidos primariamente a través de los tractos gastrointestinales y respiratorio.

El plomo da lugar a intoxicaciones agudas o bien se acumula de manera importante en dientes, huesos y sistema hematopoyético. Se le asocia con las alteraciones en el sistema nervioso central, así como a fenómenos de interferencia en los mecanismos de defensa del organismo donde participe el sistema retículo endotelial.

1.5 *Inventario de emisiones*

La contaminación del aire es algo inherente al desarrollo y funcionamiento de la Ciudad. Por tanto, para comprender la estructura del problema, en términos de contribución relativa de cada proceso urbano a las emisiones totales, es indispensable plantear un inventario de emisiones. Este permite identificar responsabilidades y prioridades, como fundamento para un programa efectivo.

El inventario de emisiones de contaminantes atmosféricos es un instrumento estratégico para el manejo de la cuenca atmosférica; es cual, refleja la intensidad con que diferentes usuarios de las capacidades de carga de la atmósfera utilizan este recurso común ambiental. Los usuarios se pueden agrupar en sectores de actividad, lo cual da una idea de la eficiencia ambiental de diferentes procesos urbanos, y también de las prioridades de atención en el diseño de programas y medidas.

El desarrollo de un inventario de emisiones es una tarea compleja que demanda la integración sistemática de información en un marco de concurrencia institucional entre gobierno local y la autoridad federal en la materia.

Del análisis del Inventario de Emisiones y de la contribución a la contaminación atmosférica de la Ciudad de México por sector, se desprenden las siguientes conclusiones¹⁰:

1. Los automóviles particulares son la principal fuente de contaminación.
2. Los vehículos concesionados (taxis, combis y minibuses), dada la frecuencia de sus recorridos, generan una alta contaminación, equivalente a la mitad de automóviles privados.

Cap. 1 Por qué contaminación ambiental en la ZMGM

- Los camiones de carga de circulación interior y foránea tienen una menor contribución a la contaminación global, sin embargo, ésta es muy alta en partículas suspendidas y bióxido de azufre.
- La contribución de la industria a la contaminación total, en volumen, es menor que la de los vehículos. Sin embargo, tomando en cuenta algunos de los problemas mas graves de contaminación como el ozono, bióxido de azufre y las partículas, su contribución aumenta significativamente, aproximándose a la que generan los vehículos particulares.
- Si los datos de niveles de emisiones contaminantes se ponderan por su grado de toxicidad, aparece un fenómeno que hasta este momento no ha sido adecuadamente reconocido: el gran problema que significan las partículas suspendidas en la ciudad. La deforestación, erosión de las tierras, depósitos a cielo abierto de basuras y la contaminación que se genera en ciertas zonas industriales de la Ciudad de México, como la de Xalostoc, tienen un efecto negativo sobre la salud de los habitantes de la Ciudad mucho mayor al que se conocía.

Sector	Inventario de emisiones 1994. (ton/año)					Total	Porcentaje
	PST	SO ₂	CO	No _x	HC		
Industria	006 358	26 051	8 696	031 520	033 099	105 724	003 %
Servicios	001 077	07 217	0 948	005 339	398 433	413 014	010%
Transporte	018 842	12 200	2 348 497	091 787	555 319	3 026 645	075%
Vegetación y suelos	425 337	00 000	00 000	000 000	038 909	464 245	012%
Total	451 614	45 468	2 358 141	128 646	1 025 760	4 009 629	100%

Sector	Inventario de emisiones 1994. porcentaje en peso por contaminante				
	PST	SO ₂	CO	No _x	HC
Industria	01.4	57.3	00.4	24.5	03.2
Servicios	00.2	15.9	00.1	04.2	38.9
Transporte	04.2	26.8	99.5	71.3	54.1
Vegetación y suelos	94.2	00.0	00.0	00.0	03.8
Total	100	100	100	100	100

Fuente: Departamento del Distrito Federal, Gobierno del Estado de México, Secretaría del Medio Ambiente Recursos Naturales y Pesca y Secretaría de Salud. Programa para Mejorar la Calidad del Aire en el Valle de México 1995 - 2000. México D.F., Marzo de 1996; pág. 74

1.6 Acciones institucionales para el control de la contaminación atmosférica

Las medidas adoptadas en los últimos años tendientes a frenar el deterioro de la calidad del aire en la ZMCM han generado buenos resultados; la tendencia al incremento de ciertos contaminantes atmosféricos ha sido controlada (como es el caso del plomo, bióxido de azufre y monóxido de carbono) y las gasolinas mexicanas cumplen ahora con estándares internacionales. Se tiene una gasolina sin plomo y se redujo en un 92% el contenido de este elemento en la gasolina Nova; se han establecido límites máximos a los contenidos de olefinas, aromáticos, benceno y presión de vapor. En cuanto al diesel y al combustóleo, el primero ha sido mejorado disminuyendo en un 95% su contenido de azufre, y el segundo, ha sido reemplazado en su mayoría por gas natural y en menor escala por gasóleo industrial, de menor contenido de azufre.

Hoy en día la sociedad metropolitana exige el abatimiento de la contaminación atmosférica en el Valle de México. En este contexto, y para que los procesos vitales que mantienen el funcionamiento y generan el crecimiento de la ZMCM no sigan deteriorando la calidad del aire, son necesarias las acciones eficaces y complementarias, que incluyan a todos los sectores de la sociedad y que produzcan beneficios claros y permanentes a la población, tales acciones han quedado comprendidas en el marco de los programas realizados con este fin.

Los programas gubernamentales planteados en la lucha de la contaminación atmosférica son los siguientes:

☉ *Programa Integral Contra la Contaminación Atmosférica en la ZMCM, PICCA*

En 1990, el Departamento del Distrito Federal, Petróleos Mexicanos, el Instituto Mexicano del Petróleo, el Gobierno del Estado de México y la Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología, conjuntaron una serie de medidas para ser aplicadas tanto en el transporte como en la industria, en los servicios y en las actividades de producción de energéticos.

Los términos que se establecieron en la Constitución, la Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente y el Programa Nacional de protección al Medio Ambiente de 1990-1994, buscaron que cada quien contribuyera según las emisiones que genere y su grado de toxicidad de las mismas. Así, los compromisos se identifican alrededor de los causantes de la contaminación y las áreas prioritarias de acción ⁽⁶⁾:

1. *La industria petrolera*, en sus aspectos de refinación, distribución y calidad de combustibles.
2. *El transporte*, en sus modalidades de carga, colectivo e individual, tanto en su eficiencia urbana y ambiental, como en su avance tecnológico, racional aprovechamiento energético y control de emisiones contaminantes.
3. *La industria privada y los establecimientos de servicios*, en su modernización tecnológica y productiva, así como en su eficiencia energética y control de emisiones contaminantes.
4. *Las termoeléctricas*, por ser los mayores consumidores de combustibles en la Ciudad, en el uso continuo de energéticos limpios.
5. *Reforestación y restauración ecológica de los suelos deforestados*, zonas sin drenaje, reservas ecológicas ocupadas y tiraderos a cielo abierto.
6. *Investigación, educación ecológica y comunicación social*, por las entidades a cargo del monitoreo de la calidad del aire, de la investigación y de la comunicación social.

Con el PICCA se consiguieron reducciones significativas en las emisiones de bióxido de azufre, plomo, partículas y monóxido de carbono, mientras que en el caso del ozono se frenó su incremento en la atmósfera.

1.6 *Acciones institucionales para el control de la contaminación atmosférica*

☛ *El Programa Hoy No Circula, HNC*

El PICCA incluyó la continuación del programa Hoy No Circula. Dicho programa fue concebido como una medida regulatoria para controlar la demanda de gasolina y reducir las emisiones vehiculares. Fue presentado como un programa temporal buscando que la gente se desplazara en transporte público o compartiendo el auto con vecinos o compañeros de trabajo.

Durante los primeros meses de aplicación los resultados fueron satisfactorios, sin embargo, en cuanto se decidió convertirlo en programa permanente los habitantes de la Zona Metropolitana se enfrentaron a un diferente esquema de incentivos que modificó radicalmente sus decisiones.

La disponibilidad de los automovilistas para cambiar de modo de transporte ante la aplicación de esta medida regulatoria, es muy baja debido a su percepción del sistema de transporte público como un mal sustituto para el auto privado. La percepción de un servicio de mala calidad en los vehículos de transporte público, orientaron las opciones de las familias hacia las opciones más costosas desde el punto de vista social y ambiental; a parte de la adquisición de autos de repuesto (generalmente más viejos y más contaminantes), recurrieron al traslado de sus recorridos a otros días de la semana incrementando con ello los kilómetros recorridos y por lo tanto el volumen de emisiones a la atmósfera.

Sin embargo, el HNC constituyó un importante avance cualitativo al abrir una hasta entonces inédita perspectiva de política pública local, al instrumentar una medida de regulación dirigida a la demanda de combustibles y de kilómetros recorridos del sector que más contribuye a la contaminación atmosférica de la Zona Metropolitana.

☛ *El Programa para Mejorar la Calidad del Aire en el Valle de México 1995 - 2000*

La continuación al conjunto de estrategias anteriormente mencionadas prosiguió con el Programa para Mejorar la Calidad del Aire en el Valle de México. El procedimiento analítico utilizado se desarrolló a partir de dos ejes rectores. Por un lado, mediante una revisión a fondo de las causas de la contaminación atmosférica, se procedió a la elaboración de una tipología de las variables consideradas y se determinaron las metas generales del programa. Posteriormente, se definieron tanto las estrategias adecuadas para el logro de cada una de las metas, como los instrumentos que habrían de conformarlas.

A continuación se enuncian las cuatro metas generales y sus respectivas definiciones técnicas ⁽⁷⁾:

1. *Industria limpia*, reducción de emisiones por unidad de valor agregado en la industria y establecimientos de servicios.
2. *Vehículos limpios*, disminución de emisiones por kilómetro recorrido.
3. *Nuevo orden urbano y transporte limpio*, regulación del total de kilómetros recorridos por los vehículos automotores.
4. *Recuperación ecológica*, abatimiento de la erosión.

Capítulo 2

Material particulado y plomo atmosférico

2.1 Partículas suspendidas totales

2.1.1 Aspectos generales

Las partículas suspendidas son el segundo problema más importante de contaminación del aire en la ZMCM; debido a que este problema está estrechamente relacionado con la presencia de áreas desprovistas de cubierta vegetal su origen se remonta a más de cuatro siglos atrás ⁽⁴⁾.

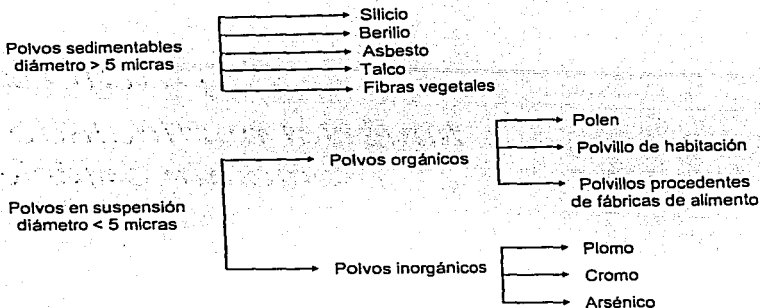
Por partículas entendemos cualquier sustancia, a excepción del agua pura, presente en la atmósfera en estado sólido o líquido bajo condiciones normales y cuyo tamaño es microscópico o submicroscópico ⁽³²⁾.

Las partículas suspendidas en el aire pueden estar constituidas por una gran diversidad de sustancias; las de origen natural se componen principalmente de suelos y ocasionalmente por partículas de origen biológico (restos orgánicos de plantas y animales, esporas, virus, etc.); las que provienen de la combustión generalmente están integradas por partículas atomizadas y cenizas del combustible.

Las partículas son dispersadas y depositadas de nuevo en la superficie de acuerdo con sus propiedades sedimentables y con los patrones meteorológicos que prevalecen en un momento determinado. Su reactividad y participación en los procesos fotoquímicos es poco significativa pero representan el agente antropogénico más relevante en la disminución de la visibilidad. Estas constituyen sólo el 9% de la masa total de los contaminantes del aire producidos por el hombre ⁽³⁶⁾; no obstante, representan un riesgo para los pulmones; incrementan las reacciones químicas en la atmósfera; reducen la visibilidad; aumentan la posibilidad de la precipitación, la niebla y las nubes; reducen la radiación solar, con los consecuentes cambios en la temperatura ambiental y en las tasas biológicas de crecimiento de las plantas y dañan las materias del suelo.

2.1.2 Características

Además de los contaminantes gaseosos, el aire puede tener partículas sólidas y líquidas suspendidas y dispersas. A ellas se debe el aspecto nebuloso y brumoso del aire contaminado, del cual hablaremos posteriormente. *De acuerdo a su tamaño*, las partículas sólidas se clasifican de la siguiente forma:



Fuente: Tecnológico de Monterrey Campus Estado de México; diplomado en tecnología y administración ambiental seminario II, efectos de los contaminantes; programas de educación continua; México 1996.

De acuerdo a su origen, las partículas pueden clasificarse en primarias y secundarias. Las primarias mantienen diámetros mayores a 2.5 micrómetros, y están formadas principalmente por polvo arrastrado por el viento; mientras que las secundarias se forman en la atmósfera como resultado de la reacción química de gases o por aglomeración de partículas finas y la condensación de vapores, estas tienen diámetro generalmente menor a 2.5 micrómetros y su proceso de eliminación es más lento que en el caso de las partículas de mayor diámetro.

Las partículas que comúnmente se encuentran contaminando la atmósfera tienen diámetros que van de 0.001 μm hasta 100 μm , formando lo que puede llamarse aerosol atmosférico (dispersión de partículas en el aire).

☞ Partículas suspendidas que representan un mayor interés

- ◆ Partículas menores a 10 micrómetros, PM_{10}

Debido a su tamaño, éstas se sedimentan a una velocidad tan lenta que pueden ser inhaladas. Las PM_{10} se adoptaron en Estados Unidos como parámetros de evaluación y regulación de la calidad del aire en sustitución de las partículas suspendidas totales (PST).

- ◆ Partículas menores a 2.5 micrómetros, $\text{PM}_{2.5}$

En esta categoría se incluyen las partículas inhalables de mayor penetración en el sistema respiratorio y, por tanto, las más dañinas a la salud y las que por su tamaño (situado en el intervalo de longitudes de onda de la luz) interfieren con la dispersión de la luz contribuyendo a la disminución de la visibilidad.

2.1 Partículas suspendidas totales

◆ Partículas aerobiológicas

Entre las partículas suspendidas en la atmósfera se presentan las que mantienen actividad microbiana, por ejemplo: bacterias, hongos, virus y protozoarios, presentándose como células vegetativas. Por su pequeño tamaño (aproximadamente de 1 a 10 micrómetros), algunas de estas partículas aerobiológicas pueden quedar suspendidas en el aire durante largos periodos. Su importancia radica en el potencial infeccioso y alergénico que depende a la vez de las características del agente patológico, las condiciones ambientales y la resistencia de los posibles huéspedes.

● *Composición de las partículas atmosféricas*

Los principales componentes de las partículas atmosféricas finas (menor a 2.5 micrómetros) son los sulfatos, los nitratos, el material carbonáceo, el amonio, el plomo y otros metales pesados. Las partículas gruesas (mayor a 2.5 micrómetros) consisten principalmente de óxidos de silicio, de aluminio, de calcio, magnesio y hierro, así como carbonato de sodio y otras sales, materiales como partículas de llantas y partículas vegetales como polen y esporas.

Los compuestos carbonáceos de las partículas finas contienen carbón elemental (grafito y hollín) y compuestos orgánicos (hidrocarburos emitidos de las fuentes de combustión y compuestos orgánicos secundarios formados por reacciones fotoquímicas); en muchas áreas urbanas y no urbanas, estas especies pueden constituir las partículas más abundantes después de las formadas por sulfatos.

La materia particulada producida por fuentes también incluye la sal de los océanos, cenizas volcánicas, productos de la erosión del viento, polvo de las carreteras, desechos de incendios forestales, el polen y las semillas de plantas.

● *Tipos de aerosoles*

Se denomina *aerosol* a la dispersión de partículas sólidas o líquidas en el aire; los principales aerosoles son:

Polvo. Es un aerosol formado por subdivisión mecánica de un material en partículas finas que tienen la misma composición. Esto ocurre en operaciones tales como triturado, molido, excavado y dinamitado. Las partículas de polvo son generalmente sólidas e irregulares en su forma, teniendo diámetro mayor de 1 μm .

Huma. Es un aerosol de partículas sólidas formadas por condensación de vapores generados a elevadas temperaturas por combustión o sublimación.

Bruma: Es un aerosol formado por pequeñas gotas de un líquido producidas en forma mecánica: por atomización, nebulización, burbujeo, dispersión o condensación.

Niebla. Es un aerosol acuoso formado por condensación sobre un núcleo atmosférico en humedades relativas altas. Los tamaños de las gotitas son generalmente mayores de 1 μm .

Smog. Es un término popular para un aerosol contaminante derivado de una combinación de humo (smoke) y niebla (fog).

Nebliña. Es un aerosol submicrométrico formado de partículas higroscópicas que atrapan el vapor de agua a baja humedad relativa.

Núcleo de condensación. Partículas atmosféricas muy pequeñas (generalmente menores de 0.1 μm), formadas por procesos de combustión y por conversión química de sus precursores gaseosos.

2.1.3 Muestreo de material particulado

Existen diversos métodos para medir concentraciones de partículas suspendidas. El más comúnmente utilizado para medir partículas suspendidas totales (PST) es el de los grandes volúmenes; el cual consiste esencialmente de un motor aspirador de aire y un filtro, que debe ser de diferentes materiales dependiendo del tipo de análisis que se quiera efectuar de las partículas.

El muestreador de grandes volúmenes se considera un instrumento bastante confiable para determinar el peso (la masa) de la materia particulada total; el muestreo se realiza cada seis días. Durante el invierno esta frecuencia se intensifica a una vez cada tercer día. Esto asegura la representatividad tanto del monitoreo de las partículas suspendidas como de los resultados de la determinación del plomo.

Finalmente, las muestras de partículas suspendidas son analizadas en laboratorio mediante la técnica de absorción atómica. Las partículas menores a diez micras se miden a través de un fraccionador de partículas llamado Anderson particulado.

2.1.4 Fuentes de partículas suspendidas totales

Las principales fuentes de emisión de partículas a la atmósfera son la erosión del suelo, así como la suspensión de polvos provenientes de áreas pavimentadas y sin pavimentar, y específicamente lacustres desecadas en la parte oriental de la cuenca; los suelos contribuyen con más del 90% de las emisiones de partículas ⁽⁷⁾.

Las partículas suspendidas totales se constituyen por smog, cenizas, humo, polvo, metales, alquitrán y neblina, que se generan en los procesos de combustión, calentamiento, producción, transporte y manejo de materiales pulverizados.

Las industrias que emiten estos contaminantes son aquellas que para sus procesos utilizan equipos como: calderas, molinos, incineradores, reactores de oxidación, pulverizadores para minerales y hornos de calcinación, acero, cubilote, coque y ferroaleación. Las emisiones provenientes de vehículos automotores que utilizan diesel como combustible constituyen una fuente importante de partículas. Otras de los principales emisoras industriales son la fabricación de hierro y acero, la producción del cemento, la extracción de rocas y minerales, el almacenamiento y la manipulación de granos y la elaboración de papel.

Fuentes emisoras de PST en la ZMCM	
Fuentes	Porcentaje del total anual de emisiones de macropartículas
• Transporte	04.3
• Combustión de carburantes (fuentes estacionarias). Plantas de energía, calefacción de espacios industriales. etc.	31.4
• Procesos industriales	26.4
• Refinación y elaboración de hierro	07.3
• Eliminación de desechos sólidos	03.9
• Diversas	33.9
• Incendios forestales	23.7

Fuente: Tecnológico de Monterrey Campus Estado de México. Diplomado en tecnología y administración ambiental seminario II, efectos de los contaminantes. Programas de educación continua. México 1996.

2.1 Partículas suspendidas totales

Las fuentes naturales de partículas incluyen las emisiones volcánicas y las áreas carentes de vegetación, pavimentación o que se encuentran en proceso de erosión.

La quema de combustibles fósiles representa el proceso mas relevante en la emisión de las partículas menores a diez micrómetros. Una fracción importante proviene de la reacción entre contaminantes primarios (principalmente SO_2 y No_x) y de fuentes naturales.

Resumen de los procesos industriales generadores de partículas

Industria o proceso	Fuentes de emisión	Partículas
Fábricas de hierro y acero	Altos hornos, hornos para la producción de acero, máquinas de sinterización.	Oxidos de hierro, polvo, humo.
Fundiciones de hierro gris	Hornos de cubilote, sistemas de vibración, fabricación de núcleos.	Oxidos de hierro, humo, polvo aceitoso, vapores metálicos.
Metalurgia no ferrosa	Fundiciones y hornos.	Humo, vapores metálicos grasa.
Refinerías de petróleo	Regeneradores de catalizador, incineradores de lodos.	Polvo de catalizador, ceniza de los lodos.
Cemento Portland	Hornos, secadores, sistemas de manejo de materiales.	Polvos de procesos y alcalinos.
Fábrica de papel Kraft	Hornos de recuperación, hornos de cal, tanques de beneficio.	Polvos de origen químico.
Manufactura de ácidos fosfórico, sulfúrico	Procesos térmicos, acidulación de las rocas, molienda.	Neblina ácida, polvos.
Manufactura de coque	Operación de las estufas, manejo de los materiales a templar.	Polvos de carbón y de coque, alquitranes del carbón.
Vidrio y fibra de vidrio	Hornos, formación y curado, manejo.	Neblina ácida, óxidos alcalinos, polvos, aerosoles.

Fuente: Wark Kenneth, Warker Cecil F. Contaminación del aire, origen y control. Edit. Limusa. México, 1996.

☉ *Inventario de emisiones*

De acuerdo al inventario de emisiones 1994 se presentan las siguientes cantidades de aportación por cada tipos de fuente de contaminación por partículas suspendidas totales:

2.1 *Partículas suspendidas totales*

Inventario de emisiones de partículas 1994

Tipo de fuente	Ton/año	Porcentaje
Industria		
Generación de energía eléctrica	162.72	0.04
Refinación de petróleo/petroquímica	006.84	0.00
Industria química	973.68	0.22
Minerales metálicos	549.84	0.12
Minerales no metálicos	1 675.32	0.37
Productos vegetales y animales	111.36	0.02
Madera y derivados	384.36	0.09
Productos de consumo alimenticio	799.32	0.18
Industria del vestido	459.96	0.10
Productos de consumo (varios)	066.60	0.01
Productos de impresión	775.92	0.17
Productos metálicos	196.92	0.04
Productos de consumo de vida media	098.88	0.02
Productos de consumo de vida larga	093.36	0.02
Otros	002.64	0.00
Servicios		
Combustión en hospitales	008.13	0.00
Combustión residencial	372.10	0.08
Combustión comercial/institucional	696.54	0.15
Transporte		
Auto particular	10 321	2.29
Pick-up	1 049.00	0.23
Microbús	397.00	0.09
Combi	042.00	0.01
Taxi	612.63	0.14
Autobús (R-100)	1 900.00	0.42
Foráneos, suburbanos	120.00	0.03
De carga	360.00	0.08
De carga (más de dos ejes)	1 902.00	0.42
Autobús municipal	2 075.00	0.46
Locomotoras	038.52	0.01
Locomotoras de patio	024.91	0.01
Suelos		
Suelos	425 337	94.18
TOTAL	451 613.55	100

Fuente: DDF, Gobierno del Estado de México, Secretaría del Medio Ambiente Recursos Naturales y Pesca y Secretaría de Salud.
Programa para Mejorar la Calidad del Aire en el Valle de México 1995 - 2000. México D.F., Marzo de 1996. Pág. 76-79

2.1 Partículas suspendidas totales

2.1.5 Las partículas fracción fina y fracción gruesa

El indicador en México de la calidad del aire que se emplea para evaluar las concentraciones de partículas en la atmósfera son las partículas suspendidas totales (PST) y las partículas menores a 10 micrómetros (PM_{10}). En el primer caso, agrupa a todas las partículas sólidas que se mantienen suspendidas en la atmósfera. En el segundo caso, es un indicador que representa la fracción respirable de las partículas suspendidas totales susceptibles de causar efectos en la salud, debido a que por su tamaño pueden penetrar a las vías respiratorias⁽⁷⁾.

Las partículas con mayor impacto sobre la salud, e incluso sobre la visibilidad, son las de un tamaño menor a diez micrómetros, a las que se les conoce como PM_{10} . En la ZMCM, el contenido de PM_{10} puede representar entre 40 y 60% de las partículas suspendidas totales⁽²⁰⁾.

Existe otra división de partículas, la cual corresponde a las partículas menores a 2.5 μm este indicador representa en su mayoría a las partículas que no se emiten directamente al aire sino que se forman en la atmósfera como producto de reacciones químicas y procesos físicos.

Las partículas menores de 2.5 μm de diámetro pueden penetrar hasta lo más profundo del sistema respiratorio humano; y dependiendo de su composición química es la gravedad del daño que pueden causar. Estas partículas constituyen la fracción fina de todas las partículas atmosféricas. La fracción gruesa está comprendida entre las 2.5 μm y los 15 μm de diámetro.

Generalmente la fracción fina está constituida por metales pesados y carbón elemental en un gran porcentaje, lo que ennegrece el filtro con las partículas colectadas. Por su parte, las partículas gruesas están constituidas por sales inorgánicas.

Las partículas suspendidas totales y las menores de 10 μm se vigilan cotidianamente en la Zona Metropolitana. En tanto, las partículas menores a 2.5 μm son objetos de investigaciones para determinar su concentración y caracterizarlas fisicoquímicamente en nuestra ciudad.

2.1.6 Efectos de las partículas atmosféricas

☉ *Visibilidad*

Uno de los efectos más comunes de la contaminación del aire es la reducción de la visibilidad, entendiendo a ésta como la mayor distancia a la cual puede ser conocido un objeto a simple vista durante el día, o a la que una luz cuya intensidad es conocida puede verse durante la noche. La visibilidad se reduce debido a la absorción y a la dispersión de la luz por los materiales líquidos y sólidos arrastrados por el aire, y por las partículas que se forman en la atmósfera como consecuencia de diferentes reacciones. Aunque no son visibles, el bióxido de azufre (SO_2), el vapor de agua y el ozono (O_3), aunque en pequeñas cantidades cambian las características de absorción y transmisión de la luz por la atmósfera.

La absorción de la luz es otro fenómeno que reduce la visibilidad, y está determinada por la composición y el tamaño de las partículas. Las partículas muy finas (menores a 2.5 micrómetros) son responsables de una mayor absorción de la luz visible en comparación con partículas de mayor tamaño.

Los aerosoles derivados del ácido sulfúrico y otros sulfatos, que constituyen entre el 5 y el 20 por ciento de las partículas en suspensión en el aire urbano, contribuyen significativamente a la reducción de la

visibilidad. Las investigaciones indican que una buena parte de la neblina atmosférica se debe a la formación de aerosoles por las reacciones fotoquímicas entre el bióxido de azufre, las partículas, los óxidos de nitrógeno y los hidrocarburos presentes en la atmósfera.

• *Vegetación y ecosistemas*

Las emisiones de partículas tienen un mayor impacto en los ecosistemas cercanos a las grandes fuentes de emisión. Si las partículas contienen elementos tóxicos, estos afectarán a los ecosistemas, aún si la depositación no es muy alta. La solubilidad de los componentes de las partículas es un factor importante en el efecto que se causa a los ecosistemas, terrestres y acuáticos.

Las partículas gruesas, depositadas directamente en la superficie de hojas, pueden reducir el intercambio gaseoso, incrementan la temperatura de la superficie de la hoja, reducen la fotosíntesis y el crecimiento, producen clorosis y, finalmente, causan la necrosis de la hoja. Si las partículas contienen metales pesados, al depositarse en la superficie de la hoja o en el suelo pueden ser tomados por la planta, acumularse en ella y alcanzar concentraciones tóxicas en los tejidos de las mismas.

• *Materiales*

Si las partículas que se depositan sobre los materiales de construcción contienen especies ácidas en su composición química (por ejemplo: sulfatos y nitratos), éstos reaccionan con los compuestos inorgánicos de los materiales (piedra caliza, mármol, etc.), propiciando su destrucción. Cuando el material es metálico, esas partículas ácidas promueven la oxidación, la corrosión y, finalmente, la destrucción total del material.

• *Salud*

Los daños a la salud asociados con la exposición a altas concentraciones de partículas fracción respirable (menores a diez micras), incluyen cambios en la función respiratoria, agravamiento de las enfermedades respiratorias y cardiovasculares, alteraciones de los sistemas de defensa del cuerpo humano, daño en los tejidos pulmonares, cáncer y, en caso extremo, muerte prematura.

Las partículas suspendidas aunadas al bióxido de azufre, interactúan de manera sinérgica, siendo su efecto combinado significativamente mayor al de cada uno de estos contaminantes actuando por separado. Diversos estudios han mostrado una asociación de la variación promedio de SO_2 y PST con un incremento en la mortalidad, en la morbilidad y, específicamente, con disminución en la función pulmonar. Concentraciones altas de estos dos contaminantes pueden elevar la morbilidad, especialmente en individuos con alta sensibilidad, como son los enfermos de asma y de bronquitis.

Las partículas mayores a $10 \mu m$ se depositan principalmente en el pasaje oro-nasal de la cabeza, y son filtradas, evitándose su paso hacia el tracto respiratorio. Las partículas menores a $10 \mu m$ pasan hasta lo más profundo del sistema respiratorio, alojándose en las regiones traqueobronquiales y alveolares de los pulmones.

Los daños en la salud causados por las PM_{10} dependen de la composición química de las mismas. Si estas partículas contienen metales pesados en su composición, éstos pueden transportarse a través del torrente sanguíneo y alojarse en alguno de los órganos del cuerpo humano, causando daños irreversibles. Entre la gente que puede ser considerada sensible se encuentran:

- Personas con influenza, enfermedades respiratorias crónicas y cardiovasculares o bronquitis.

2.1 *Partículas suspendidas totales*

- Niños y gente mayor.
- Fumadores y personas que practican mucho deporte al aire libre.

2.1.7 Acciones realizadas para la reducción y control de las PST

Las estrategias para abatir este contaminante en la ZMCM han sido las siguientes ⁽⁴⁾ :

- ◊ Pavimentación de calles en una superficie equivalente a 1.705 millones de metros cuadrados.
- ◊ Plantación de 42 millones de árboles, durante los últimos cuatro años.
- ◊ Restauración ecológica del exvado del lago de Texcoco, por lo que actualmente se han eliminado las tolvaneras intensas en esa zona.
- ◊ Uso de combustibles con menos de 2% de azufre.
- ◊ Operación al 100% con gas natural en las termoeléctricas y 365 grandes industrias.
- ◊ Introducción de motores diesel a partir de los modelos 1994.
- ◊ Verificación obligatoria de emisiones industriales.
- ◊ 86% del equipo ya instalado en industrias está orientado al control de partículas.
- ◊ Diversos cursos impartidos por la Comisión Nacional para el Ahorro de Energía (CONAE), para evitar la mala operación de las calderas.
- ◊ Sanciones a más de 15 mil vehículos ostensiblemente contaminantes.
- ◊ Renovación de 3 500 unidades de R-100 e introducción de Diesel Sin.

Proyectos e Inversiones del Programa Integral Contra la Contaminación Atmosférica (PICCA)
Octubre de 1990 a diciembre de 1995

Medida	Ejecutor	Inversiones a diciembre de 1995 (millones de dólares)	Porcentaje de reducción
1. Elaboración de diesel con bajo contenido de azufre.	PEMEX	118.300	12.00%
2. Control de emisiones y reubicación de fundidoras.	SEDESOL Sector privado	000.500	00.07%
3. Mejoramiento de procesos de combustión e instalación de equipos de control en establecimientos de servicios.	SECTOR PRIVADO	000.500	00.05%
4. Programa "Cada familia un árbol". Programa de reforestación urbana.	DDF DDF-BID	000.500 047.100	09.69%
5. Reforestación rural del Valle de México y su área ecológica de influencia.	DDF EDO. MEX MORELOS	020.219	33.5%
TOTAL		187.119	55.20%

Fuente: Departamento de DF, Gobierno del Edo. de México, Secretaría del Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca y Secretaría de Salud. Programa para mejorar la calidad del aire en el Valle de México 1995-2000. Marzo 1996. Pág. 110-112

2.2 Contaminación por plomo

2.1.1 Generalidades

El plomo es un metal que se encuentra presente de manera constante en la naturaleza, donde ha existido desde siempre; su ciclo de movimiento no permite suponer que sea un elemento que de manera natural pudiera desaparecer. La participación del plomo en diferentes aspectos de la civilización es muy antigua; el desarrollo tecnológico contemporáneo permitió que en años recientes su uso aumentara, incrementando de esta manera las posibilidades de una exposición elevada y prolongada ⁽²⁸⁾.

El plomo elemental es blando y presenta una coloración grisácea; se extrae con facilidad de sus menas, propiedad que lo puso a disposición de los antiguos egipcios y babilonios. La principal mena es un sulfuro, el PbS, comúnmente denominado galena, de esta forma se extrae en muchas partes del mundo.

El uso inapropiado del plomo ha engendrado irrupciones periódicas de envenenamiento en el hombre desde la antigüedad, la mayoría de ellas habían sido el resultado de la contaminación del agua por este metal; sin embargo, los últimos años se ha puesto mayor énfasis en los grandes riesgos procedentes de la contaminación por plomo en la atmósfera ⁽³²⁾.

El crecimiento industrial y demográfico que ha ocurrido en México en las últimas décadas, ha originado problemas importantes de contaminación ambiental en las ciudades mayores, y particularmente en la ZMCM. En la actualidad, una cuarta parte (20 millones) de la población mexicana vive en esta área, produciendo 36% del producto interno bruto y consumiendo 26% del total de energía producida por el país. Se estima que en la ZMCM se emiten al aire 4 350 000 toneladas de contaminantes cada año, originados por 3 millones de vehículos que circulan diariamente y por una planta industrial de casi 30 mil fábricas; el plomo es el mayor contaminante en estas emisiones ⁽²⁹⁾.

Debido a sus propiedades físicas y bajo costo, el plomo tiene un sinnúmero de aplicaciones en materiales, objetos y utensilios de uso cotidiano; es un metal blando, dúctil, maleable y resistente a la corrosión, por lo que ha tenido diversas aplicaciones metalúrgicas y eléctricas. Sus pigmentos son muy apreciados por su colorido y bajo costo; los barnices preparados con sales de plomo permiten un acabado brillante aún cuando el cocimiento se realice a bajas temperaturas, por esta razón se le ha usado tradicionalmente en México para la producción de artesanías de barro vidriado ⁽³⁾.

Se reconoce a la contaminación por plomo como un riesgo, particularmente en mujeres que se encuentran en edad reproductiva y niños pequeños. La exposición al metal resulta de diferentes fuentes y vectores: gasolina, soldadura, pintura, cerámica, etc. Diferentes factores ambientales son responsables por la carga de plomo en los individuos, como aire inhalado, polvo, agua y comida. Las principales vías de absorción son la respiratoria y la digestiva. En adultos, la absorción pulmonar corresponde aproximadamente del 30 a 50% de la cantidad inhalada, mientras que en los niños es entre el 40 y 50% de la ingerida. El ayuno, dietas con bajo contenido de calcio, vitamina D, hierro y zinc, incrementan la absorción del plomo, que puede alcanzar hasta el 80%, aun en personas con buen nivel nutricional ⁽³⁴⁾.

El plomo es un elemento especialmente importante debido a su amplia utilización en una gran variedad de procesos industriales y a su alta toxicidad aguda y crónica. Su resistencia a la corrosión atmosférica y a la acción de los ácidos, especialmente al sulfúrico, hace que el plomo sea muy útil en la edificación, en las instalaciones de fábricas de productos químicos y en tuberías y envolturas de cables.

2.2 Contaminación por plomo

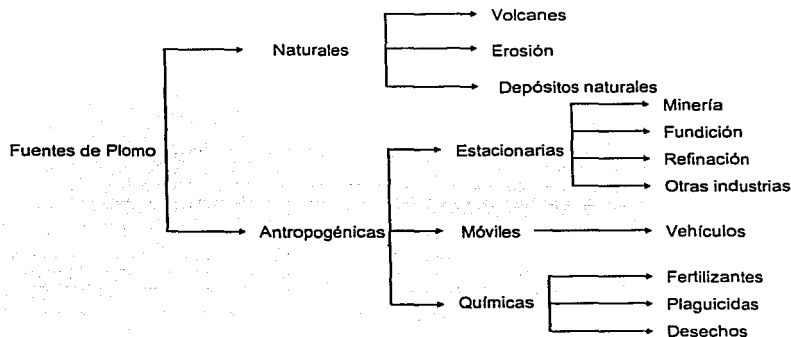
Muchos países, incluso el nuestro, enfrentan epidemias de intoxicación por bajos niveles de plomo; la familiaridad que se tiene con el plomo es el resultado de la gran variedad de usos y aplicaciones de este metal. Las propiedades del plomo que lo hacen tan dúctil en general son ⁽³³⁾:

1. Presenta un punto de fusión bajo, lo que permite el empleo de técnicas simples y baratas al manejarlo como líquido.
2. Es un metal blando y maleable que adopta con facilidad diversas formas.
3. Su actividad química hace que se forme una capa protectora cuando se expone al aire húmedo.
4. Forma aleaciones con muchos otros metales. Las aleaciones resultantes presentan propiedades distintas al plomo puro.
5. La densidad del plomo es superior a la de cualquier otro metal común, con las excepciones del oro y del mercurio.

2.2.2 Fuentes de plomo

México ocupó el decimotercer lugar mundial de producción de plomo en 1989, con 132 788 toneladas, alcanzando 139 954 toneladas en 1990, exportando casi el 60% de esta producción, donde la mayor parte se utiliza para procesos industriales como manufactura de baterías y para la producción de tetraetil de plomo; el resto se utiliza en la producción de soldadura, cable, municiones, pigmentos, pintura, vidriado para cerámica, barnices y otros productos ⁽³²⁾.

En nuestro país, las fuentes mas importantes de contaminación por dicho metal son: gasolina, cerámica vidriada y cocida a baja temperatura, pintura con plomo (cromatos), soldadura con plomo en latas sanitarias y plomo en el agua.



Fuente: Tecnológico de Monterrey Campus Estado de México; Diplomado en tecnología y administración ambiental seminario II, efectos de los contaminantes; Programas de educación continua: México 1996.

En México, casi dos terceras partes del plomo refinado se destina a la producción de óxidos de plomo, los cuales sirven a su vez de materias primas en la industria del hierro y del acero, así como en la fabricación de textiles, celulosa, papel y metalurgia. El resto se emplea para la manufactura de acumuladores, tetraetilo de plomo (usado como aditivo antidetonante en la gasolina), cables, pigmentos, cerámicas y barnices. Otro de los usos importantes del plomo es la manufactura de partes metálicas que requieren aleaciones de plomo.

Productos derivados del plomo en México (1986) ⁽⁶⁾

Acumuladores	07%
Tetraetilo de Plomo	11%
Cables	06%
Óxidos	68%
Otros	08%

Debido a su resistencia a los agentes químicos, a su maleabilidad y ductibilidad, el plomo se usa también como cubierta protectora de cables. Su alta densidad hace que el plomo sea un protector eficiente contra los efectos de los rayos X y Gamma. Gran parte de la producción del plomo se usa en la fabricación de pigmentos; uno de los más apreciados es el cromato de plomo, el cual es de color amarillo brillante, de gran durabilidad por su alta resistencia a la luz.

☉ *Plomo en el aire*

Se estima que aproximadamente el 30% de la emisión total Nacional de plomo está en la atmósfera de la ZMCM, donde vive más del 20% de la población del país. Las principales causas de este problema son el crecimiento industrial y demográfico de esta zona, con una emisión de más de 4 350 000 toneladas de contaminantes que llegan al ambiente anualmente debido a la emisión de más de tres millones de vehículos y 30 000 plantas industriales, además de su situación geográfica con características topográficas y condiciones meteorológicas adversas para la disposición de los contaminantes ⁽⁷⁾.

Debido a las condiciones climáticas del Valle de México, la dispersión del plomo en el aire es limitada y tiende a sedimentarse, contaminando el aire, el suelo y el agua por drenaje y reservorios destapados.

☉ *Plomo en pinturas*

La pintura y pigmentos con plomo (cromatos) son frecuentemente utilizados en México. En la pintura utilizada para viabilidad, la proporción de plomo puede alcanzar hasta el 50%, y aunque es poco soluble en el agua, en soluciones ácidas es lo contrario, por lo que el plomo queda libre en el polvo y suelo por contacto con lluvia ácida o drenaje. Después, al ser ingeridos el cromo y el plomo, pueden ser disociados por jugos gástricos, lo que hace a los metales biodisponibles.

A estas pinturas se les da uso en juguetes y artículos escolares, como se destaca en análisis realizados a diferentes lápices de colores, donde la proporción del plomo varía según su origen (mexicano, alemán, chino, etc.). Los estudios muestran que los colores de origen mexicano tienen una concentración mayor de plomo, y pueden dañar el organismo cuando son mordidos.

2.2 Contaminación por plomo

☞ *Cerámica vidriada*

La cerámica vidriada y cocida a baja temperatura (menos de 800°C), es usada comúnmente en México como utensilios para cocinar, servir o almacenar alimentos, por lo que el plomo retenido en el barniz utilizado en el vidriado puede ser desprendido por acción de los alimentos, principalmente ácidos, y así contaminar los mismos.

Hay varios factores que determinan el contenido de plomo de las sustancias en contacto con la cerámica:

1. *Tipo de cerámica usada.* Las mediciones realizadas en el barniz para cubrir la cerámica, han mostrado que la mayoría del plomo se desprende del mismo y no del barro. El origen de la cerámica es un factor importante al respecto, se han analizado vajillas de diversos Estados, encontrando los mayores niveles en platos y jarros de Guadalajara, México y Oaxaca, localizando variaciones aún dentro de la misma zona; también es importante mencionar que el plomo se desprende más fácilmente si el barniz es viejo o muy usado.
2. *Tipo de comida o líquido utilizado, y tiempo que éste permanece en contacto con el vidriado.* Las sustancias ácidas (chile, tomate, jugo de limón, naranja) guardados en cerámica, pueden ser contaminadas con plomo fácilmente; la medición de contenido de plomo en bebidas preparadas en cerámica vidriada han mostrado niveles sumamente altos; el contenido de plomo en los alimentos se incrementa en relación al tiempo de contacto con el barniz.

☞ *Plomo en latas*

La soldadura en los costados de las latas contiene plomo en un gran número de productos en México; como en el caso de la cerámica, es más fácil que un alimento ácido desprenda el plomo de la soldadura y contamine el alimento. En 1990 se realizó un estudio para determinar el contenido de plomo en diferentes latas, encontrándose los siguientes porcentajes por arriba de la norma establecida: chiles verdes 33%, atún 37%, sardinas 33%; se han realizado otras mediciones para determinar el plomo desprendido de latas de diferentes tamaños, con distinto contenido y diferente soldadura ⁽⁵⁾.

El plomo contenido en la comida enlatada, así como en otros alimentos, puede provenir de otras fuentes, además de la soldadura, como sería el suelo donde fue cultivada una verdura, por contaminación del agua de riego o depósito de partículas durante su transporte.

☞ *Plomo en el agua potable*

El plomo en el agua potable puede provenir de la contaminación en su origen o bien en su transporte y distribución. Los niveles de plomo en el líquido pueden ser altos, cuando el agua suave y ácida transita por tubería de plomo. En México, las casas conectadas al sistema de distribución lo tienen que hacer con tubería de plomo reforzado.

☞ *Plomo en gasolinas*

La principal fuente de emisión del plomo son los automóviles, debido al uso de gasolina con este metal, y las fundidoras. La concentración de este elemento en el aire disminuyó notoriamente como consecuencia de sucesivas reformulaciones de la gasolina ⁽⁷⁾.

Las gasolinas son una mezcla de hidrocarburos derivados del petróleo. En términos generales las gasolinas están compuestas por parafinas, isoparafinas, aromáticas, naftenos y olefinas.

En México, los compuestos alquilados de plomo se utilizan en las gasolinas como aditivos antidetonantes desde hace más de 60 años. El uso de estos compuestos, principalmente el tetrametilo y el tetraetilo de plomo (TEP), ha correspondido a las demandas técnicas del parque vehicular en servicio durante diferentes épocas.

El reconocimiento de los efectos del plomo y la introducción de convertidores catalíticos han propiciado una tendencia en los países ambientalmente más avanzados, para la reducción progresiva del contenido de TEP, así como la introducción de gasolina sin plomo. Es importante destacar que la gasolina es el elemento central para reducir la exposición, por un lado, y por otro también lo es para poder instalar convertidores catalíticos que a su vez reducen otros contaminantes (óxido de nitrógeno, monóxido de carbono, hidrocarburos, y ozono).

Anteriormente al año de 1992, la combustión de la gasolina con plomo por vehículos automotores era en muchos países la fuente predominante de contaminación en el aire. Este problema ocasionó una reformulación rápida en las gasolinas, lo que provocó una disminución acelerada en los niveles de plomo en sangre en las poblaciones afectadas. En el Área Metropolitana de la Ciudad de México, entre 1981 y 1986 se redujo en un 300% el plomo utilizado como aditivo en las gasolinas. Hasta noviembre de 1996, se vendían en la ZMCM dos tipos de gasolinas ⁽¹⁹⁾:

a) Gasolina con plomo (Nova)

A partir de 1986 la concentración de TEP en esta gasolina ha disminuido; principalmente en la gasolina que circula en la ZMCM. En este mismo año el contenido máximo de TEP se redujo de 2.5 a 1.0 cc/gal (centímetros cúbicos por galón).

En 1991 se fijaron nuevos valores de 0.3 a 0.54 cc/gal de TEP, condición que representa una disminución de cerca del 50% en la presencia de plomo en las gasolinas.

Al final de 1992 se redujo aún más la cantidad del TEP, fijando para la gasolina destinada a la ZMCM un nuevo intervalo, de 0.2 a 0.3 cc/gal, concentración que continua vigente. Como un esfuerzo adicional, durante el periodo invernal 1992-1993 PEMEX se comprometió a reducir el contenido del TEP en la gasolina Nova limitando así su contenido a un máximo de 0.2 cc/gal. Esta medida se aplicó en los periodos invernales posteriores.

Como medida adicional a la anterior, PEMEX introdujo el control en la composición química de las gasolinas a partir del invierno de 1992. De esta manera, queda regulado el contenido de hidrocarburos reactivos (aromáticos, olefinas y benceno) cuya presencia en la atmósfera promueve la formación de ozono.

Gasolinas con plomo correspondientes a la ZMCM
cronología de acciones

Fecha	Acción
Junio 1986	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Se establece un rango de contenido de tetraetilo de plomo (TEP) de 0.5 a 1.0 cc/gal. ◆ Se especifica un rango de 7 a 9.5 lb/pulg² para la presión de vapor en lugar del máximo establecido de 9.5 lb/pulg². ◆ Incorporación del aditivo detergente (IMP-D6-2*).
Noviembre 1989	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Se sustituye el aditivo IMP-D6-2* por un detergente dispersante (IMP-DDCV-3). ◆ Se incorpora a la gasolina un compuesto oxigenado (Metil Terbutil Eter (MTBE)).

2.2 Contaminación por plomo

Junio 1991	<ul style="list-style-type: none"> Se reduce en 50% el rango especificado para el TEP, esto es, se modifica el anterior de 0.5 a 1.0 cc/gal a un intervalo de 0.3 a 0.54 cc/gal.
Octubre 1992	<ul style="list-style-type: none"> Se establece una nueva especificación para el rango de TEP en 1991 a un rango de 0.2 a 0.3 cc/gal esta disminución representa una reducción adicional de casi el 50%.
Diciembre 1992	<ul style="list-style-type: none"> Se especifican valores máximos de los componentes reactivos a la formación de Ozono como son los aromáticos, olefinas y el benceno en 30%, 15% y 2% en volumen como máximo. También, se reduce la presión de vapor de 7 a 9.5 lb/pul² a un rango de 6.5 a 8.5 lb/pul² para disminuir de esta manera su volatilidad.
Mayo 1994	<ul style="list-style-type: none"> Se planea eliminar totalmente el Plomo y usar un aditivo que lo compense, disponible en el mercado.

Fuente: PEMEX refinación. Calidad de los combustibles que se usan en la ZMCM. Enero de 1993.

b) Gasolina sin plomo

A partir de junio de 1986 se introduce al mercado nacional la gasolina Extra-Plus en sustitución de la Extra sin Plomo; adicionalmente y con base en la norma emitida por SEDUE en 1988, la cual limita las emisiones de contaminantes de los vehículos modelo 1989 y posteriores, se hizo necesaria la introducción de vehículos con convertidores catalíticos que obligaban a disponer de una gasolina con un control más riguroso de calidad y con mejoras en algunos de sus parámetros. En septiembre de 1990 se introdujo al mercado la gasolina Magna-Sin de 87 octanos.

Adicionalmente, se lleva un control más estricto para evitar la intervención de la gasolina Magna-Sin en la contaminación por plomo. Al igual que la gasolina con plomo, a partir de diciembre de 1992, se fijaron especificaciones para los componentes reactivos de la gasolina que se distribuye en la ZMCM.

Gasolinas sin plomo correspondientes a la ZMCM Cronología de acciones

Fecha	Acción
Junio 1986	<ul style="list-style-type: none"> Se sustituye la gasolina Extra sin plomo por la Extra Plus. Este nuevo combustible contiene un aditivo detergente y un rango especificado de presión de vapor de 7 a 9.5 lb/pul², en lugar de sólo un valor máximo de 9.5 lb/pul².
Noviembre 1989	<ul style="list-style-type: none"> Se sustituye el aditivo detergente por uno detergente dispersante. Se incorpora a la gasolina un compuesto oxigenado Metil Terbutil Eter (MTBE).
Septiembre 1990	<ul style="list-style-type: none"> Se sustituye la gasolina Extra Plus por la Magna Sin. Este nuevo producto satisface los requerimientos de los vehículos con convertidor catalítico. Se tiene un estricto control de calidad para evitar su contaminación con plomo. Para darle confianza al consumidor, se certifica la calidad por medio de una empresa externa a PEMEX.
Diciembre 1992	<ul style="list-style-type: none"> Se establecen valores máximos de los componentes químicos (reactivos) precursores del ozono; es decir, se especifican límites de aromáticos, benceno y olefinas en 30%, 2% y 15% en volumen respectivamente y se reduce su volatilidad a través de la disminución de la presión de vapor.

Fuente: PEMEX refinación. Calidad de los combustibles que se usan en la ZMCM. Enero de 1993.

En 1990 la especificación de plomo en la gasolina Nova fue de 0.2 a 0.3 ml Pb/gal y en la Magna Sin de 0.01 g Pb/gal.

➤ *Otras fuentes de plomo*

Entre las potenciales destacan el tabaco, los cosméticos y la medicina tradicional. El hábito de fumar es una fuente potencial de exposición a plomo; cosméticos nacionales o extranjeros contienen plomo y, su uso frecuente puede ser una fuente de exposición. La medicina tradicional o casera puede tener alto contenido de plomo, un ejemplo es el azarcón, pigmento amarillo a base de plomo y comúnmente utilizado para contrarrestar el cólico infantil, el cual es reportado como posible origen de intoxicación por plomo.

2.2.3 Medición del plomo en la Zona Metropolitana

El plomo se encuentra presente en el aire formando parte de las partículas suspendidas. La medición de su concentración en la atmósfera se realiza a partir del análisis de muestras de partículas que se colectan en las estaciones de la Red Manual de Monitoreo Atmosférico. Esta Red Manual cuenta con 19 estaciones y en 11 de ellas se realiza el monitoreo de plomo ⁽²⁹⁾ (observar la relación de parámetros registrados en cada estación de monitoreo, anexo A.

Para la identificación y cuantificación del plomo presente en el aire, se requiere contar previamente con muestras de partículas suspendidas para su análisis. El muestreo de partículas suspendidas totales se realiza mediante el método de altos volúmenes, siguiendo los procedimientos de calibración y muestreo establecidos por la Secretaría de Desarrollo Social, con base en los criterios establecidos por la Organización Mundial de Meteorología y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. Rutinariamente, el muestreo se realiza cada seis días, durante el invierno esta frecuencia se intensifica a una vez cada tercer día. Esto asegura la representatividad tanto del monitoreo de las partículas suspendidas como de los resultados de la determinación del plomo. Finalmente, las muestras de partículas suspendidas son analizadas en laboratorio mediante la técnica de absorción atómica ⁽⁹⁾.

➤ *Normas de plomo en aire ambiente*

Para fines de evaluación de la calidad del aire, en México se aplica la norma de plomo en aire ambiente vigente en los Estados Unidos, establecida por la Agencia de Protección al Ambiente (EPA). Esta norma es 1.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (microgramos de plomo por metro cúbico) en promedio trimestral, lo cual implica que la concentración de plomo correspondiente a cada muestreo de 24 horas debe promediarse con las restantes concentraciones obtenidas durante el trimestre. Este límite está diseñado para proteger la salud de los niños, quienes constituyen la población de mayor riesgo ⁽¹⁰⁾.

2.2.4 Efectos de la contaminación por plomo en la ZMCM

➤ *Efectos en el medio biótico*

Se sabe que el plomo afecta diversos tipos de organismos; las plantas que crecen en suelos contaminados por este elemento tienden a concentrarlo sobre todo en su sistema radicular; esta contaminación se ha atribuido principalmente al plomo atmosférico.

2.2 Contaminación por plomo

Algunos animales, por ejemplo las lombrices de tierra, tienden a acumular plomo y pueden ser una de las rutas por las que este elemento entra a las cadenas alimenticias. En este caso los demás estabones serán afectados.

☞ *Efectos en la Salud*

En general, podemos mencionar dos clases de compuestos de plomo: los inorgánicos, que incluyen a las sales y óxidos y, los orgánicos, principalmente el tetraetilo y el tetrametilo de plomo. Todos los compuestos inorgánicos actúan en el organismo de la misma forma una vez que han sido absorbidos, mientras que los compuestos orgánicos difieren de los primeros en cuanto a su absorción y distribución en el organismo, es decir, si el plomo ha llegado a la parte baja del sistema respiratorio, la absorción dependerá de factores tales como el tamaño de la partícula inhalada, la forma química, el ritmo respiratorio y las características intrínsecas del organismo.

El plomo es el contaminante más tóxico entre los seis indicadores de la calidad del aire que se evalúan internacionalmente. Este contaminante actúa sobre el sistema nervioso central y periférico de los seres humanos, con daños que dependen de la duración e intensidad de la exposición. Puede llegar al cuerpo humano por vía oral, inhalación y a través de la piel; los niños constituyen el principal grupo de riesgo, debido a la mayor sensibilidad a sus efectos.

