

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA**

***INSTITUTO DE INGENIERÍA***

***MAESTRÍA Y DOCTORADO EN CIENCIAS E INGENIERÍA***



**“PARTÍCULAS PM<sub>10</sub>, Y SU COMPOSICIÓN QUÍMICA EN LA ZONA URBANA Y RURAL DE MEXICALI Y POBLADO LA RUMOROSA”**

***TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE:  
DOCTOR EN CIENCIAS***

***PRESENTA***

**MIGUEL ÁNGEL CANALES RODRÍGUEZ**

***DIRECTOR: DR. MARGARITO QUINTERO NÚÑEZ***

***Mexicali, B. C.***

***30 de Septiembre de 2014***

*Dedicatoria:*

*A mi abuela y mi abuelo*

## **AGRADECIMIENTOS**

*Deseo expresar mis más sinceros agradecimientos al Dr. Margarito Quintero Núñez por su confianza y generosidad al compartir sus conocimientos, su apoyo y disposición a escucharme durante el desarrollo de esta. Del mismo modo manifestar mi admiración por la profundidad y seriedad de su trabajo.*

*Agradezco a los doctores del programa de Maestría y Doctorado en Ciencias e Ingeniería y a mis sinodales de tesis sin cuyas diferentes visiones mi proceso de aprendizaje y el presente trabajo no habrían alcanzado el nivel logrado.*

*Agradezco también al programa de becas CONACYT por el financiamiento a esta investigación.*

*Un especial agradecimiento a mi compañera de cubículo: M I Martha López Millán.*

*Un agradecimiento a mis amigos de residuos: Hugo, Samantha, Wendy, a mis compañeras de climatología: Adriana, Elizabeth, y un profundo agradecimiento al señor Enrique Dávalos por su ayuda en mi tesis. Agradezco también a la Dra. Silvia Ahumada y al Dr. Rafael García Cueto por su excelente ayuda durante todo mi doctorado. Y a todos mis amigos y compañeros del Instituto de Ingeniería con los que he compartido momentos buenos y muy buenos.*

*Y a mis abuelos, padres, hermanos y familia por ayudarme en todo. Muchas gracias amor por tu ayuda en estos meses, gracias Carla.*

*Sinceramente, su amigo Miguel A. Canales Rodríguez.*

## RESUMEN

El principal objetivo de este trabajo de investigación fue caracterizar químicamente las  $PM_{10}$  en dos de las tres zonas bajo estudio (zonas rural y urbana de Mexicali), teniendo a la zona montañosa (La Rumorosa) como testigo. Poniendo énfasis en los altos niveles de contaminación y trayectorias en la cuenca atmosférica del valle de Mexicali y la Rumorosa. Con este fin se diseñó un proyecto basado para: a) Evaluar los niveles gravimétricos de  $PM_{10}$  tanto en la zona urbana y rural de Mexicali, así como en la zona montañosa. b) Caracterizar químicamente las  $PM_{10}$  de la zona urbana y rural de Mexicali y c) Realizar modelos potenciales de trayectorias de  $PM_{10}$  en la región de la zona urbana y rural de Mexicali y de la zona montañosa (La Rumorosa).

La investigación se llevó a cabo en tres zonas: zona urbana y rural en Mexicali, así como en la zona montañosa en la Rumorosa, dividida en dos temporadas: invierno y verano. Se utilizaron cinco equipos de bajo volumen, con filtros de teflón y de cuarzo. Estos equipos operaron a un flujo de 5 L/min por períodos de 24 horas cada tercer día. A los filtros de teflón y cuarzo se les determinó gravimetría, mientras que a los filtros de teflón se sometieron a análisis de los 38 (Na a Pb) metales mediante espectroscopia de análisis de dispersión de rayos X (EDX). A los filtros de cuarzo se les determino cationes y aniones mediante cromatografía de iones y también se analizaron carbón orgánico y carbón elemental por transmitancia térmico-óptica por espectroscopia de absorción atómica electrotérmica. Los niveles de  $PM_{10}$  registrados en las estaciones de las tres zonas de estudio por cada temporada fueron:

**Tabla.- Niveles de PM<sub>10</sub> (µg/m<sup>3</sup>)**

Zona de muestreo/Filtro	Invierno	Verano
Zona montañosa/teflón	182.02	82.15
Zona urbana/cuarzo	62.12	45.14
Zona urbana/teflón	136.12	131.6
Zona rural/cuarzo	91.42	58.6
Zona rural/teflón	190.19	159.5

En lo que corresponde a las violaciones a la norma mexicana para las PM<sub>10</sub>. Se obtuvieron los siguientes datos para las estaciones en las tres zonas de estudio por cada temporada:

**Tabla.- Numero de violaciones (días)**

Zona de muestreo/Filtro	Invierno	Verano
Zona montañosa/teflón	13	4
Zona urbana/cuarzo	3	2
Zona urbana/teflón	12	10
Zona rural/cuarzo	2	1
Zona rural/teflón	16	9

Esto demuestra que la contaminación es mucho más alta en la temporada de invierno que en la de verano. Según el análisis estadístico hechos mediante la prueba T para la temporada de invierno y verano, se puede concluir que no hay relación entre la contaminación en la mayoría de las estaciones de monitoreo, excepto entre la zona urbana y zona rural en invierno. Mientras que para verano, se puede notar esto mismo entre la zona montañosa con la zona rural y con la zona urbana de Mexicali. Lo cual hace suponer que la contaminación es puntual y solo se da en las áreas de influencia de los muestreadores.

En base a los elementos identificados en los análisis de los filtros y asociándolos a su potencial origen, los resultados obtenidos identifican al material geológico como el principal contaminante con un 53.67% para la zona rural, en cambio para la zona urbana el material orgánico es el principal

contaminante con un 54.52% en invierno, mientras en verano, el principal contaminante tanto para la zona rural como la zona urbana es el material geológico con 52.34% y 75.48%, respectivamente.

Las trayectorias del transporte de contaminantes para las dos temporadas difieren significativamente debido a la dirección del viento prevaleciente en cada una de ellas; mientras que para la temporada de invierno las trayectorias en su mayoría provenían del norte – noroeste, en verano estas fueron de sur – sureste, solo algunos cambios se pudieron observar sobre todo en la estación de monitoreo de la Rumorosa, donde tanto en invierno como verano provenía del oeste y también algunos casos sobre todo en la noche y madrugada de la zona urbana de Mexicali donde esta misma provenía del oeste, que pudieron haber resuspendido el material geológico contiguo a las estaciones de monitoreo.

# ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE GENERAL .....	i
ÍNDICE DE FIGURAS .....	iv
ÍNDICE DE TABLAS .....	vii
CAPITULO I.- INTRODUCCIÓN.....	1
1.1.- Introducción.....	1
1.2.- Antecedentes de la región.....	3
1.3.- Contenido de la tesis. ....	6
1.4.- Planteamiento del problema .....	7
1.5.- Hipótesis .....	8
1.6.- Objetivo general.....	8
1.7.- Objetivos específicos.....	8
1.8.- Justificación .....	8
CAPITULO II.- MARCO TEÓRICO .....	9
2.1.- Fuentes de contaminación atmosférica .....	11
2.2.- Definición de PM <sub>10</sub> .....	14
2.3.- Características de las PM <sub>10</sub> y su composición química .....	15
2.4.- Causas de la proliferación de las PM <sub>10</sub> .....	17
2.5.- Importancia de la morfología y tamaño de partícula. ....	17
2.5.1.- Principales tipos de partículas atmosféricas .....	17
2.5.2.- Tamaño de la partícula .....	20
2.6.- Efectos principales de las PM <sub>10</sub> sobre la salud del ser humano.....	22
2.7.- Vía de entrada al cuerpo humano.....	23
2.8.- Normas de calidad del aire .....	25
2.9.- Los modelos de dispersión atmosférica.....	28
CAPITULO III.- MÉTODOS Y MATERIALES .....	30

3.1.- Método.....	30
3.1.1.- Campaña de monitoreo .....	30
3.1.2.- Caracterización química .....	33
3.2.- Materiales .....	34
3.2.1.- Filtros.....	34
3.2.2- Equipos .....	35
3.2.3.- Muestreador de partículas con equipo de bajo volumen. ....	36
3.2.4.- Métodos analíticos.....	37
3.2.5.- Modelación .....	40
3.2.6.- Rosa de los vientos.....	47
<b>CAPITULO IV.- RESULTADOS .....</b>	<b>48</b>
4.1.- Análisis de series de tiempos.....	48
4.1.1- Temporada de invierno.....	49
4.1.1.1- La Rumorosa .....	49
4.1.1.2.- Zona urbana de Mexicali.....	54
4.1.1.3.- Zona rural de Mexicali.....	59
4.1.1.4.- Análisis estadístico .....	65
4.1.2.- Temporada de verano .....	66
4.1.2.1.- La Rumorosa .....	67
4.1.2.2.- Zona urbana de Mexicali.....	72
4.1.2.3.- Zona rural de Mexicali.....	77
4.1.2.4.- Análisis estadístico .....	82
4.2.- Caracterización química y orígenes de PM <sub>10</sub> .....	84
4.2.1.- Temporada de Invierno.....	87
4.2.1.1.- Zona urbana.....	87
4.2.1.2.- Zona rural.....	92

4.2.2.- Temporada de Verano .....	96
4.2.2.1.- Zona Urbana .....	96
4.2.2.2.- Zona Rural.....	101
4.3.- Trayectorias de PM <sub>10</sub> .....	105
4.3.1.- Temporada de Invierno.....	106
4.3.1.1.- 15 de Enero del 2011 .....	106
4.3.1.2.- 17 de Enero del 2011 .....	109
4.3.1.3.- 21 de Enero del 2011 .....	112
4.3.2.- Temporada de Verano .....	118
4.3.2.1.- 15 de Agosto del 2011 .....	118
4.3.2.2.- 17 de Agosto del 2011 .....	123
4.3.2.3.- 27 de Agosto del 2011 .....	128
CAPITULO V.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	133
5.1.- Conclusiones.....	133
5.2.- Alcances y limitaciones.....	139
5.3.- Líneas futuras.....	140
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	141
ANEXO .....	155