Cuando el plomo entra al organismo puede causar deficiencias en el crecimiento y desarrollo, con problemas cardíacos en la edad adulta. Se sabe que para cada microgramo de plomo inhalado de la atmósfera hay un incremento de dos microgramos por decilitro de sangre ⁽⁴⁾ ($\mu\text{g}/\text{dl}$). A continuación se enuncian algunos aspectos importantes de los efectos del plomo en la salud ⁽²⁶⁾:

1. El plomo es un elemento nocivo al sistema nervioso de los niños.
2. Existe una relación entre cifras específicas de plomo circulante y la presencia de síntomas y signos neurológicos.
3. El plomo produce lesiones cerebrales.
4. La elevada concentración de plomo sanguíneo en las madres produce alteraciones fetales tanto en trastornos del desarrollo como en la presencia de malformaciones congénitas.
5. Existe una correlación significativa entre niveles bajos de plomo sanguíneo en niños crónicamente expuestos y su capacidad cognitiva.

En dosis muy elevadas, está asociado con disfunciones digestivas y enfermedades renales que causan la muerte (cantidades mayores de 130 $\mu\text{g}/\text{dl}$ de sangre).

2.2.5 Acciones realizadas para la reducción y control del plomo

La participación social para reducir y controlar los niveles de plomo en la ZMCM ha sido la siguiente ⁽⁶⁾:

- Reducción de 92% de su contenido en la gasolina Nova.
- Introducción de gasolina sin plomo Magna Sin, cuyo consumo representa ahora 32% del total.
- Reducción de su contenido en pinturas, barnices, tintas, esmaltes y lacas.

- Utilización de pintura sin plomo y a base de agua para fines de vialidad y mobiliario urbano.
- Eliminación del plomo en latas de alimentos, útiles escolares y juguetes.

A partir de marzo de 1992 hasta abril de 1994, el plomo que se presentó en el aire se mantuvo dentro de la norma establecida que protege la salud en toda la Ciudad de México (1.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en promedio trimestral).

En los últimos cinco años, las concentraciones de plomo en el aire se han reducido en más del 90% y actualmente se encuentran en niveles inferiores a la tercera parte del límite establecido por la norma. Este resultado se debe en mayor parte a la disminución del contenido de plomo en la gasolina y a la introducción de la gasolina sin plomo. La gasolina Nova que se consume en el Valle de México contiene 92% menos plomo que en 1986, al disminuir gradualmente de un valor de 0.86 gramos de plomo por litro de gasolina en ese entonces a 0.07 en 1992.

En 1990 se introdujo la gasolina Magna Sin, sin plomo, como requisito indispensable para la incorporación en los nuevos vehículos del convertidor catalítico, que entraron en circulación a partir de 1991.

Para eliminar las emisiones de plomo al ambiente se planeó una sustitución gradual en las gasolinas a partir de 1990. Así, para el año 2000, del volumen total de gasolina se deberá vender 50% de Nova y 50% de Magna-Sin y para el año 2010 solamente se venderá Magna-Sin. Este cambio se ha ido dando y en 1995 el volumen de venta promedio de la gasolina Nova es 56.2% y 43.8% de la gasolina sin plomo.

☉ *Convenio para la reducción del plomo en México.*

El 6 de junio de 1991 fue firmado el Convenio de Concertación de Acciones para la Solución Integral de los Problemas Relativos al Plomo en productos que pudieran constituirse en un riesgo para la salud y los ecosistemas. El convenio tiene el propósito de evitar los riesgos a la salud y los ecosistemas asociados con la exposición al plomo contenido en diversos productos⁽⁵⁷⁾. Para este fin se establecieron compromisos a todos los sectores involucrados tendientes a la introducción de tecnologías alternativas que permitan reducir el contenido de plomo en los productos de consumo, o bien, sustituirlos por otros que estén libres de este metal.

En sus cláusulas, se establecieron los siguientes compromisos⁽⁵⁸⁾:

- Constituir el Comité Consultivo Nacional de Normalización para la Prevención del Uso de Plomo.
- Sustituir el uso de soldaduras y materias primas que contengan plomo para el envasado de productos y evitar el suministro de latas que contengan plomo para envases de productos alimenticios, en un plazo máximo de 18 meses.
- Eliminar el uso de óxidos de plomo y carbonatos de plomo en pigmentos, barnices, lacas, esmaltes y pinturas, en un plazo de tres meses.
- Reducir el contenido de plomo en productos de barro vidriado destinados a estar en contacto con alimentos y bebidas.
- Promover la sustitución de la tecnología tradicional de fabricación de loza vidriada por otra que evite la liberación del plomo a los alimentos y bebidas.

2.2 Contaminación por plomo

- Apoyo financiero para inversiones que contribuyan a la solución integral de los problemas relativos al contenido de plomo en diversos productos, incluyendo la adquisición de equipos y nuevas tecnologías.

A partir de la firma del convenio, se han emprendido múltiples acciones para dar cumplimiento a los compromisos contraídos. En el convenio participaron las siguientes entidades públicas y privadas:

Secretaría de Comercio y Fomento Industrial, Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología, Secretaría de Salud, Secretaría de Energía Minas e Industria Paraestatal, Nacional Financiera, Departamento del Distrito Federal, Confederación Nacional de Cámaras Industriales, Cámara Nacional de la Industria de Transformación, Asociación Nacional de la Industria Química, Asociación de Fabricantes de Envases Metálicos, Asociación Nacional de Fabricantes de Pinturas y Tintas, Cámara Nacional de Conservas Alimenticias, Cámara Nacional de Perfumería y Cosméticos, Cámara Minera de México, Sociedad Mexicana de Cerámica del Centro, Instituto Nacional Indigenista, Asociación Mexicana de Artesanías y Cultura Popular R.C., Fondo Nacional para el Fomento de las Artesanías.

Proyectos e Inversiones del Programa Integral Contra la Contaminación Atmosférica (PICCA)
octubre de 1990 a diciembre de 1995

Medida	Ejecutor	Inversiones a diciembre de 1995 (millones de dólares)	Porcentaje de reducción
1. Elaboración de gasolina de calidad ecológica internacional	PEMEX	810.81	40%
2. Suministro de gasolina sin plomo. MAGNA SIN para los vehículos 1991 con convertidor catalítico.	PEMEX	345	0.5%
3. Instalación inmediata de convertidores catalíticos en todos los vehículos a gasolina, modelo 1991.	SECTOR PRIVADO		0.5%
TOTAL		855.81	41%

Fuente: Departamento de DF, Gobierno del Edo. de México, Secretaría del Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca y Secretaría de Salud; Programa para mejorar la calidad del aire en el Valle de México 1995-2000; marzo 1996.

Capítulo 3

Conceptos generales

3.1 Esquema de planeación

3.1.1 Antecedentes

Durante los últimos cien años, las empresas y la forma de conceptualizarlas han evolucionado mucho. La empresa moderna ha sido producto de la Revolución Industrial, la cual a su vez fue un producto de la Era de la Máquina ⁽¹⁾.

Los seres humanos, siempre han buscado la estabilidad, además pertenecen a grupos, organizaciones, instituciones y sociedades que tienen la misma búsqueda; para lograr este objetivo, el ser humano debe relacionarse con un mundo cada vez más dinámico e inestable. Debido al incremento de las relaciones e interdependencia de los individuos, grupos, organizaciones, instituciones y sociedades, producido por los cambios en las comunicaciones y el transporte, nuestro medio ambiente se ha vuelto más amplio y menos predecible; es decir, más turbulento.

La adaptación a los rápidos cambios actuales exige frecuentes y grandes ajustes a lo que se realiza y a la forma como se realiza. Es por ello, que los ajustes requeridos en la administración para manejar los cambios, se han convertido en lo más importante para todas las personas relacionadas con ellos.

3.1.2 La empresa vista como una organización

Anteriormente las organizaciones eran consideradas como máquinas cuya función consistía en servir a sus creadores, proporcionando una retribución sobre su inversión en dinero y tiempo. Así la primera función de tales organizaciones, era producir utilidades.

Durante la primera Guerra Mundial, emergió gradualmente, el nuevo concepto de la empresa considerándola como un organismo. Bajo este concepto, a la empresa se le atribuían vida y propósitos propios. Sus principales objetivos, como los de cualquier organismo, se suponía que eran la supervivencia y el crecimiento.

De esta forma el concepto de la empresa evolucionó de mecanicista a orgánico y de orgánico a organizacional. Cuando la empresa era considerada como una máquina no se le atribuía propósito propio, y sólo se consideraba como un instrumento de sus propietarios para que éstos persiguieran sus objetivos individuales: *las utilidades*. Considerada como un organismo, la empresa tendría como uno de sus principales propósitos el sobrevivir y crecer. Finalmente, si se ve como una organización, entonces la empresa debe tener responsabilidades para con los integrantes de ella misma. Dentro de este concepto, la planeación es considerada como una actividad

dentro de la cual tiene lugar el desarrollo y no simplemente el de una actividad cuyos resultados pueden contribuir a éste ⁽¹⁾.

La planeación en una organización que cree en el cambio y confía en la ayuda que la ciencia y la tecnología pueden proporcionar consiste en predecir el futuro y prepararse para él. La preparación consiste en dar los pasos necesarios para minimizar o evitar las amenazas del futuro y, de ser posible, explotar las oportunidades futuras. La planeación se divide en cinco fases:

1. *Formulación e identificación del problema* ; donde se visualiza el conjunto de amenazas y oportunidades que encara la organización.
2. *Planeación de los fines* ; la cual otorga la especificación de los fines que se van a perseguir.
3. *Planeación de los medios* ; en esta fase se realiza la selección o creación de los medios con los que se van a perseguir los fines especificados.
4. *Planeación de los recursos* ; se determinan los recursos que se requerirán y la forma en que se obtendrán los que no estarían disponibles.
5. *Diseño de la implantación y el control* ; por último se determina lo que se va a hacer y sus consecuencias.

La toma de decisiones generalmente se encarga de la fase dos a la cuatro de la planeación. Es importante mencionar que el desarrollo debe ser el principal propósito de una organización; y éste tiene lugar más eficientemente cuando se participa en la toma de decisiones adecuada, la cual deberá ir acorde con los objetivos planteados que apoyan el desarrollo de las organizaciones, donde será de gran importancia para que los sistemas alienten el desarrollo ⁽¹⁾.

3.2 Necesidad de tomar decisiones

Decidir es un proceso de selección de cursos de acción. Su fin es que, de acuerdo a ciertos criterios, los resultados esperados se acerquen a objetivos y metas establecidas, bajo los entornos dados por los posibles estados de la naturaleza²⁴. Esta selección radica en seleccionar los valores cuantitativos o cualitativos de entre dos o más variables. A estas variables se les denomina de decisión. Sólo se intenta controlar las variables que pueden ser relevantes, o tener algún efecto sobre el resultado. Controlar una variable significa ser capaz de establecer su valor unilateral, o sea causarlo.

Al llevar a cabo una acción, el tomador de decisiones debe tomar en cuenta sus consecuencias, por lo general serán una función del "estado de la naturaleza". Un estado de la naturaleza es una representación de la situación real a la que se le aplicará la acción. Normalmente los estados de la naturaleza son una enumeración, dentro del modelo y de acuerdo a algún conjunto de índices, de las posibles representaciones distintas del fenómeno físico que se estudia ⁽¹⁴⁾.

El resultado de una decisión es producido por lo que se hace (los medios seleccionados) y por el medio ambiente en que se hace. Los aspectos de la situación que afectan el resultado, pero que no son controlados por los que toman las decisiones, constituyen el *medio ambiente de la decisión*. El grupo de variables relevantes sobre las que se puede tener influencia pero no control completo constituyen lo que se denomina *medio ambiente*

transaccional. El grupo de variables relevantes sobre las que no se tiene control, constituye el *medio ambiente contextual*. Debido al control que se tiene sobre las cosas, estos ambientes pueden cambiar con el paso del tiempo. A medida que se obtiene más control, los elementos del medio ambiente contextual se trasladan al medio ambiente transaccional y los elementos del medio ambiente transaccional se convierten en variables controlables.

En el proceso de decisión se identifica una serie de elementos; estos a su vez son los procesos de decisión, los entornos de la naturaleza y los decisores; este mismo proceso de decisión se puede realizar bajo los principios de la *metodología científica o la improvisación*. Los entornos de la naturaleza, en relación con la identificación, formulación y solución de un problema, pueden ser determinísticos, estocásticos y de total incertidumbre; y dependen respectivamente: de que la ocurrencia de sus posibles estados se conozcan con certeza; se desconozcan pero se les pueda atribuir una función de probabilidad o se desconozcan y no se les pueda atribuir alguna función de probabilidad.

La capacidad para formular los medios, depende en parte de cuán bien se comprenda la naturaleza de las decisiones.

3.2.1 Planeación de los medios

Una vez que se ha formulado un grupo de medios alternativos, se puede elegir uno de ellos. Esta elección normalmente se basa en una evaluación comparativa. Uno de los mejores caminos para evaluar un medio es a través de un experimento bien diseñado; con éstos, es posible acelerar los procesos de prueba; reducir su costo e incrementar su precisión; así como la confiabilidad de los resultados obtenidos; además, permiten aprender mejor de los medios que se prueban.

☞ *Acerca de los medios*

El objetivo de la toma de decisiones parece ser la selección de medios que produzcan los resultados deseados, es decir, los fines deseados. Los medios tienen dos clases de valor: *un valor instrumental o extrínseco*, que yace en la posibilidad de producir el resultado deseado y *un valor intrínseco*, relacionado con la satisfacción que produce, independientemente del resultado que proporcione.

Un medio es algo que produce un resultado deseado o permite acercarse a él. Los tipos más comunes son los siguientes:

- *Los actos* : acciones que requieren relativamente poco tiempo.
- *Las series de acciones, procedimientos o procesos* : secuencia de actos dirigidos a producir el resultado deseado.
- *Las prácticas* : actos frecuentemente repetidos o series de acciones.
- *Los proyectos* : sistemas de series de acciones simultáneas y secuenciales, o ambas, dirigidas a los resultados deseados.
- *Los programas* : sistemas de proyectos dirigidos a los resultados deseados.

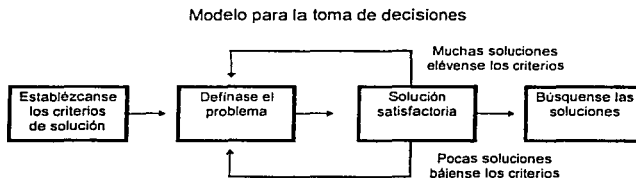
Antes de optar por un medio, su evaluación requiere tiempo y recursos, los cuales pueden ser muy costosos. Sin embargo, el costo de no hacer la mejor elección puede ser muy alto. En realidad, el costo de hacer una elección equivocada depende de cuán reversible sean la planeación y sus efectos.

En algunos casos no es posible realizar la evaluación experimental de los medios alternativos; en otros resulta impráctico. Afortunadamente la evaluación de los medios alternativos no sólo se puede realizar en el mundo real; existe otro método, el cual requiere del uso de modelos.

Es difícil especificar qué información se requiere para la toma de decisiones, por ello es necesario construir un modelo que explique el proceso y la conducta del sistema.

3.3 Uso de modelos en la evaluación de los medios

Los modelos son representaciones simplificadas de una realidad que puede ser sustituida por estos mismos bajo ciertas condiciones. Los modelos generalmente se pueden manipular más fácilmente y con menor costo que la realidad que representan, además de poderse utilizar para predecir y evaluar las consecuencias de una elección de medios. Las representaciones simplificadas de la realidad, en principio, no contienen aspectos irrelevantes de la misma para la investigación que se está realizando.



Fuente: Gallagher Charles A., Watson Hugh J.; Métodos cuantitativos para la toma de decisiones administrativa; Edit. McGraw-Hill; México, 1987.

Además, mientras mejor se comprenda la realidad que se estudia, se requiere una cantidad menor de variables para representarla; así el modelo será más económico, simple y eficiente.

3.3.1 Tipos de modelos

Existen tres tipos de modelos: *los icónicos*, *los análogos* y *los simbólicos*. Además, estos modelos básicos se pueden combinar de varios modos.

En el *modelo icónico* las propiedades relevantes de la realidad se muestran con esas mismas propiedades, pero generalmente cambiando su escala; este tipo de modelos generalmente representan cosas específicas y concretas. Sin embargo, tales modelos frecuentemente son difíciles de cambiar para propósitos experimentales. Un ejemplo es el modelo de un átomo.

En un *modelo análogo* las cualidades relevantes de la realidad se representan por otras diferentes, generalmente más fáciles de manejar. Las gráficas son probablemente el tipo de modelo análogo más fácilmente manipulable debido a que utilizan propiedades geométricas para representar una amplia gama de variables y las relaciones entre ellas.

Un *modelo simbólico* es aquel que utiliza símbolos para representar las propiedades de los objetos reales y las relaciones entre ellos. Los modelos simbólicos para evaluar los medios son los que generalmente se utilizan en los modelos de decisión. Este tipo de modelos son los más generales, abstractos y difíciles de construir, pero se pueden manipular y cambiar más fácilmente.

3.3.2 Utilidad de los modelos en la evaluación de los medios

Los modelos pueden evaluar los medios de dos maneras: matemáticamente (o analíticamente) y experimentalmente.

Es posible manipular algunos modelos simbólicos matemáticamente, con el fin de determinar cuál combinación de valores de las variables controladas produce el mejor resultado. Algunos de los procedimientos matemáticos son de naturaleza deductiva; otros son de naturaleza inductiva.

La utilidad de los modelos para evaluar medios depende de la capacidad que tengan los primeros para describir o explicar los fenómenos relevantes.

● *Evaluación de los modelos*

La técnica más efectiva para evaluar modelos es de carácter estadístico; con esta técnica los modelos que se utilizan tienen asignado un porcentaje de confiabilidad.

La construcción de modelos es una generalización del proceso de formulación de los medios alternativos. Las variables controladas en un modelo definen los medios. Los modelos también representan el ambiente en el cual se utilizarán los medios y, especifican cómo los cambios en las variables controladas y en las no controladas afectarán el resultado.

Los modelos pueden probarse de modo *retrospectivo* (contra la actuación pasada) o *prospectivo* (contra la actuación futura).

Una herramienta muy importante dentro de la toma de decisiones, es el *pronóstico* ⁽¹⁴⁾, éste no debe ser visto como un producto final, sino como un apoyo para tomar las decisiones que se requieren dentro del contexto apropiado de la organización.

Todas las organizaciones deben vigilar y responder al ambiente. Algunas variables en el ambiente de la organización solamente requieren vigilancia, aunque las variables ambientales cruciales requieren vigilancia y el pronóstico de su valor futuro. El pronóstico de estas variables proporciona los tiempos de entrega para tomar decisiones y realizar planes ⁽¹²⁾.

3.4 Pronósticos

La década pasada, fue testigo de muchos y grandes adelantos en el campo de los pronósticos y la planeación, lo cual generó experiencia en el uso de varias metodologías aprovechables dentro de un contexto más amplio de situaciones de planeación y un conocimiento más profundo de los factores psicológicos y organizativos que determinan el impacto del pronóstico en la planeación y en la toma de decisiones.

A pesar de que la elaboración de pronósticos siempre ha sido una parte integral de casi todos los tipos de toma de decisiones administrativas, durante las dos últimas décadas ha progresado mucho como disciplina. A finales de la década de 1970, esta disciplina se transformó en un campo con derecho propio, debido a que fue reconocida su importancia para todas las formas de planeación y de toma de decisiones, en áreas tan diversas como los negocios, el gobierno, las instituciones no lucrativas y las organizaciones militares.

Algunos autores creen firmemente que los pronósticos no son únicamente una parte del área de la estadística, sino que tienen que ver con la psicología, sociología, política, las ciencias de la administración, la economía y otras disciplinas relacionadas ⁽²⁷⁾.

Un requisito previo para cualquier clase de pronósticos, sea de juicio o estadístico, es que haya una norma o una relación correspondiente al hecho de que se trate. Si existe esta pauta o relación y se puede identificar correctamente, después se puede proyectar para el pronóstico ⁽²⁷⁾.

3.4.1 Elaboración de pronósticos

Una situación irónica que prevaleció en el campo de los pronósticos, fue el hecho de la poca importancia que se le otorgaba a este en la década de los años sesenta; a pesar de que las condiciones económicas y políticas en los países industrializados del mundo eran relativamente estables. En contraste, en medio del desequilibrio de principios de la década de 1980, se reconoció ampliamente la necesidad de elaborar pronósticos.

Los pronósticos formales constituyeron un área técnica dominada por métodos estadísticos, aplicados únicamente a datos históricos. Este enfoque ha cambiado en años recientes y a pesar de que la estadística y los datos cuantitativos aún desempeñan papeles importantes, los aspectos psicológicos y organizativos de los pronósticos han adquirido una importancia creciente.

En la siguiente tabla se presenta una clasificación de las diferentes posibilidades que existen, según Makridakis y Wheelwright, de pronósticos.

Clasificación de las posibilidades de pronósticos

	Implícito	Explícito
Intuitivo	Estimar los pronósticos para un tiempo determinado de una manera intuitiva.	Recurrir a una junta para generar los pronósticos de interés para un tiempo determinado.
Estadístico	Predecir el pronóstico deseado empleando un método de pronósticos estadístico.	Obtener pronósticos para cada producto importante en una fecha específica para emplearlos en la planeación de la producción.

Fuente: Makridakis Spyros and Wheelwright Steven C., Manual de técnicas de pronósticos. Edit. Limusa. México D.F. 1991. Pág. 21.

El conocimiento de las diferentes combinaciones de posibilidades de pronósticos es una forma de obtener un punto de referencia para planear su aplicación.

El *pronóstico intuitivo* se refiere a los procesos que son subjetivos para el encargado de planificar o de tomar las decisiones adecuadas para la organización. De esta manera, si bien una persona puede realizar un pronóstico, también es vulnerable a los diversos sesgos relacionados con estimaciones subjetivas o estimaciones a criterio.

Los métodos denominados *pronósticos formales* son aquellos cuyos pasos pueden describirse y que cuando se aplican por diferentes individuos, proporcionan un pronóstico semejante. Una diferencia importante entre el método intuitivo y el formal consiste en el grado en el que se pueden repetir los resultados de los pronósticos.

La característica más importante de los *pronósticos implícitos* es que no se encuentran integrados en los planes y decisiones que se están aplicando; aún cuando se usara un procedimiento formal para llegar a un pronóstico con un método implícito, este no sería registrado o incorporado en forma sistemática dentro de un plan específico de acción o de decisión. Por otro lado, los procedimientos del *pronóstico explícito* buscan describir claramente el valor del mismo y el tiempo en el que se obtuvo, usándolo directamente, tal vez después de haberle aplicado algunos procedimientos de ajuste consistentes para fines de planeación o de toma de decisiones.

La investigación en el campo de los pronósticos indica que gran parte de las aplicaciones de estos, en un principio son de origen intuitivo e implícito, sin embargo, el cambio que se ha estado dando hacia los procedimientos explícitos formales, tienden a conducir hacia mejoras importantes en el desarrollo de los pronósticos.

Un punto trascendente considerado en el campo de los pronósticos es el conocimiento de las posibilidades y las limitaciones de las técnicas existentes, de tal forma que se tengan expectativas realistas en la evaluación de los resultados; así, lo que se espera del pronóstico depende en gran parte del método utilizado y del horizonte de tiempo del pronóstico.

Existen dos tipos o categorías principales de técnicas formales. Una de estas la constituyen los métodos de *series de tiempo*. Este tipo de metodología busca extrapolar hacia el futuro los patrones de los datos del pasado. La base de tales métodos consiste en que en una serie de tiempo existen las fuerzas de la inercia y que tales fuerzas harán que las series se repitan al menos durante el horizonte de tiempo por pronosticarse. En cierto sentido, los métodos que se basan en las series de tiempo se pueden considerar como "fatalistas", debido a que suponen que las cosas no cambiarán sino que la "historia se repetirá".

El otro tipo principal de técnicas formales de pronóstico se puede denominar *causal o explicativo* e incluye los métodos de regresión y econométricos. Las técnicas de estas categorías tratan de descubrir los factores causales o por lo menos explicativos que relacionan entre sí a dos o más series. Un aspecto importante de los métodos de regresión o econométricos, es el conocimiento de la relación que existe entre las diversas series y de la manera en que se comporta la variable en cuestión respecto a otras variables.

Uno de los problemas tanto en los métodos de las series de tiempo como con los métodos de regresión y econométricos, es que los patrones en los que se basan se calculan empleando datos históricos. Si estos patrones o relaciones cambian, disminuye la exactitud del pronóstico. Por lo tanto, es la velocidad del cambio la que determina, en general, la efectividad relativa de los métodos formales de pronósticos.

Cuando el objetivo del pronóstico es proporcionar un mejor conocimiento del ambiente y de los factores causales que actúan sobre él, la precisión adquiere una importancia secundaria. Además, la simple identificación de los factores que influyen en el cambio y en la dirección de la casualidad, puede ser muy útil en muchas situaciones de planeación o de toma de decisiones ⁽²²⁾.

Una importante perspectiva acerca de los pronósticos, se relaciona con la incertidumbre en la planeación y en la toma de decisiones. Por lo anterior, es necesario tener en cuenta que la capacidad del pronóstico para reducir la incertidumbre futura suele ser limitada, debido a que esta puede existir independientemente de lo que hagan los planificadores y los que toman las decisiones; o bien, debido a que la percepción de la incertidumbre cambia con la cantidad de pronósticos.

Desde esta perspectiva, el propósito principal de pronosticar es permitir a los que toman decisiones y adoptan políticas, que tomen en cuenta la incertidumbre del futuro y que se fuercen a tomar decisiones dentro de un nivel de riesgo adecuado. También, una de las funciones más importantes en la elaboración de pronósticos es ayudar a determinar varias alternativas futuras y los niveles de riesgo y ganancias asociadas con cada una de ellas.

La planeación estratégica corporativa se desenvuelve en un ambiente de incertidumbre, es por ello que surge la necesidad de analizar pronósticos de interés para la organización.

3.4.2 Criterios para seleccionar técnicas apropiadas de pronósticos ^(22, 24)

Los siguientes elementos determinan, en principio, qué tipo de técnica deberá recomendarse en una situación dada:

1. El horizonte de planeación que se predecirá.
2. La incertidumbre que rodea todo el marco de toma de decisiones.
3. La existencia de series históricas que sean relevantes y confiables.

Posteriormente se analizan las siguientes condiciones que esencialmente determinarán la técnica a utilizar:

- ◆ *El horizonte que se contempla.* Puede ser a corto, mediano y largo plazo:

Pronósticos a largo plazo. El largo plazo inmediato contempla de dos a cinco años. Cuando se va hacia el lejano y distante largo plazo, la exactitud de los pronósticos concretos disminuye drásticamente, debido a que pueden pasar muchas cosas que hagan variar las pautas y relaciones establecidas. En este tipo de horizonte, el fin del pronóstico es dar orientaciones generales sobre el camino al que se dirige el fenómeno. Los pronósticos que abarcan un período de dos o más años son típicamente muy inexactos.

Pronósticos a mediano plazo. La relación usual del mediano plazo es dos años, típicamente se deriva de los pronósticos a largo plazo o a partir de una integración de pronósticos a corto plazo. Uno de los problemas a los que se pueden enfrentar los pronosticadores a mediano plazo es que con frecuencia, pueden ocurrir recesiones imprevistas, las cuales son muy difíciles de pronosticar.

Pronósticos a corto plazo. Debido a que existe una inercia muy grande en la mayoría de los fenómenos económicos y naturales, el estado actual de muchas variables es un buen índice de predicción de su estado futuro a corto plazo. Esto es especialmente cierto cuando el horizonte de tiempo es de tres meses o menos. Los métodos, como las técnicas de pronósticos de series de tiempo, a menudo pueden brindar pronósticos a corto plazo más o

menos exactos y superar en calidad a enfoques en teoría más exactos y avanzados, como los métodos econométricos. En general las predicciones a corto plazo son posible debido a que las pequeñas diferencias no tendrán tiempo de transformarse en grandes. Sin embargo, la definición de corto plazo depende de qué tan sensible sea el sistema a los pequeños cambios en este punto del tiempo.

- ◆ *El número de productos u objetos que se deben predecir.*

Es importante definir el número de productos de los cuales se desea encontrar sus proyecciones futuras.

- ◆ *El uso del pronóstico (si es para control o planeación).*

En caso de control, se requiere un pronóstico por excepción para detectar rápidamente cuándo un proceso se encuentra fuera de límites tolerables. En el caso de planeación el énfasis del pronóstico consiste en identificar los patrones básicos de la información requerida y extrapolarla al futuro.

- ◆ *La existencia o inexistencia de un proceso de planeación.*

Como el pronóstico es una herramienta de la planeación, es importante observar, qué tipo de planeación se desarrolla. De acuerdo con Ackoff, existen cuatro tipos de planeación: *inactiva* (no hacer nada); *reactiva* (el pasado fue siempre mejor que el presente y obviamente que el futuro); y *proactiva* (optimizar al sistema sin cambiarlo) e *iteractiva* (cambiar un sistema para asemejarlo a un ideal concebido). A menos de que el proceso de planeación sea proactiva o interactiva, el pronóstico tendrá poca utilidad para la toma de decisiones. En el caso inactivo y reactivo el pronóstico puede servir como un marco de referencia.

- ◆ *Exactitud de los pronósticos.*

Por lo general, cuanto más exacto sea el pronóstico, tanto mejor. Sin embargo, las pequeñas inexactitudes en pronósticos no significan básicamente diferencia alguna en la compleja operación de agregación de una organización industrial común.

- ◆ *El costo del pronóstico.*

Incluye el desarrollo, almacenamiento, operación y la oportunidad de la técnica utilizada; generalmente se trata de utilizar un método de pronóstico consistente, que opere a un costo razonable y con errores tolerables.

- ◆ *Complejidad y comprensión de los pronósticos.*

Los sistemas de pronósticos deben ser aceptables por el usuario, de lo contrario, se desarrollará un sistema informal de pronósticos; además es muy difícil emplear un modelo si éste es demasiado complicado para el que toma las decisiones. Así mismo, también se rechazará un modelo que no incluya aquellos elementos que se juzgen importantes.

3.4.3 Marco de trabajo para los pronósticos

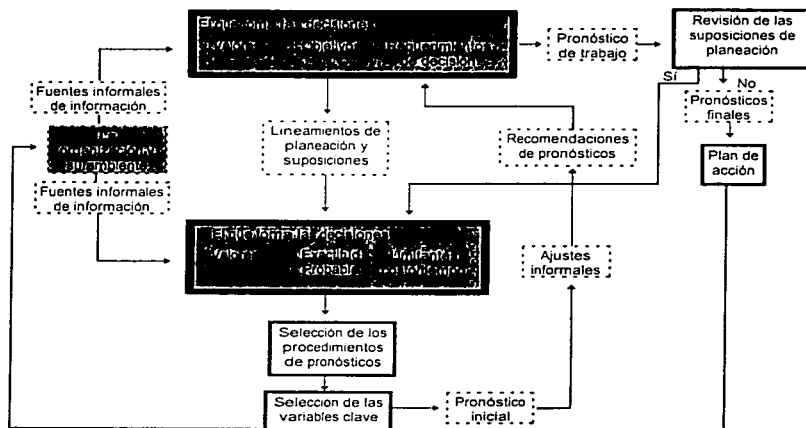
En la figura 1 se presenta un marco de trabajo para una mejor comprensión del proceso de pronóstico en la organización y de los problemas que se necesitan entender. En este modelo, se informa al encargado de la toma de decisiones de las consecuencias previstas de un conjunto propuesto de planes. Para ello, se emplea información recabada del ambiente. La información se puede obtener a través de un sistema de administración de

los servicios de información, así como también de alguna fuente informal apropiada. Para hacer un pronóstico, deberá adoptarse un procedimiento específico tomando en consideración el costo de las diversas posibilidades, el tiempo disponible antes de que se necesite el pronóstico y la precisión probable de los métodos que pueden ser útiles en forma competente.

Estos criterios no se definen en el vacío. El pronosticador tiene la característica de una visión confiable que ha desarrollado a través del estudio en la materia; a ello se le llama *valores del pronosticador*.

A través de las diferencias empíricas y técnicas que existen entre el pronosticador y el que toma las decisiones, puede ser que el pronóstico resultante no satisfaga, por lo que será necesario revisar los lineamientos de planeación y los supuestos que constituyen la información de entrada del conjunto inicial de pronósticos. Recordemos que el pronóstico es una técnica que ayuda a predecir lo que ocurrirá en el futuro; este, es un elemento necesario del proceso de planeación, pero no es la planeación en sí. El futuro, por lo general, no es determinístico; ninguna técnica de pronóstico será aplicable a todos los procesos de decisión en una organización productiva de bienes y servicios ⁽²⁴⁾. De aquí parte la necesidad de explicar un rango de técnicas.

Figura 1. Sistema para la elaboración de pronósticos *



Fuente: Manual de técnicas de pronósticos; Makridakis Spyros and Wheelwright Steven C.; Edit. Limusa; México D.F. 1991; pág.119.

* Influencias directas o flujos. Los cuadros sombreados representan los componentes principales del sistema para la elaboración de pronósticos. Los cuadros de líneas continuas representan acciones efectuadas por los participantes, el pronosticador y el encargado de la toma de decisiones. Los cuadros de líneas discontinuas representan la información y las suposiciones.

3.4 Pronósticos

3.4.4 Métodos de pronósticos; definición, ventajas y desventajas

Los diferentes métodos de pronósticos pueden ser divididos en tres clases:

1. *El subjetivo*. En el cual las opiniones individuales se procesan quizá de una manera complicada.
2. *El extrapolativo* (series de tiempo). En el cual se efectúan pronósticos para una variable particular, usando únicamente la historia previa de esa variable. Se supone que los patrones identificados en el pasado se extienden hacia el futuro.
3. *El causal* (o estructural). En el cual se intenta identificar las relaciones entre variables que existieron en el pasado. Luego, se supone que las relaciones continúan siendo válidas en el futuro.

Algunos procedimientos de pronósticos emplean más de uno de estos enfoques. A continuación se describen algunos de los métodos más comunes comprendidos en los puntos anteriores, también se presenta una evaluación de los mismos.

☛ *Métodos subjetivos*

Por su naturaleza, las técnicas subjetivas se basan en el juicio personal y pueden hacer uso de cualidades como la intuición, la opinión de un experto y la experiencia. En general conducen a pronósticos basados en criterios cualitativos. En la siguiente tabla se describen los métodos estándar para establecer pronósticos subjetivos.

Métodos subjetivos, definiciones	
Método	Definición
<i>Pronósticos individuales (subjetivos)</i>	Un individuo elabora un juicio acerca del futuro sin hacer referencia a ningún otro conjunto de pronósticos.
<i>Pronósticos mediante el comité/investigación</i>	Los aspectos del comité son demasiado conocidos. Una variante del comité, agrega las opiniones de los expertos a proyectos futuros. O bien también se efectúan encuestas entre los clientes con respecto a su comportamiento futuro.
<i>Delphi</i>	Delphi tiene tres rasgos que le distinguen del comité: anonimato, retroalimentación y respuesta de grupo. Típicamente los participantes se desconocen entre sí. El ejercicio de pronósticos se lleva a cabo en una serie de vueltas en las cuales a cada participante se le ofrece un resumen de las opiniones expresadas con anterioridad, hasta que se estabilizan las respuestas del grupo.

Fuente: Makridakis Spyros and Wheelwright Steven C.; Manual de técnicas de pronósticos; Edit. Limusa; México D.F., 1991; pág. 128.

☛ *Métodos extrapolativos*

Los métodos extrapolativos sólo funcionan con variables cuantitativas. La siguiente tabla, presenta una breve descripción de los métodos más conocidos.

Pronósticos extrapolativos, definiciones

Método	Definición
<i>Curvas de tendencia</i>	Las observaciones pasadas se describen como una función del tiempo, y luego, el patrón identificado se utiliza para pronosticar el futuro. Las funciones típicas, son la recta, la línea exponencial y la curva en forma de S. A menudo este método se emplea en pronósticos a largo plazo.
<i>Descomposición</i>	Se considera que una serie de tiempo consta de cuatro componentes: tendencia (su comportamiento a largo plazo), ciclicidad (los vaivenes alrededor de la tendencia a largo plazo), estacionalidad, y un componente aleatorio sobrante. Una vez que se han identificado los componentes sistemáticos, éstos pueden reintegrarse para generar pronósticos.
<i>Atenuación exponencial</i>	El pronóstico se basa en una suma ponderada de las observaciones pasadas. Los valores dependen de los llamados parámetros de atenuación. Una vez que se han elegido tales parámetros, es fácil calcular los pronósticos. El método se puede adaptar fácilmente para considerar los factores estacionales y la tendencia.
<i>Modelos Box-Jenkins (o ARIMA)</i>	Como en la atenuación exponencial, los pronósticos se basan en una suma ponderada de las observaciones previas. Sin embargo, la selección de los valores es mucho más complicada. Los modelos ARIMA brindan al analista una gama de modelos diferentes, escogiéndose el más apropiado para la aplicación particular.
<i>Bayesiano</i>	En las aplicaciones normales, el pronóstico bayesiano es similar a la atenuación exponencial. Sin embargo, pueden ocurrir cambios súbitos en el comportamiento de las series los cuales son impredecibles. Los métodos extrapolativos regulares para pronósticos requieren la intervención humana para el reajuste después de un cambio como éste. El pronóstico bayesiano trata de tomar en cuenta estos cambios mediante la evaluación de los puntos de cada dato para ver si ha ocurrido o no algún cambio. Una vez que se identifican estos cambios, los pronósticos se ajustan automáticamente. Este método también puede incorporar la información subjetiva.

Fuente: Makridakis Spyros and Wheelwright Steven C.; Manual de técnicas de pronósticos; Edil. Limusa, México D.F., 1991; pag. 129.

☞ *Métodos causales y estructurales*

El objetivo de estos modelos es relacionar la variable que se está pronosticando, con las causas que históricamente han ejercido influencia sobre ella y emplear para el pronóstico las relaciones que se establezcan. En la siguiente tabla se listan los enfoques más conocidos con una breve definición.

3.4 Pronósticos

Modelos causales y estructurales. definición

Método	Definición
<i>Modelos de regresión de una sola ecuación</i>	Se considera que la variable dependiente Y , está determinada por varias "causas" o "factores exógenos", así como por los valores pasados de la variable dependiente en sí. La relaciones entre Y y sus causas se identifican mediante el examen de los datos pasados. Para hacer pronósticos, se necesita hacer suposiciones con relación a los valores de los factores exógenos en el futuro o bien estos valores se deberán de pronosticar en su momento.
<i>Modelos de sistemas simultáneos</i>	Estos tienen una estructura similar a la de los modelos de una sola ecuación, ya descritos, pero con más de una variable dependiente. En seguida se pronostican las variables dependientes (o endógenas) mediante suposiciones acerca de los valores futuros de las variables exógenas.
<i>Modelos de simulación</i>	Como en los modelos de sistemas simultáneos, los modelos de simulación tienen que ver con un gran número de variables y sus interrelaciones con los factores exógenos. Los modeladores de simulación hacen énfasis en la estructura del modelo (en lugar de las estructuras lineales de los modelos de sistemas de regresión y simultáneos). En general, incluyen muchos detalles del sistema modelado.
<i>Modelos de entrada-salida</i>	Los modelos de entrada-salida se fundan en la idea de que para obtener una producción dada de productos o servicios, se requiere de un conjunto fijo de insumos. Una vez que se han efectuado los pronósticos de la demanda del consumidor, las técnicas de entrada-salida permitirán calcular la cantidad necesaria de un producto en particular para mantener tal nivel de la demanda.
<i>Análisis del impacto cruzado</i>	Se elabora una lista de eventos que probablemente tendrán un impacto en el sistema analizado. En seguida se estiman las probabilidades de ocurrencia de cada uno de estos eventos. Segundo, también se estima la probabilidad condicional de que ocurra el evento A, siendo que ha ocurrido el evento B, para todos los pares posibles de eventos A y B. A partir de estas suposiciones es posible definir escenarios que estén formados por una combinación de estos diversos eventos y calcular para cada escenario la probabilidad asociada. Se eliminan aquellos conjuntos de eventos cuya probabilidad sea baja.

Fuente: Makridakis Spyros and Wheelwright Steven C.; Manual de técnicas de pronósticos; Edit. Limusa; Mexico D.F. 1991; pág. 130.

Cualquier método se puede emplear correcta o incorrectamente pero por lo general, un cuidadoso análisis de la manera en que la organización emplea los procedimientos elegidos, conduce a una mejor exactitud.

☞ *Evaluación de los métodos de pronósticos*

No se debe creer que un mismo método producirá los mejores pronósticos en todas las circunstancias. Cada uno tiene sus ventajas y desventajas, las cuales se resumen a continuación.

Ventajas y desventajas de los métodos de pronósticos

Ventajas

Desventajas

SUBJETIVOS O A CRITERIO*Pronósticos individuales (subjetivos)*

Barato si se requiere que así sea; flexible, puede pronosticar cualquier cosa; cualquiera lo puede entender.

Precisión dudosa; aunque quizá pueda mejorarse la calidad de los criterios mediante la evaluación de la precisión del pronosticador; se encuentra sujeto a todos los problemas del criterio humano.

Pronósticos mediante el comité/encuestas

Relaciona diferentes perspectivas al problema; además de las ventajas mencionadas antes.

Puede dominar una persona con suficiente peso dentro de la organización. Una encuesta puede decir más acerca de las actitudes actuales de la gente y de sus expectativas que las actividades futuras.

Delphi

Igual que en el caso anterior, pero intenta, a través del anonimato, eliminar los efectos de la autoridad y la dominación del grupo.

Complicado; existe presión por lograr el consenso a medida que transcurren las sesiones; no necesariamente existe convergencia hacia un pronóstico acordado; no constituye necesariamente el mejoramiento del método más directo del comité.

EXTRAPOLATIVO*Análisis de la curva de la tendencia*

Es fácil de aprender, de usar y de comprender.

Es demasiado fácil y por tanto, propicia el descuido; especialmente a largo plazo.

Métodos por descomposición

Credibles por intuición.

No tienen una explicación estadística; no son ideales para los pronósticos y presentan los mismos problemas que las curvas de la tendencia. Son de utilidad como método de identificación de los factores: tendencia, estacionalidad y cíclicos.

Atenuación exponencial

Fácil de aplicar con computadora para un gran número de productos. Muy barato para operar.

Sin base teórica; pierde los puntos críticos, impreciso.

Modelos de Box-Jenkins (o ARIMA)

La selección de valores es amplia, lo que permite al usuario identificar en los datos muchos más patrones sutiles que con los métodos previos. Más que una técnica, el enfoque de Box-Jenkins proporciona una filosofía acerca del modelado basada en el principio de la parsimonia: cuanto más simple es el modelo tanto mejor, siempre y cuando satisfaga un número adecuado de verificaciones de diagnóstico.

Complicado y difícil de entender; caro por su uso del tiempo de computadora.

Modelos bayesianos

Trata de incluir la probabilidad del cambio estructural; incluye información subjetiva; puede emplearse con muy pocos datos; desde el punto de vista de la computación es bastante barato.

Complicado; se sabe muy poco acerca de su funcionamiento.

CAUSAL Y ESTRUCTURAL

Modelos de regresión de una sola ecuación

Si es posible desarrollar modelos que sean suficientemente confiables, éstos son ideales debido a que resuelven dudas de influencias. Estos son modelos de control, así como modelos de pronósticos.

Los modelos son difíciles de desarrollar, requieren personal con experiencia y gran cantidad de datos que a menudo la organización no se ocupa de recolectar. Subsiste el problema de pronosticar los factores exógenos.

Modelos de sistemas simultáneos

Muchos sistemas no se ajustan naturalmente al formato del modelo de una sola ecuación. En la política macroeconómica, el desempleo, la producción y la inflación son todos interdependientes. En la empresa, a menudo se sostiene que las ventas y la publicidad se determinan en conjunto. Los modelos de sistemas simultáneos captan estas interrelaciones.

Grandes requerimientos de datos; difíciles de entender; estadísticamente complicados; difícil de definir el modelo; difícil que tengan en cuenta la falta de linealidad; caros.

Modelos de simulación

Si se aplican adecuadamente, tales modelos pueden ofrecer al encargado de la toma de decisiones una ayuda substancial; se les puede diseñar de tal modo que sean de uso sencillo y fácil entendimiento; también pueden resolver el problema "preciso".

Caros; con frecuencia requieren de gran cantidad de datos; no hay una explicación clara acerca de su construcción; requieren una validación cuidadosa.

Modelos de entrada-salida

A diferencia de muchas de las técnicas descritas, el método de entrada-salida es ideal para pronosticar productos industriales.

Pocas veces las tablas gubernamentales de entrada-salida contienen suficientes detalles para una compañía interesada en clases específicas de productos; también tienden a ser obsoletas por varios años; no se sabe que tan importante es la suposición de proporcionalidad entre la entrada (insumo) y la salida (producto). Es costoso preparar una tabla de entrada-salida específica para un producto. Los pronósticos dependen de la exactitud de los pronósticos iniciales acerca de la demanda.

Análisis de impacto cruzado

Es capaz de tratar eventos improbables que pueden ocasionar gran impacto. Puede tratar tanto con eventos cuantitativos como cualitativos.

Por lo general, las probabilidades tienen que estimarse mediante los diversos métodos a criterio mencionados. Esto puede influir en la importancia que se dé a los diferentes escenarios. También es crucial la elección de cuáles eventos incluir.

Fuente: Makridakis Spyros and Wheelwright Steven C. Manual de técnicas de pronósticos. Edit. Limusa. México D.F. 1991. Pág. 132-134.

3.5 Series de tiempo

Gran cantidad de información acerca de diversas características tanto de individuos como de empresas o países, es normalmente recopilada con la finalidad de analizarla, para posteriormente llevar a cabo planeación y toma de decisiones. Al registro metódico de la medición u observación numérica, efectuada a intervalos de tiempo fijos, de tales características o variables, es a lo que se le conoce como una *serie de tiempo*⁽¹⁷⁾.

Dado que las series de tiempo consisten de datos numéricos, se hace uso de la herramienta estadística para describirlas y analizarlas, al igual que ocurre con cualquier otro conjunto de información numérica.

La estadística utiliza dos enfoques básicos: 1) *el enfoque descriptivo*, que se encarga esencialmente de resumir y describir en forma concisa, ya sea mediante gráficas o a través de ciertas medidas descriptivas, la información en estudio, y 2) *el enfoque inferencial*, el cual, tiene por objetivo fundamental utilizar muestras representativas para realizar inferencias que sean válidas para toda la población de donde se extrajo la muestra.

Dentro de los elementos descriptivos de una serie de tiempo se encuentran las gráficas y las medidas descriptivas. Mientras que los elementos de inferencia de la estadística son aquellos que se utilizan para responder preguntas acerca de una población o universo, con base en un conjunto de datos muestrales. En el estudio de series de tiempo, la población sobre la cual se desea inferir, depende fundamentalmente del tipo de análisis y/o modelo que se emplee.

Cap. 3 Conceptos generales

3.5.1 Objetivos del análisis de series de tiempo ⁽¹¹⁾

En el análisis de series de tiempo primordialmente se identifican cuatro objetivos:

- **Descripción.** Se pretende mencionar el comportamiento de un proceso, con la finalidad de visualizarlo claramente.
- **Explicación.** Permite un análisis de tipo causa-efecto cuando se relaciona un fenómeno con el medio que lo rodea.
- **Pronóstico.** Es el caso en el que se desea tener una proyección futura del fenómeno con el fin de tomar decisiones o prever comportamientos. El pronóstico con series de tiempo está basado en un modelo de series de tiempo (implícito o explícito, según sea el enfoque) que expresa la relación entre los datos actuales y los datos históricos.
- **Control.** Cuando se pretende no sólo observar sino modificar el comportamiento del fenómeno para obtener algún beneficio.

3.5.2 Componentes de una serie de tiempo ^(12, 24)

En una serie de tiempo existen cinco componentes básicos que pueden o no presentarse en la serie y que son fundamentales para la selección de la técnica de pronósticos:

- ◆ **Horizontalidad**, cuando una serie de tiempo no tiene tendencia determinada, se dice que existe una tendencia horizontal o nula. La serie en este caso es estacionaria. En rigor, la horizontalidad es un caso particular de la tendencia.
- ◆ **Tendencia**, este componente existe cuando una serie histórica tiende a disminuir o aumentar sus valores medios con el tiempo. Una tendencia es un aumento o una disminución a largo plazo. Por definición para podersele llamar tendencia, el aumento o disminución debe ser de larga duración.
- ◆ **Estacionalidad**, la estacionalidad existe cuando una serie de tiempo fluctúa de acuerdo con un factor que depende del periodo del año; es decir, hay una variación sistemática con respecto a la horizontalidad de la serie.
- ◆ **El patrón cíclico** es similar al de estacionalidad, pero las fluctuaciones ocurren más lentamente, estas son cambios graduados en el tiempo, los cuales se realizan a largo plazo.
- ◆ **El componente aleatorio**, este elemento siempre está presente en la serie de tiempo, debido a que es la aleatoriedad de la observación.

Una serie de tiempo puede combinar los patrones de tendencia, ciclaje y estacionalidad; el valor real será la suma de esta combinación más el elemento aleatorio.

Puesto que la serie de tiempo es una descripción del pasado, un procedimiento para pronosticar el futuro es usar estos datos históricos. Si la historia ha de repetirse; es decir, si los datos pasados indican lo que se puede esperar en el futuro, es posible postular un modelo matemático que sea representativo del proceso. Sin duda, si se

conoce este modelo excepto por ciertos parámetros, es factible generar pronósticos. Si no se conoce el modelo, los datos del pasado pueden sugerir su forma ⁽¹⁴⁾.

3.5.3 Series de tiempo vistas como procesos estocásticos

Para describir lo que es una serie de tiempo dentro del contexto de procesos estocásticos, es necesario definir a estos últimos. Un proceso estocástico es una familia de variables aleatorias asociada a un conjunto índice de números reales, de forma tal que a cada elemento del conjunto le corresponda una y sola una variable aleatoria, esto se escribirá como $\{Z(\tau); \tau \in T\}$, en donde T es el conjunto índice y $Z(\tau)$ es la variable aleatoria correspondiente al elemento τ de T . Si T es un intervalo de números reales, ya sea cerrado o abierto, se dirá que el proceso estocástico es continuo, y si T es un conjunto finito o infinito pero numerable, el proceso estocástico se dirá que es discreto. El hecho de que el proceso estocástico sea discreto o continuo no indica nada acerca de la naturaleza de las variables aleatorias involucradas, ya que estas a su vez pueden ser discretas o continuas.

3.5.4 Series de tiempo discretas

Con base en lo anterior, es posible decir que una serie de tiempo es la sucesión de observaciones generadas por un proceso estocástico cuyo conjunto índice se toma en relación al tiempo. La inferencia que se realice será acerca de las características del proceso estocástico generador de la serie observada. Además, así como existen procesos estocásticos discretos y continuos, existirán también series de tiempo discretas y continuas. En particular si las observaciones de una serie de tiempo se toman en los momentos $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_N$, el proceso estocástico respectivo se denotará por $\{Z(\tau_1), Z(\tau_2), \dots, Z(\tau_N)\}$.

Debido a que el estudio de este trabajo se realizó con series discretas univariadas, serán las que exclusivamente se describirán en el mismo. Cuando se tengan N valores sucesivos de una serie de tiempo, se escribirá $Y_1, Y_2, \dots, Y_t, \dots, Y_N$ para denotar a las observaciones hechas a intervalos equidistantes $\tau_0 + h, \tau_0 + 2h, \dots, \tau_0 + th, \dots, \tau_0 + Nh$, en donde τ_0 es algún punto en el tiempo que hace las veces de origen y h es la longitud del intervalo de tiempo que separa a dos observaciones continuas. En la mayoría de los casos, los valores τ_0 y h no son relevantes para el análisis que se realice y se podrá denotar a la serie mediante $\{Y_t\}$, con el supuesto implícito de que t toma los valores $1, 2, \dots, N$.

En la práctica existen dos formas básicas para generar series de tiempo discretas:

1. Por muestreo de una serie de tiempo continua.
2. Por acumulación de una serie de tiempo, ya sea continua o discreta, sobre un periodo de tiempo dado.

Es importante notar que una serie de tiempo observada no es más que una realización de un proceso estocástico, lo cual significa que se hubiera podido observar otra realización del mismo proceso, pero cuyo comportamiento fuese distinto del que se observó en la realidad. Con esto se pretende hacer hincapié en el elemento probabilístico presente en una serie de tiempo; ese mismo elemento será el que conduzca a tener en cuenta la función de densidad conjunta de todas las variables aleatorias que constituyen el proceso estocástico.

3.5 Series de tiempo

El comportamiento de una variable aleatoria Z puede caracterizarse a través de su función de densidad $f(Z)$. Similamente, dos variables aleatorias Z_1 y Z_2 quedarán completamente descritas (en términos probabilísticos) por su función de densidad conjunta $f(Z_1, Z_2, \dots, Z_N)$.

En casi todo análisis estadístico, excepto en el análisis de series de tiempo, es costumbre suponer que las observaciones que se tienen provienen de variables aleatorias independientes, es posible obtener así la función de densidad conjunta. En contraste, en el caso de las series de tiempo se supone que existe toda una estructura de correlación entre las observaciones, como consecuencia, no es posible obtener la función de densidad conjunta tan directamente y debe utilizarse otra forma para caracterizar a las variables aleatorias que intervienen; para ello existen los operadores y polinomios de uso frecuente en el análisis de series de tiempo, los cuales se explicarán en el siguiente capítulo.

Capítulo 4

Metodología de los modelos a usar

4.1 Análisis de correlación lineal

Con la finalidad de analizar la influencia entre los tres contaminantes en estudio (PST, PM_{10} y Pb) se recurrió al análisis de correlación; con este análisis no se pretende llegar a proyecciones futuras sino a un análisis descriptivo, por ello únicamente nos enfocamos a describir en qué consiste la teoría de correlación entre dos variables.

4.1.1 Correlación contra regresión

El análisis de correlación está estrechamente relacionado con el análisis de regresión, aunque conceptualmente los dos son muy diferentes. En *el análisis de correlación*, el objetivo fundamental es la medición de la fuerza o grado de asociación lineal entre dos variables; en cambio, en *el análisis de regresión* no se está fundamentalmente interesado en este tipo de medición, en lugar de ello, se intenta estimar o predecir la medida o valor promedio de la variable dependiente con base en los valores fijos o conocidos de las variables explicativas o independientes.

Las dos técnicas de correlación y regresión tienen ciertas diferencias, entre ellas encontramos que en el análisis de regresión existe una asimetría en la manera como se manejan las variables dependientes y explicativas. Se supone que la variable dependiente es estadística, aleatoria o estocástica, lo que implica que tiene asociada a ella una distribución probabilística. También se supone que las variables explicativas tienen valores fijos; es decir, tienen los mismos valores en diferentes muestras. Por otro lado, en el análisis de correlación se manejan las (dos) variables simétricamente; no existe distinción alguna entre las variables dependientes y las explicativas. Adicionalmente, se supone que ambas variables son aleatorias, en general, la mayor parte de la teoría de correlación está basada en este supuesto, mientras que la mayor parte de la teoría de regresión está condicionada al supuesto de que la variable dependiente es estocástica y que las variables explicativas son fijas y no estocásticas⁽¹³⁾.