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1.- Distribución de los componentes en los años de 1992 a 1993.	3
Figura 1.2.- Localización del municipio de Mexicali en el estado de Baja California	4
Figura 2.1.- Comparación del cabello humano contra el diámetro de las $PM_{2.5}$ y $PM_{10}$	14
Figura 2.2.- Componentes primarios de especies que contribuyen a la formación de las $PM_{10}$ en la ciudad de México.	16
Figura 2.3.- Distribución del número de partículas en función del diámetro	20
Figura 2.4.- Distribución granulométrica del material particulado	22
Figura 2.5.- Órganos internos que atraviesan las $PM_{10}$ y $PM_{2.5}$ en el cuerpo humano	23
Figura 2.6.- Interior del pulmón humano donde se alojan las $PM_{2.5}$	24
Figura 2.7 La localización de la red de monitoreo de la calidad del aire de Mexicali.	26
Figura 3.1.- Mapa de la ciudad de Mexicali, el Ejido Guadalupe Victoria y la Rumorosa	31
Figura 3.2.- Ubicación de los primeros dos monitores en el Instituto de Ingeniería	32
Figura 3.3.- Ubicación de dos monitores en un rancho cercano al ejido Guadalupe Victoria	32
Figura 3.4.- Ubicación del monitor en la caseta del FIUARUM en el poblado la Rumorosa en invierno.	33
Figura 3.5.- Ubicación del monitor en la Bombera del poblado la Rumorosa en verano.	33
Figura 3.6.- Filtros de teflón y cuarzo.	35
Figura 3.7.- Microbalanza	35
Figura 3.8.- Monitor de bajo volumen (“Minivol airmetrics”)	36
Figura 3.9.- jeol jsm-6060lv y jeol jsm-5300 usados para EDX.	38
Figura 3.10.- Equipo IonPac as9-hc usado para cromatografía de iones	39
Figura 3.11.- Equipo Perkin-Elmer modelo 2100 usado para transmitancia térmica/optica	40
Figura 3.12.- Portada del Air Resources Laboratory.	41
Figura 3.13.- Apartados de Hysplit trajectory model.	41
Figura 3.14.- Tipos de trayectorias	42
Figura 3.15.- Modelos meteorológicos.	43
Figura 3.16.- Localización del punto.	43
Figura 3.17.- Archivos del día.	44
Figura 3.18.- Detalles de la modelación.	45
Figura 3.19.- Opciones para modelar.	46

Figura 3.20.- Imagen de la trayectoria.	46
Figura 3.21.- Rosa de los Vientos	48
Figura 4.1.- Concentración de PM <sub>10</sub> de los filtros para la zona montañosa	52
Figura 4.2.- Rosa de los vientos para la zona montañosa.	53
Figura 4.3.- Histograma de la velocidad de viento para la zona montañosa.	53
Figura 4.4.- Concentración de PM <sub>10</sub> con los filtros para la zona urbana	57
Figura 4.5.- Rosa de los vientos para la zona urbana de Mexicali.	58
Figura 4.6.- Histograma de la velocidad del viento para la zona urbana de Mexicali.	58
Figura 4.7.- Concentración de PM <sub>10</sub> con el filtro de teflón para la zona rural	63
Figura 4.8.- Rosa de los vientos para la zona rural de Mexicali.	64
Figura 4.9.- Histograma de la velocidad del viento para la zona rural de Mexicali.	64
Figura 4.10.- Concentración de PM <sub>10</sub> con los filtros para la zona montañosa	70
Figura 4.11.- Rosa de los vientos para la zona montañosa.	71
Figura 4.12.- Histograma de la velocidad del viento para la zona montañosa.	71
Figura 4.13.- Concentración de PM <sub>10</sub> para los filtros de la zona urbana	75
Figura 4.14.- Rosa de los viento para la zona urbana de Mexicali	76
Figura 4.15.- Histograma de la velocidad del viento para la zona urbana de Mexicali	76
Figura 4.16.- Concentración de PM <sub>10</sub> con los filtros para la zona rural	80
Figura 4.17.- Rosa de los vientos para la zona rural de Mexicali	81
Figura 4.18.- Histograma de la velocidad de viento para la zona rural de Mexicali	81
Figura 4.19.- Tamaño de las partículas dentro del filtro del día 6 de febrero	87
Figura 4.20.- Espectro de dispersión de energía del filtro del día 6 de Febrero	88
Figura 4.21.- Contribución promedio de especies en la zona urbana.	91
Figura 4.22.- Tamaño de las partículas en el filtro del día 19 de Enero	93
Figura 4.23.- Espectro de dispersión de energía del filtro del día 19 de Enero	94
Figura 4.24.- Contribución promedio de especies en la zona rural.	96
Figura 4.25.- Tamaño de las partículas en el filtro del día 2 de Septiembre	97
Figura 4.26.- Espectro de dispersión de energía del día 2 de Septiembre	98
Figura 4.27.- Contribución promedio de especies en la zona urbana.	100
Figura 4.28.- Tamaño de las partículas en el filtro del día 27 de Agosto	101
Figura 4.29.- Espectro de dispersión de energía del día 27 de Agosto	102
Figura 4.30.- Contribución promedio de especies en la zona rural.	104
Figura 4.31.- Trayectoria a las 0:00 horas am del día 15 de Enero del 2011	107
Figura 4.32.- Trayectoria a las 6:00 horas a.m. del día 15 de Enero del 2011	107

Figura 4.33.- Trayectoria a las 12:00 horas p.m. horas del día 15 de Enero del 2011	108
Figura 4.34.- Trayectoria a las 18:00 horas pm del día 15 de Enero del 2011	108
Figura 4.35.- Trayectoria a las 0 horas am del día 16 de Enero del 2011	109
Figura 4.36.- Trayectoria a las 0:00 horas am del día 17 de Enero del 2011	110
Figura 4.37.- Trayectoria a las 6:00 horas am del día 17 de Enero del 2011	110
Figura 4.38.- Trayectoria a las 12:00 horas pm del día 17 de Enero del 2011	111
Figura 4.39.- Trayectoria a las 18:00 horas pm del día 17 de Enero del 2011	111
Figura 4.40.- Trayectoria a las 0:00 horas am del día 18 de Enero del 2011	112
Figura 4.41.- Trayectoria a las 0:00 horas am del día 21 de Enero del 2011	113
Figura 4.42.- Trayectoria a las 6:00 horas am del día 21 de Enero del 2011	114
Figura 4.43.- Trayectoria a las 12:00 horas pm del día 21 de Enero del 2011	115
Figura 4.44.- Trayectoria a las 18:00 horas pm del día 21 de Enero del 2011	116
Figura 4.45.- Trayectoria a las 0:00 horas am del día 22 de Enero del 2011	117
Figura 4.46.- Trayectoria a las 0:00 horas am del día 15 de Agosto del 2011	119
Figura 4.47.- Trayectoria a las 6:00 horas am del día 15 de Agosto del 2011	120
Figura 4.48.- Trayectoria a las 12:00 horas pm del día 15 de Agosto del 2011	121
Figura 4.49.- Trayectoria a las 18:00 horas pm del día 15 de Agosto del 2011	122
Figura 4.50.- Trayectoria a las 0.00 horas am del día 16 de Agosto del 2011	123
Figura 4.51.- Trayectoria a las 0:00 horas am del día 17 de Agosto del 2011	124
Figura 4.52.- Trayectoria a las 6:00 horas am del día 17 de Agosto del 2011	125
Figura 4.53.- Trayectoria a las 12:00 horas pm del día 17 de Agosto del 2011	126
Figura 4.54.- Trayectoria a las 18:00 horas pm del día 17 de Agosto del 2011	127
Figura 4.55.- Trayectoria a las 0 horas del día 18:00 pm de Agosto del 2011	128
Figura 4.56.- Trayectoria a las 0:00 horas am del día 27 de Agosto del 2011	129
Figura 4.57.- Trayectoria a las 6.00 horas am del día 27 de Agosto del 2011	130
Figura 4.58.- Trayectoria a las 12:00 horas pm del día 27 de Agosto del 2011	131
Figura 4.59.- Trayectoria a las 18:00 horas pm del día 27 de Agosto del 2011	132
Figura 4.60.- Trayectoria a las 0:00 horas am del día 28 de Agosto del 2011	133

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1.- Normas oficiales mexicanas para evaluar la calidad del aire ambiente	25
Tabla 2.2. Ubicación de las estaciones de monitoreo en Mexicali	27
Tabla 4.1.- Análisis gravimétrico para los filtros del poblado La Rumorosa	49
Tabla 4.2 Flujo patrón del muestreador que contenía los filtros de la zona montañosa.	50
Tabla 4.3.- Concentraciones de las $PM_{10}$ en los filtros para la zona montañosa	51
Tabla 4.4.- Análisis gravimétrico para los filtros de la zona urbana de Mexicali	45
Tabla 4.5.- Flujo patrón del muestreador que contenía los filtros en la zona urbana	45
Tabla 4.6.- Concentraciones de las $PM_{10}$ en los filtros para la zona urbana	46
Tabla 4.7- Análisis gravimétrico para los filtros de la zona rural de Mexicali	60
Tabla 4.8.- Flujo patrón del muestreado que contenía los filtros en la zona rural	61
Tabla 4.9.- Concentraciones de las $PM_{10}$ en los filtros de la zona rural	62
Tabla 4.10.- P encontradas mediante la prueba de T, para las zonas de estudio.	66
Tabla 4.11.- Análisis gravimétrico para los filtros del poblado La Rumorosa	67
Tabla 4.12 Flujo patrón del muestreador que contenía los filtros de la zona montañosa.	68
Tabla 4.13.- Concentraciones de las $PM_{10}$ en el filtro de teflón para la zona montañosa	69
Tabla 4.14.- Análisis gravimétrico para los filtros de la zona urbana de Mexicali	72
Tabla 4.15.- Flujo patrón del muestreador que contenía los filtros en la zona urbana de Mexicali	73
Tabla 4.16.- Concentraciones de las $PM_{10}$ en los filtros de la zona urbana	74
Tabla 4.17- Análisis gravimétrico para los filtros de la zona rural de Mexicali	77
Tabla 4.18.- $Q_{fin}$ (flujo patrón) del muestreado que contenían los filtros en la zona rural	78
Tabla 4.19.- Concentraciones de las $PM_{10}$ en los filtros de la zona rural	79
Tabla 4.20.- P encontradas mediante la prueba de T, para las zonas de estudio.	83
Tabla 4.21.- Elementos químicos encontrados en el filtro del día 6 de Febrero	88
Tabla 4.22.- Cantidad de aniones, cationes y carbónacea	89
Tabla 4.23.- Tabla de elementos químicos en el filtro del día 19 de Enero	94
Tabla 4.24.- Cantidad de aniones, cationes y carbónacea	95
Tabla 4.25.- Tabla de elementos químicos en el filtro del día 2 de Septiembre.	99
Tabla 4.26.- Cantidad de aniones, cationes y carbónacea	99
Tabla 4.27.- Descripción de elementos químicos en el filtro del día 27 de agosto	102
Tabla 4.28.- Cantidad de aniones, cationes y carbónacea	103