4.1.2 Coeficiente de determinación r^2 : medida de bondad de ajuste

Una vez que se grafican los datos de las dos variables que se analizan, se obtiene una línea que corresponde a la *línea de regresión muestral*, la cual se expresa como

$$\hat{Y}_i = \hat{\beta}_1 + \hat{\beta}_2 X_i$$

donde:

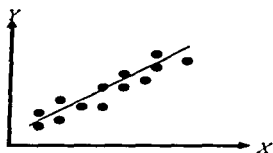
\hat{Y}_i = estimador de $E(Y|X_i)$

$\hat{\beta}_1$ = estimador de β_1

$\hat{\beta}_2$ = estimador de β_2

y gráficamente se representa a través del siguiente esquema:

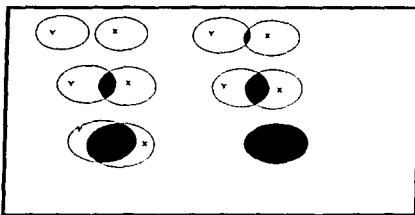
Representación de la línea de regresión muestral



Consideremos ahora, la llamada bondad de ajuste de la línea de regresión ajustada a un conjunto de datos, por lo que se tratará de encontrar en qué medida ajusta la línea de regresión muestral a los datos. Se dice que si todas las observaciones coincidieran con la línea de regresión, obtendríamos un ajuste "perfecto", lo que rara vez ocurre. Generalmente tienden a presentarse errores o residuos (e_i) positivos y negativos, con la esperanza de que los residuos localizados alrededor de la línea de regresión sean *lo más pequeños posibles*.

En este sentido, el coeficiente de determinación r^2 (para el caso de dos variables) es una medida resumen que nos indica qué tan bien la línea de regresión muestral se ajusta a los datos.

Diagrama de Venn para r^2



Fuente: Gujarati Damodar N. Econometría. Edit. MacGraw-Hill. México, D.F., 1995. Pág. 68.

El r^2 es simplemente una medida numérica de la intersección que se presenta en el anterior diagrama de Venn. Como podemos observar, a medida que nos movemos de izquierda a derecha el área de la intersección aumenta, lo cual implica que una proporción cada vez mayor de la variación en Y se explica por medio de X .

hecho que a su vez implica que r^2 aumenta. Cuando no existe intersección alguna, r^2 es cero, pero cuando la intersección es total, r^2 es igual a uno puesto que el 100% de la variación en Y se explica por medio de X ; r^2 se encuentra entre 0 y 1.

El coeficiente r^2 muestra la proporción de la varianza en la variable dependiente explicada por la variable independiente y, por tanto, proporciona una medida global de la magnitud del efecto que ejerce la variación existente en una variable sobre la variabilidad de la otra. Para calcular r^2 procederemos de la siguiente forma:

$$Y_i = \hat{Y}_i + e_i \quad \approx \quad y_i = \hat{y}_i + e_i$$

donde \hat{Y}_i es el valor medio del Y estimado y e_i son los errores o residuales. Elevando al cuadrado ambos lados y sumado sobre toda la muestra, obtenemos

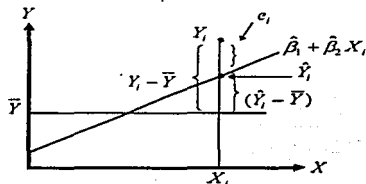
$$\begin{aligned} \sum y_i^2 &= \sum \hat{y}_i^2 + \sum e_i^2 + 2 \sum \hat{y}_i e_i \\ &= \sum \hat{y}_i^2 + \sum e_i^2 \\ &= \hat{\beta}_2^2 \sum x_i^2 + \sum e_i^2 \end{aligned}$$

debido a que $\sum \hat{y}_i e_i = 0$ y a que $\hat{y}_i = \hat{\beta}_2 x_i$.

La suma de cuadrados que aparece en la expresión correspondiente a $\sum y_i^2 = \hat{\beta}_2^2 \sum x_i^2 + \sum e_i^2$ se puede describir de la siguiente forma: $\sum y_i^2 = \sum (Y_i - \bar{Y})^2 =$ variación total de los valores reales de Y con respecto a su media muestral, a esta expresión se le conoce como *suma total de cuadrados* (STC). $\sum \hat{y}_i^2 = \sum (\hat{Y}_i - \bar{Y})^2 = \sum (\hat{Y}_i - \bar{Y})^2 = \hat{\beta}_2^2 \sum x_i^2 =$ variación de los valores estimados de Y con respecto a su media ($\bar{Y} = \bar{Y}$), y que se conoce con el nombre de suma de cuadrados debido a la regresión; es decir, debido a las variables explicativas por la regresión o simplemente, *suma explicada de cuadrados* (SEC). $\sum e_i^2 =$ variación residual o no explicada de los valores de Y con respecto a la línea de regresión o, simplemente, *suma residual de cuadrados* (SRC). Por lo que se obtiene

$$\text{STC} = \text{SEC} + \text{SRC}$$

Partición de los dos componentes de la variación de Y_i



Fuente: Gujarati Damodar N. Econometría. Edit. MacGraw-Hill. México, D.F., 1995. Pág. 69.

donde se muestra que la variación de los valores observados de Y alrededor de su media pueden dividirse en dos componentes, el primero atribuible a la línea de regresión y el segundo a fuerzas aleatorias, debido a que no todas las observaciones reales de Y caen sobre la línea de regresión ajustada.

Ahora, si dividimos ambos lados de la ecuación correspondiente a STC entre la misma STC, obtenemos

$$\begin{aligned} 1 &= \frac{SEC}{STC} + \frac{SRC}{STC} \\ &= \frac{\sum (\hat{Y}_i - \bar{Y})^2}{\sum (Y_i - \bar{Y})^2} + \frac{\sum e_i^2}{\sum (Y_i - \bar{Y})^2} \end{aligned}$$

Entonces, definimos a r^2 como

$$r^2 = \frac{\sum (\hat{Y}_i - \bar{Y})^2}{\sum (Y_i - \bar{Y})^2} = \frac{SEC}{STC}$$

La cantidad r^2 definida de esta manera, se conoce como coeficiente de determinación (muestral), y es la más ampliamente utilizada medida de la bondad de ajuste de una línea de regresión. Así, r^2 mide la proporción o porcentaje de la variación total en Y explicada por el modelo de regresión. Sus propiedades más importantes son:

1. Es una cantidad no negativa.
2. Sus límites son $0 \leq r^2 \leq 1$. Un r^2 de uno, denota un ajuste perfecto, mientras que un r^2 de cero nos indica que no existe relación alguna entre la variable dependiente y la variable explicativa.

Aunque r^2 puede calcularse directamente a partir de su definición, puede derivarse también haciendo uso de la siguiente fórmula:

$$r^2 = \frac{(\sum x_i y_i)^2}{\sum x_i^2 \sum y_i^2}$$

donde $x_i = (X_i - \bar{X})$ y $y_i = (Y_i - \bar{Y})$.

4.1.3 Coeficiente de correlación, r : medida de asociación lineal

En general, se supone que tanto X como Y son variables aleatorias y que las mediciones $\{(x_i, y_i); i = 1, 2, \dots, n\}$ son las observaciones de una población que tiene la función de densidad conjunta $f(x, y)$. En este contexto se considera el problema de medir la fuerza de tales relaciones entre dos variables por medio de un simple número que recibe el nombre de coeficiente de correlación.

En teoría se supone con frecuencia que la distribución condicional $f(y|x)$ de Y , para valores fijos de X , es normal con media $\mu_{y|x} = \beta_1 + \beta_2 x$ y varianza $\sigma_{y|x}^2$, y que, de la misma manera, X tiene distribución normal con media μ_x y varianza σ_x^2 .

4.1.1 Análisis de correlación lineal

La densidad conjunta de X y Y es

$$f(x, y) = n(y|x; \beta + \beta_2 x, \sigma) n(x; \mu_x, \sigma_x) \\ = \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left[\left(\frac{y - (\beta + \beta_2 x)}{\sigma_x}\right)^2\right]\right\}$$

para $-\infty < x < \infty$ y $-\infty < y < \infty$.

Consideremos a la variable aleatoria Y en la forma

$$Y = \alpha + \beta X + E$$

donde X es una variable aleatoria independiente del error aleatorio E . Dado que la media del error aleatorio E es cero, se sugiere que,

$$\mu_y = \beta + \beta_2 \mu_x \quad y \\ \sigma_y^2 = \sigma^2 + \beta_2^2 \sigma_x^2$$

Al sustituir β y σ^2 en la expresión de $f(x, y)$, se obtiene la distribución normal bivariada

$$f(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y\sqrt{1-\rho^2}} \exp\left\{-\frac{1}{2(1-\rho^2)}\left[\left(\frac{x-\mu_x}{\sigma_x}\right)^2 - 2\rho\left(\frac{x-\mu_x}{\sigma_x}\right)\left(\frac{y-\mu_y}{\sigma_y}\right)\left(\frac{y-\mu_y}{\sigma_y}\right)^2\right]\right\},$$

para $-\infty < x < \infty$ y $-\infty < y < \infty$, donde

$$\rho^2 = 1 - \frac{\sigma^2}{\sigma_y^2} = \beta_2^2 \frac{\sigma_x^2}{\sigma_y^2}$$

La constante ρ (rho) recibe el nombre de *coeficiente de correlación poblacional*. La línea recta dada por $\mu_{y|x} = \beta + \beta_2 x$ recibe el nombre de línea de regresión y β y β_2 son estimaciones dadas por el método de mínimos cuadrados donde

$$\beta_2 = \frac{n \sum x_i y_i - (\sum x_i)(\sum y_i)}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \\ \beta = \frac{\sum y_i - \beta_2 \sum x_i}{n}$$

el valor ρ de asociación lineal entre dos variables X y Y se estima con el coeficiente de correlación muestral r , donde

$$r = \pm \sqrt{r^2}$$

a partir de su definición

$$r = \frac{\sum x_i y_i}{\sqrt{(\sum x_i^2)(\sum y_i^2)}} = \frac{N \sum x_i y_i - (\sum x_i)(\sum y_i)}{\sqrt{[N \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2][N \sum y_i^2 - (\sum y_i)^2]}}$$

medida que se conoce como coeficiente de correlación muestral.

A continuación se presentan algunas propiedades de r :

1. Puede ser positivo o negativo; su signo dependerá del signo del numerador de la definición de r , el cual mide la covarianza de las dos variables.
2. Tiene como límites -1 y +1; es decir, $-1 \leq r \leq 1$.
3. Es de naturaleza simétrica; lo que implica que el coeficiente de correlación entre X y Y (r_{xy}) es igual al coeficiente de correlación entre Y y X (r_{yx}).
4. Es independiente del origen y de la escala; si definimos $X'_i = aX_i + c$ y $Y'_i = bY_i + d$, donde $a > 0$, $b > 0$, y c y d son constantes, entonces r entre X' y Y' es igual al r entre las variables originales X y Y .
5. Si X y Y son estadísticamente independientes, el coeficiente de correlación entre ellas es cero; pero si $r = 0$, no se puede inferir que las dos variables sean independientes.
6. Es una medida de asociación lineal o dependencia lineal únicamente.

Una prueba de hipótesis especial para probar la asociación lineal contra una alternativa apropiada puede verificarse usando el estadístico t con $n - 2$ grados de libertad, donde

$$H_0 = \rho = 0$$

$$H_a = \rho \neq 0$$

el estadístico t que se usa es

$$t = \frac{r\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r^2}}$$

tomando un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$ se puede construir la siguiente regla de decisión:

$$\rho \neq 0 \text{ si } t < -2.052 \text{ y } t > 2.052.$$

4.2 Metodología de series de tiempo Box-Jenkins

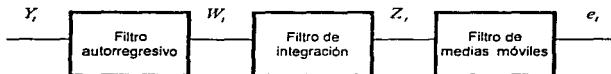
4.2.1 Antecedentes

La década de los setenta presenció un notable desarrollo de los principios y metodologías de los pronósticos con series de tiempo formulados por Box y Jenkins, quienes se basaron en los modelos de series de tiempo *autorregresivos integrados y de promedios móviles* (ARIMA); lo anterior se considera que es una de las principales contribuciones al análisis de series de tiempo que realizaron estos dos autores.

Una de las principales cualidades del método Box-Jenkins es que el modelo y el procedimiento están coordinados; en realidad, existe un enfoque sistemático para identificar un modelo apropiado, elegido entre una abundante variedad de modelos. Los datos históricos se usan para probar la validez del modelo, el cual genera también un procedimiento de pronósticos apropiado ⁽¹⁴⁾.

4.2.2 Construcción de modelos

La metodología de Box-Jenkins consiste en extraer los movimientos predecibles de los datos observados a través de descomponer la serie de tiempo en varios componentes, conocidos como filtros; los cuales, se encargan de detectar las diferentes componentes usando los filtros correspondientes, hasta llegar a residuales no predecibles, donde se buscará que el comportamiento de los mismos tenga poca influencia en el resultado final. Principalmente se consideran tres filtros lineales: *el autorregresivo, el de integración y el de medias móviles*.

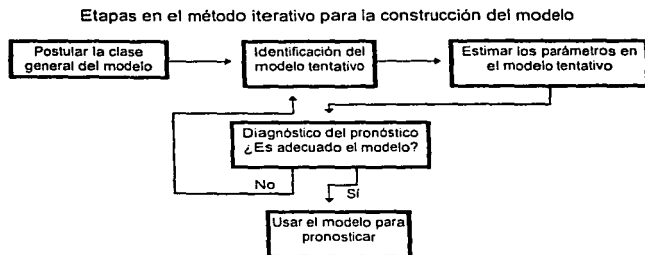


Fuente: González Videgaray María del Carmen; Modelos de decisiones con procesos estocásticos II (Metodología de Box-Jenkins); U.N.A.M., E.N.E.P Acatlán, México, 1990; pág. 6.

El proceso iterativo Box-Jenkins para construir modelos lineales de series de tiempo consiste en cuatro pasos:

1. **Identificación** de un posible modelo dentro de la clase de modelos ARIMA; es decir, se determinan los valores correspondientes a los parámetros p , d y q que especifiquen el modelo ARIMA apropiado para la serie en estudio.
2. **Estimación** de los parámetros involucrados en el modelo, a través de técnicas eficientes de estimación no-lineal.
3. **Verificación** del ajuste adecuado proporcionado por el modelo y de que los supuestos básicos, implícitos en el modelo, se satisfagan; de no cumplirse, se determinan las modificaciones necesarias y se repiten las etapas anteriores hasta que la verificación indique resultados aceptables; por último,
4. **Uso del modelo** para los fines predeterminados que se deben tomar en cuenta durante la construcción del mismo; estos fines, generalmente son de pronóstico, control, simulación o explicación del fenómeno en estudio.

El siguiente esquema representa el proceso iterativo de las etapas participantes en la construcción de modelos de acuerdo a la técnica de Box-Jenkins:



Fuente: Box George E. P., Jenkins Gwilym M. Time series analysis forecasting and control. Edit. Prentice Hall. United States of America, 1976. Pág. 19.

El problema práctico de esta metodología de pronóstico, se centra en el hecho de integrar iterativamente un modelo de pronósticos recurriendo a una gran interpretación personal del muestreo estadístico obtenido de los datos (en particular, las funciones de autocorrelación y de autocorrelación parcial).

El requisito más importante para la integración del modelo ARIMA es contar con una serie de tiempo con 50 o más observaciones. Esto se debe al proceso de identificación (no al proceso de estimación, en el cual basta con un número menor), por lo que es necesario obtener estimaciones de las autocorrelaciones y las autocorrelaciones parciales de calidad suficiente para conservar la integridad de los patrones correspondientes.

El método de Box-Jenkins es iterativo por naturaleza. Primero se elige un modelo; para lo cual, es necesario calcular autocorrelaciones y autocorrelaciones parciales y examinar sus patrones.

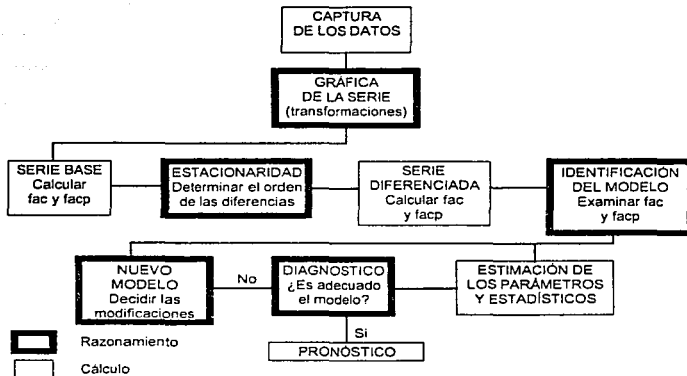
Una *autocorrelación* mide la correlación entre los valores de la serie de tiempo, separados por un número fijo de periodos que se llama espacio. Entonces, la autocorrelación para un espacio de dos periodos mide la correlación de cada tercera observación, o sea, es la correlación entre la serie de tiempo original y la misma serie de tiempo desplazada dos periodos hacia adelante. La *autocorrelación parcial* es una autocorrelación condicional entre la serie de tiempo original y la misma serie de tiempo trasladada hacia adelante un número fijo de periodos, manteniendo fijo el efecto de los otros espacios de tiempo.

Si tanto los *residuos* como los *parámetros estimados* se comportan como se espera en el modelo supuesto, el modelo queda validado. Si no, el modelo debe modificarse y el procedimiento se repite hasta que se valide el modelo. En este punto es cuando se puede obtener un pronóstico.

Los procedimientos empleados en la identificación del modelo son inexactos y requieren de razonamiento y experiencia, así como del conocimiento del fenómeno en estudio. La idea fundamental es elegir un modelo sencillo y tratar de mejorarlo. El siguiente diagrama esquematiza la funcionalidad de la metodología:

4.2 Metodología de series de tiempo Box-Jenkins

Diagrama funcional de la metodología Box-Jenkins



Fuente: González Videgaray María del Carmen. Modelos de decisiones con procesos estocásticos II (Metodología de Box-Jenkins). U.N.A.M., E.N.E.P Acatlán. México, 1990. Pág. 7.

Antes de abordar con mayor detalle las etapas de la metodología, se hablará de algunos conceptos importantes empleados en el análisis de los modelos.

4.2.3 Modelos parsimoniosos

Un modelo nunca puede llegar a ser una descripción completamente exacta de la realidad; para describir la realidad exactamente se tendría que desarrollar un modelo tan complejo que no sería útil en la práctica. Es inevitable cierta cantidad de abstracción o simplificación en la construcción de cualquier modelo.

El *principio de parsimonia* enuncia que un modelo se debe mantener tan simple como sea posible o, como diría Milton Friedman, "un modelo (hipótesis) es importante si *explica* mucho en forma resumida..."

Lo anterior implica que se debe introducir variables claves en el modelo las cuales deberán constituir la esencia del fenómeno que se está estudiando, relegando todas las influencias menores y aleatorias del error ϵ_t .

* Milton Friedman; The methodology of positive economics, essays in positive economics; Universidad de Chicago Press; Chicago, 1953; pág. 14.

4.2.4 Operadores y polinomios de retraso

El primer operador del que se habla es el llamado operador de retraso, el cual se denota por la letra B (del inglés Backward). Dicho operador se define a través de la relación

$$BZ_t = Z_{t-1} \text{ para toda } t$$

aplicando sucesivamente el operador B se obtiene

$$B^2 Z_t = B(BZ_t) = Z_{t-2}$$

$$B^3 Z_t = B(B^2 Z_t) = Z_{t-3}$$

$$\vdots$$

$$B^k Z_t = B(B^{k-1} Z_t) = Z_{t-k}$$

por tanto, la expresión general a la que se llega es

$$B^k Z_t = Z_{t-k} \text{ para toda } t$$

Al "multiplicar" a B^k por Z_t se obtiene la variable retrasada k periodos y, debido a que $B^0 = 1$, se tiene $B^0 Z_t = Z_t$. Cuando se aplica el operador de retraso a la sucesión de valores $\{Z_1, Z_2, \dots, Z_t, \dots, Z_N\}$, esta se transforma en la nueva sucesión $\{Z_{1-k}, Z_{2-k}, \dots, Z_{t-k}, \dots, Z_{N-k}\}$; por lo que la serie que originalmente constaba de N observaciones, se reducirá a una serie de solamente $N - k$ observaciones, por el hecho de aplicar B^k .

Otro operador de uso frecuente y que se encuentra íntimamente ligado con B es el operador diferencia ∇ . Este operador se utiliza para expresar relaciones del tipo $Y_t = Z_t - Z_{t-1}$; es decir, si se define a ∇ a través de

$$\nabla Z_t = Z_t - Z_{t-1} \text{ para toda } t$$

entonces Y_t puede escribirse como $Y_t = \nabla Z_t$. La relación que liga a ∇ con B es la siguiente

$$\nabla = 1 - B; \text{ es decir, } \nabla Z_t = (1 - B)Z_t,$$

debido a que ∇^k es en realidad un binomio elevado a la k -ésima potencia, se obtiene la siguiente forma general:

$$\nabla^k Z_t = (1 - B)^k Z_t,$$

El uso de polinomios de retraso es de gran importancia en el estudio de series de tiempo debido a que permiten expresar, de forma concisa y simple, algunos de los modelos que han probado ser de mayor utilidad en la práctica para representar fenómenos reales⁽¹²⁾. A continuación se hará mención de estos modelos, los cuales se detallarán posteriormente.

El modelo correspondiente a *promedios móviles* está definido por

$$Z_t - \mu = (1 - \theta_1 B - \theta_2 B^2 - \dots - \theta_q B^q) e_t,$$

donde μ denota a la media de la serie (o nivel del proceso), de tal forma que $Z_t - \mu$ representa la desviación de Z_t respecto a la media; $\{e_t\}$ es una sucesión de variables aleatorias con ciertas características (descritas posteriormente) y $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_q$ son parámetros que sirven para relacionar a las sucesiones $\{e_t\}$ y $\{Z_t\}$. Así, un modelo de promedios móviles se denota de manera compacta por

$$Z_t - \mu = \theta(B) e_t,$$

Los modelos *autorregresivos* se definen como

$$(1 - \phi_1 B - \phi_2 B^2 - \dots - \phi_p B^p)(Z_t - \mu) = e_t,$$

donde $\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_p$ son parámetros. Este tipo de modelos se representa a través de la relación

$$\phi(B)(Z_t - \mu) = e_t,$$

A la combinación de modelos anteriores se les conoce como modelos *autorregresivos de promedios móviles*, los cuales se representan por medio de la ecuación

$$\phi(B)(Z_t - \mu) = \theta(B) e_t,$$

por último haciendo uso de polinomios de retraso y del operador diferencia se obtiene

$$\phi(B) \nabla^d Z_t = \theta(B) e_t,$$

que constituye los llamados modelos *autorregresivos integrados y de promedios móviles*, ARIMA.

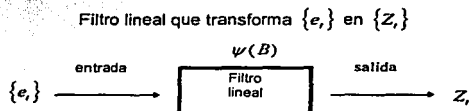
4.2.5 Procesos estocásticos lineales

Los modelos para los procesos estocásticos que se estudian a través de la metodología Box-Jenkins se basan en la idea de que una serie de tiempo, cuyos valores sucesivos pueden ser altamente dependientes; es generada a partir de una serie de choques aleatorios independientes $\{e_t\}$. Estos choques aleatorios son supuestas realizaciones independientes de una variable aleatoria cuya media es constante (generalmente se considera igual a cero) y cuya varianza es σ_e^2 . A esta sucesión de variables aleatorias $\{e_t\}$, se le conoce como ruido blanco. Dicha terminología surge del concepto de ruido blanco que se utiliza frecuentemente en estudios donde se pretende distinguir a las señales con mensaje de los simples ruidos.

La idea de que una serie de tiempo es generada a través de una serie de choques aleatorios independientes fue concebida por Yule (1927), quien propuso en esencia, expresar al proceso $\{Z_t\}$ en función de $\{e_t\}$ por medio de la relación lineal

$$\begin{aligned} Z_t &= \mu + e_t + \psi_1 e_{t-1} + \psi_2 e_{t-2} + \dots \\ &= \mu + \psi(B)e_t, \end{aligned}$$

donde μ es el parámetro que determina el nivel del proceso y $\psi(B)$ es el polinomio de retraso $\psi(B) = 1 + \psi_1 B + \psi_2 B^2 + \dots$ que convierte al proceso $\{e_t\}$ en el proceso $\{Z_t\}$. Así es como se tiene un filtro lineal basado en el operador lineal $\psi(B)$.



Fuente: Box George E. P., Jenkins Gwilym M.: Time series analysis forecasting and control; Edit. Prentice Hall; United States of America, 1976; pág. 8.

4.2.6 Procesos estacionarios

El concepto de estacionaridad es de suma importancia para el análisis de series de tiempo. En general, para caracterizar a un proceso estocástico, es necesario conocer la función de densidad conjunta de todas las variables aleatorias involucradas; sin embargo, en la práctica no es realista pensar que esto se logre con una serie de tiempo. No obstante, debido a que los primeros momentos de las variables aleatorias resumen en gran parte a su distribución, se sugiere estudiar a los momentos de primero y segundo orden, es decir, a las medias, varianzas y covarianzas de las variables involucradas en el proceso estocástico ⁽¹²⁾.

Si no hay tendencia puede asumirse que la media es constante y que el valor observado para cada periodo puede representarse por la siguiente media:

$$\begin{aligned} E(Y_t) &= E(Y_{t+h}) = \mu \\ \bar{Y}_t &= E(Y_t) = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n Y_t \end{aligned}$$

Supóngase que la media de Y_t es μ , es decir, $E(Y_t) = \mu$, entonces a partir de que $Y_t = \mu + e_t + \psi_1 e_{t-1} + \psi_2 e_{t-2} + \dots$ se tiene que

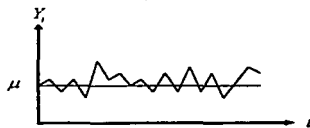
$$\mu_t = \mu + E(e_t + \psi_1 e_{t-1} + \psi_2 e_{t-2} + \dots)$$

así la esperanza de la suma en paréntesis se podría obtener a través de la suma de las esperanzas de cada uno de los sumandos, pero ello no será válido a no ser que

$$\psi_0 + \sum_{i=1}^{\infty} |\psi_i| < \infty$$

donde $\psi_0 = 1$; así, para que la esperanza de la suma exista se requiere que la serie de ponderaciones en valor absoluto converja, si esto ocurre se tendrá que $E(Y_t) = \mu$ debido a que $E(e_t) = 0$ para todo t , lo cual significa que la media del proceso no depende del tiempo, esto implica en particular que aún cuando el proceso se aleje de la media un cierto periodo, siempre regresará a una vecindad de la misma.

Realización de un proceso con media constante



Esta suposición sólo es una de las condiciones para la estacionaridad de una serie de tiempo. Una segunda, es que la varianza del proceso sea constante.

$$\text{Var } Y_t = \text{Var } Y_{t+h} = \sigma_t^2 \quad \text{es decir,}$$

$$E[(Y_t - \mu)^2] = E[(Y_{t+h} - \mu)^2] = \sigma_t^2$$

Finalmente, al considerar a una serie de tiempo como un proceso estocástico se debe tomar en cuenta a todas las variables aleatorias $Y_1, Y_2, \dots, Y_t, \dots, Y_N$, donde resulta necesario estudiar la covarianza entre Y_t y Y_{t+k} . Dicha covarianza se denota por $\gamma_k = \text{Cov}(Y_t, Y_{t+k})$ y está dada por

$$\gamma_k = E[(Y_t - \mu)(Y_{t+k} - \mu)]$$

en la práctica es común suponer que la distribución asociada con las series de tiempo es normal, por lo que es suficiente conocer la media μ y la función de autocovarianza $\{\gamma_k\}$ para caracterizar completamente a una serie estacionaria. En realidad, la autocovarianza identifica la dispersión entre observaciones de la misma variable, aunque retrasada; sin embargo, para evitar la influencia de las unidades de medida, es preferible trabajar con las autocorrelaciones.

La autocorrelación mide la correlación entre un valor observado Y_t y otro Y_{t+k} , estas se encuentran separadas por un intervalo de longitud k definida a través de

$$\rho_k = \text{corr}(Y_t, Y_{t+k})$$

$$= \frac{E[(Y_t - \mu)(Y_{t+k} - \mu)]}{E[(Y_t - \mu)^2]} = \frac{\text{Cov}(Y_t, Y_{t+k})}{\sigma_t^2} \quad k = 0 \pm 1 \pm 2 \dots$$

el valor ρ_k debe ser tal que $-1 \leq \rho_k \leq 1$. El valor de ρ_k sólo dependerá de k ; es decir, la relación entre dos variables sólo dependerá del intervalo que las separa; así, la función ρ_k sirve para especificar, junto con μ y σ^2 , a un proceso estocástico estacionario. A continuación se describen las etapas que constituyen la metodología Box-Jenkins.

4.2.7 Identificación del modelo

En esta etapa, el objetivo es determinar el orden de los polinomios autorregresivos y el de promedios móviles, así como la cantidad de veces que deberá aplicarse el operador diferencial para cancelar la no estacionaridad homogénea. En términos generales, en la etapa de identificación, primero se determina una serie estacionaria en función de la serie original, para la cual se obtendrá una representación ARIMA (p, d, q) , posteriormente se fijan los valores de p y q .

El análisis de series de tiempo comienza al graficar las observaciones del fenómeno que se estudia contra el tiempo; de esta forma se puede identificar la tendencia, heteroscedasticidad (varianza no constante), estacionaridad (o fluctuación estacional), discontinuidades y datos discrepantes o influyentes.

☛ Estabilización de la varianza

Para que la varianza de alguna serie sea constante, se recurre a ciertas transformaciones; la idea fundamental de estas, es transformar los datos de modo que las curvas tiendan a cambiar por rectas y al mismo tiempo hacer la varianza constante. Las transformaciones más utilizadas en la práctica, son las logarítmicas y las raíces cuadradas. Existen otras transformaciones a las cuales, también se puede recurrir, estas son de tipo exponencial, recíproco, recíproco de la raíz cuadrada, etc. Estas transformaciones son útiles, en general, cuando:

1. La varianza es proporcional al crecimiento de la serie.
2. El nivel medio de la serie se incrementa/decrementa a una tasa constante.

☛ Eliminación de la tendencia

Se le llama tendencia a un cambio sistemático en el nivel de una serie de tiempo. Existen diversos métodos para eliminar la tendencia, el más conocido es el modelo de regresión, el cual se usa cuando la tendencia es fija y determinística.

El problema en cuanto a la determinación de la tendencia radica en la dificultad de distinguir cuándo un cambio en el nivel de la serie se debe a que la tendencia sea determinística o estocástica; esta es una de las razones por las que se usan las diferencias para anular la tendencia; el método de diferencias generalmente funciona para series con un número grande de observaciones ⁽¹¹⁾.

Las diferencias, es un método que consiste en restar los valores de las observaciones uno de otro en un orden preestablecido; por ejemplo, si existe alguna tendencia ya sea polinomial o de algún otro tipo, es posible eliminar dicha tendencia aplicando el operador ∇ (la funcionalidad de este operador fue explicada anteriormente) un número apropiado de veces. Así, tomando las primeras diferencias de una serie con tendencia lineal, ésta desaparece.

En general, un polinomio de grado uno, se vuelve constante al aplicar una diferencia, uno de grado dos se vuelve constante al aplicar dos diferencias y así sucesivamente. Cada vez que se diferencia se pierde una observación.

Sabemos, entonces, que el propósito de tomar diferencias es volver estacionario el nivel de una serie, por lo que es importante aclarar que si se toman diferencias de series que ya son estacionarias, estas seguirán siendo estacionarias, lo cual significa que fácilmente podría *sobrediferenciarse* a una serie al tratar de volverla estacionaria; este hecho causaría problemas en la identificación de algún modelo para representarla, debido a que se incrementa la varianza de la serie y se pierden observaciones innecesariamente (al aplicar d veces el operador ∇ ; es decir, al aplicar ∇^d , se pierden automáticamente d observaciones).

Además la idea básica de eliminar la tendencia no es olvidar que existe una tendencia en la serie, sino obtener una nueva serie que pueda ser analizada con mayor sencillez.

Fluctuaciones estacionales

Cuando se analiza la estacionalidad no es posible determinar sus efectos sin poner atención a la tendencia, eliminándola primero, si es que existe en las observaciones que se analizan. La estacionalidad es generalmente clara después de eliminar la tendencia, y en algunos casos aún con la tendencia.

Existen varios métodos para manejar la estacionalidad. La mayoría son métodos de "autoajuste", basados únicamente en la información contenida en la serie; otros son de tipo causal. En este trabajo se usarán únicamente los primeros, debido a su sencillez y a la confiabilidad de los resultados, aunque estos también implican una relación causal, por lo menos intuitiva, originada del conocimiento del fenómeno.

El procedimiento de ajuste se hace con base en diferencias estacionales, de forma similar a las diferencias consecutivas (ordinarias), anteriormente explicadas.

Donde s (del inglés span) es la longitud del periodo de la fluctuación estacional. Entonces

$$\nabla_s Y_t = Y_t - Y_{t-s}$$

en este tipo de diferencias, cada que se efectúa el operador se pierden s observaciones.

Modelos autorregresivos (AR)

Se denota por Z_t la serie estacionaria, que puede ser igual a la serie original, en caso de no haber sido necesaria la aplicación de transformaciones; o bien puede ser el resultado de transformaciones y diferencias. El número resultante de observaciones disponibles dependerá de las diferencias aplicadas. Comencemos explicando el proceso AR más sencillo.

Una serie de tiempo (estacionaria) presenta un proceso autorregresivo de primer orden si los valores de la serie, Z_t , se pueden expresar como una función lineal del primer valor anterior y un choque aleatorio e_t .

$$Z_t = \phi Z_{t-1} + e_t$$

donde ϕ es el parámetro autorregresivo que describe el efecto de un cambio de Z_{t-1} en Z_t . Los valores e_t , como anteriormente se mencionó, son conocidos como errores o ruido blanco; y se caracterizan por:

$$E(e_t) = 0$$

$$E(e_t, e_k) = \begin{cases} \sigma^2 & \text{si } t = k \\ 0 & \text{otro caso} \end{cases}$$

La $E(e_t, Z_{t-1}) = 0$ y e_t se distribuye como una normal con media cero y varianza σ^2 , $N(0, \sigma^2)$. Z_t s son desviaciones respecto a \bar{Z} , de tal forma que su media es cero.

- ◆ Condiciones de estacionaridad

La *media* debe ser constante, es decir:

$$E(Z_t) = E(Z_{t-1}) = \mu$$

como $Z_t = \phi Z_{t-1} + e_t$, se tiene que

$$E(Z_t) = \phi E(Z_{t-1}) \\ = \phi E(Z_t)$$

por tanto, $\mu = 0$ sin importar ϕ .

Además, recordemos que la *varianza* también debe ser constante:

$$\begin{aligned} \text{Var}(Z_t) &= E(Z_t^2) \\ &= E(\phi Z_{t-1} + e_t)^2 \\ &= E(\phi^2 Z_{t-1}^2 + 2\phi Z_{t-1} e_t + E(e_t^2)) \\ &= \phi^2 \text{Var}(Z_{t-1}) + 0 + \text{Var } e_t \end{aligned}$$

si $\text{Var}(Z_{t-1}) = \text{Var}(Z_t) = \gamma_0$ entonces

$$\gamma_0 = \frac{\sigma^2}{1 - \phi^2}$$

por tanto $\phi^2 < 1$ y $-1 < \phi < 1$ a esta condición se le conoce como *condición de estacionaridad*. Ahora analizaremos la función de autocorrelación:

Sea

$$\begin{aligned} \gamma_1 &= \text{Cov}(Z_t, Z_{t-1}) \\ &= E(Z_t Z_{t-1}) \\ \gamma_1 &= \phi \text{Var}(Z_{t-1}) + \text{Cov}(e_t, Z_{t-1}) \\ &= \phi \text{Var}(Z_{t-1}) \\ &= \phi \gamma_0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \gamma_2 &= \phi_1 \gamma_1 \\ &= \phi_1^2 \gamma_0 \\ &\vdots \\ \gamma_k &= \phi_1 \gamma_{k-1} = \phi_1^k \gamma_0 \\ \rho_k &= \frac{\gamma_k}{\gamma_0} = \phi_1^k, \quad k > 0 \end{aligned}$$

Así observamos que la función de autocorrelación depende únicamente de k ; además, esto indica que, conforme $k > 0$ crece, la función de autocorrelación (FAC) tiende a cero, con decaimiento del tipo exponencial cuando $0 < \phi < 1$ y con signos alternados cuando $-1 < \phi < 0$.

◆ Función de memoria

Otra posible representación del proceso autorregresivo, en términos de choques aleatorios que corresponde al proceso AR(1) es:

$$Z_t = (1 - \phi B)^{-1} e_t = e_t + \phi e_{t-1} + \phi^2 e_{t-2} + \phi^3 e_{t-3} + \dots$$

Entonces AR(1) se dice que tiene memoria infinita pero, si el proceso cumple con la condición de estacionaridad, $|\phi| < 1$, el efecto se disipa al alejarse de t . Se define al coeficiente de memoria con retraso k como el coeficiente de e_{t-k} .

◆ Modelos autorregresivos de orden mayor

Cuando $p > 1$; es decir, cuando Z_t depende de dos o más valores anteriores, el modelo será un AR(p):

$$Z_t = \phi_1 Z_{t-1} + \phi_2 Z_{t-2} + \dots + \phi_p Z_{t-p} + e_t$$

Una forma de verificar el supuesto de estacionaridad es a través de las autocorrelaciones; para ello se hace uso de las ecuaciones de Yule-Walker (llamadas así en honor a Yule, 1927 y Walker, 1931), correspondientes al proceso AR(p), las cuales están dadas por:

$$\begin{aligned} \rho_1 &= \phi_1 + \phi_2 \rho_1 + \dots + \phi_p \rho_{p-2} \\ \rho_2 &= \phi_1 \rho_1 + \phi_2 + \dots + \phi_p \rho_{p-2} \\ &\vdots \\ \rho_p &= \phi_1 \rho_{p-1} + \phi_2 \rho_{p-2} + \dots + \phi_p \end{aligned}$$

donde se obtienen los valores de las primeras p autocorrelaciones en función de los parámetros autorregresivos $\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_p$; las demás autocorrelaciones pueden obtenerse de la relación

$$\rho_k = \phi_1 \rho_{k-1} + \phi_2 \rho_{k-2} + \dots + \phi_p \rho_{k-p} \quad k \geq p + 1$$

• *Modelos de promedios móviles (MA)*

Los modelos de promedios o medias móviles fueron introducidos por Yule (1926) y Slutsky (1927); la idea básica de estos modelos consiste en representar a un proceso estocástico $\{Z_t\}$, cuyos valores pueden ser dependientes unos de otros, como una suma finita ponderada de choques aleatorios independientes $\{e_t\}$. Se han llamado promedios móviles por la similitud con este tipo de suavizamiento. El valor actual de Z_t puede representarse, por ejemplo, como el valor del choque aleatorio actual y el valor anterior.

$$Z_t = e_t - \theta_1 e_{t-1}$$

donde θ_1 describe el efecto del choque aleatorio anterior a Z_t .

Al igual que en los modelos AR, se presenta el modelo de medias móviles de primer orden, MA(1):

$$Z_t = e_t - \theta_1 e_{t-1}$$

con $e_t \sim N(0, \sigma^2)$, $E(e_t - e_s) = 0$

Debido a que los modelos deben estimarse con un número finito de puntos, es importante que el proceso se represente con el menor número posible de parámetros. A ello se le llama principio de PARSIMONIA, como anteriormente se mencionó, este principio se basa en encontrar el modelo más representativo con el mínimo de parámetros; es decir, se busca la máxima sencillez.

A continuación se presenta la equivalencia entre un proceso MA(1) y un AR(∞) donde se demuestra como un proceso MA reduce el número de parámetros.

$$\begin{aligned} e_t &= Z_t + \theta_1 e_{t-1} \\ e_{t-1} &= Z_{t-1} + \theta_1 e_{t-2} \end{aligned}$$

por tanto se tiene que $Z_t = -\theta_1 Z_{t-1} - \theta_1^2 Z_{t-2} + e_t$ y así sucesivamente

$$Z_t = -\theta_1 Z_{t-1} - \theta_1^2 Z_{t-2} - \theta_1^3 Z_{t-3} - \dots + e_t$$

esta ecuación recibe el nombre de forma invertida del proceso de promedios móviles y representa un proceso con un número infinito de términos autorregresivos, AR(∞).

◆ Condición de invertibilidad

Así como se tienen restricciones en los parámetros de los modelos AR (condición de estacionaridad), también se tienen para los modelos MA. La media y la varianza en este tipo de modelos no impone restricciones en cuanto a estacionaridad:

$$\begin{aligned} E(Z_t) &= E(e_t - \theta_1 e_{t-1}) = 0 \\ \text{Var}(Z_t) &= E[(e_t - \theta_1 e_{t-1})^2] = (1 + \theta_1^2) \sigma_e^2 \end{aligned}$$

las autocovarianzas están dadas por

$$\gamma_k = E[(e_t - a_{t-1})(e_{t-k} - a_{t-k-1})] = \begin{cases} -\theta\sigma^2 & \text{si } k = 1 \\ 0 & \text{si } k \geq 2 \end{cases}$$

de donde se sigue que la FAC es

$$\rho_k = \begin{cases} -\theta & \text{si } k = 1 \\ 0 & \text{si } k \geq 2 \end{cases}$$

de modo que la autocorrelación también es constante y solo depende de k .

Las condiciones de estacionaridad no imponen restricciones directamente sobre θ ; pero debido a que se puede transformar la ecuación de choques aleatorios en una ecuación de forma invertida; es decir autorregresiva, donde se obtiene un $AR(\infty)$, es necesario obtener coeficientes decrecientes donde $|\theta| < 1$. En general, cuando un proceso se puede expresar a través de un modelo AR, se dirá que dicho proceso es invertible.

La importancia del concepto de invertibilidad radica en que todo proceso invertible está determinado de manera única por su FAC.

◆ Función de memoria

El hecho de que las autocorrelaciones para retrasos mayores que un periodo sean cero, indica que el proceso "no recuerda" más allá del periodo anterior; es decir, su memoria se limita a un solo periodo. Al momento " t " el proceso sufre el efecto completo de e_t , pero al tiempo " $t+1$ " el efecto es proporcional a $-\theta$.

◆ Modelos de promedios móviles de orden mayor $MA(q)$

Se dice que un proceso estocástico sigue un esquema de promedios móviles de orden $q \geq 1$ si se puede representar a través de:

$$Z_t = e_t - \theta_1 e_{t-1} - \theta_2 e_{t-2} - \dots - \theta_q e_{t-q}$$

donde $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_q$ son los parámetros de promedios móviles y $\{e_t\}$ es un proceso de ruido blanco con media cero y varianza constante σ_e^2 . Como ya se mencionó, todo proceso MA es estacionario. En las siguientes fórmulas se observa que la media, varianza y covarianzas del proceso $MA(q)$ no dependen del tiempo:

$$E(Z_t) = 0$$

$$\gamma_0 = (1 + \theta_1^2 + \theta_2^2 + \dots + \theta_q^2) \sigma_e^2$$

$$\gamma_k = \begin{cases} (-\theta_k + \theta_1 \theta_{k-1} + \dots + \theta_{q-k} \theta_q) \sigma_e^2 & \text{si } k = 1, \dots, q \\ 0 & \text{si } k \geq q+1 \end{cases}$$

4.2 Metodología de series de tiempo Box-Jenkins

ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA

para que esta expresión sea válida en general, se define $\theta_0 = \theta_{q+1} = \theta_{q+2} = \dots = 0$. De aquí se obtiene la función de autocorrelación

$$\rho_k = \begin{cases} \frac{-\theta_k + \theta_1\theta_{k+1} + \dots + \theta_{q-k}\theta_q}{1 + \theta_1^2 + \theta_2^2 + \dots + \theta_q^2}, & \text{si } k = 1, \dots, q \\ 0 & \text{si } k \geq q + 1 \end{cases}$$

donde el proceso MA(q) tiene memoria limitada a q periodos.

⊙ Modelos combinados autorregresivos y de promedios móviles (ARMA)

Una generalización de los modelos AR y MA, consiste en combinar ambas clases de modelos, así se obtendrán los modelos autorregresivos y de promedios móviles (ARMA); el proceso ARMA(p, q) se representa a través de

$$\phi(B)Z_t = \theta(B)e_t,$$

donde $\phi(B)$ y $\theta(B)$ son polinomios de retraso de orden p y q respectivamente y $\{e_t\}$ es un proceso de ruido blanco; es decir,

$$Z_t = \phi_1 Z_{t-1} + \phi_2 Z_{t-2} + \dots + \phi_p Z_{t-p} + e_t - \theta_1 e_{t-1} - \theta_2 e_{t-2} - \dots - \theta_q e_{t-q}$$

este modelo, tendrá condiciones de estacionaridad como de invertibilidad y su función de autocorrelación será decreciente infinita, donde el efecto de la parte de promedios móviles desaparecerá después de q periodos.

⊙ Modelos autorregresivos e integrados de promedios móviles (ARIMA)

Cuando se aprecia una tendencia en el comportamiento de la serie (normalmente de carácter polinomial), puede eliminarse aplicando el *operador diferencia*, lo cual da origen a los modelos ARIMA (p, d, q), estos modelos son una generalización de los modelos ARMA. La toma sucesiva de diferencias de la variable original, permite gran flexibilidad de representación a los modelos ARIMA, debido que al aplicar el operador diferencia ∇^d se elimina una posible tendencia polinomial de orden d , presente en la serie que se analiza.

Si el proceso original $\{Z_t\}$ carece de estacionaridad causado por la tendencia polinomial no determinística (a la que se le denomina no estacionaridad homogénea) entonces se podrá construir el proceso estacionario $\{W_t\}$, donde

$$W_t = \nabla^d Z_t \quad \text{para todo } t$$

Para esta nueva serie se obtiene un modelo ARMA: $\phi(B)W_t = \theta(B)e_t$, el cual es equivalente al modelo ARIMA

$$\phi(B)\nabla^d Z_t = \theta(B)e_t, \quad d \geq 1$$

El término "integrado" se debe a que Z_t se obtiene de la relación $W_t = \nabla^d Z_t$, a través de la operación inversa del operador ∇^d , donde se "integrarán" o sumarán los valores para reconstruir la variable original; por ejemplo, el inverso del operador ∇ es

$$\nabla^{-1} = (1 - B)^{-1} = 1 + B + B^2 + B^3 + \dots$$

dado que $W_t = \nabla Z_t$, se tendrá

$$Z_t = \nabla^{-1} W_t = W_t + W_{t-1} + W_{t-2} + \dots$$

Un modelo ARIMA (p, d, q) , indica que consta de un polinomio autorregresivo de orden p , de una diferencia de orden d (las necesarias para hacer la serie estacionaria) y de un polinomio de promedios móviles de orden q . Así, el modelo $\phi(B)\nabla^d Z_t = \theta(B)e_t$, también podrá expresarse como

$$W_t - \phi_1 W_{t-1} - \dots - \phi_p W_{t-p} = e_t - \theta_1 e_{t-1} - \dots - \theta_q e_{t-q}$$

donde:

$$\phi(B) = 1 - \phi_1 B - \dots - \phi_p B^p$$

$$\theta(B) = 1 - \theta_1 B - \dots - \theta_q B^q$$

$$W_t = \begin{cases} \nabla^d Z_t, & d > 0 \\ Z_t, & d = 0 \end{cases}$$

En ocasiones se requiere un término constante en el modelo, denotado por δ

$$\phi(B)W_t = \theta(B)e_t + \delta$$

donde δ no es necesariamente el promedio de los datos, debido a que:

$$E(1 - \phi_1 B - \dots - \phi_p B^p) = (1 - \phi_1 - \dots - \phi_p) E(W_t)$$

$$E(\theta(B)e_t) = 0$$

$$E(W_t) = \frac{\delta}{1 - \phi_1 - \dots - \phi_p}$$

δ sólo es el promedio cuando el modelo es exclusivamente de tipo MA.

• Empleo de la función de autocorrelación (FAC)

Una vez que se ha determinado la transformada apropiada así como el número de diferencias (en caso de requerirse) para obtener una serie estacionaria; el siguiente paso en la etapa de identificación es el asociar la FAC (función de autocorrelación) muestral con un proceso del tipo ARIMA.

La FAC muestral está afectada por variaciones muestrales, por ello no es tan fácil distinguir la apariencia real de las autocorrelaciones. El criterio para esta identificación lo proporcionó Bartlett (1946) al obtener expresiones apropiadas para las varianzas y covarianzas de las autocorrelaciones muestrales:

$$\begin{aligned} \text{Var}(r_k) &= \frac{1}{N} \sum_{j=-\infty}^{\infty} (\rho_j^2 + \rho_j + k\rho_{j-k} - 4\rho_k\rho_j\rho_{j-k} + 2\rho_j^2\rho_k^2) \\ \text{Cov}(r_k, r_{k+h}) &= \frac{1}{N} \sum_{j=-\infty}^{\infty} \rho_j\rho_{j+h} \end{aligned}$$

si el proceso es $MA(q)$, y las autocorrelaciones para retrasos mayores que q son cero, la expresión para la varianza será:

$$\text{Var}(r_k) = \frac{1}{N-d} \left(1 + 2 \sum_{j=1}^q \rho_j^2 \right) \quad \text{para } k > q$$

esta expresión se obtendrá siempre que se cumpla el supuesto de que $\rho_k = 0$ para $k > q$. Es importante notar el descenso de la $\text{Var}(r_k)$ conforme el tamaño de la muestra, N , crece. En la práctica, dicha fórmula se utiliza con ρ_j sustituida por su valor estimado r_j , $j = 1, \dots, q$, y así se obtiene una estimación válida para muestras grandes ($N \geq 50$), de la varianza de r_k , para $k > q$. La expresión correspondiente a la $\text{Var}(r_k)$ tiene como objetivo determinar si una autocorrelación es estadísticamente significativa, así se pueden construir pruebas de hipótesis que permitan probar si una autocorrelación se puede considerar igual a cero.

Se puede construir un estadístico (distribuido asintóticamente como t de student), para probar la hipótesis:

$$\begin{aligned} H_0: \rho_k &= 0 \\ H_a: |\rho_k| &> 0 \\ t \quad r_k &= \frac{r_k}{s_{r_k}} \end{aligned}$$

considerando que el valor del estadístico t de student, para muestras grandes es 1.96 con $\alpha = 0.05$, se usa la regla de decisión:

$$\rho_k = 0 \text{ si } |r_k| \leq 1.96 \approx 2$$

En la práctica, se dice que una autocorrelación r_k es significativamente distinta de cero si

$$|r_k| > 2 \sqrt{\frac{1}{N-d} \left(1 + 2 \sum_{j=1}^q \rho_j^2 \right)} \quad \text{para } k > q$$

• Empleo de la función de autocorrelación parcial (FACP)

La identificación de un proceso de promedios móviles puro se lleva a cabo a través del empleo de la FAC muestral y de la aproximación para la varianza de las autocorrelaciones. Con un proceso autorregresivo, la identificación del

modelo a partir de la FAC muestral no es tan simple. En general, el orden de un proceso AR(p) no es posible detectarlo con el sólo uso de la FAC muestral. Por ello, se requiere de otro instrumento que permita efectuar la identificación de procesos AR de forma clara, dicho instrumento lo constituye la *función de autocorrelación parcial* (FACP), la cual adquiere determinadas características que dependen del orden del proceso y del tipo de parámetros involucrados.

Con el fin de utilizar una notación compacta y general para las autocorrelaciones parciales de procesos AR, se escribirá ρ_{kk} para denotar al k -ésimo coeficiente del modelo AR(p) de manera que la FACP estará dada por la ecuación de valores $\{\rho_{kk}\}$.

De acuerdo a Durbin (1960), las FAP's muestrales, pueden estimarse utilizando las ecuaciones de Yule-Walker:

$$\hat{\rho}_{kk} = r_{kk} = \begin{cases} r_1 & k = 1 \\ r_k - \sum_{j=1}^{k-1} r_{k-1,j} r_{k-j} & k = 2, 3, \dots \\ 1 - \sum_{j=1}^{k-1} r_{k-1,j} r_j & \end{cases}$$

donde $r_{kj} = r_{k-1,j} - r_{kk} r_{k-1,k-j}$ $j = 1, 2, \dots, k-1$.

En realidad, el método consiste en sustituir las FAC's estimadas en las ecuaciones de Yule-Walker, y despejar el k -ésimo coeficiente del conjunto de ecuaciones correspondiente al modelo con k parámetros autorregresivos. Recordemos que la FAC estimada está sujeta a errores muestrales, así que para decidir si ρ_{kk} puede o no ser considerada como cero, se requiere cuantificar la variación muestral de su estimador $\hat{\rho}_{kk}$.

Una aproximación sugerida por Quenouille (1949), indica que si el proceso es AR(p), las autocorrelaciones parciales muestrales se distribuyen de manera independiente con media $E(r_{kk}) = \rho_{kk}$ y

$$Var(r_{kk}) \approx \frac{1}{N-d} \text{ para } k > p$$

donde $N-d$ es el número de observaciones disponibles y p representa las primeras p autocorrelaciones parciales que se suponen distintas de cero. De nuevo, se obtiene el estadístico:

$$t. r_{kk} = \frac{r_{kk}}{1/(n)^{1/2}}$$

para probar la hipótesis:

$$\begin{aligned} H_0: \rho_{kk} &= 0 \\ H_a: |\rho_{kk}| &> 0 \end{aligned}$$

entonces, $\rho_{kk} = 0$ si $|t_{r_{kk}}| \leq 1.96 \approx 2$.

Se toma la decisión con base en el intervalo de confianza:

$$\pm 2\sqrt{\text{Var}(r_{ik})} = \pm \frac{2}{\sqrt{N-d}} \quad \text{para } i > p$$

si el intervalo de r_{ik} se encuentra fuera del intervalo definido anteriormente, entonces se establece que ρ_{ik} es distinto de cero (al nivel de significancia del 5%).

Es importante mencionar que mientras un proceso $AR(p)$ tiene sólo las primeras p autocorrelaciones parciales distintas de cero, un proceso $MA(q)$ (el cual es equivalente a un proceso $AR(\infty)$) tendrá todas sus autocorrelaciones parciales distintas de cero, aunque la FACP muestre convergencia a cero. De manera similar, un proceso $ARMA(p, q)$ tendrá asociada una FACP que no desaparecerá después de un número finito de retrasos.

Comportamientos típicos de la FAC y la FACP

En general, la etapa de identificación se basa en las características de la FAC y la FACP; las cuales se resumen en el siguiente cuadro para una serie estacionaria $W_t = \nabla^d T(Z_t)$.

Proceso	Comportamiento de la FAC y FACP para procesos AR, MA y ARMA	
	FAC	FACP
$AR(p)$	Convergencia a cero, con comportamiento establecido por la ecuación $\phi(B)\rho_k = 0$ para $k \geq p$.	Solamente las primeras p autocorrelaciones parciales son diferentes de cero.
$MA(q)$	Sólo las primeras q autocorrelaciones son distintas de cero.	Sucesión infinita convergente a cero
$ARMA(p, q)$	Comportamiento irregular de las primeras q autocorrelaciones y después convergencia a cero de acuerdo con $\phi(B)\rho_k = 0$, para $k > q$.	Sucesión infinita convergente a cero.