# CAPITULO I.- INTRODUCCIÓN

## 1.1.- Introducción

El material particulado atmosférico se define como un conjunto de partículas sólidas y/o líquidas presentes en suspensión en la atmósfera (Mészáros E. 1999). El término aerosol atmosférico se utiliza como sinónimo de partículas atmosféricas y es un concepto que engloba tanto las partículas en suspensión como las partículas sedimentables, caracterizadas por un corto tiempo de residencia en la atmósfera. Estas pueden ser emitidas por una gran variedad de fuentes de origen natural o antropogénico. Respecto a los mecanismos de formación, las partículas pueden ser emitidas como tales a la atmósfera (primarias) o bien ser generadas por reacciones químicas (secundarias). Dichas reacciones químicas pueden consistir en la interacción entre gases precursores en la atmósfera para formar una nueva partícula por condensación, o entre un gas y una partícula atmosférica para dar lugar a un nuevo aerosol por adsorción o coagulación (Warneck 1988). Como resultado de esta variabilidad de fuentes y transformaciones, el material particulado atmosférico consiste en una mezcla compleja de compuestos de naturaleza orgánica e inorgánica con diferentes distribuciones granulométricas y composición química, ambas condicionadas por la composición de los gases que las rodean.

Las partículas se categorizan según su tamaño y pueden tener cualquier forma, las partículas grandes que miden entre 2.5 y 10 micrómetros de diámetro son llamadas  $PM_{10}$ , las partículas finas entre 0.1 y 2.5 micrómetros de diámetro, son llamadas  $PM_{2.5}$ , mientras que las que son menores de 0.1 micrómetros de diámetro son llamadas partículas ultra finas o  $PM_1$ . Las  $PM_{10}$  al ser grandes quedan atrapadas en las mucosidades de la nariz, pero entre más pequeñas, entran más profundamente al sistema respiratorio; las partículas menores a 5 micrómetros de diámetro quedan atrapadas en el esófago, mientras las partículas de 3 a 2.5 micrómetros de diámetro logran llegar a

los pulmones, causando efectos adversos específicamente al sistema respiratorio de las personas, por estar compuestas de elementos que son más tóxicos (como metales pesados y compuestos orgánicos) pueden causar cáncer.

En cuanto a Mexicali, existe un número importante de actividades humanas que han provocado graves problemas de contaminación (Chow et al 2000), desde un excesivo uso de automotores en mal estado o viejos, hasta las quemas de residuos agrícolas tanto en el Valle de Mexicali, B.C. México, como en Valle Imperial, Ca, EEUU. En particular, Mexicali es una de las zonas urbanas del país donde se registran los mayores índices de contaminación por partículas suspendidas respirables (INE 2010). Para el análisis de la dinámica de la contaminación por partículas suspendidas en Mexicali se cuenta con una red de monitoreo atmosférico perteneciente al gobierno del estado de Baja California (4 monitores automáticos y 2 mecánicas) que incluye monitores de partículas suspendidas menores a 10 micrómetros ( $PM_{10}$ ).

En la Zona Metropolitana de Mexicali se caracterizaron químicamente las  $PM_{10}$ , en el año de 1997 (Chow et al. 1997) dando como resultado que el material geológico representaba el 63.98% de la masa, seguido por carbón orgánico con 25.7% y 2.6% de carbón elemental, aerosoles secundarios inorgánicos con 5.5% (2.2% de sulfatos, 2.2% de nitratos y 1.0% de amonio). Por último, con contribuciones menores, se encontraron elementos no crustáceos (trazas) (3.7%) y sales (3.2%). Siendo esta una aproximación de la composición química de las partículas  $PM_{10}$ , tomando en cuenta que esta investigación se realizó entre el año de 1992 y 1993, nos muestra una contaminación netamente natural. En la Figura 1.1 se muestran las siguientes distribuciones de los componentes de las  $PM_{10}$ :

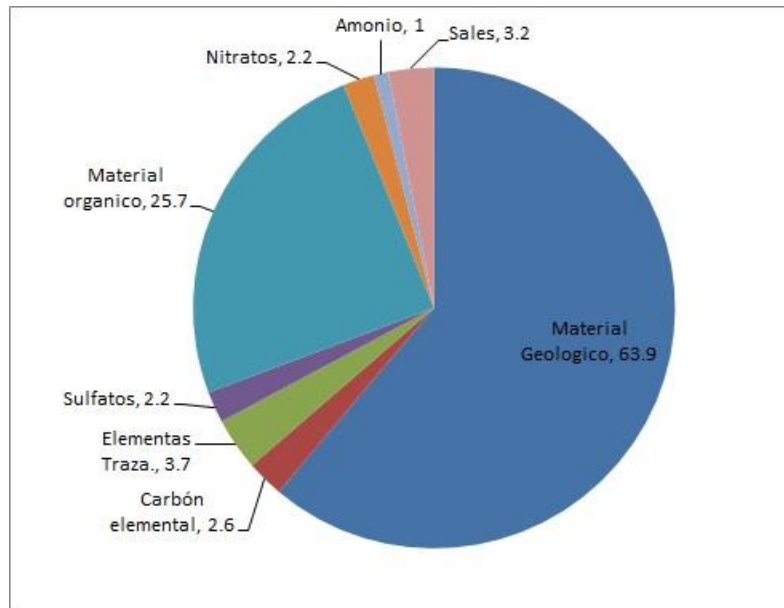


Figura 1.1.- Distribución de los componentes en los años de 1992 a 1993.

## 1.2.- Antecedentes de la región

Mexicali, es la capital del estado de Baja California (Figura 1.2). Según los datos del censo del año 2010 la zona metropolitana de Mexicali tiene una población de 936,826 habitantes (INEGI 2010). El municipio de Mexicali está dividido en Zona Urbana y Valle de Mexicali. Sus coordenadas geográficas son: al Norte 32° 43', al Sur 30° 52' de latitud Norte; al Este 114° 42' y al Oeste 115° 56' de longitud Oeste. Tiene colindancia al Norte y al Este con los EEUU, Sonora y el Golfo de California; al Sur con el Golfo de California y el municipio de Ensenada; al Oeste con los municipios de Ensenada y Tecate. La característica orográfica más importante del municipio es la de encontrarse el 30% de su territorio ocupado por sierras, resaltando, el Cerro del Centinela con una elevación de 750 metros, y cubre 10 Km<sup>2</sup>; la sierra Cucapah, con 364 Km<sup>2</sup> de extensión y una altura de 1,000 metros. Y finalmente, el volcán Cerro Prieto, con 7 Km<sup>2</sup> de extensión y una elevación de 260 metros.

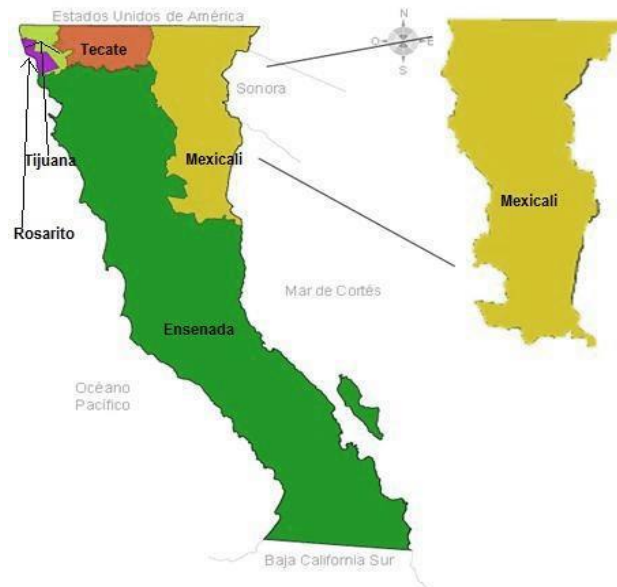


Figura 1.2.- Localización del municipio de Mexicali en el estado de Baja California

Una característica física importante es el clima, pues el valle está localizado bajo una banda solar lo que provoca que los veranos sean muy largos y los inviernos muy cortos. Se caracteriza por poseer un clima de tipo seco (B) y subtipo muy seco semicálido, con lluvias de invierno cuya frecuencia es menor a 36% (Rodríguez 2002) con un promedio anual de lluvia de 75 mm (García *et al.* 2007). La temperatura promedio en verano es de 38°C, llegando a registrarse máximas de 52°C, la temperatura media anual es de 21.4°C (Camargo y García 2012), siendo el mes más frío enero con una media mensual de 12.7°C y cercanas a los 0°C (García *et al.* 2009).

Este municipio se caracteriza por su actividad agrícola, industrial y turística, destacándose la actividad terciaria (comercio, servicios y turismo) que absorbe a 52% de la población ocupada, a su vez el 44% se emplea en servicio de hoteles y restaurantes. En la actualidad, la ciudad presenta 3 zonas importantes de crecimiento, localizadas en la periferia: la primera, hacia el sureste conocida como Nuevo Mexicali, donde predominan los conjuntos habitacionales de interés social, parques industriales orientados a la exportación dada su cercanía a la frontera, la segunda, ubicada al sur de la carretera unión en las inmediaciones de las lagunas México y Xochimilco, con fraccionamientos

populares progresivos y de interés social y la tercera, localizada al poniente, orientada al desarrollo de fraccionamientos habitacionales populares progresivos y algunos de interés social y parques industriales (SPA et al, 2011).

La mancha urbana de la ciudad de Mexicali, abarca de poniente-orientado, desde la Calzada Manuel Gómez Morán en la Colonia Nacionalista hasta el Boulevard Venustiano Carranza y de Norte a Sur de la Av. Colón hasta la Colonia Campestre; al oeste se encuentra la zona de la Santorales (Santa Isabel), localizada a 5 Km de la ciudad de Mexicali, la zona de la Colonia Progreso localizada a 7 Km. de Mexicali por la Carretera Mexicali-La Rumorosa; la sección correspondiente a la Delegación González Ortega, que abarca de poniente-orientado, del Boulevard Venustiano Carranza hasta el Ejido Cuernavaca y de Norte a Sur de la Línea Internacional hasta Calzada Gustavo Vildosola (Corredor Palaco) y por último la Zona del Valle de Puebla.

El "km 43", oficialmente Cd. Guadalupe Victoria, es una localidad y delegación del Municipio de Mexicali, Baja California, México. Su población para el año 2010 fue de 17,119 habitantes. Con una altura de 12 msnm, se encuentra en el noroeste de Baja California a 43 kilómetros de la Ciudad de Mexicali, capital del estado y cabecera municipal. En esta ciudad confluyen caminos provenientes de las ciudades fronterizas de Mexicali y de San Luis Río Colorado, Sonora. Es por esto que la ciudad representa un centro geográfico para operación de negocios y distribución de insumos (INEGI 2010).

La Rumorosa, es una localidad del municipio de Tecate, Baja California; México. Es una parte natural de la carretera entre Mexicali y Tecate, la cual está ubicada en la parte más alta. Según el censo de 2010 tiene una población de 1836 habitantes. En invierno se dan tormentas de nieve. Su altitud es de 1232 msnm. El clima de La Rumorosa es caluroso y seco durante los meses de mayo a septiembre, que es el periodo de la estación seca, y frío subhúmedo de los meses de noviembre a

abril. Durante la estación lluviosa pueden ocurrir periodos de frío prolongado con nevadas importantes, siendo febrero el mes con más nevadas. La temperatura media de La Rumorosa en el mes más frío (febrero) es de 4°C y en el mes más caliente (agosto) es de 17°C (INEGI 2010).

### **1.3.- Contenido de la tesis.**

La tesis está formada por 7 capítulos. Del capítulo 2 al 6 representan el cuerpo principal del documento; en el cual se presenta el desarrollo cronológico de la investigación. El capítulo 1 es una breve introducción al tema, el planteamiento del problema así como la justificación del trabajo, objetivos de la tesis y por último la hipótesis. En el capítulo 2 se da a conocer la revisión bibliográfica, describiéndose la investigación en torno a las PM<sub>10</sub> en la región, se da una definición de partículas menores a 10 micrómetros (PM<sub>10</sub>), características químicas y físicas, causas de sus proliferación, importancia morfológica, tamaño y vida media de las partículas. Así mismo se habla de las Normas Oficiales Mexicanas que rigen la calidad del aire. El capítulo 3 contiene la metodología. Comienza con la descripción de la campaña de monitoreo y la caracterización química a la que se sometieron los filtros más característicos: después se seleccionaron los filtros y equipo a usar, para luego describir el funcionamiento del muestreador de bajo volumen, así como una explicación de cómo se llevó a cabo el muestreo, y por último una breve explicación de los métodos analíticos que se usaron y la rosas de los vientos. El en capítulo 4 se explica los resultados a los que se ha llegado al terminar la investigación poniendo énfasis en el análisis de las series de tiempo, la cual se dividió en dos partes: la campaña de invierno y la campaña de verano; cada campaña está dividida por la zona urbana y la zona rural del valle de Mexicali y la Rumorosa como zona montañosa. El capítulo 5 contiene la explicación de donde proceden (origen) las PM<sub>10</sub> que están en el aire ambiente de la región de Mexicali, así mismo se explica la composición química y el origen de estas partículas. Mientras el capítulo 6 muestra el desenvolvimiento de las trayectorias que se realizaron en la región y los parámetros usados. Mientras que en el capítulo 7 se presentaran las

conclusiones a las que se llegó derivada de la presente investigación así como los alcances y limitaciones que tuvo el proyecto.

#### **1.4.- Planteamiento del problema**

El gran interés que ha provocado la contaminación del aire de Mexicali en la comunidad científica local ha provocado desde años atrás un número considerable de investigaciones en torno a los diferentes contaminantes criterios, desde el monóxido de carbono (CO) hasta el material particulado ( $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$ , PST), así como de su impacto a la salud (asma, enfermedades respiratorias, cáncer, etc). Sin embargo la mayoría de las investigaciones apuntan hacia la zona urbana dejando de lado lo que es la zona rural, siendo esta última parte del origen de la mayoría de los contaminantes que constituyen el material particulado. Finalmente la zona montañosa será evaluada con un blanco que servirá para compararlo con los otros dos sitios previamente seleccionados. Las causas de este problema no son solamente físicas es decir provocadas por la temperatura, la velocidad del aire y la humedad (provocan aridez, re-suspensión y polvaredas), si no también pueden ser de otro orden como son la quema de residuos agrícolas procedentes del norte y sur de la ciudad, la resuspensión de polvo provenientes de caminos pavimentados y no pavimentados de la zona urbana así como la quema de basura, llantas, entre otras. Así mismo se debe hacer notar que las investigaciones previas (Chow y Watson, 1997; Mendoza y Pardo, 2005) han dejado de lado las trayectorias de estas partículas, es por eso que se propuso realizar trayectorias donde se explique las direcciones que toma la contaminación en las tres zonas citadas: zona montañosa (La rumorosa), zona urbana (Mexicali) y zona rural (valle de Mexicali). Por todo esto es de gran relevancia conocer los niveles del material particulado menor a 10 micrómetros ( $PM_{10}$ ) tanto de la zona urbana, zona rural y zona montañosa para poder identificar la interacción de la contaminación del aire con las diferentes variables meteorológicas. Uno de los objetivos principales fue caracterizar químicamente los filtros de cada zona de estudio y de esa manera ayudar a dilucidar el origen de las  $PM_{10}$ .

### **1.5.- Hipótesis**

La contaminación por  $PM_{10}$  en la zona urbana y rural de Mexicali, así como del poblado la Rumorosa es de origen local debido a los diversos factores atmosféricos, geológicos y ciudadanos que impiden que la contaminación procedente de la zona urbana llegue a la zona rural y la Rumorosa en invierno y de la zona rural a la zona urbana y la Rumorosa en verano.

### **1.6.- Objetivo general**

Caracterizar químicamente las  $PM_{10}$  en dos de las tres zonas bajo estudio, (zonas rural y urbana) poniendo énfasis en los altos niveles de contaminación y trayectorias en la cuenca atmosférica del valle de Mexicali y la Rumorosa. La zona montañosa (La Rumorosa) fue un blanco.

### **1.7.- Objetivos específicos**

- Evaluar los niveles gravimétricos de  $PM_{10}$  tanto en la zona urbana, zona rural de Mexicali y zona montañosa.
- Caracterizar químicamente las  $PM_{10}$  de la zona urbana y zona rural de Mexicali.
- Realizar modelos potenciales de trayectorias de  $PM_{10}$  en la región de la zona urbana y rural de Mexicali y de la zona montañosa (La Rumorosa).

### **1.8.- Justificación**

A pesar de que en la actualidad los estudios sobre  $PM_{10}$  son escasos, se ha logrado relacionar el impacto potencial de estas partículas con la salud humana. Para esto se han considerado una variedad de factores que puedan ser los originarios del problema como: el tamaño de partícula, la

resuspensión, la dispersión en el ambiente, la entrada al cuerpo humano, su composición química, las diferencias de tamaño de las partículas, el tiempo de exposición, su concentración en la atmósfera y algunas variables atmosféricas. La mayoría de los proyectos que se han hecho en la región, han sido realizados directamente en la zona urbana de Mexicali, dejando de lado a la zona rural, es por eso que se llevó a cabo este trabajo de investigación en el cual se destacan las características de la zona rural que contribuye a la carga de contaminantes de la región, en especial de material particulado. Se tomó la zona de montaña como un blanco en cuanto a la gravimetría se refiere para fines comparativos con las otras dos zonas geográficas.