4.2.8 Estimación de parámetros

Una vez conocido el orden para cada uno de los polinomios, autorregresivo y de promedios móviles p y q , así como el grado de diferenciación d , se postula que el modelo

$$\phi(B)\nabla^d T(Z_t) = \theta(B)e_t$$

resulta adecuado para representar a la serie $\{T(Z_t)\}$ y por tanto se requiere asignar valores a $\phi_1, \dots, \phi_p, \theta_1, \dots, \theta_q$, que minimicen la suma de los cuadrados de las diferencias entre la serie real $Z_t = \nabla^d Y_t$ y la serie ajustada W_t ; es decir:

4.2 Metodología de series de tiempo Box-Jenkins

$$e_t = \theta^{-1}(B)\phi(B)W_t,$$

donde esta ecuación representará el valor de los residuales, al sustituir los valores estimados de los parámetros. La estimación se realiza a través de un método estadístico apropiado; entre ellos tenemos al método de momentos, el método de máxima verosimilitud o el método de mínimos cuadrados. En este trabajo se hace uso del método de máxima verosimilitud.

➤ Método de máxima verosimilitud

Podemos partir del supuesto de que $\{e_t\}$ es un proceso de ruido blanco con distribución normal, media cero y varianza σ_e^2 ; así, se obtiene la función de densidad conjunta de los errores aleatorios

$$f(e_{d+p+1}, e_{d+p+2}, \dots, e_N) = (2\pi)^{-(N-d-p)/2} \sigma_e^{-N+d+p} \exp\left\{-\sum_{i=d+p+1}^N \frac{e_i^2}{2\sigma_e^2}\right\}$$

considerando a la variable

$$W_t = \nabla^d T(Z_t)$$

la expresión $\phi(B)\nabla^d T(Z_t) = \theta(B)e_t$, implica que

$$e_t = W_t - \phi_1 W_{t-1} - \dots - \phi_p W_{t-p} + \theta_1 e_{t-1} + \dots + \theta_q e_{t-q}$$

lo cual permite obtener la función de densidad conjunta de $W_{d+p+1}, W_{d+p+2}, \dots, W_N$, por lo que obtenemos

$$\begin{aligned} f(W_{d+p+1}, W_{d+p+2}, \dots, W_N) &= f(e_{d+p+1}, e_{d+p+2}, \dots, e_N) \prod_{i=d+p+1}^N \left| \frac{dW_i}{de_i} \right| \\ &= (2\pi)^{-(N-d-p)/2} \sigma_e^{-N+d+p} \exp\left\{-\sum_{i=d+p+1}^N \frac{(W_i - \phi_1 W_{i-1} - \dots - \phi_p W_{i-p} + \theta_1 e_{i-1} + \dots + \theta_q e_{i-q})^2}{2\sigma_e^2}\right\} \end{aligned}$$

Esta función de densidad permite calcular probabilidades de la distribución normal multivariada una vez que se conoce a los parámetros $\hat{\phi} = (\hat{\phi}_1, \dots, \hat{\phi}_p)$, $\hat{\theta} = (\hat{\theta}_1, \dots, \hat{\theta}_q)$ y σ_e^2 . Inicialmente tenemos que $W = (W_{d+p+1}, W_{d+p+2}, \dots, W_N)$ se conoce y $\hat{\phi}, \hat{\theta}$ y σ_e^2 se desconoce, por ello se considera que la función $f(W_{d+p+1}, W_{d+p+2}, \dots, W_N)$, es una función de verosimilitud de los parámetros, la cual depende del vector de observaciones W , esto es

$$L(\hat{\phi}, \hat{\theta}, \sigma_e^2 | W) = (2\pi)^{-(N-d-p)/2} \sigma_e^{-N+d+p} \exp\left\{\frac{-S(\hat{\phi}, \hat{\theta})}{2\sigma_e^2}\right\}$$

con

$$S(\hat{\phi}, \hat{\theta}) = \sum_{i=d+p+1}^N e_i^2$$

$$= \sum_{i=d+p+1}^N (W_i - \phi_1 W_{i-1} - \dots - \phi_p W_{i-p} + \theta_1 e_{i-1} + \dots + \theta_q e_{i-q})^2$$

esta función de verosimilitud debe maximizarse con respecto a los parámetros, para obtener la representación $\phi(B)\nabla^d T(Z_i) = \theta(B)e$, más apropiada de la serie $\{W_i\}$ en estudio.

Para maximizar $L(\hat{\phi}, \hat{\theta}, \sigma_e^2 | W)$, primero se seleccionan los valores $\hat{\phi}$ y $\hat{\theta}$ que minimicen $S(\hat{\phi}, \hat{\theta})$ y posteriormente se determina el estimador $\hat{\sigma}_e^2$, el cual está dado por

$$\hat{\sigma}_e^2 = \frac{S(\hat{\phi}, \hat{\theta})}{N - d - p - q - 1}$$

La estimación de $S(\hat{\phi}, \hat{\theta})$ se dificulta al presentarse términos correspondientes a promedios móviles debido a que se obtienen ecuaciones no lineales para $\hat{\theta}$, como se muestra en la ecuación correspondiente a e_i , la cual no tienen solución analítica; es por ello que deberá usarse algún procedimiento numérico de estimación no lineal para minimizar

$$\hat{\phi} = (\hat{\phi}_1, \dots, \hat{\phi}_p)$$

$$\hat{\theta} = (\hat{\theta}_1, \dots, \hat{\theta}_q)$$

además, el primer error en la serie de tiempo, e_1 , depende de valores pasados no observados $W_0, W_{-1}, \dots, W_{-p+1}$ y $e_0, e_{-1}, \dots, e_{-q+1}$. De modo que debe usarse algún método para inicializar la serie, antes de aplicar el proceso de estimación no lineal.

Box y Jenkins sugieren un método de estimación no lineal para $\hat{\phi}$ y $\hat{\theta}$ basado en el algoritmo de Marquardt (1963), a través del cual se obtienen no solo estimaciones puntuales de los parámetros, sino también intervalos de confianza; este método, tiene como fundamento un desarrollo en serie de Taylor que linealiza a

$$e_i = W_i - \phi_1 W_{i-1} - \dots - \phi_p W_{i-p} + \theta_1 e_{i-1} + \dots + \theta_q e_{i-q}$$

condicionada a que se conocen los valores muestrales W y los valores iniciales de los parámetros $\hat{\phi}$ y $\hat{\theta}$. Los valores iniciales se corregirán iterativamente con la finalidad de minimizar $S(\hat{\phi}, \hat{\theta})$; el proceso iterativo termina al lograrse la "convergencia"; es decir, si el cambio relativo en cada parámetro no es mayor que un valor preestablecido.

• Valores iniciales de la serie

Debido a que se cuenta con diversos programas de estimación no lineal para modelos de Box-Jenkins, prácticamente lo que se requiere son los valores iniciales para los parámetros. Cuando el modelo identificado es AR(p), estos valores pueden obtenerse como solución del sistema de ecuaciones de Yule-Walker

4.2 Metodología de series de tiempo Box-Jenkins

$$\begin{aligned}
 r_1 &= \hat{\alpha}_1 + \hat{\alpha}_2 r_1 + \dots + \hat{\phi}_p r_{p-1} \\
 r_2 &= \hat{\alpha}_1 r_1 + \hat{\alpha}_2 + \dots + \hat{\phi}_p r_{p-2} \\
 &\vdots \\
 r_p &= \hat{\alpha}_1 r_{p-1} + \hat{\alpha}_2 r_{p-2} + \dots + \hat{\phi}_p
 \end{aligned}$$

Quando se tiene un modelo del tipo $MA(q)$, las relaciones entre los parámetros $\theta_1, \dots, \theta_q$ y las autocorrelaciones ρ_1, ρ_2, \dots son no lineales por lo que deberá resolverse el sistema de ecuaciones no lineal

$$\begin{aligned}
 r_1 &= \frac{-\hat{\theta}_1 + \hat{\alpha}_1 \hat{\theta}_2 + \dots + \hat{\theta}_{q-1} \hat{\theta}_q}{1 + \hat{\alpha}_1^2 + \hat{\alpha}_2^2 + \dots + \hat{\theta}_q^2} \\
 r_2 &= \frac{-\hat{\theta}_2 + \hat{\alpha}_1 \hat{\theta}_3 + \dots + \hat{\theta}_{q-2} \hat{\theta}_q}{1 + \hat{\alpha}_1^2 + \hat{\alpha}_2^2 + \dots + \hat{\theta}_q^2} \\
 &\vdots \\
 r_q &= \frac{-\hat{\theta}_q}{1 + \hat{\alpha}_1^2 + \hat{\alpha}_2^2 + \dots + \hat{\theta}_q^2}
 \end{aligned}$$

para así, obtener los estimadores iniciales $\hat{\theta}_1, \hat{\theta}_2, \dots, \hat{\theta}_q$. Este sistema tiene múltiples soluciones, así que se elegirá la que satisfaga las condiciones de invertibilidad.

Por último, con modelos $ARMA(p, q)$ se presentan tanto ecuaciones lineales como no lineales para obtener los valores iniciales de los parámetros; es decir, debido a que en un proceso $ARMA(p, q)$ se tiene $\phi(B)\rho_k = 0$ para $k > q$, entonces tendremos el siguiente sistema

$$\begin{aligned}
 r_{q+1} &= \hat{\alpha}_1 r_q + \hat{\alpha}_2 r_{q-1} + \dots + \hat{\phi}_p r_{q-p+1} \\
 r_{q+2} &= \hat{\alpha}_1 r_{q+1} + \hat{\alpha}_2 r_q + \dots + \hat{\phi}_p r_{q-p+2} \\
 &\vdots \\
 r_{q+p} &= \hat{\alpha}_1 r_{q+p-1} + \hat{\alpha}_2 r_{q+p-2} + \dots + \hat{\phi}_p r_q
 \end{aligned}$$

el cual, proporciona los estimadores iniciales $\hat{\alpha}_1, \hat{\alpha}_2, \dots, \hat{\phi}_p$; estos, deberán sustituirse posteriormente en las ecuaciones de las primeras q autocorrelaciones muestrales, y así determinar los valores iniciales $\hat{\theta}_1, \hat{\theta}_2, \dots, \hat{\theta}_q$; donde la solución correspondiente al sistema de ecuaciones de estos últimos valores, deberán satisfacer la condición de invertibilidad.

4.2.9 Verificación del modelo

En esta etapa, se supone la inexistencia de un modelo óptimo, debido a que los modelos son simples representaciones simplificadas de la realidad. Una vez que se tienen varios modelos tentativos, habrá que elegirse aquel que presente el mejor ajuste; es decir, aquel que presente menos fallas, las cuales se miden con

variaciones a los supuestos que fundamentan el modelo. El modelo se debe mejorar hasta donde sea posible, sin olvidar el principio de parsimonia.

Existen algunas pruebas de verificación o diagnóstico que pueden usarse para evaluar el ajuste del modelo:

- Análisis de estacionaridad
- Análisis de residuales
- Modelos sobre-especificados
- Modelos sub-especificado

• Análisis de estacionaridad

Es importante tener cuidado de no sobrediferenciar al modelo; debido a que se generará un modelo más complicado, lo cual no va de acuerdo con el principio de parsimonia. Cuando se trabaja con un proceso no estacionario, la selección del modelo no funcionará por la intervención de las suposiciones iniciales para identificar un modelo de tipo ARIMA.

• Análisis de residuales

Este análisis es una de las formas más claras y simples para detectar violaciones a los supuestos de los modelos; donde, como residual se considera la parte de las observaciones que no pueden ser explicadas por el modelo. Los residuales para el modelo $\phi(B)W_t = \theta(B)e_t$, se definen a través de

$$\begin{aligned}\hat{e}_t &= [\hat{\theta}(B)]^{-1} \hat{\phi}(B)W_t \\ &= \hat{\pi}(B)W_t\end{aligned}$$

donde

$$W_t = \hat{e}_t + \hat{\pi}_1 W_{t-1} + \hat{\pi}_2 W_{t-2} + \dots$$

así, la estimación de W_t que puede hacerse con base en el polinomio estimado $\hat{\pi}(B)$ y las observaciones hasta el tiempo $t-1$, está dado por

$$\hat{W}_t = \hat{\pi}_1 \hat{W}_{t-1} + \hat{\pi}_2 \hat{W}_{t-2} \dots$$

por lo que se obtiene que

$$\hat{e}_t = W_t - \hat{W}_t;$$

es decir, los residuales miden la discrepancia entre los valores observados y los valores estimados por el modelo. Cuando el tamaño de muestra es grande, los errores aleatorios y los residuales (que también son variables aleatorias) son esencialmente iguales; por ello, al analizar los residuales observados $\{\hat{e}_t\}$ se analiza básicamente lo que debería de ser una realización del proceso de ruido blanco $\{e_t\}$.

Así es como se forman supuestos acerca del proceso $\{e_t\}$, los cuales pueden verificarse y posiblemente corregirse.

- ◆ *Supuesto 1. $\{e_t\}$ tiene media cero.*

Verificación. Calcúlese la media aritmética y la desviación estándar muestral de los residuales

$$m(\hat{\varepsilon}) = \frac{\sum_{i=1}^N \hat{\varepsilon}_i}{N-d-p} \quad \text{y} \quad \hat{\sigma}_\varepsilon = \sqrt{\frac{[\hat{\varepsilon}_i - m(\hat{\varepsilon})]^2}{N-d-p-q}}$$

donde $r' = d + p + 1$, para construir el cociente $\frac{m(\hat{\varepsilon})}{\hat{\sigma}_\varepsilon} \sqrt{N-d-p}$. Si el valor absoluto de dicho cociente es menor que dos, se aceptará que la media del proceso es cero; y si sucede que el valor absoluto del cociente es mayor o igual que dos, entonces la media de los residuales es significativamente distinta de cero, lo cual implica que el supuesto se ha violado.

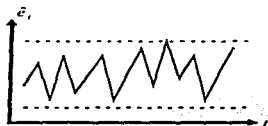
Corrección. Si la media de los residuales es significativamente distinta de cero, implica que existe una parte determinística o semideterminística en $\{\hat{\varepsilon}_i\}$ que no ha sido considerada por el modelo.

◆ **Supuesto 2.** $\{e_i\}$ tiene varianza constante.

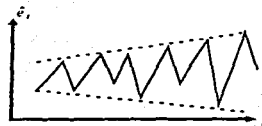
Verificación. Se deben graficar los residuales contra el tiempo para observar si la varianza parece o no constante. Esta verificación es válida debido a que solamente las violaciones muy notorias en este supuesto serán las que realmente lleguen a causar problemas.

Corrección. Si la varianza sigue algún patrón de crecimiento o decrecimiento es posible aplicar una transformación de potencia para estabilizar la varianza de la serie.

Comportamientos típicos de la varianza residual



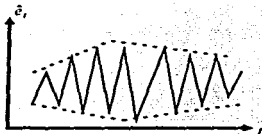
Varianza constante



Varianza creciente



Varianza decreciente



Varianza no-monótona

Fuente: Guerrero Víctor M. Análisis de series de tiempo económicas. Universidad Autónoma Metropolitana. México 1991. Pág. 138.

- *Supuesto 3. Las variables aleatorias $\{e_t\}$ son mutuamente independientes.*

Verificación. La Independencia entre las variables aleatorias $\{e_t\}$ implica no autocorrelación, por lo que se requiere que $\rho_k(e) = 0$ para todo $k \neq 0$, lo cual se puede verificar calculando, primero, la FAC muestral de los residuales $\{r_k(\hat{\theta})\}$, que en el supuesto de que su media es cero, estará dada por

$$r_k(\hat{\theta}) = \frac{\sum_{t'=t-k}^{N-1} \hat{e}_t \hat{e}_{t+k}}{\sum_{t'=1}^N \hat{e}_t^2}, \quad k = 1, 2, \dots$$

con $t' = d + p + 1$, posteriormente se deberá :

- i) Estimar la desviación estándar de $r_k(\hat{\theta})$ como

$$\sqrt{\hat{V}ar[r_k(\hat{\theta})]} = \frac{1}{\sqrt{N-d-p}}$$

para determinar la significancia estadística individual de las autocorrelaciones de los residuales.

- ii) Calcular el estadístico Q de Box y Pierce (1979) para realizar una prueba de significancia conjunta (prueba "portmanteau") de k autocorrelaciones simultáneamente, con el estadístico

$$Q = (N - d - p) \sum_{k=1}^K r_k^2(\hat{\theta})$$

si K es grande ($K > 20$), sigue aproximadamente una distribución Ji-cuadrada con $K - p - q$ grados de libertad; así, el valor de Q deberá ser comparado con valores de tablas de Ji-cuadrada para efectuar la prueba de significancia.

Corrección. Si la verificación indica que las autocorrelaciones no son las correspondientes a un proceso de ruido blanco, entonces se supondrá que corresponden a un proceso ARMA en los residuales; lo que sugerirá modificaciones al modelo originalmente identificado para $\{W_t\}$.

- *Supuesto 4. $\{e_t\}$ tiene una distribución normal, para toda t .*

Verificación. i) En una distribución normal, aproximadamente el 95% de las observaciones deben localizarse dentro de un intervalo que se encuentra dos desviaciones estándar por debajo y por arriba de la media; si la media de los residuales es cero, se esperará que a lo más un total de $N - d - p/20$ observaciones se localizarán fuera del intervalo $(-2\hat{\sigma}_e, 2\hat{\sigma}_e)$.

- ii) Al realizar un histograma de los residuales, se puede visualizar la forma de su distribución, donde podría detectarse la asimetría de la distribución.

Corrección. Es importante mencionar que el supuesto de normalidad se debe cumplir para los errores aleatorios $\{e_t\}$, pero no exactamente para los residuales $\{\hat{e}_t\}$; por esta razón se pueden esperar pequeñas violaciones a este supuesto; sin embargo, si estas violaciones son muy notorias, podría aplicarse una transformación a la serie original.

♦ **Supuesto 5.** *Implícitamente se ha supuesto que no existen observaciones ajenas a la serie en estudio.*

Verificación. La gráfica de los residuales contra el tiempo otorga una visión clara de la ocurrencia de observaciones irregulares. Se pueden considerar como "sospechosas" a las observaciones cuyos residuales estén fuera del intervalo de $(-3\hat{\sigma}_e, 3\hat{\sigma}_e)$.

Corrección. Es importante investigar la causa de tal observación, debido a que esta podría deberse a un cambio estructural en el comportamiento del fenómeno, causado quizá por una "intervención" exógena a la serie en estudio, lo cual requeriría de un análisis específico. Así mismo podría ocurrir que la observación sea causa de un error de captura.

⊕ **Modelos sobre-especificados: omitir parámetros**

Una herramienta importante sugerida por Box y Jenkins para verificar la bondad del modelo es aquella conocida con el nombre de sobreparametrización; esta, consiste en introducir parámetros extra en el modelo, previendo la posible necesidad de incluirlos, pero que en caso de no ser necesarios, se verían rechazados por la verificación del supuesto de parsimonia.

Los parámetros redundantes se pueden localizar a través del estadístico t de los coeficientes y el estimador de las correlaciones entre los estimadores. Un coeficiente es significativamente distinto de cero si el valor absoluto del estimador puntual es al menos dos veces el error estándar. También puede usarse el estadístico T del estimador

$$T = \frac{\pi_j - \pi_j}{\sigma_{\pi_j}}$$

para probar la hipótesis:

$$H_0 = \pi_j = 0$$

$$H_a = \pi_j \neq 0$$

donde π_j es el vector que representa los $p+q$ parámetros $(\hat{\phi}, \hat{\theta})$ estimados. Si el valor en tabla de T con nivel de significancia α y $(N-d-p-q)$ grados de libertad es mayor que T , hay evidencia de que el parámetro puede ser cero.

Un parámetro insignificante es una indicación de que el modelo puede estar sobre-especificado y por tanto, este deberá simplificarse.

Otra forma a través de la cual nos podemos dar cuenta de la existencia de parámetros extra en el modelo es aquella que considera al modelo *parsimonioso*.

Verificación. Lo que la parsimonia implica es que no se puede reducir el número de parámetros involucrados, debido a que todos son necesarios para explicar el comportamiento del fenómeno y no podrán ser considerados como iguales a cero. Para ello es necesario construir intervalos aproximadamente del 95% de confianza del tipo

$$\left(\hat{\theta} - 2\sqrt{\hat{V}ar(\hat{\theta})}, \hat{\theta} + 2\sqrt{\hat{V}ar(\hat{\theta})} \right)$$

para cada uno de los parámetros y así podremos observar si el valor cero se encuentra dentro del intervalo.

Corrección. Si el cero es un valor razonable para el parámetro en turno, entonces deberá cancelarse este parámetro y volver a estimar el modelo sin él.

☛ **Modelos sub-especificados : ajustar parámetros extra**

Para verificar que el modelo tentativo contiene el número apropiado de parámetros, puede incluirse un parámetro adicional con la finalidad de comprobar si con este incremento de parámetros se obtiene un mejor modelo.

Para finalizar la etapa de verificación del modelo, es importante mencionar que cuando se tienen varios modelos alternativos que satisfacen los supuestos anteriores, es decir que pasan la etapa de verificación adecuadamente, el modelo a elegir será aquel con menor desviación estándar residual ($\hat{\sigma}_e$). Para que la comparación en términos de desviación estándar residual sea válida, es requisito que la transformación empleada en los modelos sea la misma.

4.2.10 Análisis de series de tiempo estacionales

En muchas series de tiempo observadas a intervalos fijos, su comportamiento tiende a repetirse cada determinado tiempo. Por ello, se trata de aprovechar la correlación entre los periodos sucesivos. Por ejemplo, el número de usuarios del transporte metropolitano "metro", es similar de semana a semana. Los siguientes modelos tienen como objetivo reflejar estas características particulares de algunos procesos.

Una *serie estacional* es una serie de tiempo que, aparte de contener una tendencia (y/o ciclos) de larga duración, muestra fluctuaciones que se repitan durante un periodo fijo, quizá con cambios graduales a través del tiempo. Una característica fundamental de las series estacionales con observaciones mensuales, es la similitud del comportamiento entre observaciones mensuales para el mismo mes en años consecutivos.

Es importante notar que aún cuando la estacionalidad se considera en general como un fenómeno repetitivo anual, esto no indica que no pueda existir un patrón de comportamiento periódico con duración menor al año; por ello, se habla de un periodo estacional que comprende s observaciones contiguas.

☛ **Modelos estacionales autorregresivos (SAR)**

Este modelo se aplica si el valor actual de la serie W_t puede expresarse como una función lineal del valor de la serie s periodos atrás, W_{t-s} , y el choque aleatorio e_t ; es decir,

$$\begin{aligned} W_t - \Phi_s W_{t-s} &= e_t; \\ (1 - \Phi_s B^s) W_t &= e_t \end{aligned}$$

4.2 Metodología de series de tiempo Box-Jenkins

donde Φ_1 es el parámetro autorregresivo estacional. Este modelo puede expresarse como SAR(1) y el valor "s" se inferirá de acuerdo al proceso.

Utilizando la misma forma un SAR(P) se puede expresar a través de:

$$\Phi(B^s)W_t = e_t$$

donde:

$$\begin{aligned}\Phi(B^s) &= 1 - \Phi_1 B^s - \Phi_2 B^{2s} - \dots - \Phi_p B^{ps} \\ W_t &= \Delta_t^p \Delta_t^d Z_t\end{aligned}$$

La función de autocorrelación del modelo estacional autorregresivo es similar en características generales a la del modelo ordinario autorregresivo excepto que los valores de las autocorrelaciones aparecen en múltiplos de "s". Por ejemplo, para un proceso SAR(1):

$$\rho_{ks} = \Phi_1^k \quad k > 0$$

Es decir, la función es decreciente infinita y solo es distinta de cero en los intervalos $s, 2s, 3s, \dots$ y la función de autocorrelación parcial solo tendrá un valor significativo en $k = s$.

Modelos estacionales de promedios móviles (SMA)

Se dice que una serie de tiempo se comporta como un proceso de promedios móviles estacional de primer orden si el valor actual de la serie W_t puede representarse como el choque aleatorio e_t , y el choque ocurrido "s" observaciones antes, e_{t-s} , donde "s" es igual a la longitud del periodo.

$$\begin{aligned}W_t &= e_t - \Theta_1 e_{t-s} \\ &0 \\ W_t &= (1 - \Theta_1 B^s)e_t\end{aligned}$$

puede denotarse como SMA(1). En general un modelo SMA de orden Q está dado por:

$$W_t = \Theta(B^s)e_t$$

donde:

$$\begin{aligned}\Theta(B^s) &= 1 - \Theta_1 B^s - \Theta_2 B^{2s} - \dots - \Theta_Q B^{Qs} \quad y \\ W_t &= \Delta_t^p \Delta_t^d Z_t\end{aligned}$$

La función de autocorrelación, correspondiente a este tipo de proceso, es semejante a la de promedios móviles, excepto que los valores de las autocorrelaciones aparecen en los intervalos múltiplos de "s". Para un modelo estacional de promedios móviles de orden 1, la función de autocorrelación tendrá sólo un valor distinto de cero, en el intervalo "s".

$$\rho_s = \frac{-\Theta_1}{(1 + \Theta_1^2)}$$

la función de autocorrelación parcial será decreciente infinita, con valores significativos en múltiplos de s.

• *Modelos estacionales mezclados*

Un modelo estacional autorregresivo y de promedios móviles, de orden (P, Q) está dado por

$$\Phi(B^s)Z_t = \Theta(B^s)e_t,$$

La diferencia que existe entre las autocorrelaciones de un proceso estacional mixto y uno ordinario es que las autocorrelaciones distintas de cero aparecen en los intervalos múltiplos de s . En general se denota a un proceso estacional como ARIMA $(P, D, Q)_s$ donde:

P = orden del proceso AR estacional
 Q = orden del proceso MA estacional
 D = orden de las diferencias estacionales
 s = longitud del periodo estacional

4.2.11 Modelos multiplicativos estacionales

Para tener en cuenta ambos tipos de efectos, estacionales y no-estacionales, Box y Jenkins (1970) propusieron un modelo general del tipo

$$\phi(B)\Phi(B^s)Z_t = \Theta(B^s)\theta(B)e_t,$$

denotado por ARIMA $(p, d, q) \times (P, D, Q)_s$, donde $Z_t = \nabla^d \nabla^{Ds}$. La importancia de este modelo radica en que, para series con observaciones periódicas, se tienen ambas relaciones, la estacional y la no estacional.

El proceso de construcción de modelos para series de tiempo estacionales es semejante al de series de tiempo no-estacionales, únicamente que ahora se identifica un número mayor de modelos que podrían postularse para representar a una serie de tiempo dada.

Comportamiento de la FAC y FACP para procesos estacionales (longitud del periodo igual a "s")

Proceso	FAC	FACP
AR(p) x SAR(P)	Convergencia a cero.	Solamente las primeras $p + sP$ autocorrelaciones parciales son diferentes de cero.
MA(q) x SMA(Q)	Sólo las primeras $q + sQ$ autocorrelaciones son distintas de cero.	Sucesión infinita convergente a cero
Mezclados	Sucesión infinita convergente a cero.	Sucesión infinita convergente a cero.

4.2 Metodología de series de tiempo Box-Jenkins

4.2.12 Pronósticos con modelos ARIMA

La última etapa de la estrategia de construcción de modelos es el uso del modelo, para los fines por los cuales fue construido; en esta parte, explicaremos la utilidad de la metodología Box-Jenkins en el área de pronósticos.

En general, podemos decir que uno de los objetivos más importantes en el análisis de series de tiempo es el pronosticar valores futuros.

Al período actual, se le denomina fecha origen; el cual se denota como el período " n ". Se dice que se desea pronosticar " h " periodos de tiempo hacia adelante, hasta el período $n+h$, cuando se desea conocer el valor de la observación no realizada Z_{n+h} ; por ello, el intervalo de tiempo " h " recibe el nombre de horizonte; el cual, se denota como $Z_n(h)$ al valor futuro estimado de la variable aleatoria. Por lo anterior se dice que Z_{n+h} es una variable aleatoria cuya distribución es condicional a los datos pasados y presentes, así como a las especificaciones del modelo ARIMA.

El error que se comete al hacer un pronóstico en el momento n para un futuro $n+h$, $Z_n(h)$, se define como

$$e_n(h) = Z_{n+h} - Z_n(h)$$

donde el pronóstico óptimo será el valor de $Z_n(h)$ que minimice el costo esperado $C(e_n(h))$; normalmente, esta función se desconoce en forma precisa, pero se puede emplear una función de costos cuadrática

$$C(e) = \alpha e^2$$

donde α es una constante positiva. La función anterior define el costo en forma proporcional al cuadrado del error.

También tiene la característica de que la solución para el pronóstico óptimo es la media de la distribución del pronóstico; en realidad, la función de costos supone que los costos son simétricos. En caso de no ser válido para la realidad que se esté analizando, entonces tomaremos

$$C(e) = \begin{cases} \alpha_e & e > 0 \\ 0 & e = 0 \\ -\beta_e & e < 0 \end{cases}$$

Con α y $\beta > 0$, siendo los costos unitarios correspondientes al subestimar y sobre-estimar Z_{n+h} respectivamente.

Es importante saber que la media de la distribución del pronóstico minimiza el valor esperado de la función de costo cuadrático.

Se tiene que m_h es el valor esperado de Z_{n+h} ; con $m_h = E(Z_{n+h})$, y m es cualquier otro pronóstico de Z_{n+h} , definido como

$$m = m_h + d$$

donde "d" es la diferencia entre m y m_h . Usando el pronóstico puntual m , el valor esperado del error es

$$\begin{aligned} E[(Z_{n+h} - m)^2] &= E[Z_{n+h} - (m_h + d)]^2 \\ &= E[(Z_{n+h} - m_h)^2] - 2dE(Z_{n+h} - m_h) + d^2 \\ &= E(Z_{n+h} - m_h)^2 + d^2 \end{aligned}$$

y dado que se desea minimizar, entonces "d" deberá ser igual a cero. Por lo que el pronóstico óptimo de Z_{n+h} se obtiene con $m = m_h = E(Z_{n+h})$.

La media de la distribución de pronósticos, $E(Z_{n+h})$, puede calcularse de la siguiente forma: Sea Z , un proceso ARMA(p, q) estacionario e invertible. Para $t = n + h$

$$Z_{n+h} = \phi_1 Z_{n+h-1} + \phi_2 Z_{n+h-2} + \dots + \phi_p Z_{n+h-p} + e_t - \theta_1 e_{n+h-1} - \dots - \theta_q e_{n+h-q}$$

1. Reemplazar el error actual y los pasados, e_{n+j} , $j \leq 0$, con los residuales.
2. Reemplazar cada error futuro e_{n+j} , $0 < j \leq h$ por su valor esperado; es decir, cero.
3. Reemplazar las observaciones Z_{n+j} , $j \leq 0$, por los valores observados.
4. Reemplazar cada valor futuro de Z_{n+j} , $0 < j \leq h$, por el pronóstico adecuado $Z_n(j)$; de tal forma que habrá que pronosticar $Z_{n+1}, \dots, Z_{n+h-1}$ para pronosticar Z_{n+h} .
5. Por último, reemplazar los parámetros del modelo por sus estimadores.

Como ejemplo mostraremos un modelo AR(1), un MA(1) y un ARMA(1,1):

- ◆ *Modelo autorregresivo de primer orden*, con media μ , es decir

$$\begin{aligned} E(Z_t) &= \mu \\ Z_t - \mu &= \phi(Z_{t-1} - \mu) + e_t \\ Z_t &= (1 - \phi)\mu + \phi Z_{t-1} + e_t \end{aligned}$$

El pronóstico para un periodo adelante será el siguiente:

$$E(Z_{n+1}) = Z_n(1) = (1 - \phi)\mu + \phi Z_n$$

para h periodos adelante:

$$Z_n(h) = (1 - \phi)\mu + \phi Z_n(h-1), \quad h > 1$$

El hecho de que los pronósticos tiendan a la media de la serie se observará en el siguiente modelo correspondiente a un AR(1), despejando $Z_n(h)$ en términos de Z_n .

$$\begin{aligned} Z_n(2) &= (1 - \phi_1)(1 + \phi_1)\mu + \phi_1^2 Z_n \\ &\vdots \\ Z_n(h) &= (1 - \phi_1)(1 + \phi_1 + \dots + \phi_{h-1})\mu + \phi_h Z_n \end{aligned}$$

donde

$$\lim_{h \rightarrow \infty} Z_n(h) = \mu, \text{ dado } |\phi_1| < 1$$

◆ *Modelo de promedios móviles de primer orden*

$$\begin{aligned} Z_{n+h} &= \mu + e_{n+1} - \theta e_n \\ e_n &= Z_n - \mu + \theta e_{n-1} \\ &\Rightarrow \\ Z_n(1) &= \mu - \theta e_n \\ Z_n(2) &= \mu \\ &\vdots \\ Z_n(h) &= \mu, \quad h > 1 \end{aligned}$$

lo cual indica, que inmediatamente después del primer período, el pronóstico coincide con la media.

◆ *Modelo mezclado de orden (1, 1)*

$$\begin{aligned} Z_t - \mu &= \phi(Z_{t-1} - \mu) + e_t - \theta e_{t-1} \\ Z_{n+1} &= (1 - \phi)\mu + \phi Z_n - \theta e_n \\ Z_n(1) &= (1 - \phi)\mu + \phi Z_n - \theta e_n \\ Z_n(h) &= (1 - \phi)\mu + \phi Z_n(h-1), \quad h > 1 \end{aligned}$$

Como podemos observar, nuevamente, el pronóstico de un período adelante está influenciado directamente por el parámetro de promedios móviles. En los modelos de tipo AR, los pronósticos a largo plazo tenderán también a la media.

Por lo anterior, se dice que esta metodología no es adecuada para fines de obtener pronósticos a largo plazo, debido a que estos tendrán poca significancia.

◆ *Intervalos de confianza*

Una vez que se obtienen pronósticos es importante, también, obtener límites de confianza para los mismos. Dichos límites pueden obtenerse haciendo uso de las siguientes expresiones

$$E[e_t(h)] = 0 \quad \text{y} \quad \text{Var}[e_t(h)] = \sum_{j=0}^{h-1} \psi_j^2 \sigma_e^2$$

con $Var[e_t(h)] = Var[e_t(h)|Z_t, Z_{t-1}, \dots]$, donde Z_t admite la representación $Z_t = \psi(B)e_t$, para la cual existe un modelo ARIMA equivalente, modelo que se desea utilizar en la obtención de pronósticos de la serie; lo cual, aunado al supuesto de que e_t se distribuye como una $N(0, \sigma_e^2)$ para toda t , implica que $e_t(h)|\{Z_t, Z_{t-1}, \dots\}$ se distribuye como $N(0, Var[e_t(h)])$ y que

$$[T(Z_{t+h} - \hat{T}(Z_t)(h))|\{Z_t, Z_{t-1}, \dots\}] \text{ se distribuye como } N(0, Var[e_t(h)])$$

por lo que los límites del 100(1- α)% de confianza para $T(Z_{t+h})$, condicionados en el conocimiento de las observaciones Z_t, Z_{t-1}, \dots , viene a ser

$$\hat{T}(Z_t)(h) \pm Z_{\alpha/2} \left(\sum_{j=0}^{h-1} \Psi_j^2 \right)^{1/2} \sigma_e$$

donde $Z_{\alpha/2}$ es el punto porcentual tal que $P(Z > Z_{\alpha/2}) = \alpha/2$ si Z se distribuye como una $N(0, 1)$.

➤ Interpretación del pronóstico ventajas y desventajas

Los modelos ARIMA para el pronóstico con series de tiempo no deben interpretarse tan solo pensando en que las observaciones en el tiempo t son causadas por observaciones anteriores y/o por errores aleatorios. La historia de las series de tiempo es el sustituto de las variables exógenas que se podrían incluir en un modelo para representar una causa de los cambios en la variable pronosticada. La ventaja potencial de la eliminación de las variables exógenas es que no se necesita hacer el pronóstico de estas variables con el objeto de elaborar un pronóstico para la variable en cuestión. Las desventajas de esta eliminación son posiblemente que:

- 1) La sustitución efectuada contiene poca o ninguna información y
- 2) Los patrones de la variable exógena cambian, de modo que la historia de las series de tiempo ya no es el sustituto con significado que pudo tener alguna vez.

El modelo ARIMA para el pronóstico con series de tiempo es particularmente adecuado para los pronósticos a corto plazo y para el pronóstico de variables altamente estacionales. El empleo de las observaciones para la integración del modelo es el que determina la utilidad a corto plazo del enfoque.

Entre las ventajas y desventajas de esta metodología, también tenemos el hecho de que el enfoque, que se maneja, de pronósticos con series de tiempo está basado en un modelo estadístico. Suponiendo que el modelo estimado es el correcto, se llega a lo siguiente:

1. Se refuerza la habilidad que se tiene para calcular rangos aceptables dentro de los cuales caerán los valores observados, con un grado específico de certidumbre (es decir, los límites de confianza).
2. Se refuerza la habilidad para actualizar fácil y acertadamente los pronósticos originales cuando se dispone de una o de más observaciones nuevas. Las nuevas observaciones brindan información acerca de los errores aleatorios que originalmente se igualan a su valor esperado de cero.

4.2 Metodología de series de tiempo Box-Jenkins

④ *Comparación con otros enfoques de pronósticos con series de tiempo*

En esta sección se realizan algunas comparaciones generales con enfoques específicos del pronósticos con series de tiempo.

◆ *Atenuación exponencial, método II del censo y otros enfoques*

Existen una gran diversidad de enfoques para el pronóstico con series de tiempo, siendo el método de la atenuación exponencial simple y el método II del censo, únicamente dos de los más comunes. Se podría pensar que se emplea el mismo "modelo" para todos los problemas de pronósticos, independientemente de la evidencia en los datos (por lo general en estos enfoques se ignoran los modelos explícitos). La lógica del método ARIMA de identificación del modelo (según la cual el modelo debe integrarse con base en el muestreo estadístico simple de los datos disponibles) es ignorada en todos estos enfoques.

◆ *La función del tiempo*

Expresar las observaciones como funciones del tiempo, por ejemplo, en la forma de tendencias lineales, polilíneales, curvas del seno y coseno, etc., constituye un enfoque empleado con frecuencia en los pronósticos con series de tiempo. Algunas personas denominan a tal modelo "determinístico". Si bien desde cierto punto de vista el modelo aún puede llamarse "estocástico" (incluye un término para el error), los pronósticos mediante el mismo son de naturaleza determinística cuando se les compara con los pronósticos del modelo adaptable ARIMA.

◆ *Análisis de regresión*

Con frecuencia, se encuentran aplicaciones del análisis de regresión a los problemas de pronósticos con series de tiempo. Si bien el análisis de regresión, según se le define generalmente, implica el uso de dos o más variables, y por ello, no se le puede comparar con el enfoque del modelo ARIMA, hay un punto de comparación que se debe mencionar.

El objetivo del enfoque del modelo ARIMA es considerar totalmente cualquier patrón de autocorrelación (esto es, de dependencia) que pueda haber en un conjunto de observaciones de las series de tiempo. El análisis de regresión en su forma original, no permite ninguna dependencia de la variable dependiente entre las observaciones (dependencia que por lo general, existe en las observaciones de series de tiempo). Esta dependencia conduce a errores autocorrelacionados. Para tratar ciertos patrones específicos de autocorrelación, se han usado procedimientos específicos como la aplicación de la derivación o la autorregresión a las observaciones. Sin embargo, no se pueden tratar bien los patrones generales de la dependencia de las observaciones siguiendo el análisis de regresión.

◆ *Comparaciones empíricas publicadas*

En principio recordemos que el enfoque del modelo ARIMA es una generalización de varios enfoques para el pronóstico con series de tiempo. Por ejemplo, la atenuación exponencial simple equivale a la utilización de un modelo específico del grupo de los modelos ARIMA. Sin embargo, las comparaciones empíricas a menudo han demostrado que el enfoque del modelo ARIMA no produce pronósticos mejores que los obtenidos con enfoques menos generales; esto se debe a que se analizan fenómenos que cualquier metodología generaría resultados no adecuados. Es importante subrayar que el enfoque para la integración de modelos ARIMA puede emplear mejor la información en una historia de series de tiempo de una sola variable.

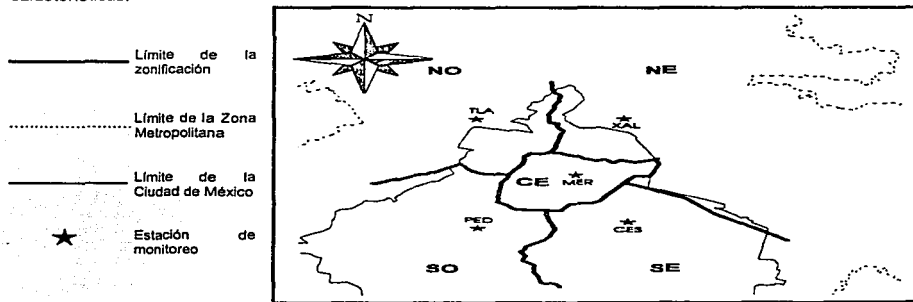
Capítulo 5

Análisis de las concentraciones atmosféricas de PM_{10} , PM_{10} y Pb

5.1 Características de los puntos de monitoreo participantes

El sistema de monitoreo atmosférico de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM) se compone de cinco elementos, siendo el principal la Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA), mientras que las Estaciones piloto, las Unidades móviles de monitoreo atmosférico, la Red Manual y la Red Meteorológica son los elementos que la complementan o apoyan; dicho sistema se encuentra operado actualmente por el Departamento del Distrito Federal D.D.F. (6).

Las Partículas Suspensas Totales (PST) son muestreadas por la Red Manual de Monitoreo Atmosférico (RMMA), donde además de PST, también se muestrean partículas menores a diez micras, plomo, metales pesados, nitratos, sulfatos y formaldehídos; el muestreo se realiza durante un periodo de 24 horas cada seis días, excepto en invierno, tiempo en el que se incrementa la frecuencia de muestreo a una vez cada tres días. Con el objeto de mantener una base estadística consistente se recurrió a las muestras colectadas en los puntos de monitoreo correspondientes a Tlalneantla, Xalostoc, Merced, Pedregal y Cerro de la Estrella, debido a que estos son los únicos que registran tanto Partículas Suspensas Totales (PST) como Partículas Menores a diez micras (PM_{10}) y Plomo (Pb). La siguiente figura ilustra la ubicación de cada uno de ellos, posteriormente se mencionan sus características.



◊ *Tlalnepantla**Clave y Zona*

F, Noroeste (NO).

Ubicación

Glorieta Atlacomulco, avenida Toluca s/n esquina Atlacomulco; Fraccionamiento Tlalnemex, c.p. 54070.

Municipio

Tlalnepantla, Estado de México.

Altura de la toma de muestra

6.20 metros.

Entorno de la estación

El uso es mixto, en la zona cercana a la estación predominan las casas-habitación y comercios de desarrollo horizontal, es una zona que en su totalidad, aún no cuenta con todos los servicios de urbanización, la fluidez vehicular es alta, circulan vehículos particulares y autobuses urbanos.

◊ *Xalostoc**Clave y Zona*

L, Noreste (N E).

Ubicación

Agencia Volkswagen "Santa Clara". Carretera México-Pachuca, Km. 13.5 calle del hierro, Xalostoc.

Municipio

Ecatepec, Estado de México.

Altura de la toma de muestra

3.50 metros.

Entorno de la estación

El uso del suelo es fundamentalmente industrial, la estación se encuentra dentro de los talleres de una agencia VW, ubicada a espaldas de una fundidora y cercana a una cementera, la infraestructura y servicios urbanos en general son deficientes.

◊ *Merced**Clave y Zona*

X, Centro (C).

Ubicación

Centro de salud "Luis E. Ruiz"; avenida Congreso de la unión 148 antes Francisco Morazán y prolongación de los Carretones; colonia Merced Balbuena; c.p. 158500.

Delegación

Venustiano Carranza.

Altura de la toma de muestra

6.20 metros.

5.1 *Características de los puntos de monitoreo participantes*

<i>Entorno de la estación</i>	El uso del suelo es fundamentalmente habitacional y comercial, se encuentra en una zona de fluidez vehicular alta; cuenta con todos los servicios urbanos. Frente a la estación se encuentra un parque deportivo que es fuente generadora de polvos en época de tolvaneras.
<i>o Pedregal</i>	
<i>Clave y Zona</i>	T, Suroeste (SO).
<i>Ubicación</i>	Escuela primaria "John F. Kennedy". Cañada No. 370, avenida Cráter; colonia, Pedregal de San Angel; c.p. 01900.
<i>Delegación</i>	Alvaro Obregón.
<i>Altura de la toma de la muestra</i>	3.70 metros.
<i>Entorno de la estación</i>	El uso del suelo es habitacional de tipo residencial, cuenta con todos los servicios. La fluidez vehicular es baja, de tipo particular. La disposición de residuos es totalmente controlada.
<i>o Cerro de la Estrella</i>	
<i>Clave y Zona</i>	Q, Sureste (SE).
<i>Ubicación</i>	Planta de tratamiento de aguas negras "Cerro de la Estrella", D.D.F.; avenida San Lorenzo s/n; colonia Paraje San Juan; c.p. 09830.
<i>Delegación</i>	Iztapalapa.
<i>Altura de la toma de muestra</i>	3.70 metros.
<i>Entorno de la estación</i>	El uso del suelo es habitacional con baja densidad; debido a que se encuentra en expansión, existen algunos tiraderos cercanos. La circulación de vehículos es alta, circulan principalmente camiones de volteo.

De estos puntos de monitoreo, como anteriormente se mencionó, se obtuvieron las muestras de las concentraciones atmosféricas de PST, PM_{10} , y Pb para su análisis; cada punto de muestreo representa un área específica de la ZMCM. Posteriormente, estas muestras se incorporaron a una hoja de cálculo con formato EXCEL, por medio de la cual se calcularon los promedios mensuales de cada una de ellas.

Para realizar el análisis estadístico de los datos se utilizó como herramienta software especializado del área: STATISTICA de Statsoft y STATGRAPHICS de Graphics software systems. Los archivos de los registros tanto de concentraciones como de promedios mensuales se importaron a cada uno de los paquetes mencionados con la finalidad de manipular los datos.

5.2 Variación temporal de los contaminantes PST, PM₁₀ y Pb

El análisis de las series de tiempo para cada contaminante está basado en la media aritmética mensual $\left(\sum_{i=1}^N Y_i / N\right)$ donde N es el total de datos que se tienen en un mes, i el tiempo en el que se registra cada dato y Y_i el dato que representa la concentración del contaminante registrada al tiempo i . La distribución temporal que se considera abarca de 1988 hasta agosto de 1996 tanto para Partículas Suspendidas Totales (PST) como partículas suspendidas fracción respirable (PM₁₀); y de 1988 hasta marzo de 1995 para las concentraciones de plomo atmosférico. La descripción se realiza con base en la Norma Oficial Mexicana (NOM) de calidad del aire para cada contaminante, las cuales fueron publicadas por la Secretaría de Salud en el Diario Oficial de la Federación en diciembre de 1994:

Contaminante	NOM	Límite máximo permisible	Especificación
Partículas Suspendidas Totales (PST)	024-SSA1	260 µg/m ³	muestreo de 24 hrs.
Partículas Menores a diez micras (PM ₁₀)	025-SSA1	150 µg/m ³	promedio móvil de 24 hrs.
Plomo (Pb)	026-SSA1	1.5 µg/m ³	promedio trimestral

La Norma Oficial Mexicana es un criterio para evaluar la calidad del aire ambiente con respecto a cada contaminante que afecta la ZMCM; es decir, es un valor permisible para la concentración de estos en el aire ambiente como medida de protección a la salud de la población, este valor máximo permisible equivale al IMECA 100 (Índice Metropolitano de la Calidad del Aire).

El comportamiento temporal que caracteriza a las partículas suspendidas totales, partículas menores a diez micras y plomo; se describe identificando como primer característica la tendencia general que presenta la serie de tiempo; posteriormente, la misma se divide en periodos los cuales se caracterizan de acuerdo a la tendencia que prevalece en ellos; esta última, define el inicio y término de los periodos establecidos.

En cada punto de monitoreo y contaminante analizado se presenta una tabla resumen de concentraciones, donde se señala por cada periodo presente: la duración del mismo, el porcentaje de concentraciones mayor a la norma (utilizando los datos promedio), el promedio de concentraciones (utilizando los datos crudos) y por último la tasa de cambio entre un periodo y el subsecuente; éste último dato, se generó a partir del promedio de concentraciones por periodo.

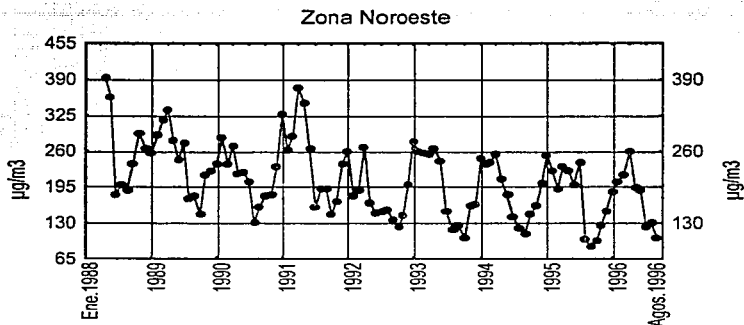
5.2.1 Tendencias históricas de las Partículas Suspendidas Totales (PST)

Como anteriormente se hizo mención, en la atmósfera de la ZMCM se encuentran presentes en suspensión, partículas de diversas composiciones y tamaños. Entre éstas se incluyen las llamadas partículas naturales (integradas por suelos, partículas de origen biológico y basuras), las partículas que provienen de los procesos de combustión, y las que se forman en la atmósfera como resultado de la transformación de otros contaminantes, entre los que pueden encontrarse los nitratos y los sulfatos.

5.2 Variación temporal de los contaminantes PST, PM₁₀ y Pb

La norma de calidad del aire para las partículas suspendidas totales se establece como $260\mu\text{g}/\text{m}^3$ en un muestreo de 24 horas, esta se usa como el límite permisible de PST para protección a la salud de los habitantes de la ZMCM.

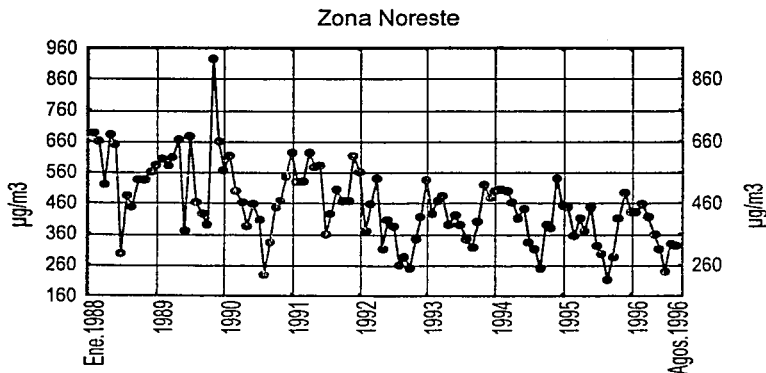
● *Tlalnepantla*



Dentro de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México, *Tlalnepantla* se ubica en la parte noroeste de la misma. La serie de tiempo, en general, presenta tendencia decreciente; esta se divide en tres periodos: el primero, de 1988 a octubre de 1990, la serie muestra un constante descenso; en este periodo, a pesar de que la tendencia que lo caracteriza es decreciente, el 35% de los datos promedio superan la norma de calidad correspondiente a $260\mu\text{g}/\text{m}^3$ (IMECA 100); el segundo periodo, inicia en noviembre de 1990 y termina en mayo de 1991 donde los datos aumentaron de tal forma que es en donde se localizan los más altos de toda la serie de tiempo; en este intervalo, la mayoría de los datos superan la norma; por último se presenta el tercer periodo, en el cual, el comportamiento de los datos abarca de junio de 1991 hasta agosto de 1996, donde las partículas suspendidas totales se estabilizan, fluctuando la mayor parte del tiempo por debajo de la norma, además de que es notorio el descenso de los valores en el mismo.

Esta zona se caracteriza por tener fluidez vehicular alta, además de que se define como mixto al uso del suelo de la misma. La tasa de cambio entre el primer periodo y el último es de -25.39%.

Concentración de PST por periodo				
Periodo	Duración del periodo	Porcentaje de concentraciones mayor a la norma	Promedio de concentraciones en $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Tasa de cambio por periodo
1	Abr.88 - Oct.90	35.48%	245.783	
2	Nov.90 - May.91	85.71%	289.161	+15.00%
3	Jun.91 - Agos.96	04.76%	183.389	-36.58%

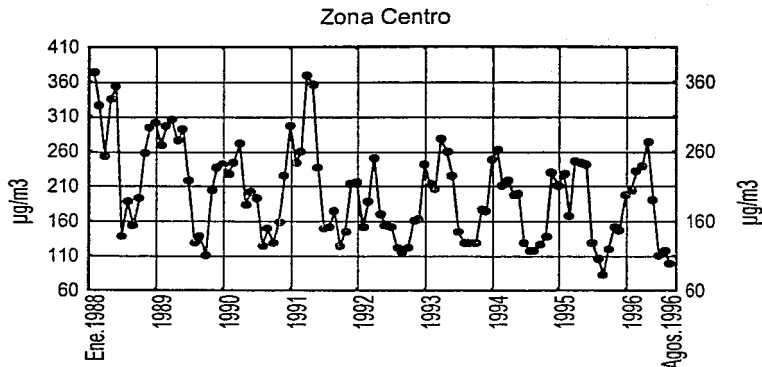


Xalostoc es la estación de monitoreo que representa la parte noreste de la ZMCM. Esta área se encuentra muy afectada por los registros de las altas concentraciones atmosféricas de PST; se caracteriza por tener los registros más altos con respecto a las demás estaciones de monitoreo participantes en el análisis; esto, como consecuencia de que la mayor parte del tiempo, las concentraciones superan la norma de calidad del aire. En general, la serie presenta tendencia paulatinamente decreciente, no obstante continua registrando niveles superiores a la norma. La serie de tiempo indica la existencia de dos periodos: el primero con una duración de cuatro años, de enero de 1988 a diciembre de 1991, donde la fluctuación de la serie permanece, en general, dentro de un intervalo de 260 a 700 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, la concentración promedio para el mes de noviembre de 1989 es la única que excede este intervalo alcanzando 923 $\mu\text{g}/\text{m}^3$; el segundo periodo abarca los datos restantes, este fluctúa entre 260 y 540 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Las altas concentraciones que se registran en esta zona se debe a la gran cantidad de industrias existentes en la misma; además de que se estima que Xalostoc es el área que contiene una mayor superficie desnuda, lo que significa que existe un alto potencial de emisión de partículas ⁽²⁾.

Concentración de PST por periodo				
Periodo	Duración del periodo	Porcentaje de concentraciones mayor a la norma	Promedio de concentraciones en $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Tasa de cambio por periodo
1	Ene.88 - Dic.91	97.92%	534.830	
2	Ene.92 - Agos.96	91.07%	393.697	-26.39%

5.2 Variación temporal de los contaminantes PST, PM_{10} y Pb

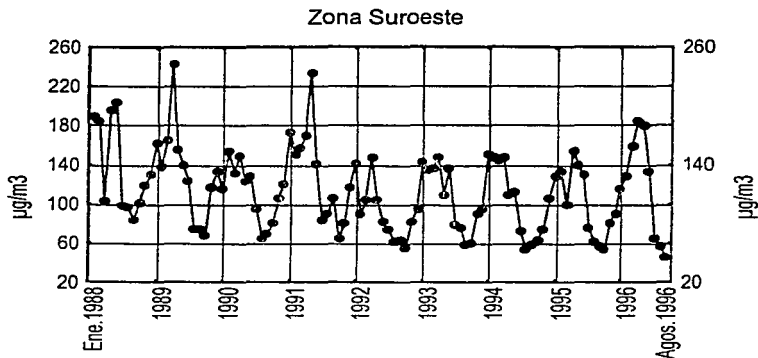


La estación de monitoreo atmosférico *Merced*, representa la zona centro de la ZMCM; la serie se caracteriza por su tendencia inicial decreciente. Durante el tiempo observado, se distinguen tres periodos de comportamiento específico: el primero abarca de enero de 1988 hasta octubre de 1990 donde predomina el comportamiento decreciente de los datos, en este período los datos que sobrepasan la norma se localizan en la primera mitad del mismo, y en la siguiente, la mayoría permanece por debajo del nivel permisible; posteriormente, de noviembre de 1990 a mayo de 1991, las concentraciones atmosféricas aumentan de tal forma que la mayor parte del tiempo superan la norma de calidad del aire, el dato más alto de este periodo excede los $360 \mu\text{g}/\text{m}^3$. El último periodo mejora notablemente comparándolo con los anteriores, en él, los datos se estabilizan fluctuando dentro del intervalo de 80 a $260 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

El uso del suelo para esta zona es fundamentalmente comercial y habitacional con alta fluidez vehicular. La tasa de cambio entre el primer periodo y el último es de -26.03%.

Concentración de PST por periodo

Periodo	Duración del periodo	Porcentaje de concentraciones mayor a la norma	Promedio de concentraciones en $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Tasa de cambio por periodo
1	Ene.88 - Oct.90	35.29%	240.110	
2	Nov.90 - May.91	57.14%	210.230	-12.44%
3	Jun.91 - Agos.96	04.76%	177.614	-15.51%

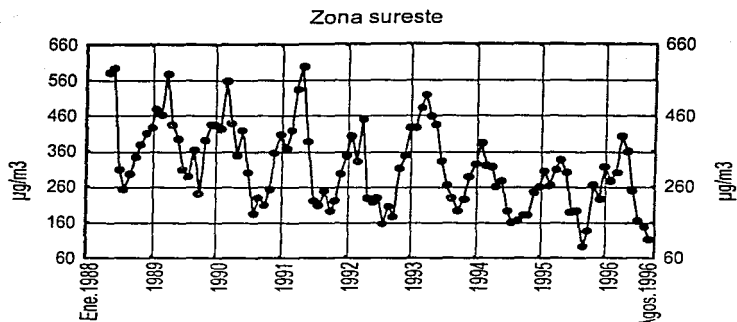


La zona suroeste, representada por la estación *Pedregal* es la menos afectada por las partículas suspendidas totales; los datos indican que a través del tiempo registrado no existe ninguno que supere al límite permisible o IMECA 100, correspondiente a 260 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. La serie de tiempo registrada en la estación de monitoreo Pedregal presenta tendencia decreciente; en ella se identifican dos periodos: el primero abarca de 1988 hasta la mitad de 1991, dentro del cual las partículas suspendidas totales fluctúan entre 60 y 200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, dentro de este período dos datos se salen del comportamiento general del mismo, estos corresponden a marzo de 1989 y abril de 1991, los valores más altos se identifican en los primeros y últimos meses. El último periodo tiene como característica peculiar el paulatino incremento del contaminante, aunado a esta característica, los valores correspondientes a 1996 presentan un ascenso significativo de tal forma que se salen del intervalo de 60 y 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ donde se había estabilizado la serie.

Es importante señalar que a pesar del último comportamiento que presentó la serie, esta permanece con niveles relativamente bajos y aceptables de contaminación por partículas suspendidas totales. Para esta zona se considera que el uso del suelo es habitacional con baja fluidez vehicular.

Concentración de PST por periodo				
Periodo	Duración del periodo	Porcentaje de concentraciones mayor a la norma	Promedio de concentraciones en $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Tasa de cambio por periodo
1	Ene.88 - May.91	0%	138.761	
2	Jun.91 - Agos.96	0%	102.652	-26.02%

5.2 Variación temporal de los contaminantes PST, PM_{10} y Pb



Cerro de la Estrella al igual que Xalostoc, se ubica en el este de la ZMCM, estas dos estaciones de monitoreo atmosférico, registran las concentraciones más altas de PST. La tendencia general que caracteriza a la serie correspondiente a la zona sureste es decreciente. En la variación temporal de la serie se identifican cuatro periodos importantes, el primero abarca de 1988 hasta octubre de 1990, donde las PST fluctúan entre 200 y 575 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, en este periodo la serie desciende paulatinamente a pesar de que el 81% de las concentraciones superan los 260 $\mu\text{g}/\text{m}^3$; posteriormente se genera el siguiente periodo con una duración de dos años, donde al inicio del mismo el contaminante se eleva tanto que precisamente en el año de 1991 alcanza los niveles más altos de todo el tiempo en análisis, el comportamiento en este periodo finaliza con un evidente descenso; el tercer periodo inicia en noviembre de 1992 y finaliza en noviembre de 1995, en este periodo, el contaminante desciende de 480 a 90 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, dentro de él, la serie decrece con mayor agilidad que en los periodos anteriores. Por último se distingue el incremento correspondiente a las concentraciones registradas en el último año de la serie.

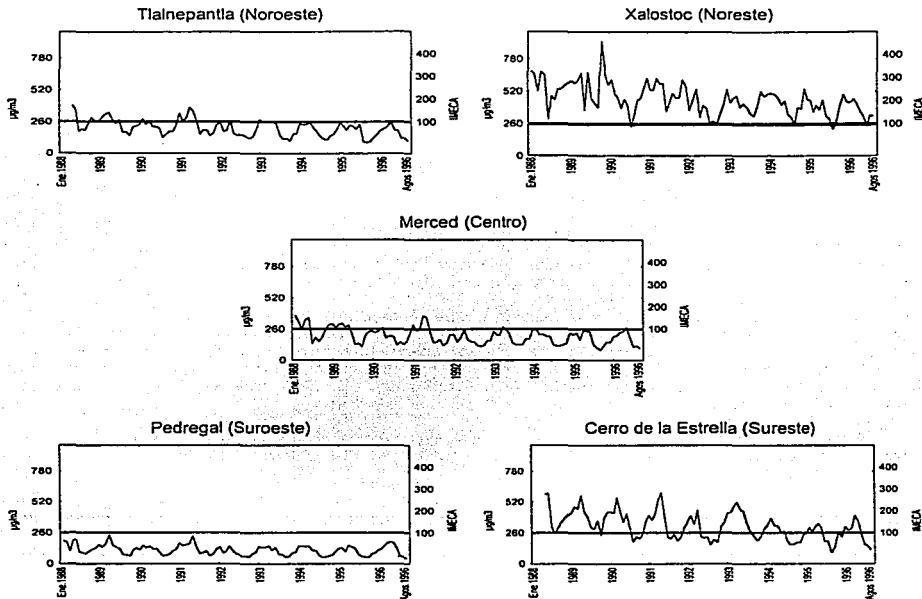
Esta zona se caracteriza por la alta circulación vehicular, principalmente camiones de volteo; además, de la existencia de áreas desprovistas de cubierta vegetal y carentes de pavimentación. La tasa de cambio entre el primero y último periodo es de -34.75%.

Concentración de PST por periodo

Periodo	Duración del periodo	Porcentaje de concentraciones mayor a la norma	Promedio de concentraciones en $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Tasa de cambio por periodo
1	Abr.88 - Oct.90	80.65%	396.022	
2	Nov.90 - Oct.92	54.17%	323.169	-18.40%
3	Nov.92 - Nov.95	65.22%	283.556	-12.26%
4	Dic.95 - Agos.96	55.55%	258.408	-08.87%

5.2.2 Generalidades de las Partículas Suspensas Totales (PST)

Con objeto de presentar una visión clara al comparar las concentraciones de las PST, en las cinco estaciones de monitoreo, se presentan las series de tiempo correspondientes a las partículas suspensas totales graficadas con base a la escala de la serie correspondiente a Xalostoc, debido a que esta se caracteriza por registrar los niveles más altos del contaminante. Así es importante para el análisis observar tanto las diferencias como las características semejantes que existen entre las cinco áreas en las que se divide la ZMCM.



Al observar las gráficas anteriores se evidencia que el grado de afectación de las Partículas Suspensas Totales (PST) varía de acuerdo al área en que se divide la ZMCM. El comportamiento de las zonas noreste y sureste, correspondientes a Xalostoc y Cerro de la Estrella, con las concentraciones más altas, se debe al

5.2 Variación temporal de los contaminantes PST, PM_{10} y Pb

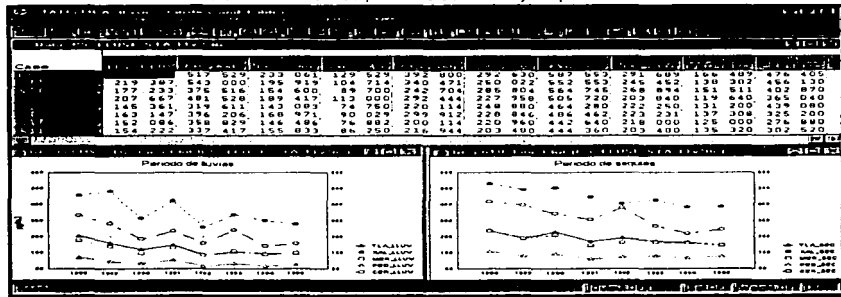
predominio de industrias, y en mayor medida, a la existencia de grandes áreas de suelos en proceso de erosión y carentes de una cubierta vegetal o de pavimentación, lo cual provoca que dentro de las mismas zonas el comportamiento de las PST sea local y los niveles registrados en algunas estaciones difieran significativamente en relación a otras estaciones de la misma zona ⁽⁹⁾.

El análisis anterior, se corrobora de acuerdo a las imágenes de satélite y estimaciones basadas en el cálculo de la erosión del suelo provocado por el viento; el cual, indica que la ZMCM tiene una superficie aproximadamente de 41 600 hectáreas con un significativo potencial de emisión de partículas. Esta superficie incluye áreas deforestadas y en proceso de erosión, entre los que se encuentran zonas agrícolas, de agostadero, lechos de antiguos lagos y zonas suburbanas sin pavimentar. Con base en este análisis se estima que en la ZMCM, los cuadrantes que tienen una mayor superficie desnuda son los que corresponden a la parte este con 24 975 hectáreas, que en conjunto contribuyen en 65% de la emisión de partículas de origen natural ⁽¹⁰⁾.

Las PST presentan como característica general una mayor concentración en los primeros y últimos meses de cada año; los niveles bajos se encuentran, en su mayoría, precisamente a la mitad de los mismos. Este comportamiento se debe a los periodos correspondientes a lluvias y sequías, definidos a través del Observatorio Meteorológico Central de la Ciudad de México (Tacubaya)* específicamente para la ZMCM, donde el periodo de lluvias abarca de abril a octubre y el periodo de sequías de noviembre a marzo ⁽¹¹⁾; en estos periodos específicos una característica por destacar es el parecido que presentan las estaciones de Tlalpanilla y Merced para estas temporadas del año.

También, es importante mencionar el incremento de las PST durante el último año registrado en las estaciones de Tlalpanilla, Merced, Pedregal y con un incremento mucho más evidente en Cerro de la Estrella. A continuación se presentan las gráficas de las concentraciones de PST para las temporadas de lluvias y sequías; el cálculo se realizó con base en un promedio aritmético por temporada del año.

Concentración de PST en los periodos de lluvias y sequías de 1988 a 1995



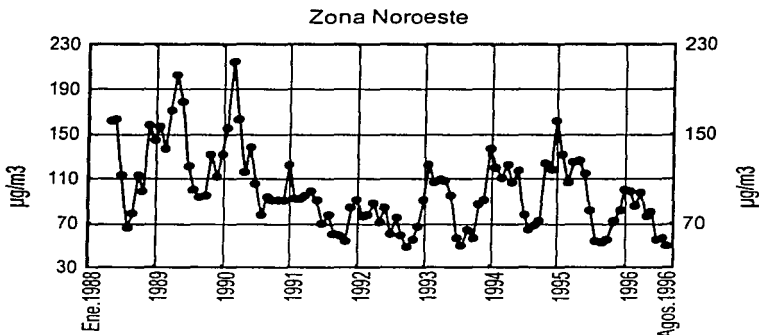
* La temporada de lluvias es un periodo de por lo menos dos meses durante el cual no ocurren siete días consecutivos con precipitaciones diarias menores a 1.0 mm, y el cual se inicia en un día con precipitación en 24 horas mayor o igual que 15.0 mm. (valor umbral para lluvia fuerte o chubasco).

El Departamento del Distrito Federal considera que la disminución gradual, para todas las zonas, que han presentado los niveles de concentraciones de PST en la ZCMV puede deberse en parte a las medidas implantadas por el PICCA a partir de 1991 y que entre ellas destacan: la pavimentación de calles, sustitución de combustóleo por gasóleo (con menos del 2% de azufre), restauración del lago de Texcoco, operación de termoeléctricas y 365 industrias con gas natural, verificación industrial obligatoria, instalación de equipo de control en industrias, capacitación de la Comisión Nacional para el Ahorro de Energía (CONAE) para la operación de calderas, instalación de equipo anticontaminante en 3 500 unidades de ruta 100, y por último, introducción del Diesel Sin (0.05% como nivel máximo de azufre).

5.2.3 Tendencias históricas de las Partículas Menores a diez micrómetros (PM_{10})

Los estudios que se han realizado acerca de este contaminante, indican que las partículas que tienen mayor impacto sobre salud, e incluso sobre visibilidad, son aquellas cuyo diámetro aerodinámico es menor a diez micrómetros, debido a que estas se sedimentan a una velocidad tan lenta que pueden penetrar profundamente en el sistema respiratorio al ser inhaladas. La norma de calidad del aire para las partículas menores a diez micrómetros se establece como $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en un muestreo de 24 horas, esta se usa como el límite permisible de las PM_{10} para protección a la salud de los habitantes de la ZCMV.

• Tlalnepantla



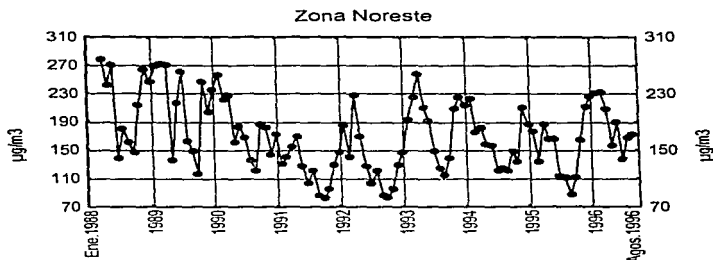
Las partículas menores a diez micras que se registraron en el área de Tlalnepantla en el periodo de abril de 1988 a agosto de 1996 presentan tendencia ascendente durante los dos primeros años, en este periodo se registran los puntos más altos alcanzados en toda la serie de tiempo, la fluctuación del contaminante está entre 80 y $210 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Al término del primer periodo, esta clase de partículas decrece significativamente de tal forma que durante el siguiente periodo, julio de 1990 a diciembre de 1992, el contaminante permanece por debajo de la norma, correspondiente a $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$; fluctuando, en general, entre 45 y $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$; finalizando este periodo, comienza otro donde la serie crece paulatinamente, a pesar de este crecimiento observado hasta enero de 1995, únicamente

en diciembre de 1994 se sobrepasa la norma de calidad del aire ($150 \mu\text{g}/\text{m}^3$), los niveles de este periodo se encuentran entre 50 y $130 \mu\text{g}/\text{m}^3$ excluyendo el mes que excede a la norma; en el último periodo el contaminante descende en sus concentraciones de $126 \mu\text{g}/\text{m}^3$ hasta $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$. La tasa de cambio entre el primero y segundo periodo es de -40.03% .

Concentración de PM_{10} por periodo

Periodo	Duración del periodo	Porcentaje de concentraciones mayor a la norma	Promedio de concentraciones en $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Tasa de cambio por periodo
1	Abr.88 - Jun.90	37.04%	138.184	
2	Jul.90 - Dic.92	0%	80.852	-42.10%
3	Ene.93 - Ene.95	04.0%	99.718	+19.77%
4	Feb.95 - Agos.96	0%	82.872	-16.89%

Xalostoc

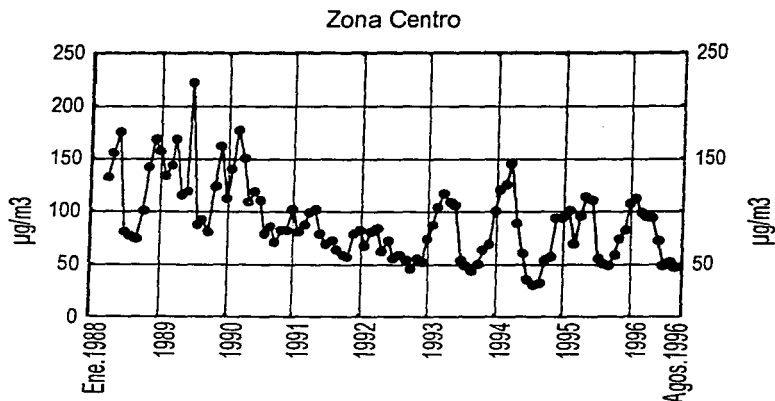


En esta estación de monitoreo, al igual que las PST, se registran las concentraciones más altas de las cinco estaciones que se analizan. El primer periodo abarca de marzo de 1988 hasta marzo de 1990 el cual fluctúa entre 120 y $280 \mu\text{g}/\text{m}^3$, en este periodo, el 80% de los datos se encuentran por arriba de la norma de calidad para las PM_{10} , el siguiente periodo, se genera entre abril de 1990 y octubre de 1991, en él, la serie descende de $186 \mu\text{g}/\text{m}^3$ hasta $83 \mu\text{g}/\text{m}^3$, el 42% de los datos sobrepasan la norma; el último periodo presenta comportamiento paulatinamente ascendente. La tasa de cambio entre el primer periodo y el último es de -28.59% .

Concentración de PM_{10} por periodo

Periodo	Duración del periodo	Porcentaje de concentraciones mayor a la norma	Promedio de concentraciones en $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Tasa de cambio por periodo
1	Mar.88 - Mar.89	80.00%	228.959	
2	Abr.90 - Oct.91	42.10%	141.833	-38.05%
3	Nov.91 - Agos.96	55.17%	163.506	+13.25%

5.2 Variación temporal de los contaminantes PST, PM_{10} y Pb

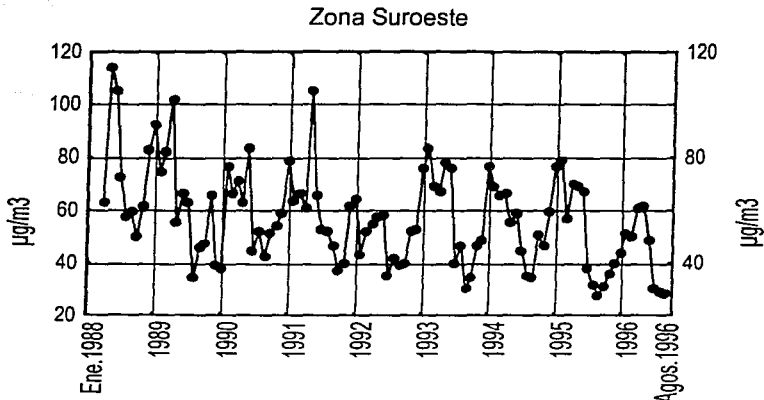


En la estación que representa el centro de la ZMCM, *Merced*, se observa un primer periodo que inicia en marzo de 1988 y finaliza en junio de 1990, dentro de este periodo las concentraciones fluctúan entre 70 y 220 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ donde el 32% de los datos superan la norma de 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$; a partir de julio de 1990 y hasta octubre de 1992 la serie desciende hasta alcanzar su punto mínimo de 45 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, este periodo fluctúa entre 40 y 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$; posteriormente las concentraciones nuevamente ascienden, formando parte del último periodo localizado entre noviembre de 1992 y agosto de 1996, en este periodo la serie fluctúa entre 30 y 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. La tasa de cambio entre el primer periodo y el último es de -42.46%.

Concentración de PM_{10} por periodo				
Periodo	Duración del periodo	Porcentaje de concentraciones mayor a la norma	Promedio de concentraciones en $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Tasa de cambio por periodo
1	Mar.88 - Jun.90	32.14%	135.613	
2	Jul.90 - Oct.92	0%	74.887	-44.78%
3	Nov.92 - Agos.96	0%	78.029	+04.03%

5.2 Variación temporal de los contaminantes PST , PM_{10} y Pb

● Pedregal

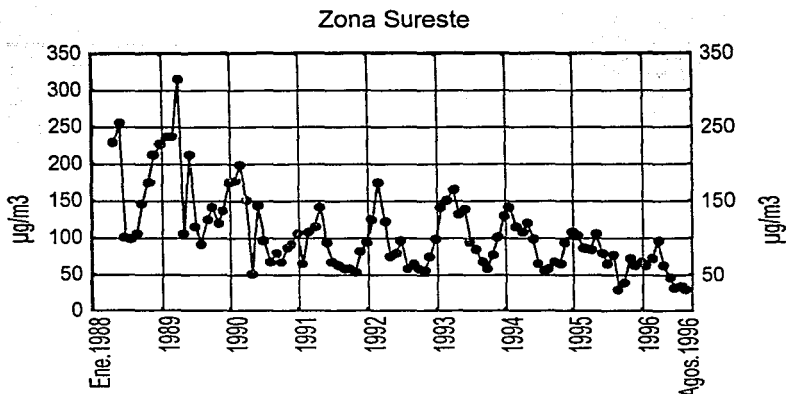


Pedregal, es la estación de monitoreo que registra las concentraciones más bajas de las cinco estaciones que representan la ZMCM (menores a $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$). No existe gran variabilidad en los datos de la serie; podemos decir que en general presenta tendencia decreciente; sin embargo, es posible identificar dos periodos: el primero, de marzo de 1988 hasta octubre de 1992, donde la serie fluctúa entre 40 y $110 \mu\text{g}/\text{m}^3$; posteriormente se identifica un último periodo, de noviembre de 1992 hasta agosto de 1996, donde se observa un descenso un poco más lento que el anterior, en este periodo la serie se encuentra entre 30 y $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Concentración de PM_{10} por periodo

Periodo	Duración del periodo	Porcentaje de concentraciones mayor a la norma	Promedio de concentraciones en $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Tasa de cambio por periodo
1	Mar.88 - Oct.92	0%	64.1818	
2	Nov.92 - Agos.96	0%	53.1741	-17.15%

5.2 Variación temporal de los contaminantes PST , PM_{10} y Pb



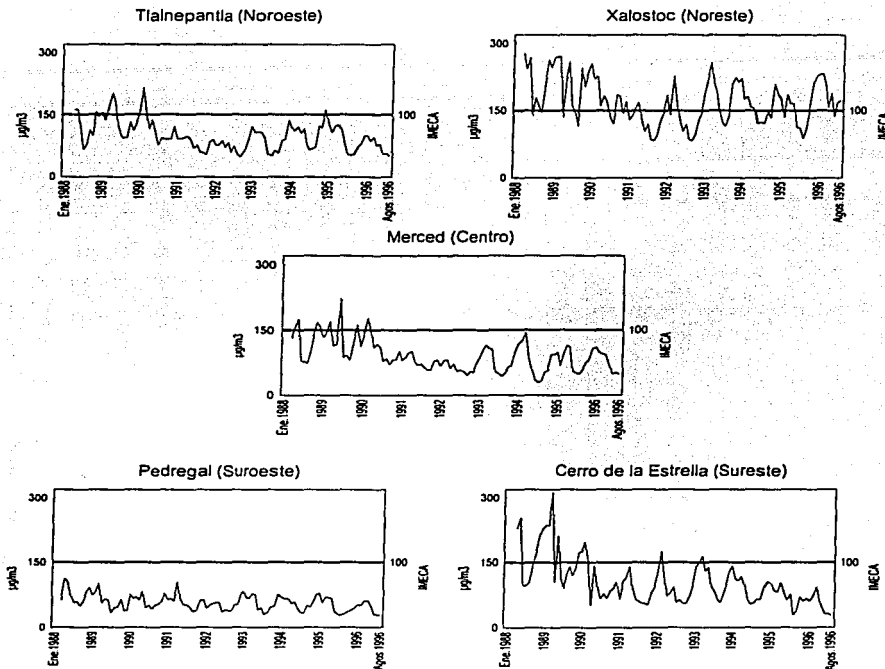
En las concentraciones de *Cerro de la Estrella* se identifica un marcado descenso; esencialmente dos periodos de comportamiento la conforman; el primero, desde abril de 1988 hasta marzo de 1990, el cual contiene los registros más altos; en este periodo, el 54% de los datos se encuentran por arriba de los 150 µg/m³; el segundo periodo, abarca de abril de 1990 hasta agosto de 1996, en todo el intervalo la serie tiene en general un comportamiento decreciente constante, sin embargo, es importante señalar que al final del último periodo tiene un descenso no tan marcado como al inicio del mismo que se observa de julio de 1995 hasta los últimos datos registrados.

Concentración de PM ₁₀ por periodo				
Periodo	Duración del periodo	Porcentaje de concentraciones mayor a la norma	Promedio de concentraciones en µg/m ³	Tasa de cambio por periodo
1	Abr.88 - Mar.90	54.17%	186.340	
2	Abr.90 - Agos.96	03.90%	85.123	-54.32%

5.2.4 Generalidades de las partículas menores a diez micras (PM₁₀)

Al igual que las partículas suspendidas totales se presentan las cinco gráficas de las diferentes áreas de la ZMCM correspondientes a las PM₁₀, las cuales se grafican con base en la escala de la serie monitoreada en Xalostoc, debido a que nuevamente es la estación que registra las concentraciones más altas de PM₁₀ en la ZMCM.

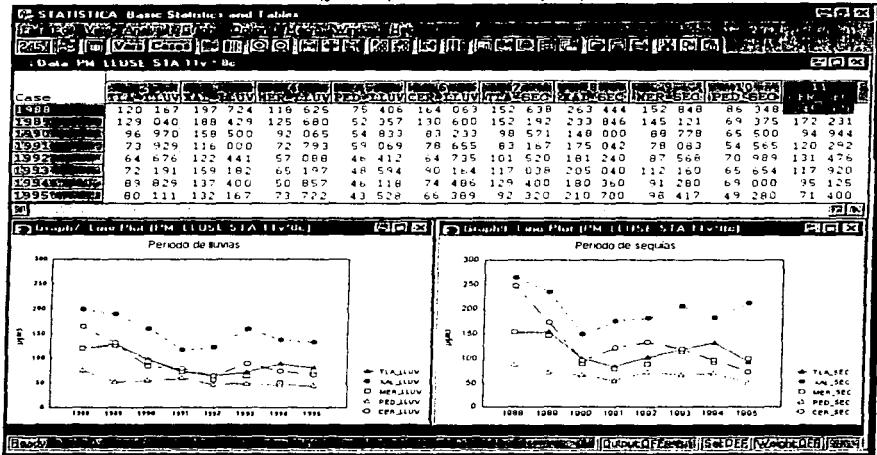
5.2 Variación temporal de los contaminantes PST, PM₁₀ y Pb



Al igual que las PST, la época de lluvias y sequías influye en el comportamiento de las PM_{10} , donde es evidente que en la época de sequías se registran las mayores concentraciones de este contaminante para cada estación; los registros de PM_{10} en estos periodos, muestran un comportamiento muy similar para las estaciones de Tlalnepantla y Merced. Nuevamente encontramos que Xalostoc y Cerro de la Estrella son las estaciones que se ven más afectadas por este contaminante, debido a las características particulares de las zonas que anteriormente se mencionaron en el análisis de las PST. También, vuelve a destacar Pedregal por ser la estación menos afectada por este tipo de contaminación.

A pesar de que las PM_{10} siguen un comportamiento similar al de las PST, las primeras no reflejan ascenso en la mayoría de estaciones durante el último año registrado; la única estación donde el contaminante tiende a incrementarse, en esta fecha, es la correspondiente a la zona noreste.

Concentración de PM_{10} en los periodos de lluvias y sequías de 1988 a 1995



Al igual que las partículas suspendidas totales, la disminución de las concentraciones de partículas menores a diez micras es atribuible a las medidas implantadas por el gobierno para controlar las primeras; las cuales, a su vez contemplan el control de las partículas con un diámetro menor a 10 micrómetros (PM_{10}), debido a que ambos tipos de partículas tienen un origen común a través de fuentes naturales y antropogénicas; las primeras, comprenden a las áreas sin vegetación o en proceso de erosión y a la actividad volcánica y las segundas, al uso de combustibles fósiles, vehículos y procesos industriales. Debido al tamaño de las PM_{10} , estas se consideran más nocivas que las PST porque pueden permanecer en la atmósfera por periodos de horas o días, lo que reduce la visibilidad y genera reacciones químicas con otros contaminantes¹⁹.

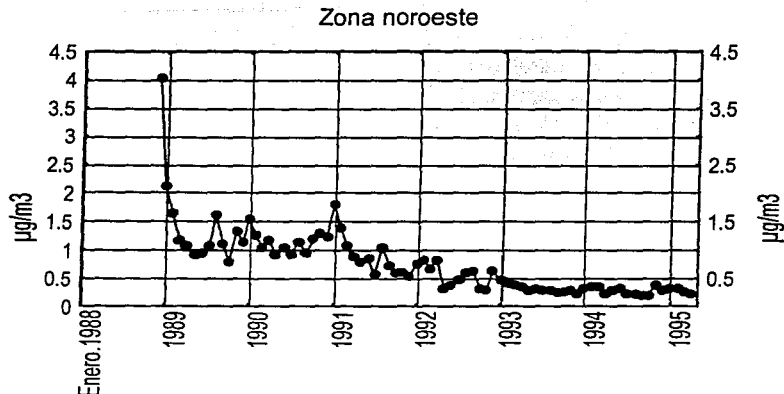
5.2.5 Tendencias históricas del Plomo (Pb)

En el aire, el plomo se encuentra en estado sólido y forma parte de las partículas suspendidas totales. Su principal fuente de emisión son los automóviles, debido al uso de gasolinas que contienen tetraetilo de plomo, el cual se usa como antidetonante; este puede ser depositado en el agua y suelo a través del depósito seco o húmedo,

5.2 Variación temporal de los contaminantes PST, PM_{10} y Pb

Incrementando los problemas de contaminación. La norma de calidad del aire para el plomo se establece como un promedio aritmético de tres meses de $1.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$; esta se usa como el límite permisible de plomo para protección a la salud de los habitantes de la ZMCM.

● *Tlalnepantla*

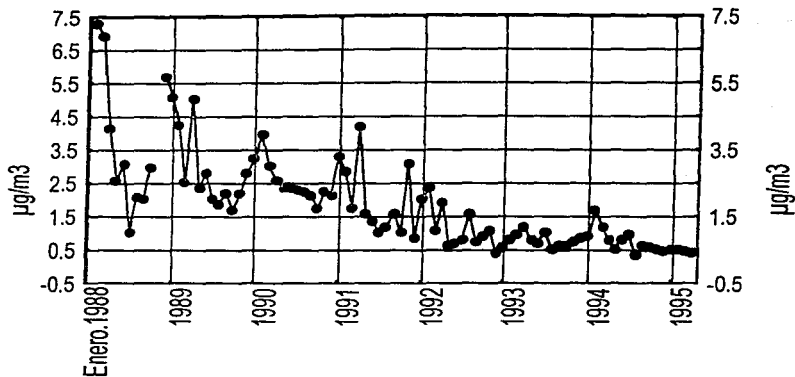


Tlalnepantla, presenta en general, tendencia decreciente; de diciembre de 1988 a noviembre de 1990 la serie fluctúa entre 0.8 y $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$, en este intervalo el 17% de los datos sobrepasan la norma de calidad del aire correspondiente a $1.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$; posteriormente, se distingue otro periodo que finaliza en noviembre de 1992 donde todos los datos permanecen por debajo de la norma, por último se presenta un periodo donde la serie se estabiliza fluctuando entre 0.2 y $0.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$. La tasa de cambio entre el primer periodo y el último es de -76.21% .

Concentración de Pb por periodo

Periodo	Duración del periodo	Porcentaje de concentraciones mayor a la norma	Promedio de concentraciones en $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Tasa de cambio por periodo
1	Dic.88 - Nov.90	16.67%	1.240	
2	Dic.90 - Nov.92	04.17%	0.884	-28.71%
3	Dic.92 - Mar.95	0%	0.295	-66.63%

Zona Noreste



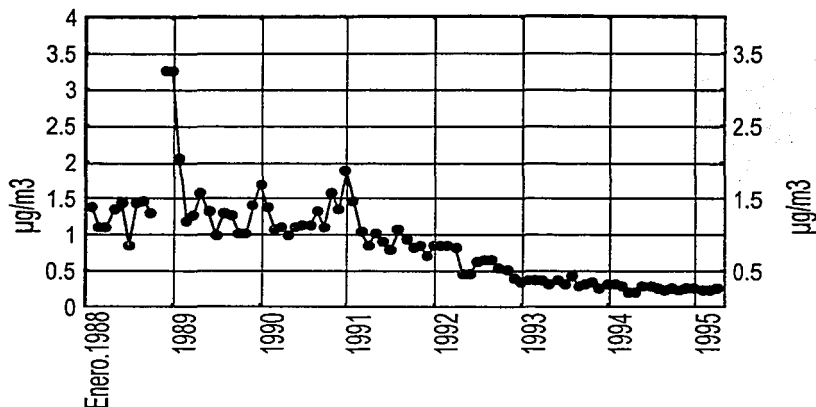
En la zona de *Xalostoc*, correspondiente a la zona noreste, prevalece tendencia decreciente en las concentraciones de plomo atmosférico. En la serie de tiempo se identifican cuatro periodos de comportamiento, el primero, de 1988 hasta octubre de 1989, donde el plomo alcanza los niveles más altos de todos los registros, en este periodo el 95% de los datos sobrepasan la norma de $1.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$, el dato más alto alcanza los $7.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$; el segundo periodo inicia en noviembre de 1989 y termina en noviembre de 1990, el contaminante fluctúa entre 1.7 y $4 \mu\text{g}/\text{m}^3$, en este periodo el 100% de los datos superan la norma de calidad del aire; el tercer periodo presenta un comportamiento decreciente, el contaminante logra descender de $4.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$, que es el dato más alto, hasta $0.68 \mu\text{g}/\text{m}^3$ que corresponde al dato más bajo registrado en todo el periodo; por último se presenta el notorio descenso que conforma el cuarto periodo donde el Pb atmosférico fluctúa entre 0.3 y $1.64 \mu\text{g}/\text{m}^3$. La tasa de cambio entre el primer periodo y el último es de -78.83% .

Concentración de Pb por periodo

Periodo	Duración del periodo	Porcentaje de concentraciones mayor a la norma	Promedio de concentraciones en $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Tasa de cambio por periodo
1	Ene.88 - Oct.89	95.24%	3.302	
2	Nov.89 - Nov.90	100.0%	2.580	-21.87%
3	Dic.90 - Oct.92	47.83%	1.705	-33.91%
	Nov.92 - Mar.95	3.45%	0.699	-59.00%

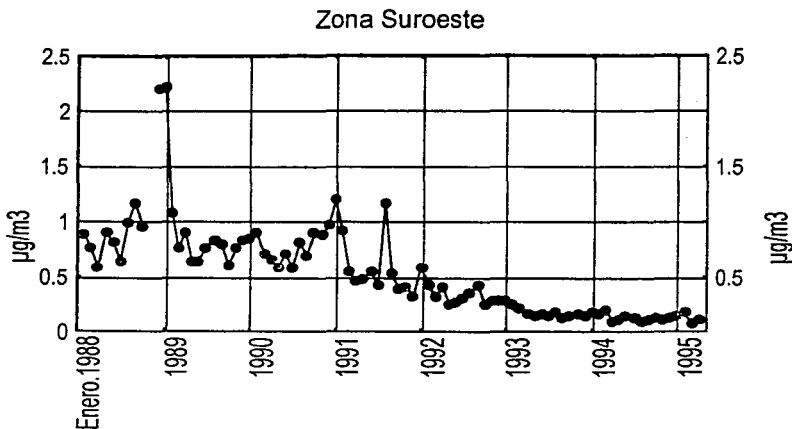
5.2 Variación temporal de los contaminantes PST, PM_{10} y Pb

Zona Centro



En la estación de *Merced*, se identifican tres periodos; el primero abarca de enero de 1988 hasta noviembre de 1990 donde, en general, la serie fluctúa entre 0.690 y 2.230 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, excluyendo los datos correspondientes a noviembre y diciembre de 1988, los cuales exceden este intervalo, el 18% de los datos sobrepasan la norma; de diciembre de 1990 a noviembre de 1992, se distingue un periodo donde el plomo atmosférico fluctúa entre 0.3 y 1.87 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ con tendencia decreciente, y por último los datos se estabilizan fluctuando entre 0.19 y 0.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. La tasa de cambio entre el primer periodo y el último es de -79.30%.

Concentración de Pb por periodo				
Periodo	Duración del periodo	Porcentaje de concentraciones mayor a la norma	Promedio de concentraciones en $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Tasa de cambio por periodo
1	Ene.88 - Nov.90	17.65%	1.353	
2	Dic.90 - Nov.92	04.17%	0.890	-34.22%
3	Dic.92 - Mar.95	0%	0.280	-68.54%

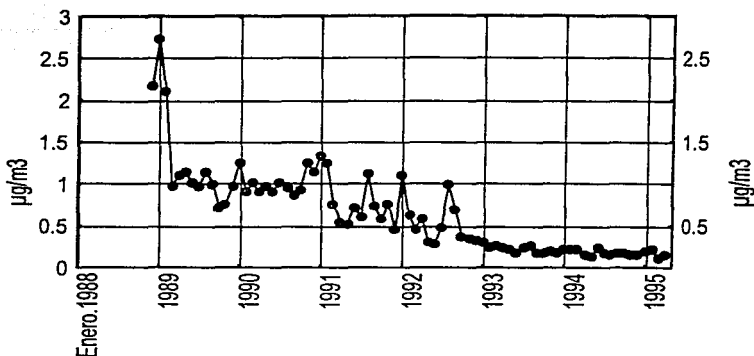


En la estación de monitoreo *Pedregal*, observamos un primer periodo hasta noviembre de 1990 donde las concentraciones, en general, fluctúan entre 0.5 y 1.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, exceptuando las correspondientes a noviembre y diciembre de 1988; posteriormente, de diciembre de 1990 a agosto de 1992 es notorio el descenso que presenta la serie para posteriormente, en el último periodo estabilizarse. En toda la serie de tiempo correspondiente a la estación del Pedregal, los únicos datos que superan al límite permisible son los meses de noviembre y diciembre de 1989. La tasa de cambio entre el primer periodo y el último es de -81.46%.

Concentración de Pb por periodo				
Periodo	Duración del periodo	Porcentaje de concentraciones mayor a la norma	Promedio de concentraciones en $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Tasa de cambio por periodo
1	Ene.88 - Nov.90	5.88%	0.847	
2	Dic.90 - Agos.92	0%	0.617	-27.15%
3	Sep.92 - Mar.95	0%	0.157	-74.55%

5.2 Variación temporal de los contaminantes PST, PM_{10} y Pb

Zona Sureste

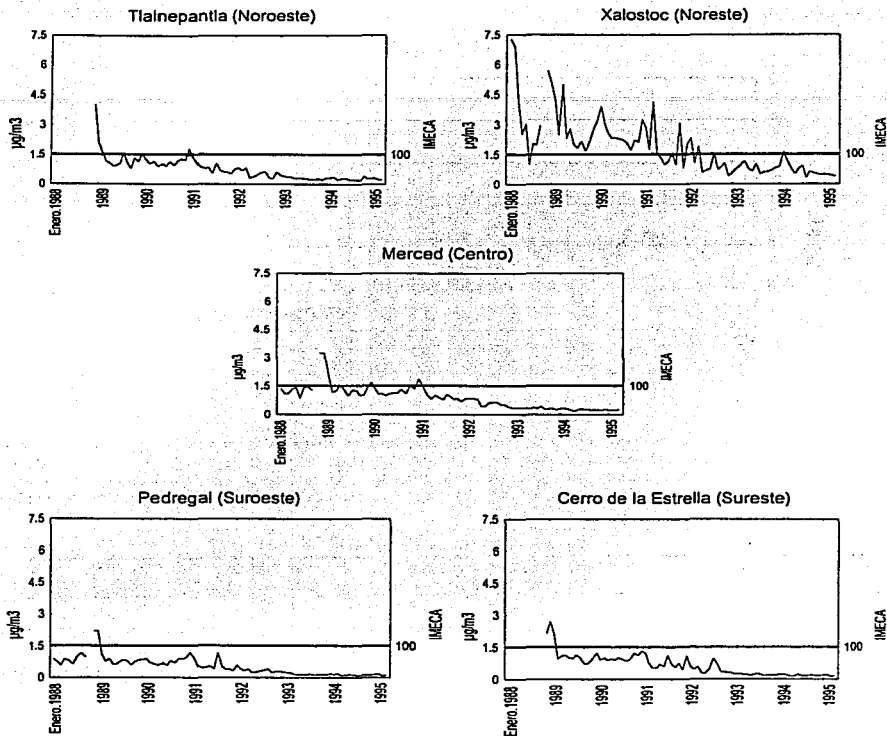


Cerro de la Estrella, después de Pedregal, es la segunda estación que presenta las menores concentraciones de plomo atmosférico; esta serie de tiempo, también presenta tres periodos de comportamiento: el primero definido hasta noviembre de 1990 donde el intervalo de fluctuación general tiene los límites de 1.3 y 0.70 $\mu\text{g}/\text{m}^3$; el segundo periodo se encuentra entre 1.24 y 1.33 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y el último se estabiliza entre 0.110 y 0.250 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. La tasa de cambio entre el primer periodo y el último es de -81.61%.

Concentración de Pb por periodo				
Periodo	Duración del periodo	Porcentaje de concentraciones mayor a la norma	Promedio de concentraciones en $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Tasa de cambio por periodo
1	Nov.88 - Nov.90	12.50%	1.115	
2	Dic.90 - Agos.92	0%	0.758	-32.02%
3	Sep.92 - Mar.95	0%	0.205	-72.95%

5.2.6 Generalidades del Plomo (Pb)

Las siguientes series se presentan graficadas con base en la escala de Xalostoc, debido a que al igual que las PST y PM_{10} , esta estación presenta las concentraciones más elevadas de plomo atmosférico de 1988 hasta marzo de 1995.



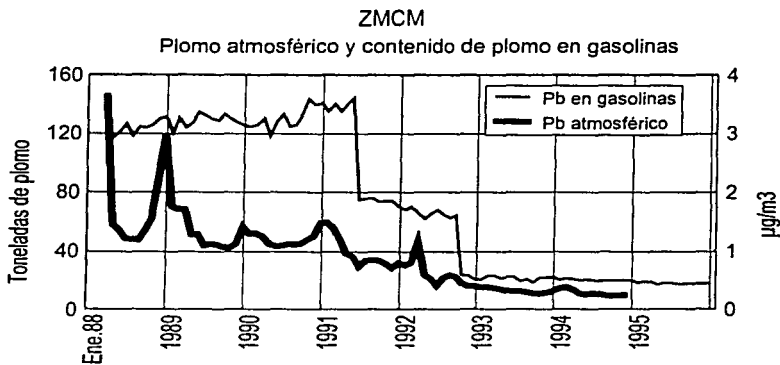
Como podemos observar, la contaminación por medio del metal pesado, plomo, alcanzó niveles muy altos, principalmente en noviembre y diciembre de 1989, por ello, se tuvo que recurrir a medidas radicales para que estos niveles descendieran notablemente. En general se detecta que a partir de 1991 comienza una reducción significativa de la concentración de este contaminante en la atmósfera lo cual se le atribuye a la introducción al

5.2 Variación temporal de los contaminantes PST, PM_{10} y Pb

mercado de gasolina Magna-Sin, con un menor contenido de plomo que las gasolinas en uso para ese tiempo, así como a la reformulación del contenido de tetraetilo de plomo en las gasolinas; posteriormente, nuevamente se detecta un notorio descenso en el año de 1993, el cual se le atribuye al hecho de que se fijaron especificaciones a partir de diciembre de 1992, para los componentes reactivos de la gasolina que se distribuye en la ZMCM. En este último periodo, las concentraciones de plomo se estabilizan, en la mayoría de las estaciones en estudio, controlando así los efectos que ocasionaba en la salud de los habitantes de la ZMCM.

En la totalidad de sitios se logró una importante reducción de plomo atmosférico; Xalostoc presentó una variación temporal diferente a las estaciones restantes, sin embargo, también en esta estación se consiguió que a partir de abril de 1992, en general, el plomo permaneciera por debajo de la norma. El orden en que se ubican las estaciones de monitoreo atmosférico de acuerdo a la mayor concentración de plomo en la atmósfera es: Xalostoc, Merced, Tlalnepanitla, Cerro de la Estrella y en último lugar Pedregal.

La siguiente gráfica esquematiza el contenido de plomo en el total de gasolina vendida al mes en la ZMCM, a partir de enero de 1988 hasta diciembre de 1995.



El control sobre las concentraciones de plomo en la atmósfera de la ZMCM, el cual proviene de la industria vidriera, alfarera, de pigmentos, fundidoras de metales no ferrosos, de rejillas para acumuladores y baterías, y en mayor medida de la combustión del tetraetilo de plomo (TEP), empleado como antidetonante en las gasolinas, tiene su origen en las diversas medidas implantadas, en particular por la industria petrolera, con el fin de reducir su concentración en la atmósfera; estas medidas han contemplado la reducción del 92 % de plomo en la gasolina Nova Plus y la distribución de gasolina sin plomo Magna Sin, la instalación de convertidor catalítico en vehículos modelo 1991 y posteriores, disminución de contenido de plomo en pinturas, barnices, tintas, esmaltes y lacas, así como su eliminación en latas de alimento, utensilios escolares y juguetes.

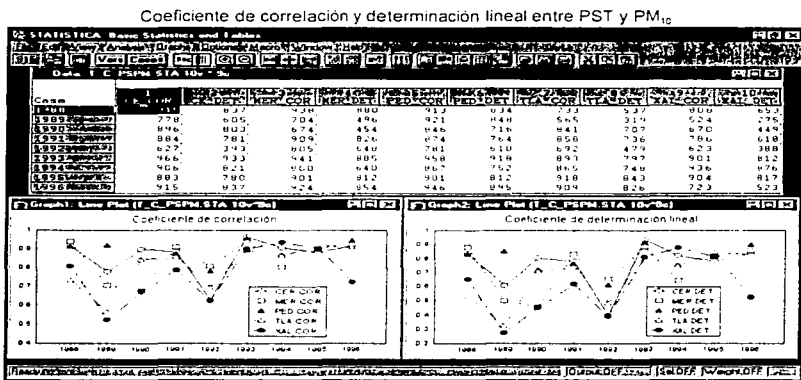
En la siguiente tabla se presentan las reformulaciones que se le han hecho a las gasolinas con plomo, donde antes de ellas, contenían 2.5 cc/gal de TEP.

Año	Contenido máximo de TEP	Reduccion total de TEP
1986	1 cc/gal	60%
1991	0.3 a 0.54 cc/gal	46%
1992	0.2 a 0.3 cc/gal	44%

5.3 Análisis de correlación lineal entre los contaminantes en estudio

5.3.1 Relación lineal entre PST y PM_{10}

Sabemos que el segundo problema de contaminación en la ZMCM lo constituyen las partículas suspendidas en el aire y que estas a su vez pueden ser clasificadas de acuerdo a su tamaño; el interés de esta clasificación, se debe a la importancia que representa el tamaño de las partículas en la salud, donde las partículas menores a diez micrómetros son las que causan un mayor riesgo a la misma. Con la finalidad de determinar la relación existente entre PST y PM_{10} , se ha realizado un análisis de correlación. En la siguiente figura, se muestran gráficamente tanto el coeficiente anual de correlación como el de determinación para cada zona de monitoreo en estudio (Tlalnepantla, Xalostoc, Merced, Pedregal y Cerro de la Estrella). La tabla de las transformaciones que se usaron para obtener cada coeficiente se presentan en el anexo B.



Los coeficientes de correlación entre PST y PM_{10} son significativos para todos los años que abarcó el estudio (1988-1996); además, podemos observar que en general, estos son altos. La evidente asociación lineal positiva dada a través de los coeficientes de correlación nos indica que ambos contaminantes presentan un comportamiento muy similar; por ello, las medidas implantadas para disminuir la concentración de *partículas suspendidas totales* pueden ser en general las mismas que ayudan a disminuir las *partículas menores a diez micrómetros*.

Al observar la gráfica correspondiente al coeficiente de determinación, se advierte un comportamiento variable en el mismo a través de los años, para todas las estaciones; además, podemos mencionar que de acuerdo a la asociación lineal existente entre estos dos contaminantes el coeficiente de determinación indica qué porcentaje de variación de las PST se explica por medio de la concentración atmosférica de PM_{10} ; estos porcentajes, se presentan en la siguiente tabla.

Porcentaje de determinación lineal entre PST y PM_{10}					
Año	Tlalnepantla	Xalostoc	Merced	Pedregal	C.Estrella
1988	53.7%	65.3%	88.0%	83.4%	83.7%
1989	31.9%	27.5%	49.6%	84.8%	60.5%
1990	70.7%	44.9%	45.4%	71.6%	80.3%
1991	73.6%	61.8%	82.6%	76.4%	78.1%
1992	47.9%	38.8%	64.8%	61.0%	39.3%
1993	79.7%	81.2%	88.5%	91.8%	93.3%
1994	74.8%	87.6%	64.0%	75.2%	82.1%
1995	84.3%	81.7%	81.2%	81.2%	78.0%
1996	82.6%	52.3%	85.4%	89.5%	83.7%

El orden que ocupan las estaciones de monitoreo atmosférico de acuerdo al mayor porcentaje de ajuste lineal es: Pedregal, Cerro de la Estrella, Merced, Tlalnepantla y en último lugar Xalostoc.

A partir de que se obtuvieron coeficientes de dependencia altos y apoyándonos en el análisis de variación temporal de estos dos contaminantes, sabemos que ambos presentaron descensos significativos a través del tiempo, podemos mencionar que la disminución de las partículas menores a diez micras se refleja en la disminución de las partículas suspendidas totales, por lo que las medidas implantadas para la disminución tanto de PST como de PM_{10} han reflejado efectos para ambos contaminantes. Es importante mencionar que al correlacionar las series completas correspondientes a estos dos contaminantes, también se obtienen correlaciones altas. A continuación se presenta una tabla con estos coeficientes; en el anexo B se muestran los diagramas de dispersión para cada estación de monitoreo correspondientes a estos coeficientes de correlación y dependencia.

Coeficiente de correlación y determinación lineal por punto de monitoreo			
Estación	Transformación	Coefficiente de correlación	Porcentaje de dependencia lineal
Tlalnepantla	ln	0.798	63.68%
Xalostoc	sqr	0.689	47.47%
Merced	ln	0.787	61.94%
Pedregal	ln	0.858	73.62%
C. de la Estrella	ln	0.789	62.25%

la siguiente tabla muestra los años de mayor a menor ajuste lineal de acuerdo al coeficiente de determinación lineal:

Tlalnepantla	Xalostoc	Merced	Pedregal	Cerro de la Estrella
1995	1994	1993	1993	1993
1996	1995	1988	1996	1996
1993	1993	1996	1989	1988
1994	1988	1991	1988	1994
1991	1991	1995	1998	1990
1990	1996	1992	1991	1991
1988	1990	1994	1994	1995
1992	1992	1989	1990	1989
1989	1989	1990	1992	1992

5.3.2 Relación lineal entre PST y Pb

El plomo forma parte de las partículas suspendidas en el aire. Su principal fuente de emisión son los automóviles, debido al uso de gasolinas con plomo y las fundidoras ⁽⁷⁾. En general, podemos decir que la concentración de este elemento en el aire disminuyó notoriamente a partir de 1991.

Con la finalidad de averiguar la magnitud de la relación lineal entre PST y Pb se obtuvieron los coeficientes de correlación para las series divididas por periodos anuales y para las series completas, de las cinco estaciones de monitoreo en estudio. La aplicación de la metodología correspondiente mostró relación lineal significativa para Merced, en los años de 1988 y 1989; para Pedregal, en 1992 y 1994; para Cerro de la Estrella, en 1989, 1993 y 1994; para Tlalnepantla, en 1990, 1991, 1992, 1993, 1994; y por último, Xalostoc, que fue la estación que presentó para todos los años en estudio coeficientes significativos.

Coeficientes de correlación significativos entre PST y Pb					
Año	Tlalnepantla	Xalostoc	Merced	Pedregal	C. Estrella
1988		0.623	0.401		
1989		0.341	0.392		0.340
1990	0.540	0.410			
1991	0.480	0.432			
1992	0.459	0.307		-0.30	
1993	0.433	0.447			0.296
1994	0.493	0.347		0.27	0.346
1995		0.584			

La existencia de una alta fluidez vehicular, para el área de Tlalnepantla, donde circulan automóviles particulares y autobuses urbanos originando el consumo de una mayor cantidad de gasolina con plomo y la ubicación de una gran parte del sector industrial en la zona de Xalostoc, donde destacan algunas fundidoras cercanas al punto de monitoreo, las cuales son fuente importante de contaminación por plomo; han hecho que estas zonas sean de las más afectadas por este contaminante; aunado a ello, sabemos que el plomo se localiza en la atmósfera como parte de las partículas suspendidas totales, por tanto, podemos mencionar que las correlaciones

5.3 Análisis de correlación lineal entre los contaminantes en estudio

significativas que se obtuvieron para estos puntos de monitoreo nos muestra la existencia de una relación lineal entre partículas suspendidas totales y plomo en años específicos.

Porcentaje de determinación lineal entre PST y Pb					
Estación	Tlalnepantla	Xalostoc	Merced	Pedregal	C.Estrella
1988		38.8%	16.1%		
1989		11.6%	15.4%		11.6%
1990	29.2%	16.8%			
1991	23.0%	18.7%			
1992	21.1%	09.4%		09.0%	
1993	18.7%	20.0%			08.8%
1994	24.3%	12.0%		07.3%	12.0%
1995		34.1%			

El coeficiente de determinación nos proporciona el porcentaje de PST que se puede describir a través de las concentraciones de Pb. Como podemos observar, este no sigue un patrón específico, lo cual indica que las medidas que se han utilizado para disminuir el plomo atmosférico, en general, no reflejan impacto en el descenso de las partículas suspendidas totales para las estaciones de Merced, Pedregal y Cerro de la Estrella.