## **CAPITULO II.- MARCO TEÓRICO**

La contaminación atmosférica antropogénica ha venido acompañando al hombre prácticamente desde hace más de 500 años (Rosales, 2001). El desarrollo tecnológico, el crecimiento demográfico, la industrialización y el uso de nuevos métodos de agricultura tecnificada son factores que contribuyen a que entren al ambiente, cantidades crecientes de un gran número de sustancias químicas, sintéticas y naturales. Cuando las formas de materia o energía son de tal clase que los seres vivos o el ambiente abiótico los pueden asimilar, transformar o eliminar continuamente, se puede considerar que existe una situación estable. Sin embargo, debido al gran aumento en la cantidad de sustancias que entran continuamente al ambiente, en muchos casos se ha rebasado la capacidad de los sistemas para transformar las sustancias naturales, o bien, los sistemas carecen de la capacidad para asimilar, transformar o eliminar las sustancias sintéticas; por lo tanto, se ha alterado el equilibrio ambiental a esto se le llama contaminación (Albert L., 2013). La organización mundial de la salud considera a la contaminación atmosférica como una de las prioridades mundiales en salud. En un reciente informe se estimó que la contaminación ambiental por partículas es responsable de 1.4 % de todas las muertes mundiales (Ballester 2005). Los problemas de contaminación en algunas ciudades llegaron a su punto máximo en 1948 cuando los altos niveles de

contaminación del aire afectaron a las personas vecindadas en Donara, Pennsylvania en Estados Unidos, evento en el cual los principales contaminantes fueron las  $PM_{10}$  y el  $SO_2$  y en otras ciudades de Inglaterra donde la contaminación llegó a tales niveles de no permitir la visibilidad (Lacasaña *et al.* 1999) y en 1952 en Londres donde hubo alrededor de 4000 muertes (Rosales *et al.* 2001). La batalla contra la contaminación del aire comenzó desde la industrialización de los países y del crecimiento desmedido de las ciudades, lo cual se ha visto en la populosa ciudad de México, donde los problemas ambientales se manifiestan en los elevados niveles de material particulado y ozono, que la ha llevado a ser considerada como una de las ciudades más contaminadas de México y del mundo; con respecto a la región binacional formada por los Valles de Mexicali e Imperial ha sido mencionada como una de las más contaminadas por material particulado, superando las normas establecidas tanto por la US EPA, E.E. U.U. como por SEMARNAT, México (Meza *et al.* 2009, Kelly *et al.* 2010), y que han provocado daños en la salud (Reyna *et al.* 2003).

Tomando en cuenta el inventario de emisiones realizado el 2005 bajo el auspicio del Pro – aire Mexicali 2011 – 2020, en la ciudad de Mexicali solo el 24.1% (48,826.6 de 202,579 toneladas al año) de la contaminación es reconocida como parte de las  $PM_{10}$ , de este total de emisiones al aire, se puede decir que el 94.5% (46,157.4 toneladas al año) es producida por fuentes de área (polvo de camino pavimentado, polvo de camino sin pavimentar, arado, cosecha, quema agrícola, etc), en cambio solo el 3% (1,476.2 toneladas al año) es producido por fuentes fijas (Energía Azteca, Termoeléctrica de Mexicali, Energía de Baja California, etc), 1% (499.1 toneladas al año) por fuentes móviles no caminos (equipos para construcción, equipo agrícola, locomotoras, etc) y 3% (694 toneladas al año) por fuentes móviles en caminos (vehículos de carga pesada a diésel, camionetas carga ligera a gasolina, vehículos de carga ligera a gasolina, etc) (Semarnat 2011). Así mismo tomando en cuenta los niveles de material particulado de la ciudad de Mexicali de 1997 a 2008 esta se ha mantenido por arriba de las normas mexicanas para  $PM_{10}$ , de más de 50 violaciones a la norma por año a solo 15 el año de 2008, esta tendencia hacia la baja se ve en la

mayoría de las estaciones de monitoreo de la ciudad, exceptuando en Campestre y Progreso donde se mantienen muy por arriba, debido a que están ubicados en lugares suburbano (Quintero 2011).

## **2.1.- Fuentes de contaminación atmosférica**

Los combustibles fósiles son una de las principales fuentes de contaminación atmosférica, en procesos industriales y en transportes. Además, algunos procesos diferentes de la combustión contribuyen a las emisiones contaminantes. Se suele distinguir la contaminación urbana de la industrial y de establecimientos industriales pequeñas y por contaminación industrial se consideran como fuente fija a los procesos industriales grandes. Las principales fuentes artificiales de los contaminantes atmosféricos son las centrales térmicas, industria petroquímica, industrias de sector metalúrgico y cemento.

### **A) Fuentes puntuales**

Son aquellas que liberan emisiones derivadas de la generación de energía eléctrica y de actividades industriales como la alimentaría, madera, metalurgia, manufacturera y procesadora de productos vegetales, entre otras.

### **B) Fuentes de área**

Incluyen algunas fuentes comerciales y/o industriales como talleres de carrocería y tintorerías, fugitivas como polvo de caminos pavimentados y sin pavimentar. Incluyen la generación de emisiones inherentes a actividades y procesos, como el consumo de solventes, limpieza de superficies, tratamiento de aguas residuales. En Mexicali, hay fuentes generadoras de contaminantes de fuentes de área, las cuales destacan las siguientes:

- Por ser una zona agrícola, en el Valle de Mexicali se realizan quemas de residuos de cultivos, cuya contaminación es transportada por los vientos. Otras fuentes son las comidas preparadas al carbón y cocinas económicas (Negrete, 2007).
- Los cruces fronterizos son una fuente importante de emisiones por las enormes filas para cruzar la frontera México - Estadounidense en ambos sentidos, se habla de más de 66 millones de cruces fronterizos para el 2011, mientras que para Mexicali – Calexico se habla de más de 8 millones de cruces, esto solo de sur a norte (Muñoz et al, 2013)

### **C) Fuentes móviles**

Incluyen a los aviones, helicópteros, ferrocarriles, tranvías, tractocamiones, autobuses, camiones, automóviles, motocicletas, embarcaciones, equipo y maquinarias no fijas con motores de combustión y similares, que por su operación generen o puedan generar emisiones contaminantes a la atmósfera:

**I) Fuentes móviles que circulan por carretera:** Incluyen todos los vehículos motorizados que están autorizados para operar (automóviles, camionetas, autobuses, motocicletas).

**a) Flota vehicular:** Mexicali se encuentra sobre un terreno plano, el cual está dividido por una red de calles irregulares. Las vialidades que registran mayor tráfico en la ciudad son los Boulevard Lázaro Cárdenas, López Mateos y las Calzadas Justo Sierra, e Independencia. El padrón de automóviles particulares tiene registrados 506,000 vehículos aproximadamente, de los cuales el 80% son automóviles fronterizos y el 20% son automóviles nacionales (Secretaría de planeación y finanzas del estado, 2010), además de los automóviles que tienen placas de los estados vecinos de E.E.U.U. que pueden representar unos 30,000 automóviles.

Esto se debe a que Mexicali es una ciudad fronteriza, donde la mayoría de los automóviles son importados de Estados Unidos y donde un número indeterminado de personas trabajan en el campo laboral y cruzan diariamente la frontera. Esto ha provocado un aumento de parque vehicular y de la contaminación ambiental por las emisiones de estos vehículos, mismos que no estaban sujetos a una verificación vehicular, implementada el 2012 (GobBC 2012).

**II) Fuentes móviles que no circulan por carretera:** Incluyen todo el equipo que se mueve por su propia energía, o que es portátil, y que no está autorizado para operar en caminos públicos, como las pavimentadoras de asfalto, aplanadoras, trituradoras, excavadoras, tractores y otros equipos de construcción, además de equipos agrícolas como: empacadoras, tractores agrícolas, equipo hidráulico.

#### **D) Vegetación y erosión de suelos**

Las emisiones de este sector dependen de varios factores, como el tipo de suelo (aquí es de textura arcillo-arenosa), la precipitación pluvial (75 mm anuales en promedio), las velocidades de los vientos, y la cobertura vegetal de los cultivos agrícolas. Lo que más se emite son partículas  $PM_{10}$ , donde la principal fuente de emisión es la erosión del suelo por efecto del viento, debido a que es zona desértica. Se estima que la erosión del suelo aporta el 24% de las emisiones de  $PM_{10}$ , aunque investigaciones posteriores en tres zonas metropolitanas Mexicanas se menciona que la erosión del suelo representa del 36 al 54% de las emisiones (Tzintzun 2005). Se consideran las emisiones de óxidos de nitrógeno e hidrocarburos generados por los suelos y la vegetación: debido a que tiene un área importante dedicada a la agricultura, donde las emisiones generadas son derivadas de las actividades metabólicas de las plantas y microbiológicas de los suelos, que dependen directamente del tipo de cultivos existentes en la zona.

## 2.2.- Definición de PM<sub>10</sub>

Las PM<sub>10</sub> o partículas gruesas (PM<sub>10 - 2,5</sub>) son las partículas menores a 10 micrómetros pero más grandes que 2.5 micrómetros de diámetro, son contaminantes constituidos por material líquido y sólido de muy diversa composición y tamaño, que se encuentra en el aire (Tzintzun 2005) y pueden ser formadas tanto por fuentes móviles como estacionarias, de manera natural (crustales, aerosol marino y biogénicas) o antrópica (Villalobos *et al.* 2008), partículas procedentes del transporte a larga distancia desde centros de combustión (sulfatos, nitratos, amonio y hollín o negro carbón) (De la Rosa *et al.* 2014). Comparado con las medidas del cabello humano que va entre 50 y 70 µm, las PM<sub>10</sub> son 50 veces más delgadas que el cabello humano (Figura 2.1).



Figura 2.1.- Comparación del cabello humano contra el diámetro de las PM<sub>2,5</sub> y PM<sub>10</sub> (Chow *et al* 2000)

Existen fenómenos que influyen de manera significativa en el ciclo de vida de las PM, el primero es la emisión del material particulado que puede producirse tanto directamente como ser fruto de la degradación de precursores gaseosos. La dispersión, que está condicionada por la dinámica atmosférica local, regional y sinóptica, la cual está determinada por la interacción entre la circulación general típica de altitudes medias y sistemas de altas presiones, esto afecta por ejemplo

en los niveles de concentración entre estaciones del año y entre periodos de día y noche. Por otro lado se encuentra el fenómeno del transporte, que conduce la transferencia de material particulado de uno a otro lugar ya sea en pequeña o grandes distancias. Finalmente llegan las partículas por depositación húmeda, que es cuando forman parte de las precipitaciones colisionando con otras partículas en el camino y la depositación seca que es producida principalmente por el transporte convectivo y por procesos de difusión y adhesión a la superficie terrestre (Borras 2013).