A pesar de la baja relación lineal que nos muestran los coeficientes de correlación anuales entre las partículas suspendidas totales y el plomo, es importante mencionar que cuando correlacionamos las series completas, este coeficiente es significativo para todas las estaciones de monitoreo en estudio. A continuación se presenta una tabla mostrando los coeficientes de correlación y determinación con los datos de ambos contaminantes desde 1988 hasta marzo de 1995. En el anexo B se presentan los diagramas de dispersión correspondientes a estos coeficientes.

Correlación y determinación lineal por punto de monitoreo			
Estación	Transformación	Coefficiente de correlación	Porcentaje de determinación lineal
Tlalnepantla	ln	0.315	09.92%
Xalostoc	ln	0.451	20.34%
Merced	ninguna	0.321	10.30%
Pedregal	ln	0.234	05.48%
C. de la Estrella	ln	0.315	09.92%

Capítulo 6

Modelos ARIMA y proyecciones futuras de los contaminantes PS_T , PM_{10} y Pb

6.1 Introducción

El desarrollo industrial de las grandes ciudades, ha ocasionado tanto progresos importantes para sus comunidades como fenómenos irregulares difíciles de controlar; este tipo de fenómenos han provocado una gran preocupación debido a las consecuencias que imperan en los mismos, donde muchas de ellas afectan a la población en diversos ámbitos. Un fenómeno que se origina principalmente como resultado de los desarrollos urbanos que existen en las grandes ciudad y que regularmente mantiene a la población en alerta es *la contaminación ambiental*.

La contaminación ambiental en la Ciudad de México surgió debido a que los polos donde se concentra la población, la actividad industrial y el servicio se realizaron sin contar para su mejor logro con los mínimos planes de ordenamiento. Así, a la creciente urbanización que registró el país, se agregó la concentración en ciertas áreas, algunas de las cuales adquieren en unos cuantos años enorme magnitud.

La Ciudad de México y los municipios que la rodean y forman su Área Metropolitana tienen la peculiaridad de presentar condiciones atmosféricas poco recomendables la mayor parte del año en términos de dispersión de contaminantes afectando así la salud y el bienestar de la población; actualmente es una de las ciudades más pobladas del mundo. En los últimos años la Ciudad se ha convertido en una Zona Metropolitana con más de quince millones de habitantes, según el último censo. La contaminación del aire, es consecuencia tanto de factores urbanos, de transporte, de tecnología y de producción, como de las múltiples alteraciones ecológicas que ha sufrido el Valle en este acelerado proceso de urbanización.

La Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM) se define como el espacio territorial comprendido dentro de los límites del Distrito Federal y los diecisiete municipios del Estado de México conurbados al mismo. De acuerdo con imágenes de satélite, su extensión se estima en 3 230 kilómetros cuadrados, de los cuales 39% (1 260 km²) corresponden a la mancha urbana.

Las partículas suspendidas junto con el ozono representan los principales problemas de contaminación atmosférica en la ZMCM, debido a que estos contaminantes muestran niveles altos de concentración durante la mayor parte del año.

El daño a la salud de los habitantes de la ZMCM provocado por las altas concentraciones de estos contaminantes, ha originado que se asigne un mayor interés a este tipo de problemas para abatirlos. En el caso de

las partículas suspendidas, se sabe que de acuerdo a su tamaño es el grado de afección que tiene la población; este tipo de contaminación se encuentra muy relacionada con las áreas que carecen de cubierta vegetal. El Gobierno de la República ha tomado conciencia de este grave problema, y ha implementado diversas estrategias para disminuir las concentraciones atmosféricas de este contaminante; pero sabemos que el trabajo no es sencillo; por ello, se realizan en diferentes centros de investigación estudios referentes a dicho problema.

El estudio de la contaminación por partículas seccionado en partículas suspendidas totales (PST), partículas menores a diez micras (PM_{10}) y plomo (Pb), surgió como consecuencia del interés de proporcionar una visión futura del comportamiento atmosférico de estos tres importantes contaminantes, donde los primeros dos, no han sido controlados, por lo que la salud de la población está mucho más expuesta a las consecuencias que ocasionan las concentraciones altas de los mismos; por ello, es importante el conocimiento tanto de la variación temporal como del comportamiento futuro de estos contaminantes, para de acuerdo a él saber la rigurosidad con la que se deben implantar estrategias así como la evaluación de las que se han establecido con el objeto de controlar el problema y evitar los daños que este ocasiona; el tercer contaminante, es considerado como uno de los más peligrosos y nocivos para la salud, por tanto las medidas para disminuir sus altas concentraciones atmosféricas, tuvieron que ser muy estrictas, hecho que posteriormente se reflejó en el muestreo del contaminante, donde se comprueba la eficiencia de las medidas implantadas para mantener al contaminante bajo control; no obstante, debido al grado de afección que causa el plomo en la población, es importante continuar vigilándolo, por lo que al igual que los contaminantes anteriores, también para el plomo se obtienen proyecciones futuras.

En esta parte del trabajo se hace uso de la metodología Box-Jenkins para series de tiempo univariadas, con la cual se obtienen los modelos correspondientes a cada contaminante, por estación de monitoreo. Los pronósticos que se han obtenido nos proporcionan una visión clara acerca del comportamiento futuro que caracterizará a los contaminantes en estudio (PST, PM_{10} y Pb), en un periodo de doce meses, a partir de septiembre de 1996 hasta septiembre de 1997, tanto para las *partículas suspendidas totales* como para las *partículas menores a diez micras*; y de agosto de 1996 a agosto de 1997 para el *plomo*, tiempo en el que se hará una revisión de su comportamiento en la atmósfera.

6.2 Construcción de los modelos ARIMA

Anteriormente, en el capítulo cuatro, se explicaron los pasos o etapas en las que consiste la metodología Box-Jenkins para construir modelos ARIMA, recordemos que esta metodología es un proceso iterativo que consiste de cuatro etapas: *identificación, estimación, verificación y uso del modelo*; en el siguiente análisis se hace uso de estas etapas para identificar el modelo ARIMA específico que mejor representa a cada serie en estudio.

6.2.1 Generalidades en el análisis

Sabemos que antes de comenzar con la identificación del modelo correspondiente, las series de tiempo con las que se va a trabajar deben cumplir con la característica de *estacionaridad*, recordemos que una serie de tiempo es estacionaria si presenta varianzas constante, media constante y sus autocorrelaciones sólo dependen del intervalo que las separa. Para obtener una serie estacionaria en función de la serie original se procede a graficar las observaciones de cada una de las series en estudio contra el tiempo, donde se identifica la tendencia, la heteroscedasticidad y la existencia de fluctuaciones estacionales, y se aplican las transformaciones necesarias para que las series cumplan con la característica de estacionaridad.

De acuerdo al comportamiento de las funciones de autocorrelación y autocorrelación parcial, se *identifica* el modelo ARIMA que presenta el mejor ajuste para cada serie analizada, para el cual se *estiman* los parámetros correspondientes, mismos que se resumen en una tabla junto con su respectivo valor del estadístico t y sus límites de confianza para cada estimación de los parámetros; recordemos que el valor del estadístico t se usa como regla de decisión para determinar la significancia de cada parámetro, el cual será significativo si el valor absoluto de este es mayor que dos; los límites de los parámetros también sirven para decidir la significancia de estos mismos, debido a que si dentro del intervalo que marcan los límites se encuentra el valor cero, se decide que los parámetros no son significativos. Posteriormente se obtienen los residuales del modelo ARIMA electo para representar a la serie en estudio.

El análisis de residuales, como se explicó en el capítulo cuatro, es una forma clara para detectar violaciones a los supuestos de los modelos, donde los residuales son la parte de las observaciones que no pueden explicarse por el mismo; así es como estos, proporcionarán la *validación* del modelo electo, este diagnóstico se realiza con base en el comportamiento de los residuales, debido a que este se debe semejar al del ruido blanco. La validación consiste en obtener funciones tanto de autocorrelación como de autocorrelación parcial de los residuales, donde se presentan los límites que ayudan a decidir si una autocorrelación es significativa; además se muestra el histograma de los residuales en el que se puede visualizar la forma de la distribución que los caracteriza, la cual deberá ajustarse a una distribución normal con media cero y varianza σ^2 , también se presenta la serie de tiempo de los residuales y los límites correspondientes a dos y tres desviaciones estándar ($\pm 2\sigma$ y $\pm 3\sigma$), el primer intervalo nos ayudará a decidir si efectivamente los residuales se distribuyen como una normal, dado que si este supuesto es cierto, entonces aproximadamente el 95% de las observaciones deberán localizarse dentro de un intervalo de dos desviaciones estándar por arriba y por abajo de la media, misma que podrá verificarse que sea igual a cero.

La evaluación del modelo termina con la presencia de los *pronósticos* comparativos, los cuales sirven como último punto de referencia para evaluar el modelo electo. Por último se presenta un año de pronósticos, los cuales, se obtienen al sustituir los valores de las Z_t 's en la ecuación matemática por los correspondientes de la serie original, aplicándoles su respectiva transformación y al resultado se le aplica la inversa de ésta, en caso de habersele aplicado alguna al modelo.

En el desarrollo del análisis de series de tiempo se hizo uso de los modelos multiplicativos ARIMA. A continuación se explica el significado de los mismos así como el de sus parámetros.

6.2.2 Modelos multiplicativos

Cuando se trabaja con series de tiempo estacionales, es decir que su comportamiento muestra fluctuaciones que se repiten cada determinado tiempo, anualmente para el caso de este análisis, los modelos ordinarios ARIMA no son suficientes para representar este tipo de fenómenos.

Una vez que se detecta que el fenómeno en estudio presenta comportamientos similares entre las observaciones para el mismo mes en años consecutivos, se prosigue a hacer uso de los modelos multiplicativos, los cuales se caracterizan por tener una parte ordinaria, (p, d, q) , y una estacional, (P, D, Q) ; donde se toman en cuenta tanto los efectos no-estacionales como los estacionales. Este tipo de modelos se expresa como:

$$\phi(B)\Phi(B^s)Z_t = \theta(B)\Theta(B^s)e_t, \text{ ó ARIMA}(p, d, q) \times (P, D, Q)_s$$

donde

$\phi(B) = 1 - \phi_1 B - \phi_2 B^2 - \dots - \phi_p B^p$; ϕ es el parámetro autorregresivo que describe el efecto del cambio de las observaciones pasadas en la observación actual.

$\Phi(B^s) = 1 - \Phi_1 B^s - \Phi_2 B^{2s} - \dots - \Phi_p B^{ps}$; Φ es el parámetro autorregresivo estacional que describe el efecto de un cambio de las observaciones s periodos atrás en la observación actual.

$Z_t = \nabla^d \nabla^s W_t$. Serie estacionaria, la cual es el resultado de las transformaciones que se le aplican a la serie original.

$\theta(B) = 1 - \theta_1 B - \theta_2 B^2 - \dots - \theta_q B^q$; θ es el parámetro de promedios o medias móviles que describe el efecto de los choques aleatorios anteriores en la observación actual.

$\Theta(B^s) = 1 - \Theta_1 B^s - \Theta_2 B^{2s} - \dots - \Theta_Q B^{Qs}$; Θ es el parámetro de promedios o medias móviles estacional que describe el efecto de los choques aleatorios s periodos atrás en la observación actual.

e_t = Proceso de ruido blanco con media cero y varianza σ^2 .

AR = Proceso en el cual el valor actual de Z_t depende de los valores anteriores más un choque aleatorio.

MA = Proceso en el cual el valor actual de Z_t se representa como una suma de choques aleatorios ponderados en el tiempo.

p = Orden del proceso AR ordinario.

d = Orden de las diferencias ordinarias.

q = Orden del proceso MA ordinario.

P = Orden del proceso AR estacional.

D = Orden de las diferencias estacionales.

Q = Orden del proceso MA estacional.

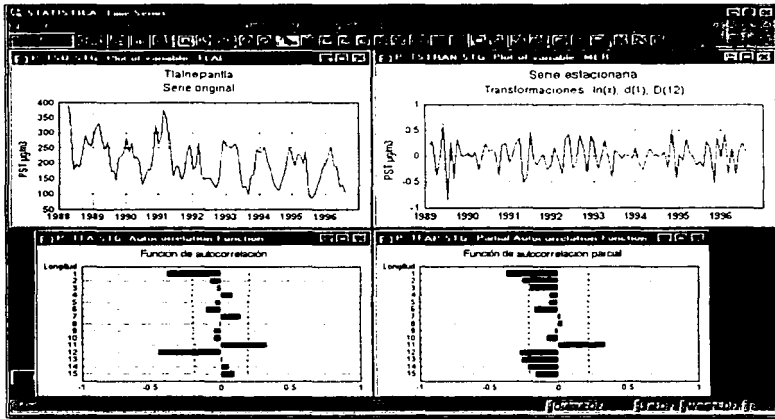
s = Longitud del periodo estacional.

6.2 Construcción de los modelos ARIMA

6.2.3 Modelos ARIMA para las partículas suspendidas totales

● TLALNEPANTLA

● Proceso de identificación y estimación de parámetros



Al observar la gráfica correspondiente a la serie original de las concentraciones registradas en la zona de *Tlalnepantla*, se puede identificar varianza no constante, tendencia decreciente y fluctuaciones estacionales. Para convertir a la serie original en una serie estacionaria, fue necesario aplicarle una transformación logarítmica para estabilizar la varianza, una diferencia ordinaria para eliminar la tendencia y una diferencia estacional para eliminar las fluctuaciones estacionales. La gráfica de la serie estacionaria fue construida en función de la serie original.

En las gráficas de las funciones de autocorrelación (FAC) y autocorrelación parcial (FACP), podemos observar que en general la primera se trunca y la segunda presenta comportamiento decreciente. Las funciones significativas de autocorrelación son: 1, 11 y 12; y las de autocorrelación parcial son: 1, 2, 11, 12, 13 y 14. El modelo que mejor se ajusta a la serie correspondiente a la zona de Tlalnepantla es un ARIMA (0,1,1)(2,1,0) con una longitud estacional de doce meses, el cual se representa a través de la siguiente ecuación:

$$Z_t = Z_{t-1} + Z_{t-12}(1 + \Phi_1) - Z_{t-13}(1 + \Phi_1) - Z_{t-24}(\Phi_1 - \Phi_2) + Z_{t-25}(\Phi_1 - \Phi_2) - \Phi_2 Z_{t-36} + \Phi_2 Z_{t-37} - \theta e_{t-1} + e_t$$

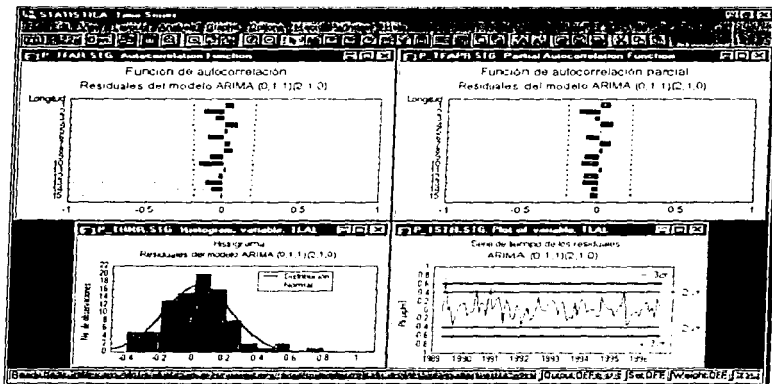
Tabla de transformaciones y estimación de parámetros

Transformación	Parámetros	Estadístico t	Límite inferior 95% de confianza	Límite superior 95% de confianza
$\ln(x)$	$\alpha_1 = 0.7296$	8.7784	0.5644	0.8949
$d(1)$	$\phi_1 = -0.7481$	-6.7477	-0.9685	-0.5276
$D(12)$	$\phi_2 = -0.2900$	-2.3727	-0.5331	-0.0470

Sustituyendo los parámetros estimados se obtiene la siguiente ecuación:

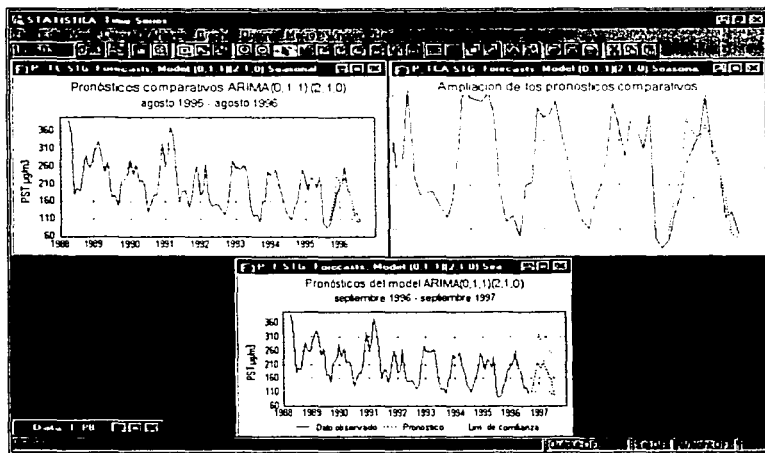
$$Z_t = Z_{t-1} + 0.2519Z_{t-2} - 0.2519Z_{t-1} + 0.4581Z_{t-2} - 0.4581Z_{t-3} + 0.29Z_{t-12} - 0.29Z_{t-11} - 0.7296e_{t-1} + e_t$$

• *Análisis de residuos*



Estas gráficas presentan el comportamiento de los residuos que generó el modelo $ARIMA(0,1,1)(2,1,0)$, donde se observa un buen ajuste del mismo, debido a que las FAC's y FACP's no son significativamente diferentes de cero, por tanto los residuos son independientes. Tanto en la gráfica del histograma como en la serie de tiempo se confirma que los residuos tienen media cero; en la primera se verifica el ajuste a una distribución normal y en la segunda se observa que estos tienen varianzas constante y que a su vez se encuentran dentro de dos desviaciones estándar; además de que por el hecho de que no salgan de los límites marcados por más y menos tres desviaciones estándar, indica que no existen observaciones anormales en la serie analizada.

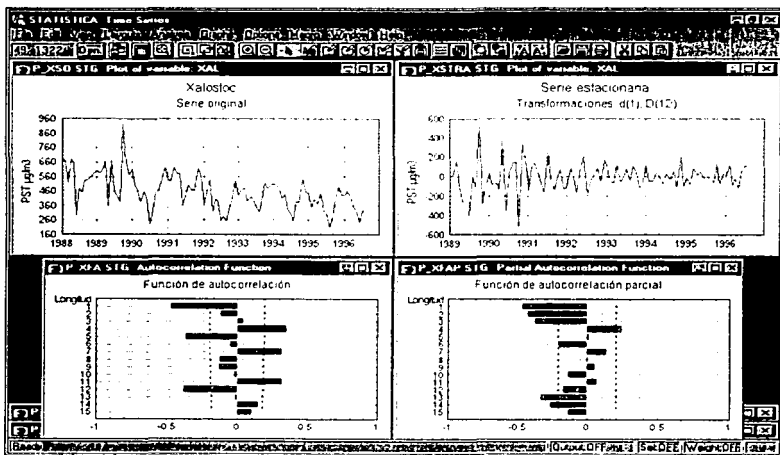
• *Pronósticos generados por el modelo ARIMA (0, 1, 1)(2, 1, 0)*



La siguiente tabla presenta los pronósticos de partículas suspendidas totales para la estación de Tlalhepan de septiembre de 1996 hasta septiembre de 1997, así como su intervalo con un 90% de confiabilidad.

Fecha	Pronóstico	Limite inferior 90% de confianza	Limite superior 90% de confianza
Sep.96	109.9104	077.6358	155.6021
Oct.96	140.4050	097.9456	201.2705
Nov.96	163.5657	112.7341	237.3170
Dic.96	216.3546	147.3855	317.5978
Ene.97	206.4422	139.0473	306.5028
Feb.97	196.1466	130.6659	294.4478
Mar.97	227.7120	150.0728	345.5172
Abr.97	196.6216	128.2342	301.4802
May.97	177.4693	114.5673	274.9070
Jun.97	161.2802	103.0824	252.3350
Jul.97	104.3676	066.0586	164.8928
Ago.97	91.2925	057.2333	145.6203
Sep.97	104.4681	063.3000	172.4104

- Proceso de identificación y estimación de parámetros



En la gráfica original de la serie de *Xalostoc* se observa varianza constante, tendencia decreciente y fluctuaciones estacionales. Para estacionar la serie, fue necesario aplicar una diferencia ordinaria y una diferencia estacional. La gráfica estacionaria, se construyó en función de la serie original.

La función de autocorrelación presenta comportamiento decreciente con las siguientes FAC's significativas: 1, 4, 5, 7, 11 y 12; la función de autocorrelación parcial muestra comportamiento truncado en tres, con correlaciones significativas en: 1, 2, 3, 13 y 14. El modelo que mostró el mejor ajuste fue un ARIMA (3,1,0)(2,1,0) con una longitud estacional de doce meses, el cual se representa por la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned}
 Z_t = & Z_{t-1}(\phi + 1) + Z_{t-2}(\phi - \phi) + Z_{t-3}(\phi - \phi) - Z_{t-4}(\phi) + Z_{t-12}(\Phi_1 + 1) \\
 & - Z_{t-13}(\phi\Phi_1 + \Phi_1 + \phi + 1) - Z_{t-14}(\Phi_1\phi - \phi\Phi_1 + \phi - \phi) - Z_{t-15}(\Phi_1\phi \\
 & - \Phi_1\phi + \phi - \phi) + Z_{t-16}(\Phi_1\phi + \phi) + Z_{t-24}(\Phi_2 - \Phi_1) - Z_{t-25}(\Phi_2\phi + \\
 & \Phi_2 - \phi\Phi_1 - \Phi_1) - Z_{t-26}(\Phi_2\phi - \Phi_2\phi - \Phi_1\phi + \phi\Phi_1) - Z_{t-27}(\Phi_2\phi - \\
 & \Phi_2\phi - \Phi_1\phi + \Phi_1\phi) + Z_{t-28}(\Phi_2\phi - \Phi_1\phi) - Z_{t-36}(\Phi_2) + Z_{t-13}(\Phi_2\phi \\
 & + \Phi_2) + Z_{t-18}(\Phi_2\phi - \Phi_2\phi) + Z_{t-19}(\Phi_2\phi - \Phi_2\phi) - Z_{t-40}(\Phi_2\phi) + \epsilon_t
 \end{aligned}$$

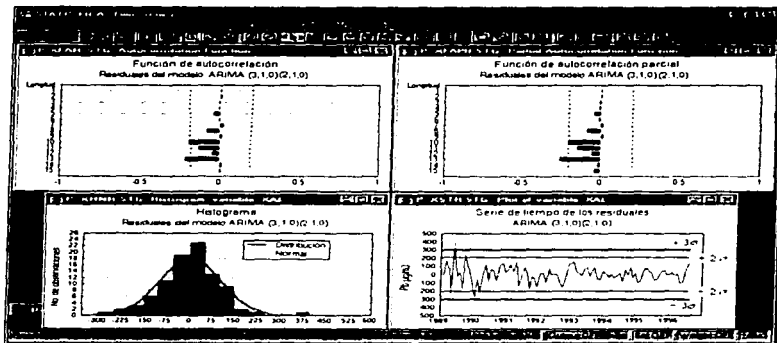
Tabla de transformaciones y estimación de parámetros

Transformación	Parámetros	Estadístico t	Límite inferior 95% de confianza	Límite superior 95% de confianza
d(1)	$\phi_1 = -0.9633$	-9.2556	-1.1702	-0.7564
D(12)	$\phi_2 = -0.8076$	-6.7042	-1.0471	-0.5682
	$\phi_3 = -0.4203$	-4.0581	-0.6262	-0.2144
	$\phi_4 = -0.6809$	-6.0946	-0.9030	-0.4588
	$\phi_5 = -0.2941$	-2.6163	-0.5177	-0.0706

sustituyendo los parámetros estimados se obtiene la siguiente ecuación:

$$Z_t = 0.0367Z_{t-1} + 0.1557Z_{t-2} + 0.3873Z_{t-3} + 0.4203Z_{t-4} + 0.3191Z_{t-5} - 0.0117Z_{t-6} \\ - 0.0497Z_{t-7} - 0.1236Z_{t-8} - 0.1341Z_{t-9} + 0.3868Z_{t-10} - 0.0142Z_{t-11} - 0.0602Z_{t-12} \\ - 0.1498Z_{t-13} - 0.1626Z_{t-14} + 0.2941Z_{t-15} - 0.0108Z_{t-16} - 0.0458Z_{t-17} - 0.1139Z_{t-18} \\ - 0.1236Z_{t-19} + e_t$$

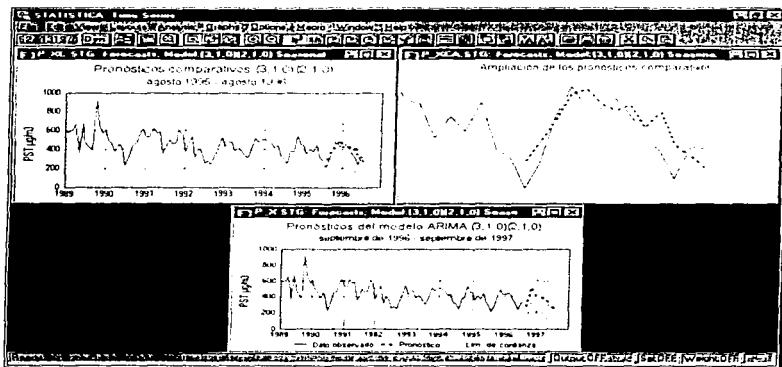
• *Análisis de residuales*



A pesar de que las funciones de autocorrelación y autocorrelación parcial de los residuales no son todas independientes, se eligió el modelo ARIMA (3,1,0)(2,1,0), como resultado de observar que su ajuste con la serie

original es aceptable, lo cual se puede verificar en la gráfica correspondiente a los pronósticos comparativos de esta serie de tiempo; además el histograma presenta un buen ajuste a la distribución normal y la serie de tiempo de los residuales indica que estos tienen media cero y varianza constante, así como el ajuste de cada dato a una distribución normal, esto debido a que en general se encuentran dentro de dos desviaciones estándar. Además de no identificarse datos discrepantes en la serie en estudio.

- *Pronósticos generados por el modelo ARIMA (3, 1, 0)(2, 1, 0).*

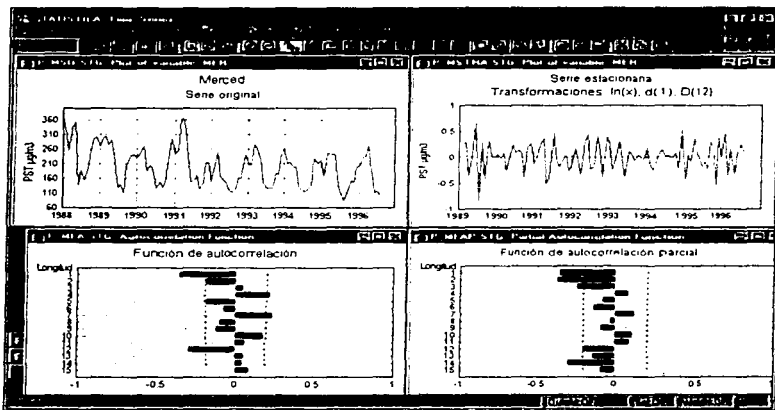


La siguiente tabla presenta los pronósticos de partículas suspendidas totales para la estación de Xalostoc del septiembre de 1996 hasta septiembre de 1997, así como su intervalo con un 90% de confiabilidad.

Fecha	Pronóstico	Limite inferior 90% de confianza	Limite superior 90% de confianza
Sep.96	268.6906	095.7743	441.6069
Oct.96	396.2059	223.1731	569.2388
Nov.96	519.1197	343.9703	694.2691
Dic.96	445.1017	256.8651	633.3382
Ene.97	407.9650	202.6857	613.2443
Feb.97	414.1415	207.1039	621.1791
Mar.97	418.4396	205.0067	631.8725
Abr.97	349.8279	126.1858	573.4700
May.97	375.3284	144.9331	605.7236
Jun.97	283.7735	049.2458	518.3013
Jul.97	291.2555	049.6871	532.8240
Ago.97	233.2501	000.0000	481.7945
Sep.97	289.4183	018.9839	559.8526

● MERCED

● Proceso de identificación y estimación de parámetros



En la serie correspondiente a la estación de *Merced*, se identifica varianza no constante, tendencia decreciente y fluctuaciones estacionales. Para estacionar la serie original, se aplicó una transformación logarítmica, una diferencia ordinaria y una diferencia estacional. La FAC se trunca en 1 y 12, y la FACP decrece lentamente, las FAC's son: 1, 2, 3 y 14. El modelo que presentó mejor ajuste es un ARIMA (0,1,1)(0,1,1)₁₂, con una longitud estacional de 12 meses, este modelo se representa con la siguiente ecuación:

$$Z_t = Z_{t-1} + Z_{t-12} - Z_{t-13} - \theta_1 e_{t-1} - \Theta_1 e_{t-12} + \theta_2 e_{t-13} + e_t$$

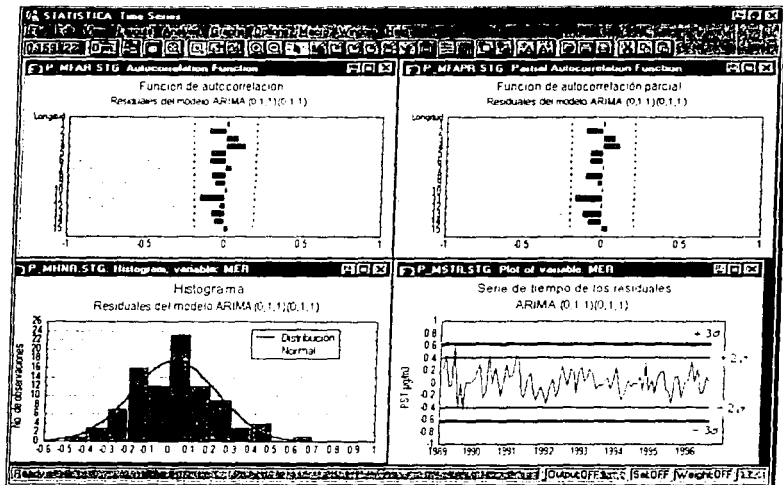
Tabla de transformaciones y estimación de parámetros

Transformación	Parámetros	Estadístico t	Límite inferior 95% de confianza	Límite superior 95% de confianza
ln(x)	$\theta_1 = 0.7180$	8.8193	0.5562	0.6797
d(1)	$\Theta_1 = 0.5160$	5.2204	0.3196	0.7124
D(12)				

Sustituyendo los parámetros estimados se obtiene la siguiente ecuación:

$$Z_t = Z_{t-1} + Z_{t-12} - Z_{t-11} - 0.7180e_{t-1} - 0.5160e_{t-12} + 0.3705e_{t-11} + e_t$$

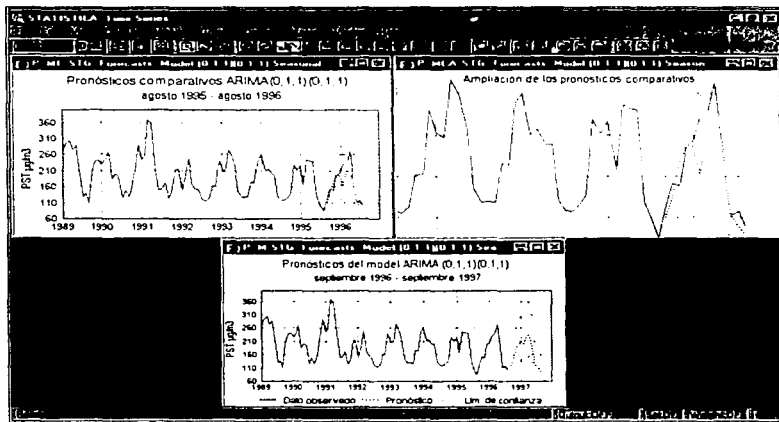
• *Análisis de residuales*



Las funciones de autocorrelación y autocorrelación parcial de los residuales, demuestran que éstos son independientes, debido a que no presentan autocorrelaciones significativas. El histograma muestra un buen ajuste con la distribución normal y en la serie de tiempo de los residuales se observa que estos tienen media cero y varianza constante, además de encontrarse dentro de los límites correspondientes a tres desviaciones estándar. Lo cual indica que no existen datos irregulares dentro de la serie; también observamos que la mayoría de los datos se encuentran dentro del intervalo correspondiente $\pm 2\sigma$ con lo que se verifica que los datos se distribuyen como una normal. El modelo que se ajusta adecuadamente a la serie analizada corresponde a un $ARIMA(0,1,1)(0,1,1)_{12}$.

6.2 Construcción de los modelos ARIMA

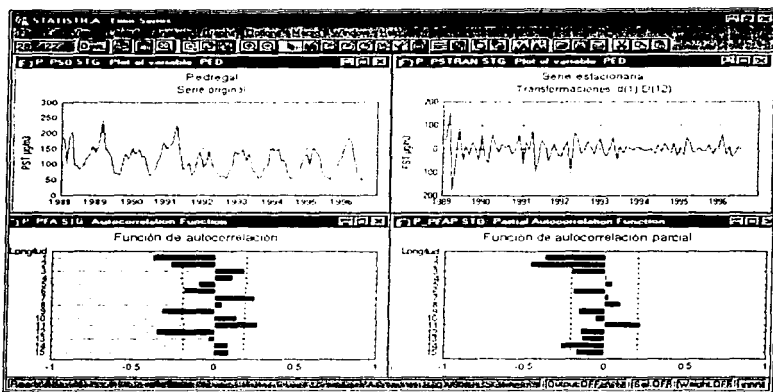
- Pronósticos generados por el modelo ARIMA (0, 1, 1)(0, 1, 1),.



La siguiente tabla presenta los pronósticos de partículas suspendidas totales para la estación de Merced de septiembre de 1996 hasta septiembre de 1997, así como su intervalo con un 90% de confiabilidad.

Fecha	Pronóstico	Limite inferior 90% de confianza	Limite superior 90% de confianza
Sep 96	117.5335	083.0828	166.2694
Oct 96	145.2368	101.2860	208.2590
Nov 96	166.4079	114.5467	241.7492
Dic 96	202.6284	137.7326	298.1015
Ene 97	205.2724	137.8374	305.6989
Feb 97	198.4690	131.7005	299.0874
Mar 97	230.4770	151.1905	351.3425
Abr 97	237.8673	154.3004	366.6930
May 97	195.3350	125.3344	304.4318
Jun 97	116.8584	074.1860	184.0763
Jul 97	110.5509	069.4548	175.9633
Ago 97	095.7641	059.5552	153.9877
Sep 97	114.5926	066.4947	197.4813

◆ Proceso de identificación y estimación de parámetros



En la serie original de la estación *Pedregal*, se identifica la tendencia ligeramente decreciente, varianza no constante y un ciclo estacional evidente; a esta serie, se le aplicó una diferencia ordinaria y una estacional para transformarla a una serie estacionaria, donde se construye la gráfica en función de la serie original

La FAC se trunca al igual que la FACP. Las autocorrelaciones significativas en la primera son: 1, 2, 7, 9 y 12; y para la segunda son: 1, 3 y 14. El modelo identificado por mostrar el mejor ajuste es un ARIMA (2,1,0)(0,1,1) con periodos estacionales de doce meses, este se representa por la siguiente ecuación:

$$Z_t = Z_{t-1}(1 + \phi) - Z_{t-2}(\phi - \phi_1) - Z_{t-3}(\phi) + Z_{t-12} - Z_{t-13}(1 + \phi) + Z_{t-14}(\phi - \phi_1) + Z_{t-14}(\phi_1) - \Theta_1 \epsilon_{t-12} + \epsilon_t$$

Tabla de transformaciones y estimación de parámetros

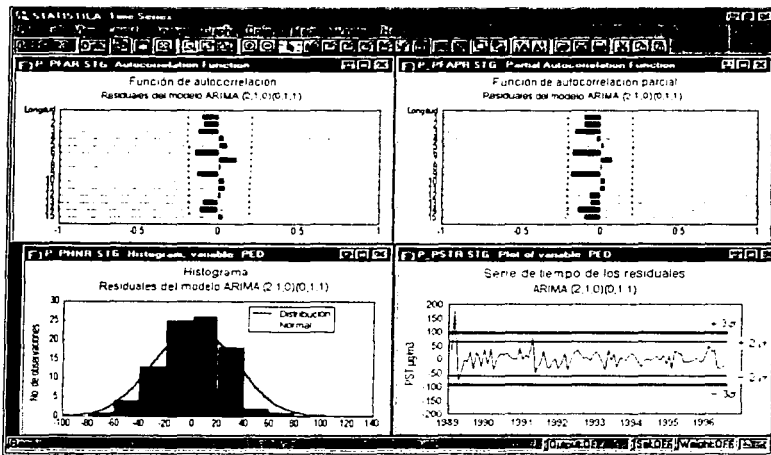
Transformación	Parámetros	Estadístico t	Límite inferior 95% de confianza	Límite superior 95% de confianza
d(1)	$\phi_1 = -0.5470$	-5.7042	-0.7376	-0.3565
D(12)	$\phi_2 = -0.4487$	-4.6787	-0.6393	-0.2581
	$\Theta_1 = 0.5523$	6.0242	0.3701	0.7345

6.2 Construcción de los modelos ARIMA

Sustituyendo los parámetros estimados se obtiene la siguiente ecuación:

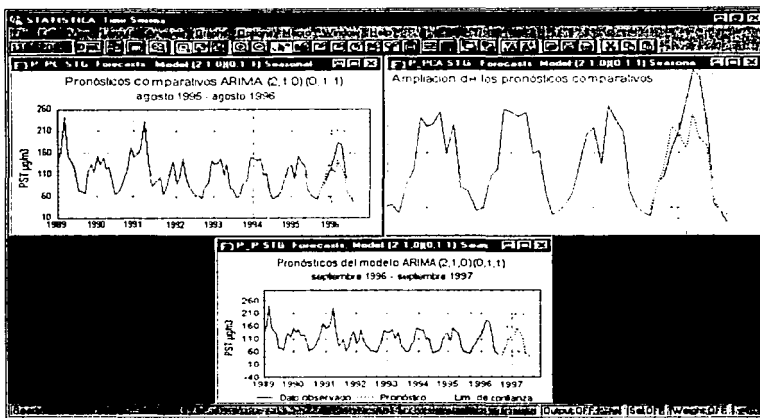
$$Z_t = 0.4529Z_{t-1} + 0.0984Z_{t-2} + 0.4487Z_{t-1} + Z_{t-1} - 0.4529Z_{t-1} - 0.0984Z_{t-1} - 0.4487Z_{t-1} - 0.5524e_{t-1} + e_t$$

• *Análisis de los residuales*



Los residuales demuestran el buen ajuste que se obtiene con el modelo $ARIMA(2,1,0)(0,1,1)_2$, donde las FAC y las FACP no presentan coeficientes significativos, lo cual indica que los residuales no están correlacionados, es decir, son independientes. El histograma muestra como las frecuencias de los residuales siguen una distribución normal con media cero, misma que se puede apreciar en su correspondiente serie de tiempo donde también observamos que los residuales no salen de los límites correspondientes a tres desviaciones estándar, lo cual indica la característica de un comportamiento regular. Esta grafica, nos ayuda a verificar que los residuales se distribuyen como una normal debido a que la mayoría permanecen dentro del intervalo correspondiente a $\pm 2\sigma$.

- Pronósticos generados por el modelo ARIMA (2, 1, 0)/(0, 1, 1)₁₂

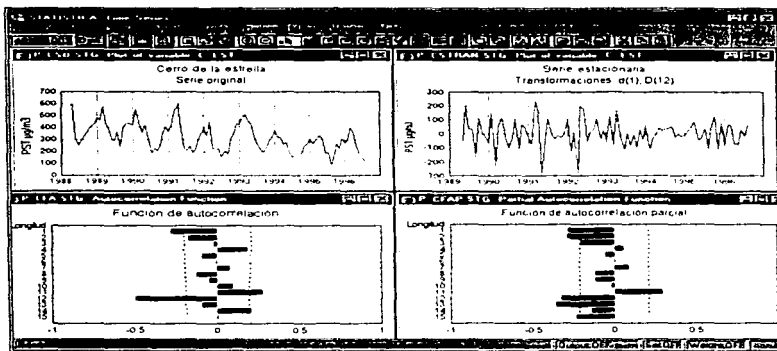


La siguiente tabla presenta los pronósticos de partículas suspendidas totales para la estación de Pedregal de septiembre de 1996 hasta septiembre de 1997, así como su intervalo con un 90% de confiabilidad.

Fecha	Pronóstico	Límite inferior 90% de confianza	Límite superior 90% de confianza
Sep.96	045.9650	00.0000	099.1363
Oct.96	072.0885	13.7171	130.4598
Nov.96	085.8385	25.2775	146.3995
Dic.96	115.8140	46.5874	185.0407
Ene.97	120.5016	45.9818	195.0215
Feb.97	125.5478	47.5495	203.5461
Mar.97	153.6089	70.6715	236.5464
Abr.97	139.7184	52.3681	227.0687
May.97	115.9443	24.9412	206.9474
Jun.97	059.2804	00.0000	154.1781
Jul.97	048.1011	00.0000	146.7647
Ago.97	041.4326	00.0000	143.5485
Sep.97	040.7574	00.0000	154.6591

CERRO DE LA ESTRELLA

Proceso de identificación y estimación de parámetros



En la serie original de *Cerro de la Estrella*, se observa tendencia decreciente, varianza constante y periodos estacionales de doce meses; la serie requirió de una diferencia ordinaria y una estacional para transformarla a una serie estacionaria.

La FAC se trunca en 1 y 12, y el comportamiento de la FACP podría identificarse también como truncado; los coeficientes significativos para esta última función son 1, 2, 11, 12 y 13. El proceso se comportó como un modelo ARIMA (0,1,1)(2,1,0) con una longitud de doce meses para el periodo estacional, el cual está representado por la siguiente ecuación:

$$Z_t = Z_{t-1} + Z_{t-12}(1 + \Phi_1) - Z_{t-11}(1 + \Phi_1) - Z_{t-24}(\Phi_1 - \Phi_2) + Z_{t-23}(\Phi_1 - \Phi_2) - \Phi_2 Z_{t-24} + \Phi_2 Z_{t-12} - \theta e_{t-1} + e_t$$

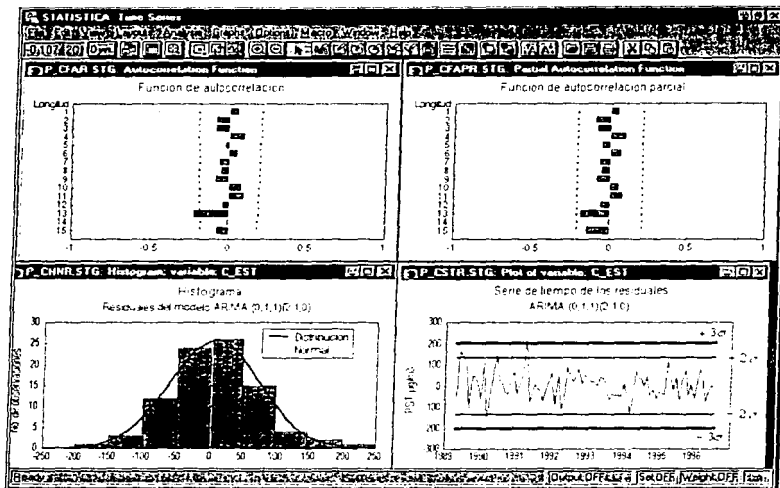
Tabla de transformaciones y estimación de parámetros

Transformación	Parámetros	Estadístico t	Límite inferior 95% de confianza	Límite superior 95% de confianza
d(1)	$\theta_1 = 0.6003$	6.2293	0.4087	0.7920
D(12)	$\Phi_1 = -0.8175$	-7.4302	-1.0363	-0.5988
	$\Phi_2 = -0.3746$	-3.3614	-0.5961	-0.1530

Sustituyendo los parámetros estimados se obtiene la siguiente ecuación:

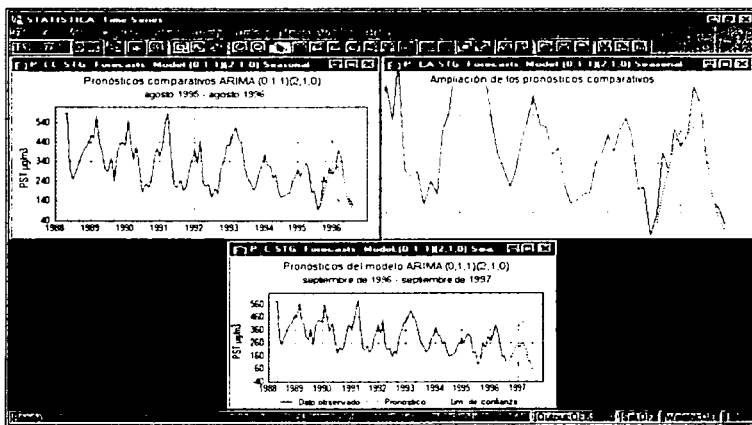
$$Z_t = Z_{t-1} + 0.1825Z_{t-2} - 0.1825Z_{t-3} + 0.4429Z_{t-4} - 0.4429Z_{t-5} + 0.3746Z_{t-6} - 0.3746Z_{t-7} - 0.6003e_{t-1} + e_t$$

• *Análisis de residuales*



Los residuales generados por el modelo ARIMA (0,1,1)(2,1,0)₁₂ indican que se ajusta adecuadamente a la serie de Cerro de la Estrella, debido a que las funciones de autocorrelación y autocorrelación parcial demuestran que son independientes, dado que no existen coeficientes de correlación significativos. El histograma nos muestra un buen ajuste a la distribución normal con media cero, lo cual puede corroborarse al observar la gráfica que corresponde a la serie de tiempo, donde la mayoría de observaciones permanecen dentro del intervalo $\pm 2\sigma$; en general no existe evidencia de observaciones irregulares debido a que estos permanecen dentro de los límites de tres desviaciones estándar.

- Pronósticos generados por el modelo ARIMA (0, 1, 1)(2, 1, 0)₁₂



La siguiente tabla presenta los pronósticos de partículas suspendidas totales para la estación de Cerro de la Estrella de septiembre de 1996 hasta septiembre de 1997, así como su intervalo con un 90% de confiabilidad.

Fecha	Pronóstico	Límite inferior 90% de confianza	Límite superior 90% de confianza
Sep.96	115.9024	001.394	230.4107
Oct.96	150.9634	027.649	274.2779
Nov.96	196.9360	065.403	328.4686
Dic.96	233.0831	093.817	372.3496
Ene.97	266.3992	119.806	412.9922
Feb.97	231.3174	077.747	384.8877
Mar.97	268.4194	108.175	428.6635
Abr.97	250.5810	083.930	417.2318
May.97	220.3994	047.579	393.2196
Jun.97	123.9974	000.000	302.7743
Jul.97	110.2753	000.000	294.8167
Ago.97	062.7879	000.000	252.9190
Sep.97	088.6427	000.000	290.1200

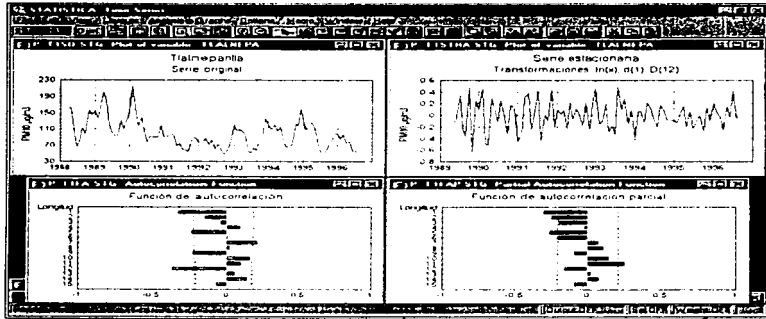
Resumen de los modelos ARIMA correspondientes a las PST

Estación de monitoreo	Varianza	Tendencia	Transformaciones	Modelo ARIMA	Longitud estacional	Parámetros
Tlalnepantla	variable	decreciente	$\ln(x)$, $d(1)$, $D(12)$	$(0,1,1)(2,1,0)$	12	$\theta_1 = 0.7296$ $\phi_1 = -0.7481$ $\phi_2 = -0.2900$
Xalostoc	constante	decreciente	$d(1)$, $D(12)$	$(3,1,0)(2,1,0)$	12	$\theta_1 = -0.9633$ $\theta_2 = -0.8076$ $\theta_3 = -0.4203$ $\phi_1 = -0.6809$ $\phi_2 = -0.2941$
Merced	variable	decreciente	$\ln(x)$, $d(1)$, $D(12)$	$(0,1,1)(0,1,1)$	12	$\theta_1 = 0.7180$ $\theta_2 = 0.5160$
Pedregal	constante	decreciente	$d(1)$, $D(12)$	$(2,1,0)(0,1,1)$	12	$\theta_1 = -0.5471$ $\theta_2 = -0.4487$ $\theta_3 = 0.5524$
Cerro de la Estrella	constante	decreciente	$d(1)$, $D(12)$	$(0,1,1)(2,1,0)$	12	$\theta_1 = 0.6003$ $\phi_1 = -0.8175$ $\phi_2 = -0.3746$

6.2.4 Modelos ARIMA para las partículas menores a diez micras

TLALNEPANTLA

- Proceso de identificación y estimación de parámetros



La serie original de *Tlalnepantla* presenta tendencia y varianza no constante, así como fluctuaciones estacionales. Para transformar la serie original en una serie estacionaria fue necesario aplicarle una diferencia ordinaria, una estacional y una transformación logarítmica.

Las funciones de autocorrelación y autocorrelación parcial presentan comportamiento truncado, las correlaciones significativas para la primera son 1 y 12, y para la segunda son: 1, 2 y 5. El modelo que presentó el mejor ajuste fue un ARIMA (0,1,1)(2,1,0) con una longitud estacional de doce meses, este modelo se representa por la siguiente ecuación:

$$Z_t = Z_{t-1} + Z_{t-12}(1 + \Phi_1) - Z_{t-11}(1 + \Phi_1) - Z_{t-22}(\Phi_1 - \Phi_2) - Z_{t-21}(\Phi_1 - \Phi_2) - \Phi_2 Z_{t-16} + \Phi_2 Z_{t-15} - \theta_1 e_{t-1} + e_t$$

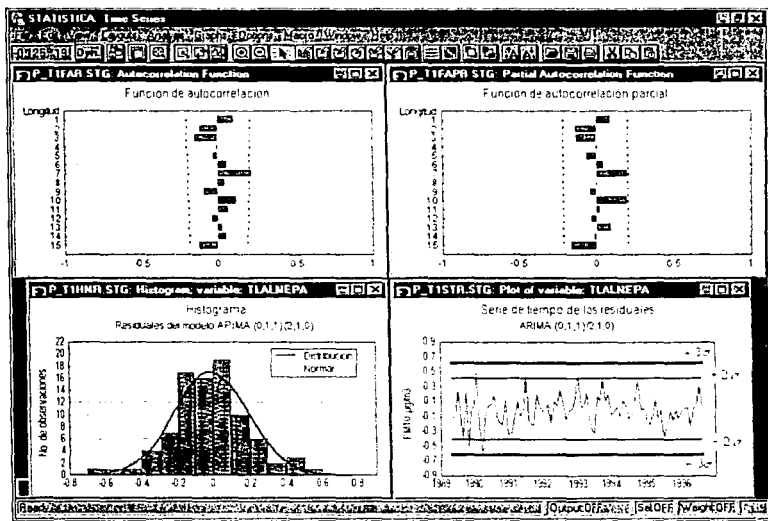
Tabla de transformaciones y estimación de parámetros

Transformación	Parámetros	Estadístico t	Limite inferior 95% de confianza	Limite superior 95% de confianza
ln(x)	$\theta_1 = 0.5685$	5.3143	0.3558	0.7812
d(1)	$\Phi_1 = -0.4371$	-3.9513	-0.6570	-0.2171
D(12)	$\Phi_2 = -0.3090$	-2.7594	-0.5316	-0.0863

Sustituyendo los parámetros estimados se obtiene la siguiente ecuación:

$$Z_t = Z_{t-1} + 0.5629Z_{t-2} - 0.5629Z_{t-3} + 0.1281Z_{t-4} - 0.1281Z_{t-5} + 0.3090Z_{t-6} - 0.3090Z_{t-7} - 0.5685e_{t-1} + e_t$$

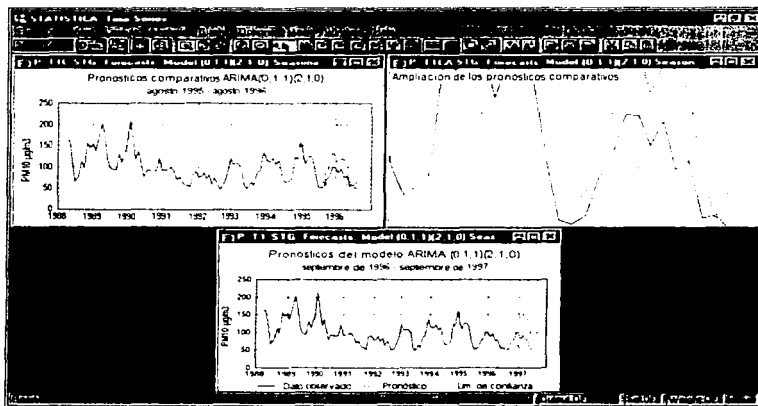
• *Análisis de los residuos*



Como podemos observar, las graficas correspondientes a los residuos presentan un buen ajuste del modelo ARIMA (0,1,1)(2,1,0)₁₂ con la serie original de Tlalnepanla. Las FAC's y las FACP's indican la inexistencia de correlación entre los residuos, es decir, que estos son independientes. El histograma muestra un buen ajuste a la distribución normal y en la serie de tiempo de los residuos se observa media cero y varianza constante; además dado que todas las observaciones permanecen dentro del intervalo de $\pm 3\sigma$ se asume que no hay observaciones discrepantes, y por último dado que la mayoría de los datos se encuentran entre los límites de $\pm 2\sigma$ corrobora el hecho de que todos se distribuyen como una normal.

6.2 Construcción de los modelos ARIMA

◆ Pronósticos generados por el modelo ARIMA (0, 1, 1)(2, 1, 0) :-

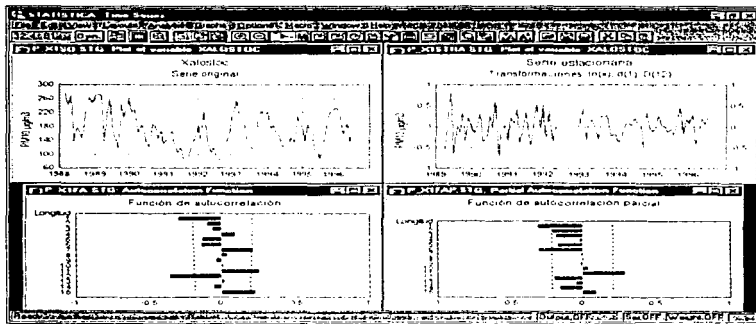


La siguiente tabla presenta los pronósticos de partículas menores a diez micras para la estación de Tlalnepantla de septiembre de 1996 hasta septiembre de 1997, así como su intervalo con un 90% de confiabilidad

Fecha	Pronostico	Limite inferior 90% de confianza	Limite superior 90% de confianza
Sep 96	050 3382	35 5816	071 2147
Oct 96	070 7268	48 4712	103 2012
Nov 96	076 3970	50 8822	114 7061
Dic 96	101 2438	65 6546	156 1247
Ene 97	094 3911	59 6910	149 2633
Feb 97	082 8966	51 1876	134 2484
Mar 97	093 0558	56 1706	154 1622
Abr 97	077 7631	45 9306	131 6573
May 97	081 3811	47 0749	140 6881
Jun 97	055 7685	31 6173	098 3678
Jul 97	050 6281	28 1512	091 0513
Ago 97	048 2388	26 3233	088 4000
Sep 97	049 5690	24 6875	099 5275

☉ XALOSTOC

- Proceso de identificación y estimación de parámetros



La gráfica original de la estación *Xalostoc*, muestra tendencia y varianza no constante y fluctuaciones estacionales. La serie estacionaria es el resultado de la aplicación de una transformación logarítmica, una diferencia ordinaria y una estacional a la serie original.

Las funciones de autocorrelación y autocorrelación parcial presentan comportamiento truncado, donde para la primera los coeficientes de correlación significativos son, 1 y 12, y para la segunda son, 1, 6 y 11. El modelo que mejor se ajustó es un ARIMA (0.1.2)(2.1.0) con longitud estacional de doce meses, mismo que tiene la siguiente representación:

$$Z_t = Z_{t-1} + Z_{t-12}(1 + \Phi_1) - Z_{t-1}(1 + \Phi_1) - Z_{t-2}(\Phi_1 - \Phi_2) + Z_{t-2}(\Phi_1 - \Phi_2) - \Phi_2 Z_{t-1} + \Phi_2 Z_{t-12} - \theta_1 \epsilon_{t-1} - \theta_2 \epsilon_{t-2} + \epsilon_t$$

Tabla de transformaciones y estimación de parámetros

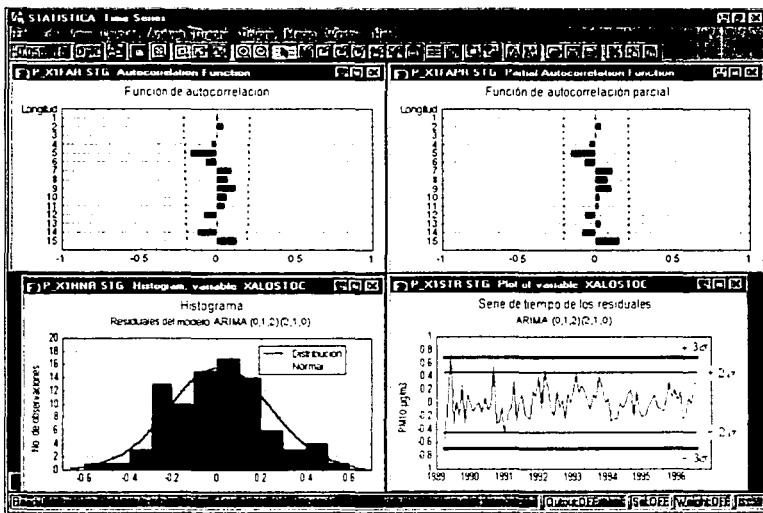
Transformación	Parámetros	Estadístico t	Límite inferior 95% de confianza	Límite superior 95% de confianza
ln(x)	$\theta_1 = 0.5028$	4.7485	0.2923	0.7133
d(1)	$\theta_1 = 0.2417$	2.3301	0.0355	0.4479
D(1)	$\Phi_1 = -0.5257$	-4.9411	-0.7373	-0.3142
	$\Phi_1 = -0.4224$	-3.7959	-0.6436	-0.2011

6.2 Construcción de los modelos ARIMA

Sustituyendo los parámetros estimados se obtiene la siguiente ecuación:

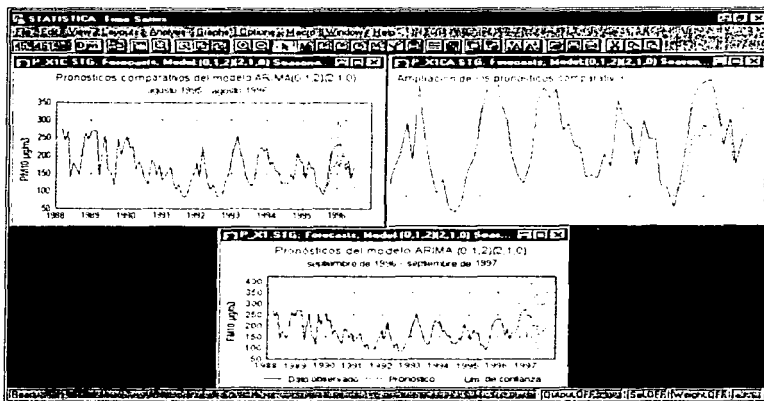
$$Z_t = Z_{t-1} + 0.4743Z_{t-12} - 0.4743Z_{t-11} + 0.1033Z_{t-24} - 0.1033Z_{t-25} + 0.4224Z_{t-16} - 0.4224Z_{t-17} - 0.5028e_{t-1} - 0.2417e_{t-2} + e_t$$

• *Análisis de residuos*



Las gráficas de los residuos indican que el modelo electo presenta un buen ajuste a la serie de datos original, debido a que las funciones de autocorrelación y autocorrelación parcial de los residuos no presentan autocorrelaciones significativas, por lo que se asume que los residuos son independientes. El histograma muestra un buen ajuste con la distribución normal y en la serie de tiempo se observa que los residuos tienen media cero y varianza constante, donde se localizan todas las observaciones dentro del intervalo de $\pm 3\sigma$, lo cual implica que no existen datos discrepantes, además también se corrobora que los datos se distribuyen como una normal debido a que la mayoría de ellos se encuentran dentro del intervalo delimitado por $\pm 2\sigma$.

- Pronósticos generados por el modelo ARIMA (0, 1, 2)(2, 1, 0):



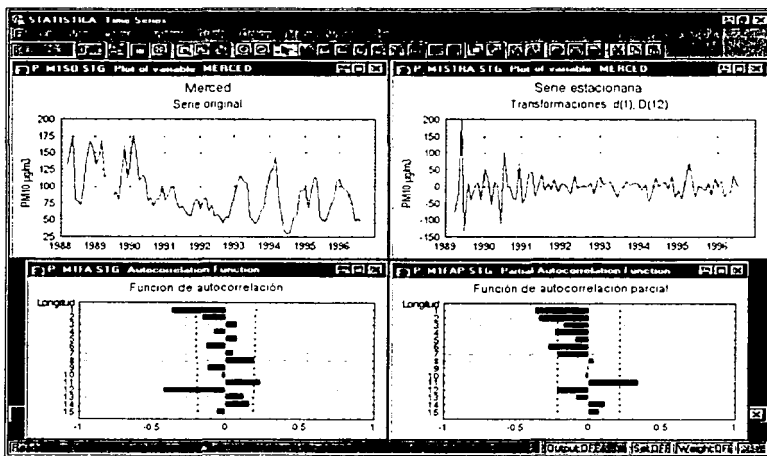
La siguiente tabla presenta los pronósticos de partículas menores a diez micras para la estación de Xalostoc de septiembre de 1996 hasta septiembre de 1997, así como su intervalo con un 90% de confiabilidad

Fecha	Pronóstico	Limite inferior 90% de confianza	Limite superior 90% de confianza
Sep.96	169.5220	114.9530	249.9955
Oct.96	222.2012	143.9920	342.8895
Nov.96	270.4324	173.2933	422.0224
Dic.96	269.7655	170.9859	425.6107
Ene.97	276.0083	173.0844	440.1353
Feb.97	243.2903	150.9825	392.0335
Mar.97	242.5529	148.9948	394.8588
Abr.97	196.7880	119.6788	323.5786
May.97	214.6326	129.2570	356.3996
Jun.97	159.0039	094.8390	266.5807
Jul.97	176.7442	104.4291	299.1362
Ago.97	172.8582	101.1896	295.2871
Sep.97	191.4390	104.4464	350.8871

6.2 Construcción de los modelos ARIMA

☉ MERCED

• Proceso de identificación y estimación de parámetros



En la serie original de la estación *Merced*, se observa varianza no constante, tendencia decreciente y fluctuaciones estacionales; por lo que fue necesario aplicar una diferencia ordinaria y una estacional para estacionar la serie. La FAC presenta comportamiento truncado en 1 y 12, mientras que la FACP decrece lentamente, presentando como coeficientes significativos a las funciones 1, 2, 6 y 11. El modelo que se identificó para esta serie corresponde a un ARIMA (0,1,1)(0,1,1) con longitud estacional de 12 meses.

$$Z_t = Z_{t-1} + Z_{t-12} - Z_{t-11} - \alpha_1 e_{t-1} - \theta_1 e_{t-12} + \alpha_2 \theta_1 e_{t-11} + e_t$$

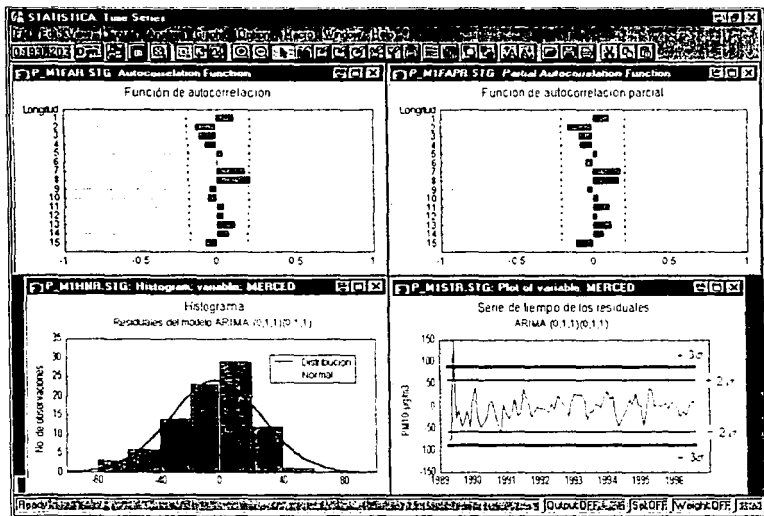
Tabla de transformaciones y estimación de parámetros

Transformación	Parámetros	Estadístico t	Límite inferior 95% de confianza	Límite superior 95% de confianza
d(1)	$\alpha_1 = 0.7173$	9.9394	0.5738	0.8607
D(12)	$\theta_1 = 0.5550$	5.1652	0.3414	0.7685

Sustituyendo los parámetros estimados se obtiene la siguiente ecuación:

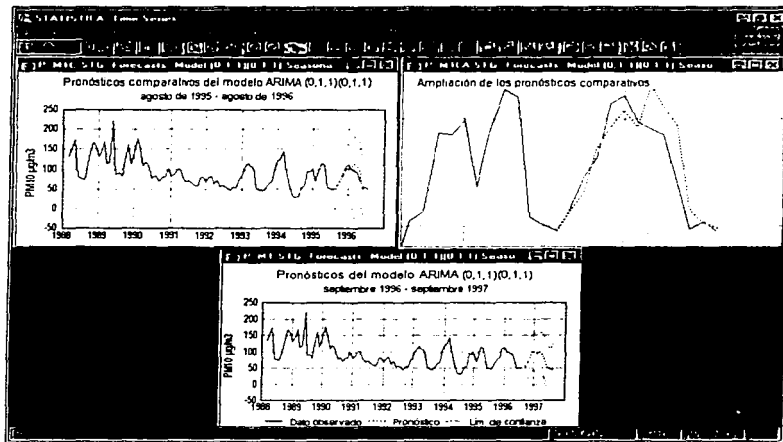
$$Z_t = Z_{t-1} + Z_{t-12} - Z_{t-11} - 0.7173e_{t-1} - 0.5550e_{t-12} + 0.3980e_{t-11} + e_t$$

• *Análisis de residuales*



Las gráficas correspondientes al comportamiento de los residuales del modelo electo reflejan un buen ajuste del mismo con la serie original, debido a que las funciones de autocorrelación y autocorrelación parcial de los residuales no presentan coeficientes de autocorrelación significativos lo cual implica que no existe dependencia entre ellos. El histograma muestra un buen ajuste a la distribución normal y la serie de tiempo de los residuales corrobora el ajuste a una normal, debido a que la mayoría de estos permanecen dentro del intervalo de $\pm 2\sigma$; en esta misma gráfica podemos observar que los residuales tienen media cero y varianza constante.

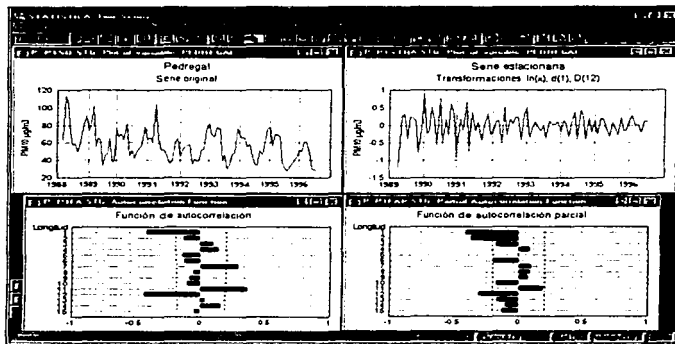
• Pronósticos generados por el modelo ARIMA (0,1,1)(0,1,1)₁₂



La siguiente tabla presenta los pronósticos de partículas menores a diez micras para la estación de Merced de septiembre de 1996 hasta septiembre de 1997, así como su intervalo con un 90% de confiabilidad.

Fecha	Pronóstico	Límite inferior 90% de confianza	Límite superior 90% de confianza
Sep.96	53.1894	3.5283	102.8506
Oct.96	65.1048	13.4968	116.7128
Nov.96	79.9845	26.5005	133.4686
Dic.96	96.9568	41.6603	152.2534
Ene.97	103.0587	46.0072	160.1101
Feb.97	93.0225	34.2685	151.7764
Mar.97	102.3621	41.9535	162.7706
Abr.97	95.9372	33.9182	157.9562
May.97	81.6263	18.0377	145.2149
Jun.97	49.2074	-15.9130	114.3279
Jul.97	47.5889	-19.0282	114.2060
Ago.97	44.3148	-23.7660	112.3956
Sep.97	52.2872	-24.7926	129.3671

● Proceso de identificación y estimación de parámetros



Como podemos observar, las características que prevalecen en la serie original de la estación *Pedregal* son: varianza no constante, tendencia decreciente y fluctuaciones estacionales, es por ello que para estacionarla se le aplicó una transformación logarítmica, una diferencia ordinaria y una estacional.

Las funciones de autocorrelación y autocorrelación parcial se caracterizan por presentar comportamiento truncado, la primera en 1 y 12, y la segunda en 2. Las FAC's significativas son: 1, 7, 11 y 12, y las FACP's son: 1, 2 y 12. Esta serie se ajustó a un modelo ARIMA (2,1,0)(0,1,1) con longitud estacional de doce meses; el cual se representa por la siguiente ecuación:

$$Z_t = Z_{t-1}(1 + \phi_1) - Z_{t-2}(\phi_1 - \phi_2) - Z_{t-3}(\phi_2) + Z_{t-12} - Z_{t-13}(1 + \phi_1) + Z_{t-14}(\phi_1 - \phi_2) + Z_{t-15}(\phi_2) - \theta_1 e_{t-12} + e_t$$

Tabla de transformaciones y estimación de parámetros

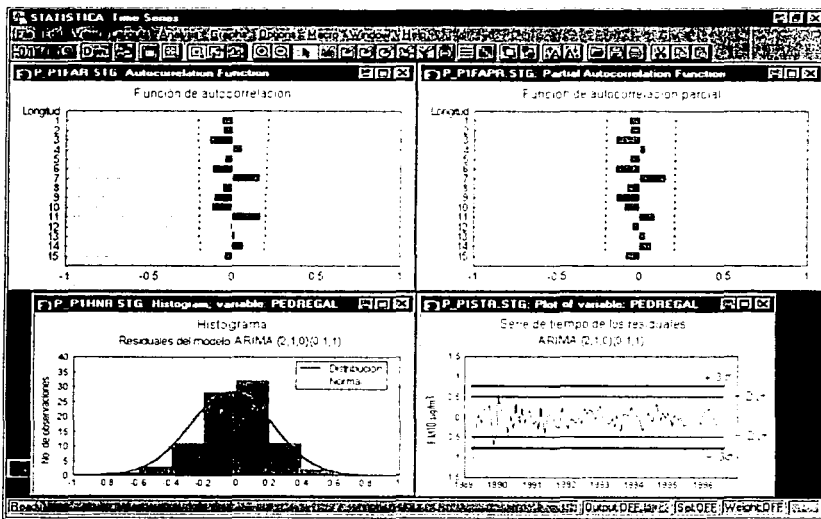
Transformación	Parámetros	Estadístico t	Límite inferior 95% de confianza	Límite superior 95% de confianza
ln(x)	$\phi_1 = -0.4608$	-4.3333	-0.6723	-0.2494
d(1)	$\phi_2 = -0.3070$	-2.8900	-0.5182	-0.0958
D(12)	$\theta_1 = 0.6696$	8.3911	0.5110	0.8283

6.2 Construcción de los modelos ARIMA

Sustituyendo los parámetros estimados se obtiene la siguiente ecuación:

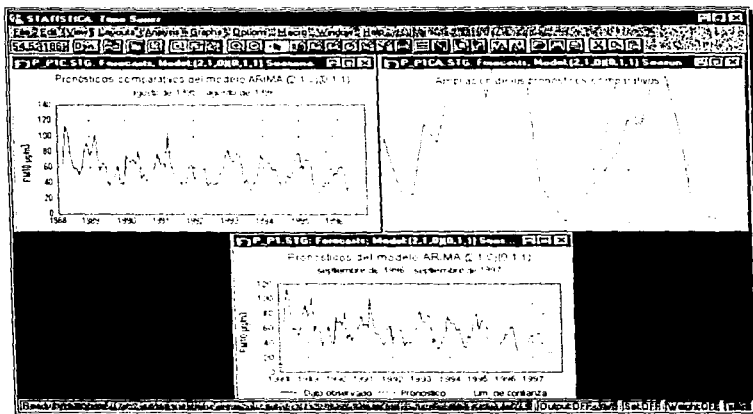
$$Z_t = 0.5392Z_{t-1} + 0.1538Z_{t-2} + 0.3070Z_{t-3} + Z_{t-12} - 0.5392Z_{t-11} - 0.1538Z_{t-10} - 0.3070Z_{t-9} - 0.6696e_{t-12} + e_t$$

• *Análisis de residuales*



Observando el comportamiento de los residuales, se argumenta que el modelo ARIMA (2,1,0)(0,1,1), presenta un buen ajuste para la serie original. Los residuales son independientes debido a que no existen correlaciones significativas entre los mismos. El histograma muestra un buen ajuste de los residuales con la distribución normal, mismo que se corrobora en la serie de tiempo, debido a que la mayoría de datos permanecen dentro de los límites de $\pm 2\sigma$; además en esta misma serie se puede comprobar que los residuales se comportan como ruido blanco con varianza constante y media cero, también se verifica la inexistencia de datos discrepantes en la serie original.

- Pronósticos generados por el modelo ARIMA (2, 1, 0)(0, 1, 1).

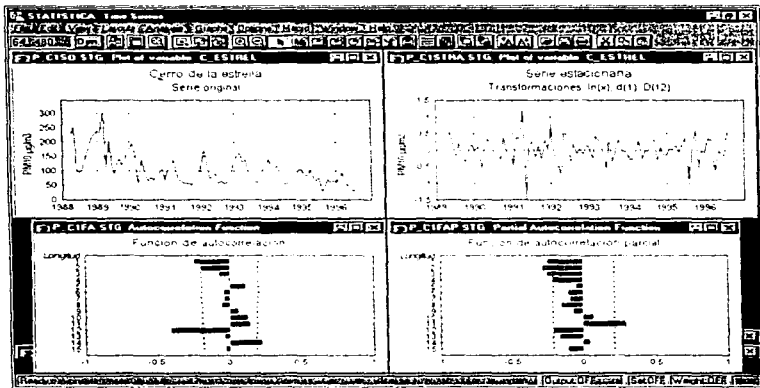


La siguiente tabla presenta los pronósticos de partículas menores a diez micras para la estación de Pedregal de septiembre de 1996 hasta septiembre de 1997, así como su intervalo con un 90% de confiabilidad.

Fecha	Pronóstico	Limite inferior 90% de confianza	Limite superior 90% de confianza
Sep 96	30 3469	19 7951	046 5234
Oct 96	34 4037	21 1737	055 9001
Nov 96	40 0798	23 7989	067 4985
Dic 96	49 1983	27 3660	088 4483
Ene 97	50 3677	26 6740	095 1077
Feb 97	46 1546	23 4624	090 7939
Mar 97	52 1136	25 3748	107 0283
Abr 97	53 4968	25 0283	114 3465
May 97	48 8839	22 0396	108 4245
Jun 97	30 5694	13 2956	070 2857
Jul 97	28 2588	11 8742	067 2517
Ago 97	25 8053	10 4915	063 4718
Sep 97	28 8119	10 8344	076 6193

• CERRO DE LA ESTRELLA

• Proceso de identificación y estimación de parámetros



La serie correspondiente a la estación *Cerro de la Estrella* se caracteriza por presentar varianza decreciente, tendencia decreciente y fluctuaciones estacionales, para estacionar esta serie se utilizó una transformación logarítmica para la varianza, una diferencia ordinaria para eliminar la tendencia y una diferencia estacional para anular las fluctuaciones estacionales

La función de autocorrelación se trunca en 1 y 12, y las funciones de autocorrelación parcial significativas son: 1, 2, 3 y 11. El modelo que presentó el mejor ajuste para esta serie fue un ARIMA (0,1,1)(1,1,0) con periodos estacionales de doce meses, este modelo se expresa a través de la siguiente ecuación

$$Z_t = Z_{t-1} + Z_{t-12}(1 + \Phi_{12}) - Z_{t-11}(1 + \Phi_{11}) - \Phi_{12}Z_{t-24} - \Phi_{11}Z_{t-23} - \alpha e_{1t} + e_t$$

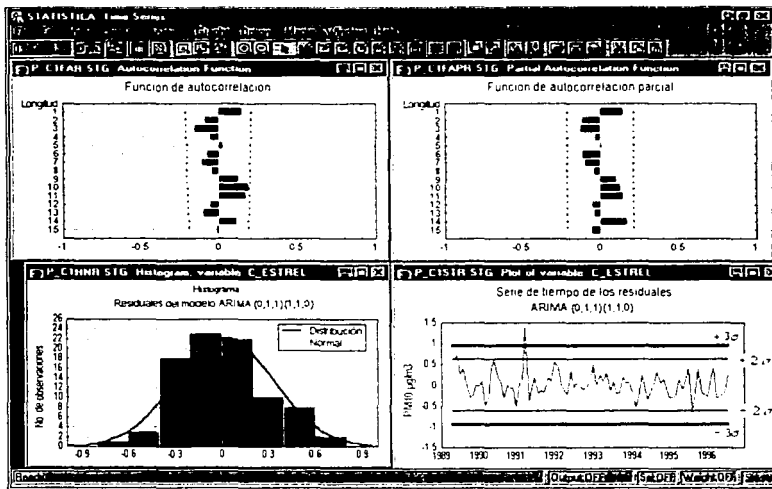
Tabla de transformaciones y estimación de parámetros

Transformación	Parámetros	Estadístico t	Limite inferior 95% de confianza	Limite superior 95% de confianza
ln(x)	$\alpha = 0.6605$	6.1259	0.4461	0.8748
d(1)	$\phi_1 = -0.4734$	-4.4535	-0.6847	-0.2621
D(12)				

Sustituyendo los parámetros estimados se obtiene la siguiente ecuación:

$$Z_t = Z_{t-1} + 0.5266Z_{t-12} - 0.5266Z_{t-11} + 0.4734Z_{t-24} - 0.4734Z_{t-23} - 0.6605e_{t-1} + e_t$$

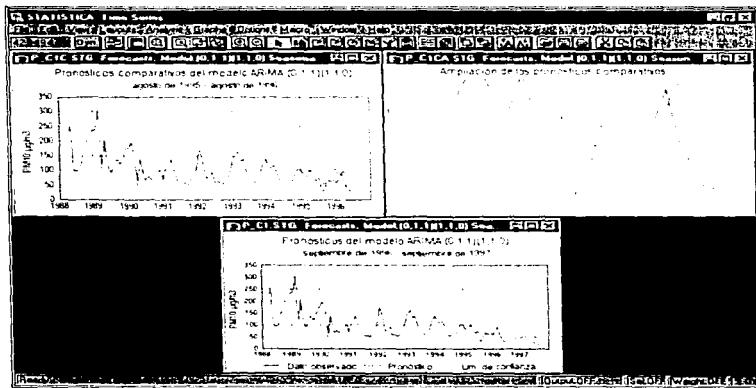
• *Análisis de residuos*



Los residuos generados por el modelo ARIMA (0, 1, 1)(1, 1, 0)₁₂ presentan un comportamiento muy semejante al del ruido blanco, con lo que se decide que el modelo tiene un buen ajuste a la serie correspondiente a Cerro de la Estrella. Como podemos observar las funciones de autocorrelación y autocorrelación parcial de los residuos indican que estos son independientes debido a que no existen correlaciones significativas. El histograma muestra un buen ajuste a la distribución normal, al igual que la serie de tiempo donde se observa que dado que la mayoría de datos permanecen dentro del intervalo de $\pm 2\sigma$ se asume que estos se distribuyen como una normal; también en esta serie podemos verificar que los residuos tienen media cero y varianza constante, además de no presentar observaciones discrepantes en la serie analizada, debido a que todos los residuos se encuentran dentro de $\pm 3\sigma$.

6.2 Construcción de los modelos ARIMA

◆ Pronósticos generados por el modelo ARIMA (0, 1, 1)(1, 1, 0),.



La siguiente tabla presenta los pronósticos de partículas menores a diez micras para la estación de Cerro de la Estrella de septiembre de 1996 hasta septiembre de 1997, así como su intervalo con un 90% de confiabilidad.

Fecha	Pronóstico	Limite inferior 90% de confiabilidad	Limite superior 90% de confiabilidad
Sep.96	29.6405	17.4947	050.2185
Oct.96	40.7932	23.3760	071.1877
Nov.96	44.7771	24.9487	080.3646
Dic.96	50.0060	27.1257	092.1855
Ene.97	46.5203	24.5956	087.9888
Feb.97	46.7848	24.1328	090.6988
Mar.97	52.9615	26.6770	105.1440
Abr.97	47.2335	23.2512	095.9523
May.97	35.1201	16.9077	072.9505
Jun.97	26.3717	12.4247	055.9747
Jul.97	29.1597	13.4527	063.2057
Ago.97	16.7182	07.5568	036.9862
Sep.97	20.0135	08.0077	050.0194

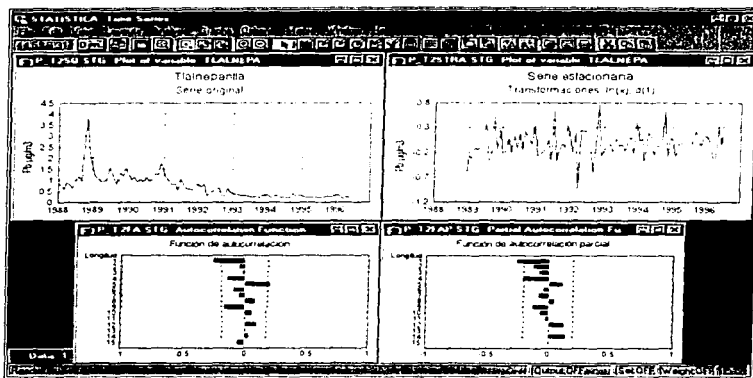
Resumen de los modelos ARIMA correspondientes a las PM_{10}

Estación de monitoreo	Varianza	Tendencia	Transformaciones	Modelo ARIMA	Longitud estacional	Parámetros
Tlalnepanlta	variable	variable	$\ln(x)$, $d(1)$, $D(12)$	$(0,1,1)(2,1,0)$	12	$\theta_1 = 0.5685$ $\phi_1 = -0.4371$ $\phi_2 = -0.3090$
Xalostoc	variable	variable	$\ln(x)$, $d(1)$, $D(12)$	$(0,1,2)(2,1,0)$	12	$\theta_1 = 0.5028$ $\theta_2 = 0.2417$ $\phi_1 = -0.5257$ $\phi_2 = -0.4224$
Merced	variable	decreciente	$d(1)$, $D(12)$	$(0,1,1)(0,1,1)$	12	$\theta_1 = 0.7173$ $\theta_2 = 0.5550$
Pedregal	variable	decreciente	$\ln(x)$, $d(1)$, $D(12)$	$(2,1,0)(0,1,1)$	12	$\theta_1 = -0.4608$ $\theta_2 = -0.3070$ $\theta_3 = 0.6696$
Cerro de la Estrella	decreciente	decreciente	$\ln(x)$, $d(1)$, $D(12)$	$(0,1,1)(1,1,0)$	12	$\theta_1 = 0.6605$ $\phi_1 = -0.4734$

6.2.5 Modelos ARIMA para el plomo

TLALNEPANTLA

- Proceso de identificación y estimación de parámetros



La serie original, correspondiente al muestreo de las concentraciones de plomo en *Tlalnepantla*, se caracteriza por tener tendencia decreciente y varianza no constante. Para estacionar la serie, se le aplicó una transformación logarítmica para estabilizar la varianza y una diferencia ordinaria, para eliminar la tendencia.

En las gráficas de las funciones de autocorrelación y autocorrelación parcial, se observa como estas se truncan en uno, mismo que corresponde a las únicas funciones significativas. El modelo que presentó el mejor ajuste para esta serie es un ARIMA (0,1,1), el cual tiene la siguiente representación:

$$Z_t = Z_{t-1} - \theta_1 e_{t-1} + e_t$$

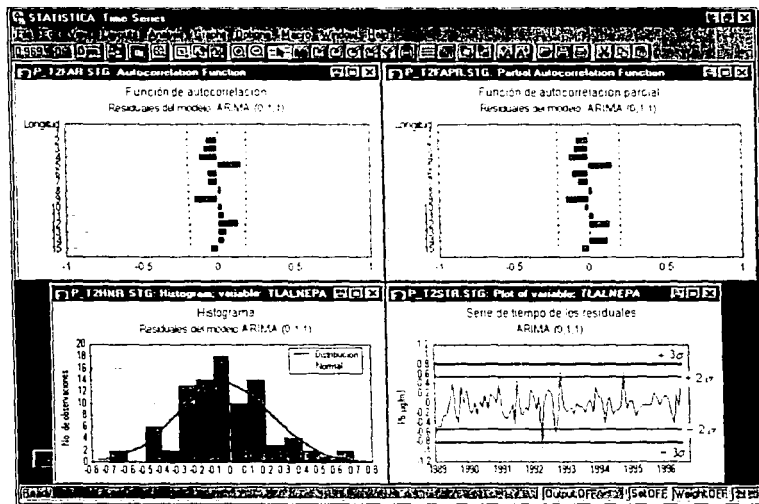
Tabla de transformaciones y estimación de parámetros

Transformación	Parámetros	Estadístico t	Limite inferior 95% de confianza	Limite superior 95% de confianza
ln(x)	$\theta_1 = 0.3308$	2.9125	0.1052	0.5564
d(1)				

Sustituyendo los parámetros estimados se obtiene la siguiente ecuación:

$$Z_t = Z_{t-1} - 0.3308e_{t-1} + e_t$$

• Análisis de residuales

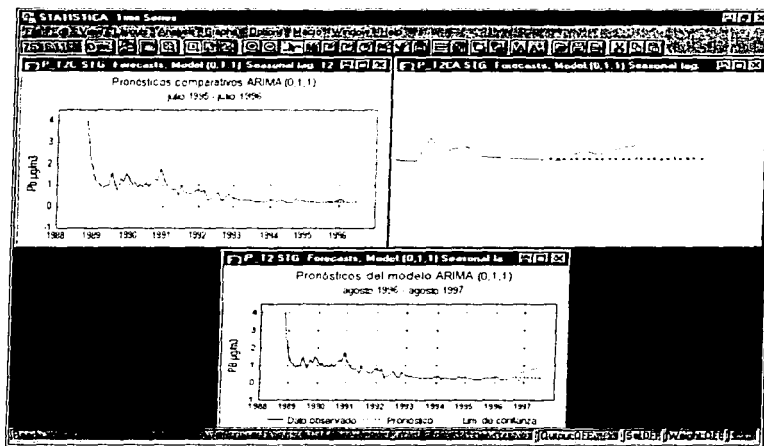


Como se observa en las gráficas de los residuales, el modelo electo para la zona de Tlalneantla tiene un buen ajuste con la serie original, dado que las funciones de autocorrelación y autocorrelación parcial no presentan correlaciones significativas, lo cual indica la independencia de los residuales.

El histograma muestra el ajuste a la normal y por último, la serie de tiempo de los residuales indica que en general los datos se encuentran dentro del intervalo correspondiente a $\pm 3\sigma$, por lo que se asume que no existen observaciones anormales en el fenómeno; al igual que podemos observar que la mayoría de los datos permanecen dentro de $\pm 2\sigma$, lo cual ayuda a verificar que los residuales se distribuyen como una normal con media cero y varianza σ^2 .

6.2 Construcción de los modelos ARIMA

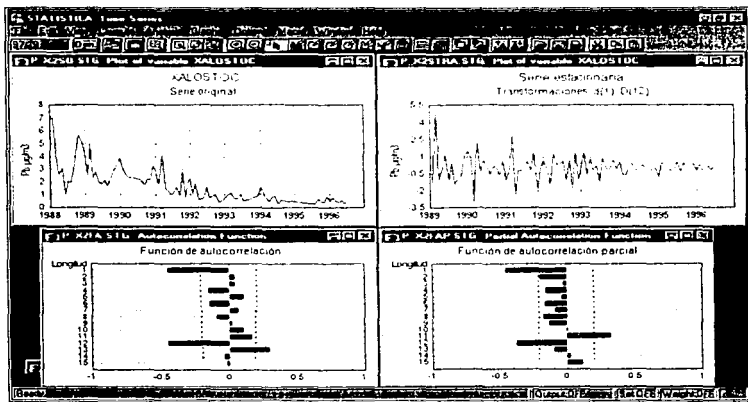
- Pronósticos generados por el modelo ARIMA (0, 1, 1)



La siguiente tabla presenta los pronósticos del plomo para la estación de Tlalnepantla de agosto de 1996 hasta agosto de 1997, así como su intervalo con un 90% de confiabilidad

Fecha	Pronóstico	Limite inferior 90% de confianza	Limite superior 90% de confianza
Ago.96	0.299	0.190	0.469
Sep.96	0.299	0.173	0.514
Oct.96	0.299	0.160	0.556
Nov.96	0.299	0.149	0.596
Dic.96	0.299	0.140	0.635
Ene.97	0.299	0.132	0.674
Feb.97	0.299	0.125	0.711
Mar.97	0.299	0.119	0.749
Abr.97	0.299	0.113	0.786
May.97	0.299	0.108	0.823
Jun.97	0.299	0.104	0.860
Jul.97	0.299	0.099	0.897
Ago.97	0.299	0.095	0.935

◆ Proceso de identificación y estimación de parámetros



La serie original de las concentraciones de plomo en la estación de *Xalostoc*, presenta tendencia decreciente, varianza no constante y fluctuaciones estacionales, para estacionar la serie original, únicamente fue necesario aplicar una diferencia ordinaria y una estacional.

Las funciones de autocorrelación y autocorrelación parcial presentan comportamientos truncados en la longitud correspondiente a 1 y 12. El modelo que muestra el mejor ajuste para esta serie de tiempo es un ARIMA (0,1,1)(1,0) con una longitud estacional de doce meses, éste se representa a través de la siguiente ecuación:

$$Z_t = Z_{t-1} + Z_{t-12}(1 + \Phi_1) - Z_{t-11}(1 + \Phi_1) - \Phi_1 Z_{t-24} + \Phi_1 Z_{t-23} - \theta_1 \epsilon_{t-1} + \epsilon_t$$

Tabla de transformaciones y estimación de parámetros

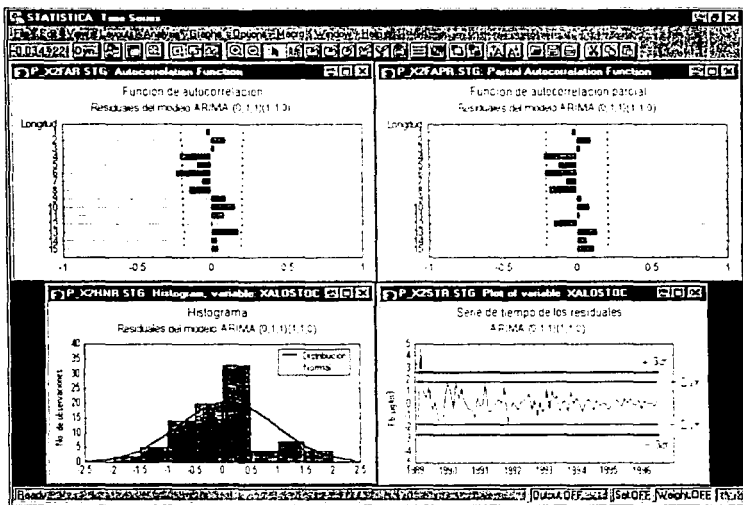
Transformación	Parámetros	Estadístico t	Limite inferior 95% de confianza	Limite superior 95% de confianza
d(1)	$\theta_1 = 0.4545$	4.0949	0.2339	0.6751
D(12)	$\phi_1 = -0.3843$	-3.6563	-0.5932	-0.1754

6.2 Construcción de los modelos ARIMA

Sustituyendo los parámetros estimados se obtiene la siguiente ecuación:

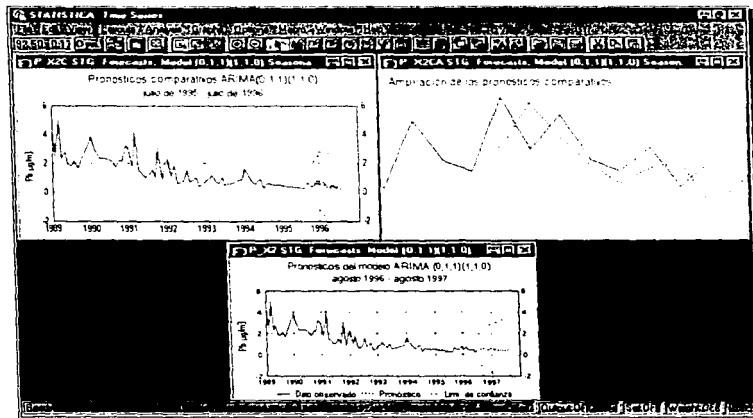
$$Z_t = Z_{t-1} + 0.6157Z_{t-2} - 0.6157Z_{t-3} + 0.3843Z_{t-4} - 0.3843Z_{t-5} - 0.4545e_{t-1} + e_t$$

• *Análisis de residuales*



Como se observa en las gráficas correspondientes a las funciones de autocorrelación y autocorrelación parcial, algunas correlaciones son significativas, no obstante, el modelo electo presentó un buen ajuste al evaluar los pronósticos con los valores reales, recordemos que la última forma de elegir el modelo es verificando los pronósticos. Los residuales del modelo ARIMA (0,1,1)(1,1,0) se ajustan aceptablemente con la distribución normal, lo cual se corrobora al analizar la serie de tiempo de los mismos, esta demuestra que la mayoría de residuales se encuentran dentro del intervalo de $\pm 2\sigma$, por lo que se considera que estos se distribuyen como una normal, donde también podemos verificar que presentan media cero; esta misma gráfica indica que no existen observaciones discrepantes dado que los residuales permanecen dentro de los límites de $\pm 3\sigma$.

- Pronósticos generados por el modelo ARIMA (0, 1, 1)(1, 1, 0)₁₂.



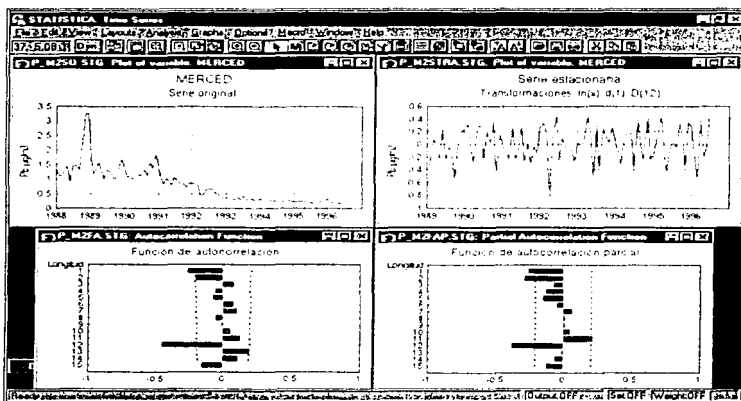
La siguiente tabla presenta los pronósticos del plomo para la estación de Xalostoc de agosto de 1996 hasta agosto de 1997, así como su intervalo con un 90% de confiabilidad.

Fecha	Pronóstico	Limite inferior 90% de confianza	Limite superior 90% de confianza
Ago.96	0.419	0.000	1.889
Sep.96	0.659	0.000	2.333
Oct.96	0.489	0.000	2.345
Nov.96	0.432	0.000	2.454
Dic.96	0.730	0.000	2.905
Ene.97	0.518	0.000	2.836
Feb.97	0.632	0.000	3.085
Mar.97	0.447	0.000	3.027
Abr.97	0.395	0.000	3.097
May.97	0.476	0.000	3.294
Jun.97	0.319	0.000	3.249
Jul.97	0.402	0.000	3.440
Ago.97	0.376	0.000	3.861

6.2 Construcción de los modelos ARIMA

• MERCED

• Proceso de identificación y estimación de parámetros



Las concentraciones promedio de plomo correspondientes a la estación *Merced* presentan varianza no constante, tendencia decreciente y fluctuaciones estacionales; para eliminar estas características de la serie original fue necesario aplicar una transformación logarítmica, una diferencia ordinaria y una estacional para así estacionar la serie original. La función de autocorrelación muestra correlaciones significativas en 1 y 12, y la función de autocorrelación parcial en 1, 2 y 12. El modelo que representa a esta serie es el correspondiente a un ARIMA (0.1.1)(0.1.1) con longitud estacional de doce meses, el cual tiene la siguiente representación:

$$Z_t = Z_{t-1} + Z_{t-12} - Z_{t-11} - \theta_1 e_{t-1} - \theta_2 e_{t-12} + \phi_1(\theta_1) e_{t-1} + \phi_2(\theta_2) e_{t-12} + e_t$$

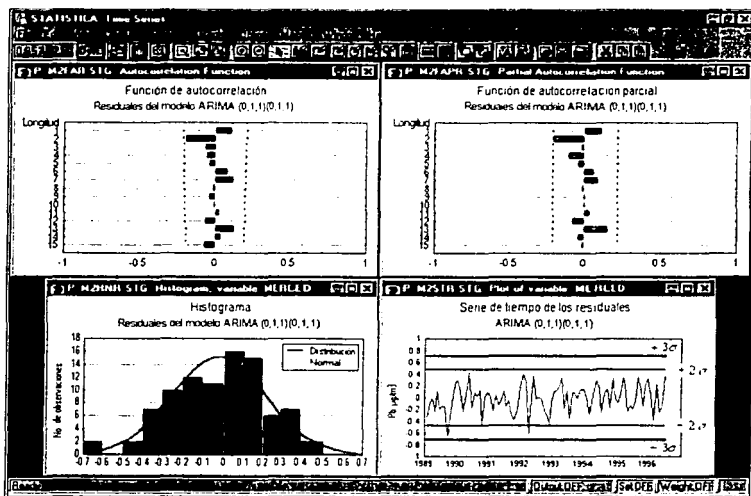
Tabla de transformaciones y estimación de parámetros

Transformación	Parámetros	Estadístico t	Límite inferior 95% de confianza	Límite superior 95% de confianza
ln(x)	$\theta_1 = 0.4711$	3.7402	0.2208	0.7214
d(1)	$\theta_2 = 0.4375$	4.5007	0.2443	0.6307
D(12)				

Sustituyendo los parámetros estimados se obtiene la siguiente ecuación:

$$Z_t = Z_{t-1} + Z_{t-12} - Z_{t-13} - 0.4711e_{t-1} - 0.4375e_{t-12} + 0.2061e_{t-13} + e_t$$

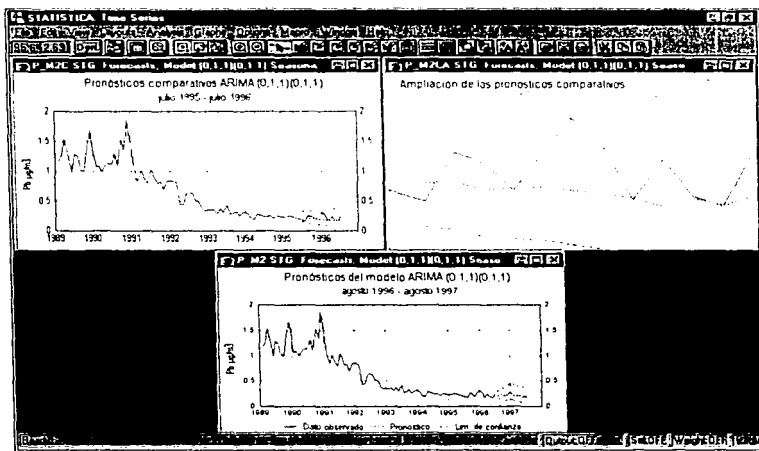
• *Análisis de residuales*



Al observar las funciones de autocorrelación y autocorrelación parcial, se identificó que los residuales son independientes, debido a la ausencia de correlaciones significativas en ambas funciones, lo cual indica que el modelo electo tiene un buen ajuste con la serie original; esto se corrobora al analizar el histograma correspondiente a las frecuencias de los residuales, el cual tiene la forma de una distribución normal, esta última característica también la podemos observar en la serie de tiempo de los residuales donde la mayoría de las observaciones se encuentran dentro del intervalo de $\pm 2\sigma$, lo que significa que estos se distribuyen como una normal, en esta misma gráfica también se verifica que los residuales tienen media cero y varianza constante; además dado que estas observaciones no sobrepasan los límites de $\pm 3\sigma$ se considera que no existen datos discrepantes en la serie de tiempo original. El modelo que presenta este ajuste corresponde a un ARIMA (0,1,1)(0,1,1)₁₂.

6.2 Construcción de los modelos ARIMA

- Pronósticos generados por el modelo $ARIMA(0, 1, 1)(0, 1, 1)_2$.

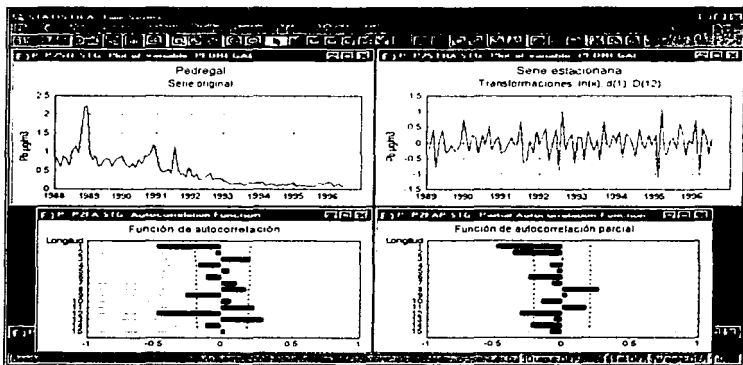


La siguiente tabla presenta los pronósticos del plomo para la estación de Merced de agosto de 1996 hasta agosto de 1997, así como su intervalo con un 90% de confiabilidad.

Fecha	Pronóstico	Limite inferior 90% de confianza	Limite superior 90% de confianza
Ago.96	0.1918	0.1289	0.2853
Sep.96	0.2394	0.1528	0.3751
Oct.96	0.2232	0.1360	0.3665
Nov.96	0.1996	0.1165	0.3420
Dic.96	0.2357	0.1322	0.4200
Ene.97	0.2608	0.1410	0.4823
Feb.97	0.2360	0.1232	0.4520
Mar.97	0.1828	0.0923	0.3619
Abr.97	0.2110	0.1032	0.4310
May.97	0.1860	0.0883	0.3917
Jun.97	0.1711	0.0790	0.3710
Jul.97	0.2155	0.0967	0.4805
Ago.97	0.1755	0.0706	0.4366

• PEDREGAL

♦ Proceso de identificación y estimación de parámetros



La serie original de la estación *Pedregal*, se caracteriza por tener varianza y tendencia decreciente así como fluctuaciones estacionales; para estacionar esta serie, se aplicó una transformación logarítmica, una diferencia ordinaria y una estacional.

La función de autocorrelación presenta correlaciones significativas en 1, 9, 11, 12 y 13; y la función de autocorrelación parcial en 1, 2, 6, 8, 12 y 14. El modelo electo para esta serie de tiempo corresponde a un ARIMA (2,1,0)(0,1,1) con longitud estacional de doce meses, y se representa a través de la siguiente ecuación:

$$Z_t = Z_{t-1}(1 + \phi_1) - Z_{t-2}(\phi_1 - \phi_2) - Z_{t-3}(\phi_2) + Z_{t-12} - Z_{t-11}(1 + \phi_1) + Z_{t-14}(\phi_1 - \phi_2) + Z_{t-15}(\phi_2) - \theta_1 e_{t-12} + e_t$$

Tabla de transformaciones y estimación de parámetros

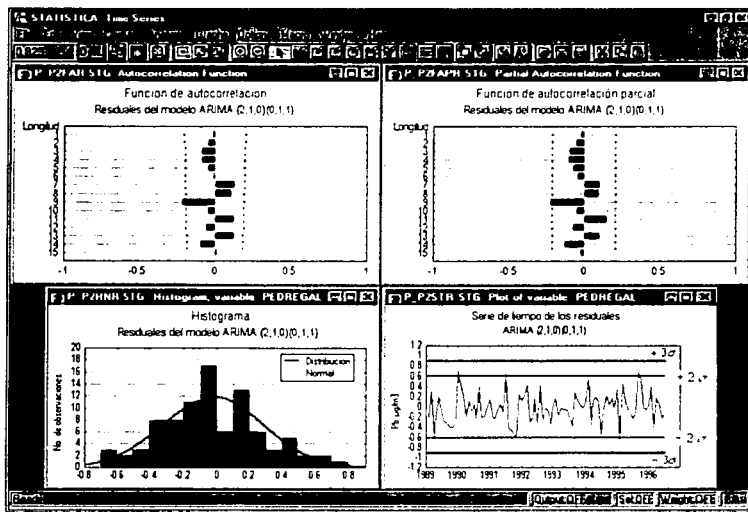
Transformación	Parámetros	Estadístico t	Limite inferior 95% de confianza	Limite superior 95% de confianza
ln(x)	$\phi_1 = -0.5318$	-4.8634	-0.7492	-0.3145
d(1)	$\phi_1 = -0.3232$	-3.1245	-0.5287	-0.1176
D(12)	$\theta_1 = 0.5406$	5.2131	0.3345	0.7468

6.2 Construcción de los modelos ARIMA

Sustituyendo los parámetros estimados se obtiene la siguiente ecuación:

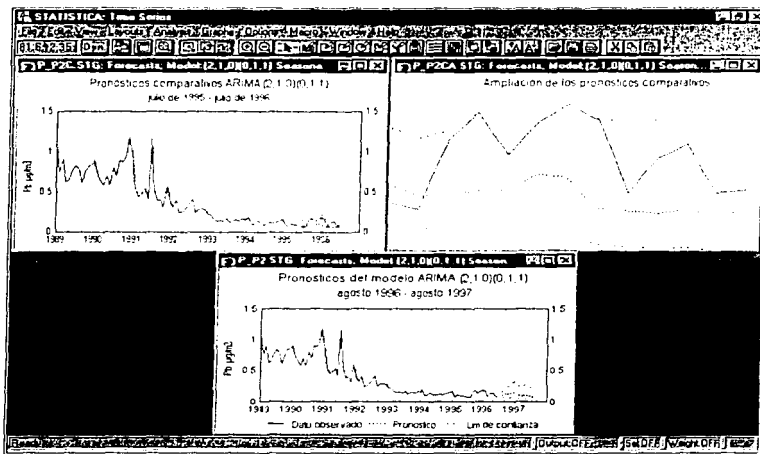
$$Z_t = 0.4682Z_{t-1} + 0.2086Z_{t-2} + 0.3232Z_{t-3} + Z_{t-12} - 0.4682Z_{t-13} - 0.2086Z_{t-14} - 0.3232Z_{t-15} - 0.5406e_{t-12} + e_t$$

• *Análisis de los residuales*



El modelo ARIMA (2,1,0)(0,1,1) presenta un buen ajuste, dado que las funciones de autocorrelación y autocorrelación parcial no son significativas y por tanto los residuales son independientes. El histograma de las frecuencias de los residuales muestra un buen ajuste con la distribución normal el cual se verifica en la serie de tiempo donde la mayoría de los datos permanecen dentro del intervalo de $\pm 2\sigma$, lo cual indica que se distribuyen como una normal; también observamos que estos tienen media cero y varianza constante; en la gráfica se corrobora la inexistencia de observaciones ajenas a nuestro modelo electo, dado que estas no sobrepasan los límites marcados por $\pm 3\sigma$.

- Pronósticos generados por el modelo ARIMA (2, 1, 0)/(0, 1, 1)

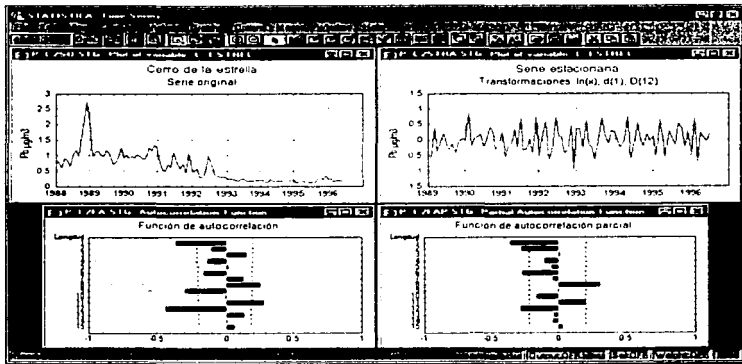


La siguiente tabla presenta los pronósticos del plomo para la estación de Pedregal de agosto de 1996 hasta agosto de 1997, así como su intervalo con un 90% de confiabilidad.