### **2.3.- Características de las $PM_{10}$ y su composición química**

Son sustancias sólidas o líquidas que se pueden sedimentar. Las más grandes pueden durar dentro de la atmósfera minutos u horas y viajar distancias cortas. Sin embargo, cuando ocurren tormentas de polvo, se hacen grandes mezclas de partículas en la atmósfera, en donde las de tamaño más pequeño pueden tener un tiempo de vida más largo y viajar grandes distancias. Las partículas finas tienen poca depositación debido a que pueden ser transportadas miles de kilómetros y permanecer en la atmósfera por varios días. Las  $PM_{10}$  se asocia generalmente a la combustión no controlada, algunas están relacionadas con la desintegración mecánica de la materia o la re-suspensión de partículas en el ambiente (Echeverri et al 2008), generalmente las partículas más grandes son a menudo de origen natural, producidas por procesos mecánicos como la erosión del suelo y los incendios forestales.

La composición de las partículas que se encuentran en la atmósfera urbana son complejas y heterogéneas, ya que varían de un lugar a otro, dependiendo de su origen; algunos de sus componentes son pólenes y esporas, asociadas con procesos alérgicos e inflamatorios. Otros componentes de las partículas, son aquellas que se originan por procesos de quema de combustible como los sulfatos y los metales pesados (Ponciano 2001), que podrían ser los responsables de la producción de cáncer y de mutaciones (Muñoz-amador et al 2001). El material particulado, particularmente en la atmósfera urbana, presenta compuestos químicos de comprobada toxicidad o

carcinogenicidad (Rojas 2004), dentro de los que se cuentan sulfatos, nitratos, amonio, plomo, mercurio, benceno y compuestos aromáticos policíclicos (PAH).

En la Zona Metropolitana del Valle de México se caracterizaron químicamente las  $PM_{10}$ , dando como resultado que el material geológico representaba el 48% de la masa, seguido por material orgánico con 23.1% y 8.4% de carbón elemental, aerosoles secundarios inorgánicos con 19% (11.5% de sulfato de amonio y 7.5% de nitrato de amonio). Por último, con contribuciones menores, se encontraron elementos no crustáceos (trazas) (1.3%) y sales (.2%). Siendo esta una aproximación de la composición química de las partículas  $PM_{10}$ . En la Figura 2.2 se muestran las siguientes distribuciones de los componentes de las  $PM_{10}$ :

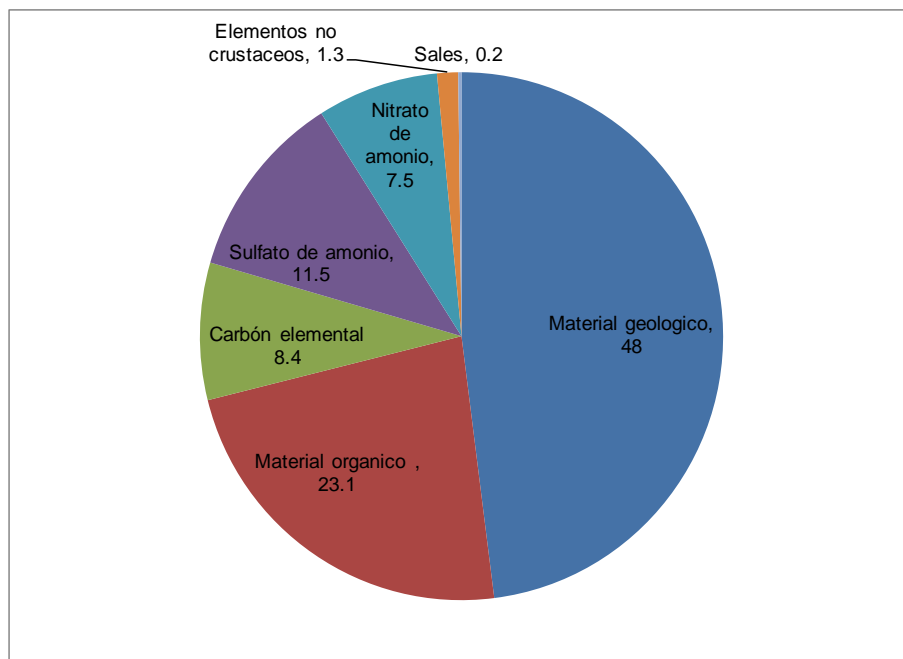


Figura 2.2.- Componentes primarios de especies que contribuyen a la formación de las  $PM_{10}$  en la ciudad de México.

(Tzintzun 2005)

## **2.4.- Causas de la proliferación de las PM<sub>10</sub>**

Las partículas atmosféricas pueden ser emitidas por fuentes de origen natural (volcanes, incendios forestales y erosión de la tierra) o antropogénico (camino sin pavimentar, fábricas, contaminación por autos y quemadas agrícolas). Los contribuyentes de PM<sub>10</sub> varían según la región. Las zonas rurales tienen caminos no pavimentados que emiten polvo con el flujo de los automotores y actividades agrícolas que en su mayoría contienen un cóctel de contaminantes producto de insecticidas (Rotor, Hostation, Lorsban, etc), herbicidas (Ilixan, bromilan, etc), Fungicidas (baileton, tilt, etc) y fertilizantes (amoníaco, fosfato, etc) (Moreno y López 2005). Los orígenes y cantidades de emisiones de material particulado son afectados por la meteorología, la geografía, la población y el uso de la tierra. A esto hay que agregarle que la combustión de madera incrementa substancialmente la concentración de partículas en el aire durante el invierno. El tráfico es sin duda uno de las fuentes importante de esta contaminación. En las zonas urbanas, las emisiones de escape de automóvil son más importantes en las intersecciones de carreteras, cuellos de botella y calles estrechas. Además, algunos estudios han mostrado muy altas concentraciones de contaminantes por mala ventilación, los espacios confinados utilizados por los vehículos de motor que incluyen aparcamiento, garajes y túneles (Ourtirane y Alkama, 2002).

## **2.5.- Importancia de la morfología y tamaño de partícula.**

### **2.5.1.- Principales tipos de partículas atmosféricas**

El material mineral constituye la fracción mayoritaria del aerosol atmosférico con 44% de las emisiones (Duce 1995; IPCC 1996); la emisión de partículas minerales se genera por la acción de los vientos sobre la superficie terrestre, en forma de emisiones fugitivas; la mayor emisión de este tipo de partículas se produce en regiones áridas o semi-áridas, durante los periodos de sequía, que se

ven expuestos a elevadas temperaturas y a la circulación de masas de aire, que inducen su paso a la atmósfera (Alfaro et al 1998). La emisión de partículas de origen mineral depende de la superficie del suelo, de la humedad y la cobertura vegetal (Marticorena et al 1997). La composición del material mineral transportado desde regiones desérticas suele estar enriquecida en arcillas, como consecuencia de su mayor tiempo de residencia, su menor diámetro de partícula y morfología (Pósfai y Molnár 2000). Se considera la existencia de un número limitado de fuentes de material mineral de origen antropogénico como la construcción, la minería.

El aerosol marino es el segundo tipo de partícula con mayor importancia con 38% de las emisiones (IPCC 1996). Las partículas de aerosol marino son de origen natural y son emitidas directamente a la atmósfera (partículas primarias).

Los compuestos de azufre (sulfatos) son de origen secundario, ya que no son emitidos directamente a la atmósfera sino que se generan como resultado de la oxidación de precursores gaseosos ( $\text{SO}_2$ ), el diámetro de este tipo de partícula es  $< 1\mu\text{m}$  (EPA 1996), también existen fuentes naturales y antropogénicas de sulfatos, como los yacimientos yesíferos, la producción y manipulación de productos minerales tales como el yeso. Los compuestos de azufre (S) representan el 7% de las emisiones (IPCC 1996). Los gases de origen natural precursores de los sulfatos son emitidos a través de emisiones biogénicas y durante las emisiones volcánicas (Andrae y Crutzen 1997). Los sulfatos de origen no natural, constituyen la fracción principal del material particulado atmosférico antropogénico (Chuang et al 1997).

Los compuestos de nitrógeno (nitratos), se encuentran en la atmósfera como  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{NH}_4^+$ , al igual que los sulfatos, son de origen mayoritariamente secundario y provienen de la reacción de precursores gaseosos naturales y antropogénicos. Estos compuestos representan aproximadamente 2-5% de las emisiones (IPCC 1996). El diámetro de las partículas atmosféricas suele ser también

menor a  $1\mu\text{m}$  (EPA 1996); los compuestos nitrados de origen natural se suelen originar a partir de las emisiones de los suelos (nitrificación,  $\text{N}_2\text{O}$ ), los incendios forestales ( $\text{NO}_2$ ,  $\text{NO}$ ), las descargas eléctricas ( $\text{NO}$ ) y las emisiones biogénicas ( $\text{NH}_3$ ) (Seinfeld y Pandis 1998). Las emisiones naturales de  $\text{NO}$  y  $\text{NO}_x$  a escala global constituyen la tercera parte de las emisiones antropogénicas (Mészáros 1993).

Los compuestos de carbón (C) comprenden una gran variedad de especies naturales y antropogénicas de composición y estructura diversa, cuya característica es la presencia de carbono. Se distingue al carbono elemental (CE) y la materia orgánica (MO). Debido a su máxima capacidad de absorción de la radiación emitida (Sloane et al 1991), el carbono elemental (grafítico) puede ser denominado carbón negro (CN); Esta fracción suele ser emitida directamente a la atmósfera (partículas primarias) por procesos de combustión incompleta (gas, carbón y/o combustible) o formarse por condensación de compuestos orgánicos volátiles (COVs, de origen natural o antropogénico), y su origen es antropogénico (Avino et al. 2002). El término soot (hollín) es utilizado para denominar la suma de materia orgánica (MO) + carbón equivalente primario (CE primario) (EPA 1996; Pósfai y Molnár 2000). Los compuestos carbonosos representan el 5% de las emisiones globales (IPCC 1996).

Estas partículas pueden encontrarse en las fracciones más finas o gruesas del aerosol atmosférico. El material carbonoso primario de origen antropogénico, tiene su principal fuente en la generación eléctrica (procesos de combustión). Dentro de las ciudades es necesario destacar las emisiones del tráfico, y en especial las de los vehículos diesel, cuya contribución a los niveles de materia carbonosa es cinco veces superior a la de los motores de gasolina (Kim y Hopke 2003). La materia orgánica está compuesta por una mezcla de compuestos orgánicos; la concentración de material orgánico (MO) suele expresarse como el contenido en carbono orgánico (CO). Con objeto de evitar esta pérdida de masa, la concentración de CO se suele multiplicar por un factor de 1.5 (Wolff et al

1991) o 1.4 (White y Macías 1989) para estimar la concentración de materia orgánica (MO). La masa de MO puede llegar a representar entre 18% de  $PM_{10}$  y entre 20% de  $PM_{2.5}$  (Wolff et al 1991).

### 2.5.2.- Tamaño de la partícula

El diámetro de las partículas atmosféricas varía desde nanómetros (nm) hasta decenas de micras ( $\mu m$ ). Se identifican diferentes rangos de tamaños de partícula denominados “modas”, que están relacionados con el mecanismo de formación de las partículas: nucleación, Aitken, acumulación y moda gruesa (Figura 2.3).

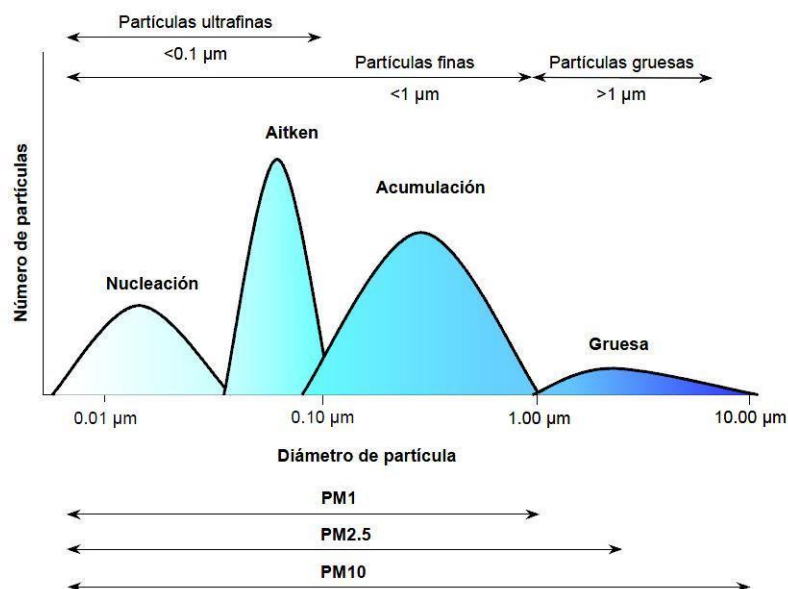


Figura 2.3.- Distribución del número de partículas en función del diámetro (EPA 1996).

Moda de nucleación (<0.02  $\mu m$ ): se encuentra entre 5-15 nm. Los precursores gaseosos para formar partículas por nucleación son  $H_2SO_4$  y  $NH_3$ . La vida media de estas partículas es de horas ya que coagulan rápidamente o incrementan de tamaño por condensación. Se desconoce si son emitidas como material particulado primario (carbono elemental en motores diesel) por los vehículos o si se forman al entrar en contacto los gases de combustión con el aire.

Moda Aitken (0.02-0.1  $\mu\text{m}$ ): Son de origen primario (natural o antropogénico) o secundario (a partir de la moda de nucleación). Las de origen secundario se forman por procesos de coagulación a partir de la moda de nucleación, por condensación y/o por reacciones en fase líquida. Estas partículas de carbono suelen presentar diámetros de partícula de 100 nm (y generalmente  $>30$  nm), pudiendo llegar a alcanzar 150-200 nm.

Moda de acumulación (0.1-1  $\mu\text{m}$ ): Se encuentra entre 150-250 nm. En la atmósfera, las partículas de la moda Aitken crecen hasta formar parte de la moda de acumulación por medio de reacciones en fase líquida que tienen lugar en gotas de agua en las nubes. El 90% del sulfato que se forma en la atmósfera es originado por la oxidación en fase líquida del dióxido de azufre en las nubes.

Moda gruesa ( $>1$   $\mu\text{m}$  en términos de aerosoles atmosféricos, en términos de calidad del aire y epidemiología comprende las partículas de diámetro  $>2.5$   $\mu\text{m}$ ): Se forman por procesos mecánicos tales como la erosión de la superficie terrestre (materia mineral) o de otros materiales, o por la explosión de burbujas en la superficie de mares y océanos (aerosol marino).

En la Figura 2.4 se muestra un ejemplo que representa la distribución del material particulado en función del número, superficie y masa de las partículas.

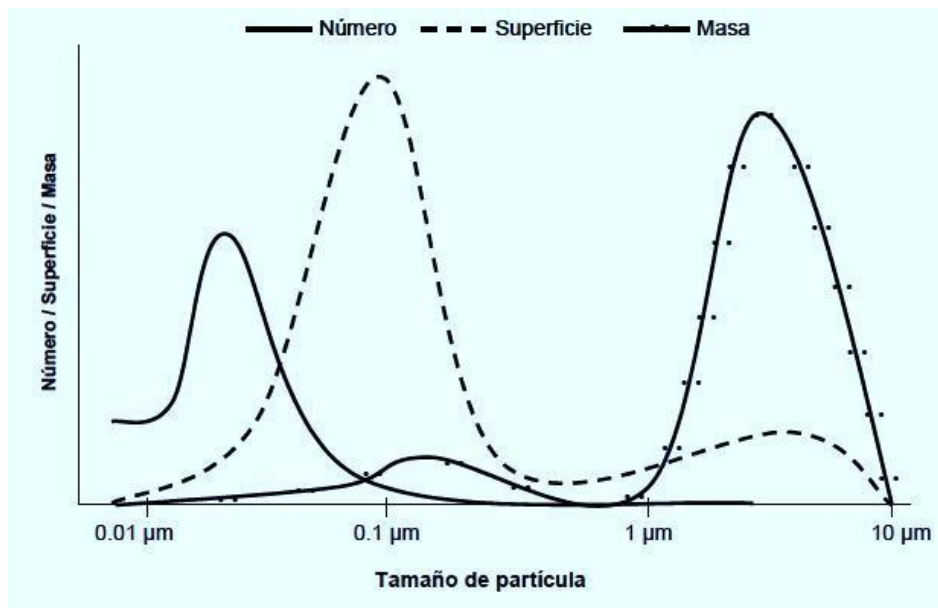


Figura 2.4.- Distribución granulométrica del material particulado (Putaud et al 2002)

En primer lugar, las partículas de las modas de nucleación y Aitken dominan el escenario. La distribución en función de la superficie, muestra un máximo en torno a 0.1  $\mu\text{m}$  lo cual indica que en este diámetro se produce la acumulación de masa por procesos de coagulación y condensación. Por último, la distribución de la masa se concentra en la moda gruesa.

## 2.6.- Efectos principales de las $\text{PM}_{10}$ sobre la salud del ser humano

Se puede afirmar que hay evidencia científica que correlaciona la exposición al material particulado atmosférico con diversos efectos a la salud (Künzli *et al.* 2000, Horak Jr. F. *et al.* 2002, Viana y Salas 2003, Chow y Watson 2006, Fuchs y Rosen 2012). Estos estudios epidemiológicos demuestran que la exposición a diferentes contaminantes ambientales, incluso a niveles por debajo de la normas internacionales y nacionales (Rosales *et al.* 2001), se asocian con un incremento en hospitalización por incidencia de asma, severidad en el deterioro de la función pulmonar, así como mayor gravedad en la presentación de las enfermedades respiratorias de niños y adolescentes (Romero *et al.* 2006, Querol 2008), además de síntomas comunes como la irritación ocular, tos,

malestar en garganta y dolor de cabeza (Muñoz *et al.* 2005), además de esto hay que agregar tumores cancerígenos y problemas de coagulación de la sangre, así como mal funcionamiento hepático (Ode et al 2002). Otros efectos son daños a la economía por costo de enfermedades (Ceballos y Melgar 2005), reducción de la visibilidad (Watson y Chow 2006), lluvia ácida (Querol 2008) daño a los animales (Alcalá *et al.* 2008) y efectos psicológicos y fisiológicos en los hombres (Romero *et al.* 2006).

## 2.7.- Vía de entrada al cuerpo humano

Las partículas se encuentran en el aire siendo normal que entren al cuerpo, (Figura 2.5), ya que los humanos pueden respirar por la nariz y la boca.