Fecha	Pronóstico	Limite inferior 90% de confianza	Limite superior 90% de confianza
Ago.96	0.0903	0.0542	0.1505
Sep.96	0.1204	0.0685	0.2117
Oct.96	0.1345	0.0735	0.2463
Nov.96	0.1205	0.0608	0.2385
Dic.96	0.1461	0.0701	0.3047
Ene.97	0.1506	0.0690	0.3288
Feb.97	0.1161	0.0506	0.2665
Mar.97	0.0843	0.0351	0.2022
Abr.97	0.0973	0.0389	0.2433
May.97	0.1063	0.0408	0.2769
Jun.97	0.0803	0.0296	0.2174
Jul.97	0.0811	0.0289	0.2280
Ago.97	0.0771	0.0243	0.2440

● CERRO DE LA ESTRELLA

● Proceso de identificación y estimación de parámetros



Como última serie del análisis, tenemos a las concentraciones atmosféricas promedio de plomo registradas en la estación de *Cerro de la Estrella*; esta presenta varianza variable, tendencia decreciente y fluctuaciones estacionales; para estacionarla fue necesario aplicarle una transformación logarítmica, una diferencia ordinaria y una estacional.

Las funciones de autocorrelación significativas corresponden a las longitudes 1, 8, 9, 11 y 12 y las funciones de autocorrelación parcial significativas son 1, 2, 6, 8 y 12, este registro de concentraciones se comportaron como un ARIMA(0,1,1)(2,1,0) con longitud estacional de doce meses; este modelo tiene la siguiente expresión matemática:

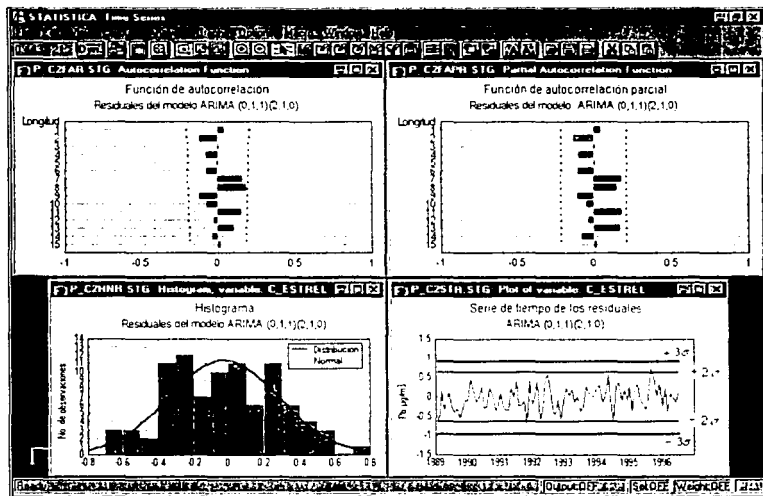
$$Z_t = Z_{t-1} + Z_{t-12}(1 + \Phi_1) - Z_{t-11}(1 + \Phi_1) - Z_{t-24}(\Phi_1 - \Phi_2) + Z_{t-23}(\Phi_1 - \Phi_2) - \Phi_2 Z_{t-12} + \Phi_2 Z_{t-11} - \theta_1 \epsilon_{t-1} + \epsilon_t$$

Transformación	Parámetros	Estadístico t	Límite inferior 95% de confianza	Límite superior 95% de confianza
ln	$\theta_1 = 0.3832$	3.1858	0.1441	0.6223
d(1)	$\Phi_1 = -0.5728$	-5.0971	-0.7961	-0.3494
D(12)	$\Phi_2 = -0.3233$	-2.7072	-0.5606	-0.0859

Sustituyendo los parámetros estimados se obtiene la siguiente ecuación.

$$Z_t = Z_{t-1} + 0.4272Z_{t-1} - 0.4272Z_{t-2} + 0.2495Z_{t-1} - 0.2495Z_{t-2} + 0.3233Z_{t-1} - 0.3233Z_{t-2} - 0.3832e_{t-1} + e_t$$

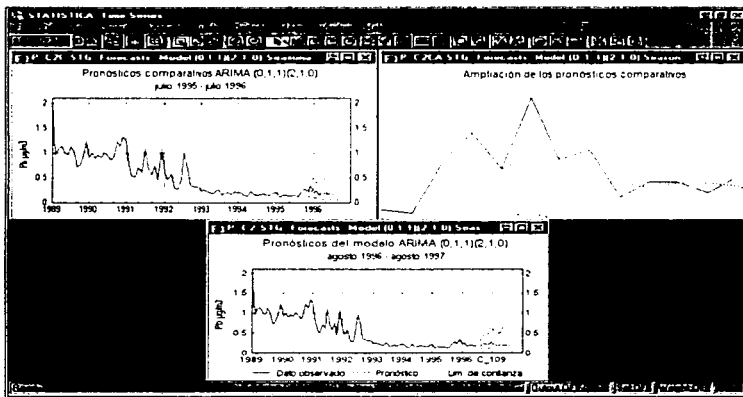
• *Análisis de residuales*



El comportamiento de los residuales indica que el modelo ARIMA (0,1,1)(2,1,0), se ajusta aceptablemente a la serie en estudio y, debido a la falta de funciones significativas, tanto de autocorrelación como de autocorrelación parcial, son independientes. También podemos observar la frecuencia de los mismos en el histograma, la cual se considera que siguen una distribución normal, corroborando esta misma suposición en la serie de tiempo de los residuales, donde la mayor parte de ellos se encuentran dentro de un intervalo de $\pm 2\sigma$ así la mayoría de las observaciones se distribuye como una normal, en esta misma gráfica observamos que efectivamente se distribuyen como una normal con media cero y varianza constante; al igual que nos muestra la ausencia de observaciones discrepantes dado que todas las observaciones se encuentran dentro de $\pm 3\sigma$.

6.2 Construcción de los modelos ARIMA

- *Pronósticos generados por el modelo ARIMA (0, 1, 1)(2, 1, 0).*



La siguiente tabla presenta los pronósticos del plomo para la estación de Cerro de la Estrella de agosto de 1996 hasta agosto de 1997, así como su intervalo con un 90% de confiabilidad.

Fecha	Pronóstico	Limite inferior 90% de confianza	Limite superior 90% de confianza
Ago.96	0.1691	0.0997	0.2869
Sep.96	0.2201	0.1183	0.4094
Oct.96	0.2431	0.1206	0.4899
Nov.96	0.2014	0.0930	0.4362
Dic.96	0.2847	0.1231	0.6588
Ene.97	0.2438	0.0991	0.5995
Feb.97	0.2156	0.0828	0.5614
Mar.97	0.1719	0.0626	0.4725
Abr.97	0.1779	0.0615	0.5147
May.97	0.2095	0.0690	0.6362
Jun.97	0.1778	0.0559	0.5660
Jul.97	0.1823	0.0548	0.6070
Ago.97	0.1771	0.0472	0.6651

Resumen de los modelos ARIMA correspondientes al Pb

Estación de monitoreo	Varianza	Tendencia	Transformaciones	Modelo ARIMA	Longitud estacional	Parámetros
Tlalnepanlla	decreciente	decreciente	$\ln(x)$, $d(1)$	(0,1,1)		$\theta_1 = 0.3308$
Xalostoc	variable	decreciente	$d(1)$, $D(12)$	(0,1,1)(1,1,0)	12	$\theta_1 = 0.4545$ $\phi_1 = -0.3843$
Merced	decreciente	decreciente	$\ln(x)$, $d(1)$, $D(12)$	(0,1,1)(0,1,1)	12	$\theta_1 = 0.4711$ $\theta_2 = 0.4375$
Pedregal	decreciente	decreciente	$\ln(x)$, $d(1)$, $D(12)$	(2,1,0)(0,1,1)	12	$\theta_1 = -0.5318$ $\theta_2 = -0.3232$ $\theta_3 = 0.5406$
Cerro de la Estrella	variable	decreciente	$\ln(x)$, $d(1)$, $D(12)$	(0,1,1)(2,1,0)	12	$\theta_1 = 0.3832$ $\theta_2 = -0.5728$ $\theta_3 = -0.3233$

6.3 Generalidades de los modelos ARIMA

A través de la metodología Box-Jenkins se generaron modelos ARIMA para cada serie de tiempo en estudio donde a través de estos, se identificaron características específicas por punto de muestreo y por contaminante analizado.

Con este tipo de modelos se detectó tendencia general decreciente tanto para las partículas suspendidas totales como para el plomo; mientras que las partículas menores a diez micras mostraron tendencia variable en las estaciones de Tlalnepantla y Xalostoc, y decreciente en las restantes.

La mayoría de series de tiempo presentaron similitud del comportamiento entre las observaciones del mismo mes en años consecutivos dado que se encontró estacionalidad con duración de doce meses. Esta característica no se reflejó, únicamente, en la serie correspondiente a las concentraciones atmosféricas de plomo en la estación de Tlalnepantla.

6.3.1 Características por punto de monitoreo

● Tlalnepantla

Presentó un modelo ARIMA (0,1,1)(2,1,0) tanto para las partículas suspendidas totales como para las partículas menores a diez micras y un modelo ARIMA (0,1,1) para la serie del plomo; lo cual indica que en la parte ordinaria los tres contaminantes se determinan a través del mismo proceso en el que se involucra directamente la aleatoriedad; la parte estacional de las PST y PM_{10} está determinada por un proceso que consta de dos parámetros autorregresivos donde al valor actual de las respectivas series depende de los valores anteriores más un error aleatorio; en esta determinación del valor actual, se involucran algunos datos registrados durante los últimos tres años.

● Xalostoc

Esta estación es la que presenta las concentraciones menos consistentes, lo cual se refleja en los modelos, dado que para los tres contaminantes son diferentes.

Las PST se ajustaron a un modelo ARIMA (3,1,0)(2,1,0), a pesar de que un parámetro de orden 3 podría verse como no parsimonioso, la evaluación del modelo registró que este fue adecuado y además de pertenecer al mejor ajuste encontrado para esta serie, donde las concentraciones son muy altas y muy variadas; así, vemos que tanto la parte ordinaria como la estacional se encuentran dominadas por procesos autorregresivos, por lo que el valor actual depende únicamente de las observaciones pasadas, este modelo se caracteriza por tener una gran memoria tomando en cuenta datos que sucedieron durante los últimos tres años cuatro meses.

El modelo registrado para las PM_{10} fue un ARIMA (0,1,2)(2,1,0), en este modelo observamos que la parte ordinaria es diferente al de las PST, no obstante la parte estacional es la misma, lo que indica que esta serie está dominada en su parte ordinaria por un proceso de dos parámetros de promedio móviles; las observaciones de esta serie se determinan a través de la suma de valores sucedidos durante los últimos 37 meses, adicionándoles la suma de los errores aleatorios correspondientes a los dos últimos meses.

Por último para esta estación, tenemos el modelo de la serie del plomo atmosférico, el cual corresponde a un ARIMA (0,1,1)(1,1,0); este modelo es muy parecido al de las PM_{10} , excepto que tiene un parámetro menos tanto

en la parte ordinaria como en la estacional, lo que indica que tiene una memoria menor a la del modelo anterior, la observación actual se determina a partir de la suma de algunos valores ocurridos durante los últimos 25 meses más el error involucrado en el último mes.

Merced

La estación que representa a la zona centro de la ZMCM tuvo un comportamiento muy homogéneo para los tres contaminantes que se estudiaron, lo cual se reflejó al identificar los modelos a través de la metodología Box-Jenkins; donde el modelo ARIMA (0,1,1)(0,1,1) representa a los tres diferentes contaminante muestreados en esta zona. En éste modelo impera tanto en la parte ordinaria como en la estacional el proceso de promedios móviles, la aleatoriedad se encuentra muy involucrada en este tipo de modelo; el valor actual se determina a través de la suma de valores aleatorios sucedidos durante 1, 12 y 13 meses anteriores, adicionando también los valores correspondientes a las observaciones de estos mismos meses.

Pedregal

Esta zona es la que se encuentra menos afectada por la contaminación de los tres contaminantes analizados. Al igual que Merced, también presentó un mismo modelo para los tres contaminantes en estudio el cual corresponde a un ARIMA (2,1,0)(0,1,1), mismo que se encuentra dominado en la parte ordinaria por un proceso autorregresivo de dos parámetros y en la parte estacional por uno de promedios móviles; el valor actual se obtiene a partir de la suma de ciertos valores ocurridos durante 15 meses anteriores más el error ocurrido 12 meses atrás.

Cerro de la Estrella

Presentó un mismo modelo tanto para las partículas suspendidas totales como para el plomo, este corresponde a un ARIMA (0,1,1)(2,1,0); las partículas menores a diez micras se ajustaron a un modelo muy semejante, únicamente difiere a este primero en un parámetro menos en la parte estacional, este modelo se define como un ARIMA (0,1,1)(1,1,0); como podemos observar en estos modelos se determina la parte ordinaria a través de un proceso de medias móviles y la parte estacional por un proceso autorregresivo aunque con memoria de un año más en el modelo correspondiente a PST y al Pb.

La siguiente tabla resume el dominio de los procesos autorregresivos y de medias móviles que se obtuvo para cada estación de monitoreo:

ESTACIÓN	PARTE ORDINARIA		PARTE ESTACIONAL	
	Modelo Autorregresivo	Modelo de Promedios móviles	Modelo Autorregresivos	Modelo de Promedios móviles
Jalisco		PST PM ₁₀ Pb	PST PM ₁₀	
Aguascalientes	PST	PM ₁₀ Pb	PST PM ₁₀ Pb	

6.3 Generalidades de los modelos ARIMA

Merced	PST	PST
	PM ₁₀	PM ₁₀
	Pb	Pb
Pedregal	PST	PST
	PM ₁₀	PM ₁₀
	Pb	Pb
Cerro de la Estrella	PST	PST
	PM ₁₀	PM ₁₀
	Pb	Pb

6.3.2 Características específicas por contaminante analizado

Al analizar los modelos ARIMA por contaminante, observamos que al igual que por punto de muestreo, también se identifican características particulares las cuales se mencionan a continuación:

- ◆ Partículas Suspendidas Totales

Una vez que se divide este tipo de modelos en su parte ordinaria y estacional, observamos que las estaciones de Tlalnepantla, Merced y Cerro de la Estrella se caracterizan por presentar semejanza en la parte ordinaria, debido a que ésta, presenta un proceso de medias móviles con un sólo parámetro; por lo que las mismas se encuentran dominadas en mayor medida por la aleatoriedad. En la parte estacional destacan Tlalnepantla, Xalostoc y Cerro de la Estrella representadas por un proceso autorregresivo; con lo que se identifica que las observaciones se relacionan con las que ya sucedieron.

- ◆ Partículas Menores a diez micras

En este contaminante, se encontró que las estaciones de Tlalnepantla, Xalostoc, Merced y Cerro de la Estrella, la parte ordinaria de sus modelos ARIMA está dominada por un proceso de media móviles y Pedregal por un proceso autorregresivo; y en la parte estacional, Tlalnepantla, Xalostoc y Cerro de la Estrella por uno autorregresivo, mientras que Merced y Pedregal por un proceso de medias móviles.

- ◆ Plomo

Los modelos ARIMA de este contaminante para las estaciones de Tlalnepantla, Xalostoc, Merced y Cerro de la Estrella en su parte ordinaria son similares, estos son dominados por un proceso de medias móviles; la estación que difiere es Pedregal a la cual la representa un modelo autorregresivo. En la parte estacional, se tiene que tanto Xalostoc como Cerro de la Estrella presentan un modelo autorregresivo mientras que Merced y Pedregal uno de medias móviles.

A continuación se presenta una tabla donde se resumen el dominio de los procesos autorregresivos y de medias móviles que se obtuvo para cada contaminante:

CONTAMINANTE	PARTE ORDINARIA		PARTE ESTACIONAL	
	<i>Modelo Autorregresivo</i>	<i>Modelos de Promedios móviles</i>	<i>Modelo Autorregresivo</i>	<i>Modelos de Promedios móviles</i>
PST		Tlalnepantla	Tlalnepantla	
	Xalostoc	Merced	Xalostoc	
	Pedregal			Merced Pedregal
PM ₁₀		Cerro de la Estrella	Cerro de la Estrella	
		Tlalnepantla	Tlalnepantla	
		Xalostoc	Xalostoc	
	Pedregal	Merced		Merced Pedregal
PM _{2.5}		Cerro de la Estrella	Cerro de la Estrella	
		Tlalnepantla		
		Xalostoc	Xalostoc	
	Pedregal	Merced		Merced Pedregal
		Cerro de la Estrella	Cerro de la Estrella	

6.3.3 Tendencia de los pronósticos

Las proyecciones futuras revelan que durante el año pronosticado, de septiembre de 1996 a septiembre de 1997 para PST y PM₁₀ y de agosto de 1996 a agosto de 1997 para el Pb, se tendrá el siguiente comportamiento:

Estación	PST	PM ₁₀	Pb
Tlalnepantla	decreciente	constante	constante
Xalostoc	constante	creciente	constante
Merced	decreciente	constante	constante
Pedregal	decreciente	decreciente	constante
Cerro de la Estrella	decreciente	decreciente	constante

Con lo que observamos que el único contaminante que refleja incremento en sus pronósticos es el que corresponde a las partículas menores a diez micras en la estación de Xalostoc.

6.3 Generalidades de los modelos ARIMA

Conclusiones

La sociedad contemporánea enfrenta día con día nuevos retos. En todos los ámbitos los avances de la tecnología y la incorporación de procesos emergentes reclaman una actitud diferente acorde con las necesidades del tiempo presente. Sabemos que la contaminación atmosférica es el resultado de estos avances que el hombre ha requerido para su desarrollo, es por ello que día con día surge la necesidad de elaborar trabajos formales que nos ayuden a tener un mayor conocimiento de este tema, para así plantear soluciones que nos ayuden a abatirlo.

Hoy en día, la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM) está viviendo un enorme problema por la contaminación de partículas suspendidas en su atmósfera; por ello, se ha puesto mayor énfasis en el estudio de este contaminante.

El material particulado es extremadamente variado al igual que sus propiedades físicas y químicas; no obstante, la importancia que se le otorga a este contaminante se establece de acuerdo a los diversos tamaños que lo caracterizan. Es por ello que en este trabajo se desarrolló un estudio de tres de los contaminantes que conforman el material particulado que prevalece en la atmósfera de la ZMCM: las partículas suspendidas totales, las partículas menores a diez micras y el plomo.

La primer clase de partículas que se analizó corresponde a las *Partículas Suspendidas Totales* (PST); las cuales están constituidas por una gran diversidad de sustancias entre las que destacan: partículas naturales (integradas por suelos, partículas de origen biológico y basuras), partículas provenientes de procesos de combustión y las que se forman en la atmósfera como resultado de la transformación de otros contaminantes.

Los efectos que causan las altas concentraciones de las PST se reflejan en la reducción de visibilidad, impactos negativos en los ecosistemas cercanos a las grandes fuentes de emisión, daños a las estructuras de construcción y principalmente daños a la salud de la población expuesta a este contaminante.

El análisis de la variación temporal indica que las principales zonas afectadas por la presencia de las PST son la noreste y sureste correspondiente a Xalostoc y Cerro de la Estrella; mismas que tienen la característica del predominio de grandes extensiones de suelos en proceso de erosión y carentes de cubierta vegetal. Xalostoc es la zona en la que se monitorean las concentraciones más altas de este contaminante, situación que se le atribuye, en mayor proporción, a la existencia de áreas altamente industrializadas. El orden en el que se registran las mayores concentraciones de partículas suspendidas totales es el siguiente: Xalostoc, Cerro de la Estrella, Tlalnepanitla, Merced y Pedregal.

El comportamiento atmosférico de este contaminante se encuentra estrechamente relacionado con la temporada de lluvia y sequía o también llamada estiaje, registrándose los datos más altos, en todas las estaciones analizadas, durante esta última.

El comportamiento temporal de las concentraciones registradas en Tlalnepanitla y el de la estación Merced son muy similares, característica que se visualiza tanto en el periodo de lluvias como en el de sequías, explicándose

debido a la similitud que prevalece en el uso del suelo de ambas zonas (fundamentalmente habitacional y con una alta fluidez vehicular).

Una característica notoria en los registros de concentraciones de PST, es el incremento de este contaminante durante el último año, en las estaciones de Tlalnepantla, Merced, Pedregal y con una proporción mayor en Cerro de la Estrella.

El segundo contaminante participante en el análisis fueron las *Partículas Menores a diez micras* (PM_{10}), donde diversos estudios indican que este tipo de partículas tienen un mayor impacto en la salud, e incluso sobre la visibilidad, debido a que se sedimentan a una velocidad tan lenta que pueden penetrar profundamente en el sistema respiratorio al ser inhaladas. Estas partículas se generan principalmente por el uso de combustibles fósiles, vehículos y procesos industriales.

El comportamiento de este tipo de partículas tiene características semejantes al de las PST, donde Xalostoc y Cerro de la Estrella también son las estaciones de monitoreo que registran las concentraciones más altas del contaminante, destacando Xalostoc debido a que la mayor parte del año las concentraciones superan la norma de calidad permitida para las PM_{10} ($150 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

Al igual que las PST, las partículas menores a diez micrómetros presentan una variación temporal de acuerdo a las temporadas de lluvia y sequía de cada año; donde las mayores concentraciones se registran en la temporada de sequía.

Nuevamente, destaca la similitud de las concentraciones registradas en las zonas de Tlalnepantla y Merced. A pesar de que algunas características de las PST son semejantes a las de las PM_{10} , se tiene que estas últimas no presentan ascenso de sus concentraciones durante el último año en la mayoría de estaciones, excepto Xalostoc.

El proceso de implantar estrategias para disminuir la contaminación por partículas no es fácil, debido a que muchas de las fuentes que las generan son naturales, no obstante al observar la variación temporal de este contaminante, se refleja el descenso gradual que ha tenido a través del tiempo, situación que se considera puede deberse a las medidas implantadas por el PICCA (Programa Integral en Contra de la Contaminación Ambiental); estas estrategias contemplan tanto el control de PST como el de PM_{10} , debido a que ambos tipos de partículas tienen un origen común a través de fuentes naturales y antropogénicas.

El último contaminante que se analizó fue el *Plomo* (Pb), el cual permanece en la atmósfera en forma de partículas; las concentraciones de este contaminante se obtienen a través del análisis de caracterización que se le realiza a las PST. Su principal fuente de emisión son los automóviles, debido al uso de gasolinas que contienen tetraetilo de plomo, el cual se usa como antidetonante.

La contaminación por plomo afectó una gran cantidad de años a la ZMCM, debido a que las concentraciones registradas eran demasiado altas; por esta razón el gobierno puso una gran parte de su atención para disminuir este contaminante, por lo que las medidas que se implantaron fueron inmediatas y con obligados resultados, situación reflejada en el análisis de variación temporal de este contaminante donde se observa que a partir de 1991 las concentraciones disminuyeron de tal forma que en la mayoría de las estaciones en análisis, no se volvió a sobrepasar el nivel permisible, la excepción a este comportamiento fue Xalostoc, donde se continuaron registrando concentraciones altas, a pesar de que fue notoria, también, su descenso.

La reducción de este contaminante en la atmósfera de la ZMCM es consecuencia en gran parte de las reformulaciones que han tenido las gasolinas a través del tiempo, dado que al observar el descenso del

Conclusiones

contaminante en los muestreos, estos coinciden en general con el tiempo en el que las medidas se fueron implantando.

El orden en el que se ubican las estaciones de monitoreo de acuerdo a la mayor concentración de plomo atmosférico es: Xalostoc, Merced, Tlalnepanitla, Cerro de la Estrella y en último lugar Pedregal.

Una forma de analizar la relación existente entre las concentraciones de PST con PM_{10} , y PST con Pb se obtuvo al encontrar el coeficiente de correlación y determinación lineal para las mismas variables. En el primer análisis, se encontró que existe una fuerte relación lineal positiva entre las partículas suspendidas totales y las partículas menores a diez micrómetros, lo que conlleva a determinar que las medidas implantadas para la disminución de las partículas han sido eficientes para ambos contaminantes. El orden que presentan las estaciones de acuerdo a su mayor porcentaje de ajuste lineal es: Pedregal, Cerro de la Estrella, Merced, Tlalnepanitla y en último lugar Xalostoc.

El análisis correspondiente a las correlaciones entre PST y Pb reflejó una relación no tan estrecha como la que se había supuesto encontrar, sin embargo, la poca relación encontrada es de gran importancia debido a que donde se encontró una mayor relación fue en la zona de Xalostoc, misma que fue significativa para todos los años en estudio, la siguiente estación que presentó asociación lineal significativa fue Tlalnepanitla para los años de 1990 a 1994; en el resto de las estaciones la relación lineal que se encontró fue en muy pocos años.

Sin embargo, como complemento de este análisis, también se correlacionaron las series completas para cada estación de monitoreo; es decir, los datos abarcaron de 1988 hasta 1995, donde la relación lineal fue significativa para todas las estaciones, lo que indica que a pesar de que esa relación no se refleje anualmente, cuando las series tienen mayor información esta nos ayuda a determinar con mayor precisión la existencia de relaciones lineales entre nuestras variables en estudio. La relación lineal que se encontró entre estos dos últimos contaminantes indica que el descenso importante que tuvo el plomo atmosférico, si bien no mostró efecto trascendente para la disminución de PST sí resultó un impacto positivo e importante para el problema en salud.

Se obtuvieron los modelos ARIMA a través de la metodología Box-Jenkins para cada una de las series que participaron en el análisis; donde se observó que en todas las estaciones, tanto las partículas suspendidas totales como el plomo, presentaron tendencia decreciente. Las partículas menores a diez micras mostraron tendencia variable en las estaciones de Tlalnepanitla y Xalostoc, y decreciente en Merced, Pedregal y Cerro de la Estrella.

Una característica común que presentaron los tres contaminantes analizados en la mayoría de las estaciones, fue la estacionalidad con duración de doce meses; es decir, existe una alta similitud del comportamiento entre las observaciones para el mismo mes en años consecutivos; en la única serie de tiempo que no se mostró esta peculiaridad fue la correspondiente al Pb en la estación de Tlalnepanitla.

Los modelos ARIMA reflejan que la ZMCM tiene una alta zonificación; es decir en general, para cada punto de monitoreo analizado predomina un tipo de modelo con características semejantes para los tres contaminantes que se analizan en la misma zona.

Así tenemos que en Tlalnepanitla y Cerro de la Estrella, los modelos prevalecen dominados en su parte ordinaria por el proceso de medias móviles y en su parte estacional por el autorregresivo, lo cual indica que las observaciones actuales se relacionan tanto con concentraciones pasadas como por fenómenos aleatorios.

Xalostoc, es un punto de monitoreo inconstante en los modelos ARIMA, esto se debe a que es la estación en la que se registran las concentraciones más altas de los contaminantes analizados principalmente en partículas

suspendidas totales, donde el modelo ARIMA refleja que sus concentraciones actuales en la atmósfera están íntimamente ligadas a las concentraciones ocurridas con anterioridad. Mientras que las concentraciones de PM_{10} y Pb se relacionan tanto con fenómenos aleatorios como con observaciones pasadas.

Los modelos ARIMA que se obtuvieron en la estación Merced fueron muy consistentes para los tres contaminantes, estos indicaron que las concentraciones registradas en esta estación se encuentran dominadas por fenómenos aleatorios.

La estación Pedregal, también presenta un modelo ARIMA semejante para los tres contaminantes, pero a diferencia de Merced, las concentraciones de esta estación de monitoreo se relacionan tanto con fenómenos aleatorios como con observaciones ya ocurridas.

Los modelos ARIMA también permitieron obtener características relevantes al ser analizados por contaminantes, con lo que se encontró que las concentraciones de partículas suspendidas totales tienen un modelo semejante en las zonas de Tlalnepantla y Cerro de la Estrella. Las partículas menores a diez micras presentaron modelos similares entre las zonas de Tlalnepantla, Xalostoc y Cerro de la Estrella; y para los registros de plomo los modelos similares se presentaron en las zonas de Xalostoc y Cerro de la Estrella.

La tendencia que prevaleció en los pronósticos que se obtuvieron de la contaminación por partículas suspendidas totales fue decreciente, excepto para la estación de Xalostoc, donde los pronósticos no reflejaron alguna tendencia predominante. Para las partículas menores a diez micras los datos indican comportamiento constante para las zonas de Tlalnepantla y Merced, creciente para Xalostoc y decreciente para Pedregal y Cerro de la Estrella. Por último los pronósticos del plomo reflejan la continuidad de un comportamiento constante en las concentraciones atmosféricas del contaminante; es importante señalar que estas concentraciones que se pronosticaron continúan siendo niveles bajos de concentración de plomo atmosférico.

Referencias Bibliográficas

1. Ackoff Russell L.. Planificación de la empresa del futuro. Edit. Limusa. México D.F., 1990.
2. Barnés de Castro Francisco. Esfuerzos de México para reducir el plomo en las gasolinas, su efecto en el ambiente y en la salud. IMP. Oaxaca México. Octubre, 1995.
3. Box George E. P., Jenkins Gwilym M. Time series analysis forecasting and control. Edit. Prentice Hall. United States of America, 1976.
4. Comisión Metropolitana para la Prevención y Control de la Contaminación Ambiental en el Valle de México. La contaminación atmosférica en el Valle de México, acciones para su control, 1988 - 1994. México, D.F., 1984.
5. Comisión Metropolitana para la Prevención y Control de la Contaminación Ambiental en el Valle de México. Plomo, situación actual y avances en su control. Enero 1993.
6. Comisión Nacional de Derechos Humanos. Contaminación atmosférica en México, sus causas y efectos en la salud. Coordinador: Iván Restrepo. México, D.F. , 1992.
7. Departamento del Distrito Federal, Gobierno del Estado de México, Secretaría del Medio Ambiente Recursos Naturales y Pesca y Secretaría de Salud. Programa para Mejorar la Calidad del Aire en el Valle de México 1995 - 2000. México D.F. Marzo de 1996.
8. Departamento del Distrito Federal. Programa Integral en Contra de la Contaminación Atmosférica, un compromiso común. México D.F. 1990.
9. D.D.F., Secretaría del Medio Ambiente, Dirección General de Prevención y Control de la Contaminación. Informe anual de la Ciudad de México 1995. RAMA.
10. Gallagher Charles A., Watson Hugh J. Métodos cuantitativos para la toma de decisiones administrativa. Edit. McGraw-Hill. México, 1987.
11. González Videgaray María del Carmen. Modelos de decisiones con procesos estocásticos II (Metodología de Box-Jenkins). U.N.A.M. , E.N.E.P Acatlán. México, 1990.
12. Guerrero Víctor M. Análisis de series de tiempo económicas. Universidad Autónoma Metropolitana. México 1991.
13. Gujarati Damodar N. Econometría. Edit. MacGraw-Hill. México D.F., 1995.

14. Hiller Frederick, Lieberman Gerald J. Introducción a la investigación de operaciones. Editorial McGraw-Hill. México, 1988.
15. IMP. Acciones de la Industria petrolera para abatir la contaminación atmosférica por dióxido de azufre, plomo y ozono en la ZMCM. Toluca Edo. de México. Febrero 1996.
16. IMP. Diagnóstico del CO, SO₂, ozono, óxidos de nitrógeno, PST y su impacto en la ZMCM durante 1994. México D.F. 1995.
17. I.M.P. Proyecto DOB-7238. Investigación sobre materia particulada y deterioro atmosférico 1996.
18. IUPPA. Clean Air Around the World. England, 1992.
19. Jaffe, L.S. Carbón Monoxide in the Biosphere: Source, Distribution and concentrations, proceeding of the conference on sources, sinks and concentrations, of carbon monoxide and methane in the earth's environment, American geophysical union and American meteorological society. St. Petersburg. Agosto 1992.
20. Lacy Rodolfo. La calidad del aire en el Valle de México. Colegio de México. México 1993.
21. Makridakis Spyros G. Pronósticos, Estrategia y planificación para el siglo XXI. Edit. Díaz de Santos, S.A. España, 1993.
22. Makridakis Spyros and Wheelwright Steven C. Manual de técnicas de pronósticos. Edit. Limusa. México D.F. 1991
23. Palazuelos R. Eduardo. Plomo y salud, impacto ambiental de la reformulación de las gasolinas en la ZMCM. Noviembre 1993.
24. Prawda Witenberg Juan. Métodos y modelos de investigación de operaciones, Volumen II Modelos estocásticos. Edit. Limusa. México, 1984.
25. Quadri De La Torre Gabriel, Sánchez Castaño Luis Rubén. La Ciudad de México y la contaminación atmosférica. Edit. Limusa. México 1992.
26. San Esteban José Eduardo. Plomo y desarrollo neurológico: realidades y fantasías. Presentado en la octava reunión anual del Servicio de Pediatría del Hospital ABC. Mayo 1992.
27. SECOFI. Convenio de concertación de acciones para la solución integral de los problemas relativos al contenido de plomo en productos que pudieran constituir un riesgo para la salud y los ecosistemas. México, 1991.
28. Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología, Departamento del Distrito Federal, Secretaría de Salud. Contaminación y calidad del aire en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México. Octubre de 1990.
29. SEDESOL. Datos de concentración de plomo en PST. Red Manual de Monitoreo Atmosférico, 1986 - 1992.
30. SEDESOL, INE. Informe de la situación general en materia de equilibrio ecológico y protección al ambiente. México 1993.

Referencias bibliográficas

31. SEDUE, Subsecretaría de ecología, Coordinación de asesores y Asesoría técnica. Índice Metropolitano de Calidad del Aire. Boletín informativo.
32. Seinfeld John H.. Contaminación atmosférica fundamentos físicos Y químicos. Edit. Mcgraw-Hill. Madrid 1979.
33. Stoker H. Stephen y Seager Spencer C.. Química Ambiental: Contaminación del aire y del agua. Edit. Blume. España, 1981.
34. Tecnológico de Monterrey Campus Estado de México. Diplomado en tecnología y administración ambiental seminario II, efectos de los contaminantes. Programas de educación continua. México 1996.
35. Walpole Ronald E., Wyers Raymond H. Probabilidad y estadística. Edit. McGraw-Hill. México, 1993.
36. Wark Kenneth, Warner Cecil F. Contaminación del aire, origen y control. Edit. Limusa. México 1996.

Glosario

Aerosol. Una dispersión de partículas microscópicas, sólidas o líquidas, en medios gaseosos.

Absorción. Proceso mediante el cual una sustancia atraviesa las membranas biológicas exteriores de un organismo y pasa desde el medio externo hacia el medio interno de éste especialmente mediante la circulación sanguínea.

Adsorción. Proceso por medio del cual varios componentes de una capa entre dos fases principales, son enriquecidos o empobrecidos.

Aleatoriedad. Se refiere a la componente de una serie de tiempo que carece de patrón. Se le llama ruido (perturbación) o error de la serie, ya que no puede pronosticarse.

Aleatoriedad (ruido). Las variaciones inexplicables en una serie de tiempo.

Análisis de las series de tiempo. Técnica de pronósticos en la que se predice el comportamiento futuro de una variable a partir de su comportamiento pasado.

Análisis de las series de tiempo. Rama de los pronósticos cuantitativos en la cual se examinan los datos para una variable a partir de los patrones de la tendencia, la estacionalidad y el ciclo.

Antropogénico. Que se origina a causa de las actividades desarrolladas por el hombre.

ARIMA. Abreviatura para el promedio móvil autorregresivo integrado (del inglés, Autorregresive (AR), Integrated (I), Moving Average (MA); nombre de una amplia clase de modelos con series de tiempo.

Atmósfera. Es la envoltura gaseosa que rodea a la Tierra.

Autocorrelación. La autocorrelación del retraso k de una serie de tiempo de N observaciones es la correlación entre el valor en el tiempo t , digamos Z_t , y el valor en el tiempo $t - k$, digamos Z_{t-k} , calculada sobre los pares de tiempo $(k + 1, 1)$, $(k + 2, 2)$, ..., $(N, N - k)$, exactamente como se calcularía la correlación de dos variables diferentes X y Y .

Autocorrelación parcial. La autocorrelación parcial del retraso k de una serie de tiempo Z , es básicamente el coeficiente estimado de Z_{t-k} en la regresión de Z_t sobre $Z_{t-1}, Z_{t-2}, \dots, Z_{t-k}$. Las autocorrelaciones parciales son útiles para determinar los retrasos autorregresivos adecuados.

Autorregresión. Un elemento típico de muchos modelos de series de tiempo en los cuales se puede sugerir que un valor en el tiempo t , como Z_t , se encuentra asociado con los valores Z de series anteriores, digamos $Z_{t-1}, Z_{t-2}, \dots, Z_{t-p}$, en el caso de una autorregresión de orden p .

Autorregresión. En el caso de las series de tiempo, la dependencia de una variable con respecto a sus propios valores anteriores.

Biodisponible. El grado al cual una sustancia química a la que el cuerpo está expuesto (ya sea por ingestión, inhalación, inyección o contacto con la piel) llega a la circulación sistémica, y la velocidad con que esto ocurre.

Ciclo. Secuencia recurrente de períodos de expansión y depresión. Los ciclos comerciales son fenómenos comunes, pero varían en cuanto a longitud y magnitud.

Contaminación del aire. Es la presencia en el medio ambiente de sustancias o partículas que causan daño a la salud de los seres vivos.

Desviación estándar. La raíz cuadrada de la varianza, cantidad empleada con frecuencia para medir la dispersión que presenta una cantidad desconocida o ciertos datos.

Diferencia. Transformación de una serie de tiempo Z con n observaciones para crear una nueva serie de tiempo Z tomando una diferencia de órdenes s , $W_t = Z_t - Z_{t-s}$, $t = s+1, \dots, n$. Las diferencias se emplean para lograr la estacionalidad y se encuentran asociadas con el término "integradas".

Ecuación del pronóstico. Función matemática que especifica cómo se deben combinar los valores de los coeficientes del modelo para producir un pronóstico.

Efecto de invernadero. Se da normalmente en toda la Tierra: es la capacidad que tiene la atmósfera para absorber y almacenar el calor del sol. El problema surge cuando la atmósfera está cargada de partículas y sustancias que aumentan la temperatura.

Error. La diferencia entre un valor real y un valor pronosticado.

Error medio cuadrático (EMC). Valor promedio de todos los valores del error llevados al cuadrado. Esta medida aplica una sanción a errores mayores que es más que proporcional. Un error dos veces mayor entra en el cálculo del EMC como una cantidad cuatro veces más grande.

Estacionalidad. Componente de una serie de tiempo, que ocurre en forma repetida año con año (o con otra periodicidad). La causa es la necesidad o disponibilidad "estacionales" y no modifica la dirección prevaleciente que muestran las series.

Estacionario. Se refiere a un proceso con una distribución compuesta que es invariable con respecto al desplazamiento a través del tiempo. Los datos de las series de tiempo deben mostrar este carácter estacionario o tener la capacidad de ser transformados a esta condición.

Estimador. Un estimador o estadístico (muestral), es una regla, fórmula o método que nos dice como estimar el parámetro poblacional a partir de la información proporcionada por la muestra que se tiene a mano.

Exógena. Categoría de las variables que se determinan fuera del modelo.

Fuente de emisión. Es el sitio o área donde se efectúa la descarga de sustancias a la atmósfera. El proceso que se lleva a cabo en la industria, el tipo de combustible que se usa y las condiciones.

Fuentes fijas. Son las fuentes emisoras que no presentan desplazamiento. Están constituidas por instalaciones fabriles, refinerías, termoelectricas, erupciones volcánicas, tolvaneras, etc.

Fuentes móviles. Las conforman los vehículos automotores de combustión interna, aviones, locomotoras, barcos, motocicletas y similares.

Función de autocorrelación. El coeficiente de autocovarianza mide la covarianza entre una serie de tiempo y entre el mismo desplazado en k unidades de tiempo. El coeficiente de autocorrelación es el coeficiente de autocovarianza dividido entre la varianza del proceso. La función de autocorrelación o correlograma, es simplemente una gráfica de las autocorrelaciones a través de todas las unidades de tiempo k .

Función de autocorrelación. La colección de autocorrelaciones individuales correspondientes a los retrasos $k = 1, 2, 3, \dots$ hasta algún retraso máximo seleccionado. Se usa para identificar un modelo para series de tiempo.

Función del costo del error. Se asigna un costo, $I(e)$, al efecto de un error de magnitud e . La forma funcional del costo del error que se emplea con más frecuencia es la cuadrática; ésta supone que el efecto de un error es proporcional al cuadrado del mismo.

Hidrosfera. Conjunto de las partes líquidas del globo terráqueo. La masa principal de la hidrosfera la constituyen los océanos y mares, pero también contribuyen a ella los ríos, arroyos y corrientes, las aguas subterráneas, los glaciares y, circunstancialmente, las aguas salvajes.

Hollín. Una aglomeración de partículas de carbón.

Horizonte del pronóstico. El plazo hacia el futuro para el cual se deben hacer los pronósticos.

Identificación. El paso en la elaboración de los modelos de series de tiempo en el cual los patrones de muestreo estadístico proveniente de los datos observados, tales como las funciones de autocorrelación, autocorrelación parcial, etc., se asocian con un modelo potencial para los datos.

IMECA. Índice Metropolitano de la Calidad del Aire; permite comparar las magnitudes de los diversos contaminantes en una escala homogénea, en la cual 100 puntos IMECA corresponde al valor de la norma de cada uno de los contaminantes.

Inventario de emisiones. El inventario de emisiones de contaminantes atmosféricos es un instrumento estratégico para el manejo de la cuenca atmosférica. El inventario de emisiones refleja la intensidad con que diferentes usuarios de las capacidades de carga de la atmósfera utilizan este recurso común ambiental. Debe tenerse en cuenta que los usuarios se pueden agrupar en sectores de actividad, la cual da una idea de la eficiencia ambiental de diferentes procesos humanos, y también de las prioridades de atención en el diseño de programas y medidas. El inventario de emisiones nos proporciona un punto de partida para visualizar la magnitud y costo del tipo de acciones que serían necesarios para disminuir progresivamente las concentraciones de contaminantes atmosféricos hasta que finalmente se llegue al cumplimiento de las normas de calidad del aire.

Inversión térmica. En condiciones normales, la temperatura del aire disminuye a medida que se incrementa la altura (por ello las montañas elevadas tienden a desarrollar nieve en su cúspide). Cuando se presenta el fenómeno de inversión térmica se invierte esta situación, por lo que la temperatura se incrementa con la altura. De esta forma, el aire frío (es decir, más pesado) y los contaminantes que contiene, tienden a permanecer estancados en la superficie al ser atrapados por una capa de aire más caliente (y más ligera) que funciona como tapa.

Litosfera. Capa sólida que ocupa la superficie del globo terrestre. Su espesor medio aproximado es de unos 35 Km.

Media o promedio aritmético. El valor promedio de algunos datos o de alguna cantidad desconocida.

Medio. Un medio es algo que produce un resultado deseado o permite acercarse a él

Mensurable. Sustancias que causan efecto nocivo.

Método de altos volúmenes. El método de altos volúmenes implica el paso de volúmenes controlados a través de un filtro de fibra de vidrio, durante 24 horas, de tal forma que las partículas suspendidas en el aire son retenidas por el filtro. Dicho filtro se pesa antes y después del muestreo, por lo que la masa de las partículas retenidas se determina por la diferencia de peso. La concentración de partículas en el aire se calcula dividiendo la masa de las partículas entre el volumen de aire que pasó a través del filtro durante las 24 horas de muestreo.

Microgramos por metro cúbico ($\mu\text{g}/\text{m}^3$). Unidad utilizada para expresar la concentración de Partículas Suspendidas en un volumen de aire. La concentración de partículas se determina por la diferencia del peso de un filtro, después de la extracción de un volumen de aire conocido.

Modelo. Descripción de una relación o de un conjunto de relaciones entre las variables económicas, por lo general en la forma de ecuaciones aritméticas. Cuando se emplea un modelo es posible usar las relaciones históricas entre las variables para producir los pronósticos de algunas variables a partir de los pronósticos de otras.

Modelo de caminata aleatoria. Modelo que emplea los datos disponibles más recientes como pronóstico futuro.

Modelos parsimoniosos. Ciertos modelos de series de tiempo simples que se comprueba con datos acerca de las ganancias trimestrales. Procedimiento mediante el cual se generan estos modelos y se evita la etapa más complicada y subjetiva de la modelación de Box-Jenkins.

Morbilidad. Cualquier desviación, subjetiva u objetiva, de un estado de bienestar fisiológico o psicológico.

Muestreo. Método para la recopilación de datos en el cual únicamente se estudia a una pequeña porción de la población.

Neblina. Dispersión de pequeñas gotas de líquido de suficiente tamaño como para caer desde el aire.

Necrosis. Muerte de un conjunto localizado de células; en ocasiones es compatible con la vida del órgano afectado.

Niebla. Aerosol visible.

Objetivos. Los resultados que la gerencia de una empresa desea alcanzar.

Octano. El índice de octano indica la tendencia antidetonante relativa de un combustible.

Orográficas. Este tipo de características hacen referencia a la descripción de las montañas que rodean el Valle de México

Parte por millón (ppm). Unidad utilizada para expresar la concentración de contaminantes gaseosos, especificada por el Sistema Americano de ingeniería (A.E.I.) adoptado por los Estados Unidos

Partículas. Cualquier material, excepto agua no combinada, que existe en estado sólido o líquido en la atmósfera o en una corriente de gas en condiciones normales.

Población. Una población es el conjunto de todos los resultados de un experimento o medición.

Polvo. Partículas sólidas de un tamaño mayor que el coloidal, capaces de estar en suspensión temporal en el aire.

Presión atmosférica. Es el peso o fuerza ejercida por una columna de aire sobre un área específica.

Promedio móvil. Elemento típico de muchos modelos de series de tiempo en los cuales se sugiere que un valor para el tiempo t , por ejemplo Z_t , se asocia con los valores de las series anteriores de errores aleatorios, como $e_{t-1}, e_{t-2}, \dots, e_{t-q}$, en el caso del comportamiento de un promedio móvil del orden q .

Pronóstico. Estimación del futuro basada en el pasado, a diferencia de la predicción (subjetiva).

Radiación gamma. Radiación electromagnética que viaja con la velocidad de la luz en el vacío. Su longitud de onda va de 10^9 a 10^{11} cm; es la más penetrante y peligrosa de las emisiones radiactivas.

R.A.M.A. Red Automática de monitoreo Atmosférico.

Rayos X. Radiación electromagnética similar en naturaleza a la luz ultravioleta, pero de menor longitud de onda, por tanto, de mayor energía, que se produce por la desaceleración de partículas cargadas o por las transiciones electrónicas en un átomo.

Series correlacionadas. Los modelos de pronósticos no pueden predecir perfectamente los datos reales. La diferencia entre los valores reales y los pronosticados se denomina el error. En teoría estos errores son aleatorios. Sin embargo, en muchos casos no lo son. Si los errores no son aleatorios, se les denomina series correlacionadas.

Series de tiempo. Una secuencia ordenada de los valores de una variable observados a intervalos iguales.

Smog. Palabra en desuso en nuestro país que viene del inglés smoke (humo) y fog (niebla). Se refiere a la contaminación atmosférica por componentes precedentes sobre todo de la quema de carbón.

Sumideros. Son aquellos medios y materiales que absorben o transforman los compuestos contaminantes que están presentes en el aire (ejm. Vegetación).

Tendencia. Curso promedio y predominante de una serie, con frecuencia se expresa como en crecimiento promedio durante un periodo.

Vapores. Partículas formadas por condensación, sublimación, o reacción química, predominantemente mayores de 1 μm (humo o tabaco).

Variables explicativas. Variables que explican parte de la fluctuación total de lo que se trata de pronosticar.

Varianza. La desviación promedio al cuadrado de la media de algunos datos o de una cantidad desconocida; una medida de la variación o de la dispersión.

Z.M.C.M. Zona Metropolitana de la Ciudad de México.

Zonas Suburbanas. Asentamientos humanos semiurbanizados, lotes baldíos sin vegetación y calles sin pavimento ni empedrado.

Zonas semirurales. Son colonias o predios con calles sin pavimento o empedrado en donde coexisten las actividades urbanas y rurales.

Anexo A

Relación de parámetros registrados en cada red de monitoreo.

Red automática:

Zona	Estación	Parámetros						
Noroeste	Vallejo	CO	SO ₂					
	Tacuba	O ₃	CO	SO ₂	H ₂ S	MET	NO ₂	NO _x
	ENEP-Acatlán	O ₃	CO	SO ₂		MET	NO ₂	NO _x
	Azcapotzalco	O ₃	CO	SO ₂			NO ₂	NO _x
	Tlalnepantla	O ₃	CO	SO ₂		MET	NO ₂	NO _x
	I.M.P.		CO					PM ₁₀
	Cuhtlahuac		CO					
	Tultitlán		CO	SO ₂			NO ₂	NO _x
	Atizapán		CO	SO ₂			NO ₂	NO _x
	Noreste	Laureles			SO ₂			
La Presa				SO ₂				
La Villa				SO ₂				PM ₁₀
San Agustín		O ₃	CO	SO ₂		MET	NO ₂	NO _x
Xalostoc		O ₃	CO	SO ₂		MET	NO ₂	NO _x
Aragón			CO	SO ₂				
Netzahuatcoyotl			CO	SO ₂				PM ₁₀
Coacalco			CO	SO ₂			NO ₂	NO _x
Chapingo		CO					PM ₁₀	
Centro	Lagunilla	O ₃	CO	SO ₂			NO ₂	NO _x
	Merced	O ₃	CO	SO ₂	H ₂ S	MET	NO ₂	NO _x
	Hangares	O ₃	CO	SO ₂		MET	NO ₂	NO _x
	Benito Juárez	O ₃	CO	SO ₂			NO ₂	NO _x
	Insurgentes		CO					
Suroeste	Santa Ursula			SO ₂				
	Pedregal	O ₃	CO	SO ₂		MET	NO ₂	NO _x
	Plateros	O ₃	CO	SO ₂		MET	NO ₂	NO _x
	Cuajimalpa	O ₃						
	Tlalpan	O ₃						
Sureste	Cerro de la Estrella	O ₃	CO	SO ₂		MET	NO ₂	NO _x
	UAM Iztapalapa	O ₃	CO	SO ₂			NO ₂	NO _x
	Taxqueña	O ₃	CO	SO ₂			NO ₂	NO _x
	Tlahuac	O ₃	CO	SO ₂			NO ₂	NO _x
								PM ₁₀

Simbología	Unidades de reporte
O ₃	Ozono ppm
CO	Monóxido de Carbono ppm
SO ₂	Dióxido de Azufre ppm
H ₂ S	Ácido Sulfhídrico ppm
MET	Parámetros Meteorológicos: velocidad del viento m/s dirección del viento temperatura centígrados humedad relativa HR %
NO ₂	Dióxido de Nitrógeno ppm
NO _x	Óxidos de Nitrógeno ppm
PM ₁₀	Partículas Menores a diez micrómetros µg/m ³

Fuente: Red Automática de Monitoreo Atmosférico de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México. Informe mensual de la calidad del aire. Marzo 1996.

Red manual:

<i>Zona</i>	<i>Estación</i>	<i>Parámetro</i>		
Noroeste	S. Hacienda	PST		
	Tlalnepantla	PST	PM ₁₀	Pb
Noreste	La Presa	PST		
	Netzanualcoyotl Sur	PST		
	Cerro del Tepeyac	PST	PM ₁₀	Pb
	Xalostoc	PST		Pb
Centro	Chapingo	PST		
	Hangares	PST		
	Merced	PST	PM ₁₀	Pb
	Museo de la Cd. de México	PST		Pb
	Portales			
Suroeste	Museo Tecnológico			Pb
	F. Angeles			Pb
	Lomas			
	Pedregal		PM ₁₀	Pb
Sureste	Xochimilco			
	C. Estrella		PM ₁₀	Pb
	Taxqueña			
	UAM-Iztapalapa			

<i>Simbología</i>		<i>Unidades de reporte</i>
PST	Partículas Suspensas Totales	µg/m ³
PM ₁₀	Partículas Suspensas totales fracción respirable	µg/m ³
Pb	Plomo	µg/m ³

Fuente: Red Automática de Monitoreo Atmosférico de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México. Informe mensual de la calidad del aire. Marzo, 1996.

Anexo B

Tabla de los coeficientes de correlación y dependencia entre PST y PM₁₀

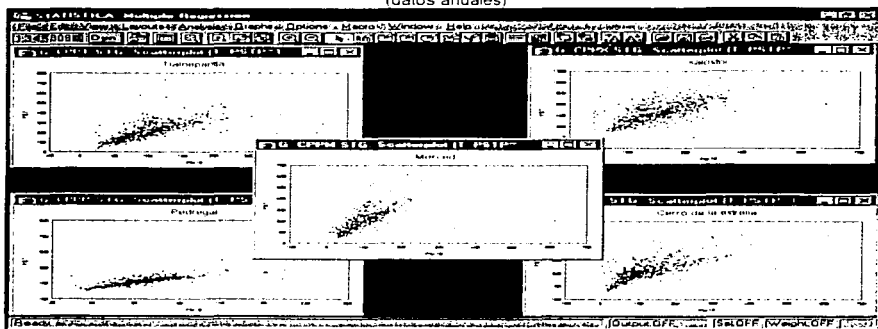
<i>Cerro de la estrella</i>					<i>Merced</i>		
Año	Transfor.	Correlación	Dependencia	N.datos	Transfor.	Correlación	Dependencia
88	In	0,915	0,837	46	In	0,938	0,880
89	nada	0,778	0,605	73	In	0,704	0,496
90	nada	0,896	0,803	76	In	0,674	0,454
91	In	0,884	0,781	54	nada	0,909	0,826
92	sqr	0,627	0,393	56	In	0,805	0,648
93	In	0,966	0,933	57	In	0,941	0,885
94	In	0,906	0,821	60	In	0,800	0,640
95	nada	0,883	0,780	60	nada	0,901	0,812
96	In	0,915	0,837	39	In	0,924	0,854

<i>Pedregal</i>					<i>Tlalnepantla</i>		
Año	Transfor.	Correlación	Dependencia	N.datos	Transfor.	Correlación	Dependencia
88	In	0,913	0,834	54	nada	0,733	0,537
89	nada	0,921	0,848	52	In	0,565	0,319
90	nada	0,846	0,716	79	In	0,841	0,707
91	In	0,874	0,764	53	In	0,858	0,736
92	In	0,781	0,610	57	nada	0,692	0,479
93	In	0,958	0,918	58	In	0,893	0,797
94	In	0,867	0,752	59	In	0,865	0,748
95	nada	0,901	0,812	61	In	0,918	0,843
96	nada	0,946	0,895	39	In	0,909	0,826

<i>Xalostoc</i>					
Año	Transfor.	Correlación	Dependencia	n_xal	
88	In	0,808	0,653	53	
89	sqr	0,524	0,275	59	
90	nada	0,670	0,449	76	
91	In	0,786	0,618	55	
92	nada	0,623	0,388	57	
93	In	0,901	0,812	57	
94	In	0,936	0,876	59	
95	In	0,904	0,817	61	
96	nada	0,723	0,523	35	

Los siguientes diagramas se construyeron utilizando las series completas de cada contaminante, con la finalidad de visualizar la asociación lineal que existe entre ambos a través del tiempo registrado

Diagramas de dispersión entre las variables PST y PM₁₀
(datos anuales)



Diagramas de dispersión entre las variables PST y Pb
(datos anuales)