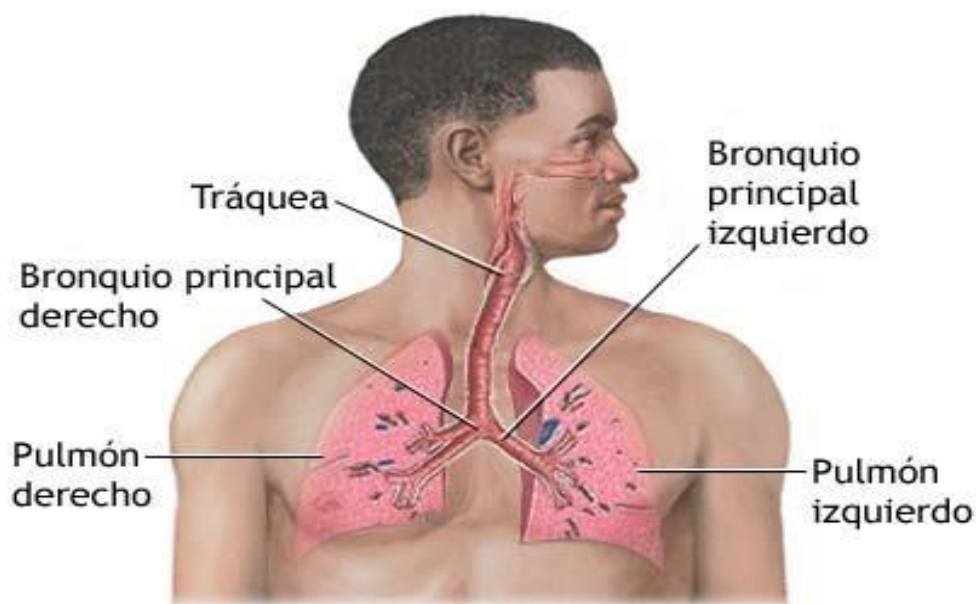


Figura 2.5.- Órganos internos que atraviesan las  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  en el cuerpo humano

Al respirar por la boca hacen que las partículas viajen mucho más dentro de los pulmones, normalmente las partículas mayores a  $PM_{10}$  no pasan más allá de la nariz ya que son atrapados por

las mucosidades, pero las  $PM_{2.5}$  y las  $PM_{2.5-10}$  si lo hacen; cuando las partículas grandes han pasado la nariz, antes de llegar a la tráquea, se pueden adherir a las paredes cercanas de la tráquea.

A la tráquea solo logran entrar las partículas menores a 7 micras, dentro de ella se retienen partículas mayores a 5 micras, gracias a que los pulmones producen mucosidad para atrapar a las partículas y existen vellitos llamados epitelio cilíndrico pseudoestratificado que se menean para mover las partículas fuera del pulmón (Figura 2.6). Esta mucosidad sale de las vías respiratorias al toser o al tragar. Hasta los bronquios solo pasan partículas de 2 a 7 micras; aquí células atrapan las partículas, que si no son atrapadas llegan a los alvéolos. Donde sí alcanzar esta región, causar un daño potencial en la transferencia de partículas del pulmón a la circulación sanguínea y a otros órganos (Chow y Watson 2006).

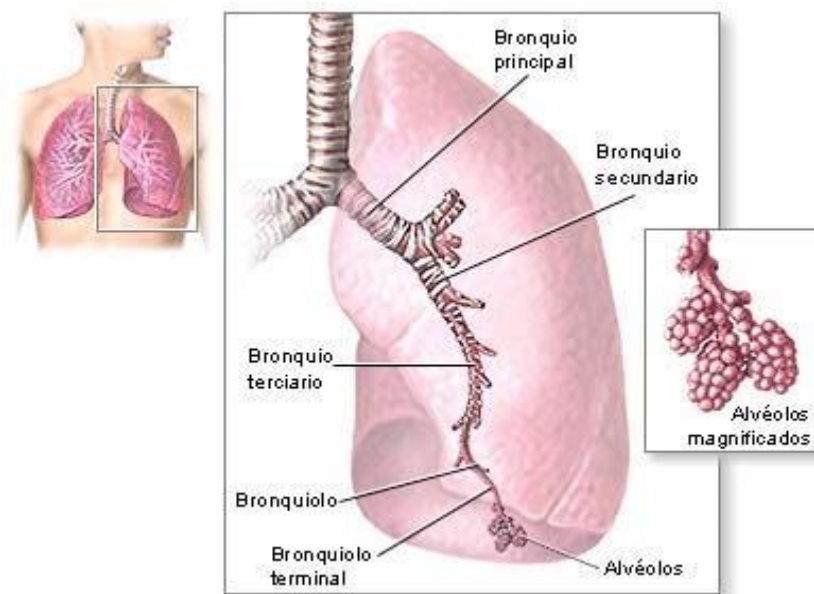


Figura 2.6.- Interior del pulmón humano donde se alojan las  $PM_{2.5}$

## 2.8.- Normas de calidad del aire

Las Normas Oficiales Mexicanas vigentes para evaluar la calidad del aire ambiente con respecto a los diferentes contaminantes criterios se dan a conocer en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1.- Normas oficiales mexicanas para evaluar la calidad del aire ambiente (SINAICA 2006)

Contaminante	Valores Límites			Normas Oficiales Mexicanas
	Exposición Aguda		Exposición Crónica	
	Concentración y Tiempo Promedio	Frecuencia Máxima Aceptable	(Para protección de la salud de la población susceptible)	
Ozono (O <sub>3</sub> )	0.11 ppm (1 Hora) (216 µg/m <sup>3</sup> )	1 vez al año	-	NOM-020-SSA1-1993
	0.08 ppm (8 horas)	Quinto máximo en un año		
Monóxido de Carbono (CO)	11 ppm (8horas) (12595 µg/m <sup>3</sup> )	1 vez al año	-	NOM-021-SSA1-1993
Bióxido de Azufre (SO <sub>2</sub> )	0.13 ppm (24 horas) (341 µg/m <sup>3</sup> )	1 vez al año	0.03 ppm (media aritmética anual)	NOM-022-SSA1-1993
Bióxido de Nitrógeno (NO <sub>2</sub> )	0.21 ppm (1 hora) (341 µg/m <sup>3</sup> )	1 vez al año		NOM-023-SSA1-1993
Partículas Suspendidas Totales (PST)	210 µg/m <sup>3</sup> (percentil 98 promedio de 24 horas)	24 Horas		NOM-024-SSA1-1993
Partículas con diámetro menor a 10 µm (PM <sub>10</sub> )	120 µg/m <sup>3</sup> (percentil 98 promedio de 24 Horas)	24 Horas	50 µg/m <sup>3</sup> (promedio aritmético anual)	NOM-025-SSA1-1993
Partículas con diámetro menor a 2.5 µm (PM <sub>2.5</sub> )	65 µg/m <sup>3</sup> (percentil 98 promedio de 24 horas)	24 Horas	15 µg/m <sup>3</sup> (promedio aritmético anual)	NOM-025-SSA1-1993
Plomo (Pb)	-	-	1.5 µg/m <sup>3</sup> (promedio aritmético en 3 meses)	NOM-026-SSA1-1993

La mayoría de estas normas fueron emitidas en el año 1993 y han estado siendo actualizadas a medida que las circunstancias así lo requieren. El sistema de monitoreo atmosférico de Mexicali se inició en julio de 1996 con los trabajos de instalación, configuración y pruebas de aceptación de funcionamiento de los equipos, empezando su operación en enero de 1997, la red de monitoreo estaba conformada por 6 estaciones, actualmente son 5 (Figura 2.7) de las cuales cuatro median concentraciones de  $O_3$ ,  $NO_2$ ,  $SO_2$  y  $CO$ , así como temperatura, humedad relativa, dirección y velocidad del viento, además de muestrearse manualmente las  $PM_{10}$  y PST, actualmente se utilizan equipos BAM para medir  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$ .



Figura 2.7 La localización de la red de monitoreo de la calidad del aire de Mexicali.

Las estaciones eran: Centro de Bachillerato Técnico Industrial y de Servicios (CBATIS21) que dejó de operar en el año de 2002, siendo esta trasladada al Campestre, donde se instaló en el año de 2004 y dejó de funcionar en el año de 2010, posteriormente se trasladó a (CESPM) donde se instaló en el año de 2012 y sigue en operación; Universidad Autónoma de Baja California (UABC), que dejó de operar en el año de 2013; Instituto Tecnológico de Mexicali (ITM) que dejó de operar en el año de 2010 y pasó a (UPBC) en el año de 2012; Colegio de Bachilleres del Estado de Baja California

(COBACH), Colegio Nacional de Educación Profesional Técnica (CONALEP) y (Progreso. Esta red era operada y financiada por la Agencia Estatal de California y las diferentes actividades estaban a cargo de una empresa norteamericana (TEAM-TTACER) y la supervisión sobre el desarrollo del proyecto llevado por parte de la delegación de Semarnap en el estado, con asistencia técnica del INE, a partir de junio del 2006 esta red de monitoreo quedo a cargo del Gobierno del Estado de Baja California (Tabla 2.2).

Tabla 2.2. Ubicación de las estaciones de monitoreo en Mexicali

Estación	Zona	Uso de suelo predominante	Parámetros monitoreados	Parámetros meteorológicos
CESPM	Suroeste	Urbano	O <sub>3</sub> , CO, NO <sub>2</sub> , PM <sub>2.5</sub> , PM <sub>10</sub>	Temperatura, dirección y velocidad del viento, humedad relativa
UPBC	Este	Urbano	O <sub>3</sub> , CO, NO <sub>2</sub> , PM <sub>10</sub>	Temperatura, dirección y velocidad del viento, humedad relativa
COBACH	Oeste	Urbano	O <sub>3</sub> , CO, NO <sub>2</sub> , PM <sub>10</sub>	Temperatura, dirección y velocidad del viento, humedad relativa
CENTRO DE SALUD	Suroeste	Urbano-Agrícola Habitacional	PM <sub>10</sub>	
CONALEP	Suroeste	Urbano-Agrícola	PM <sub>10</sub>	

## 2.9.- Los modelos de dispersión atmosférica

La modelación se convirtió en una herramienta habitual de diversas disciplinas que buscan explicar o reproducir sus respectivas observaciones. Es así como Higashi y Burns (1991) señalan: “La modelación matemática es una metodología sistemática de comprobado éxito en el descubrimiento y entendimiento de los procesos y causas subyacentes en la naturaleza basada sobre sus partes observables y sus relaciones”. Desde el punto de vista de la dispersión de contaminantes, la modelación se utiliza para saber cómo cambia en el tiempo y el espacio la concentración o la razón de mezcla de una sustancia o traza habitualmente identificada como un contaminante criterio, a objeto de predecir y analizar la calidad del aire y de esta forma colaborar en las decisiones políticas y de planificación respecto a la gestión, mediante el desarrollo de planes, programas, proyectos y normas de emisión o calidad del aire (Bustos 2004). Los modelos de dispersión son herramientas computacionales que resuelven la ecuación de continuidad utilizando diversos métodos y aproximaciones. En el esfuerzo por predecir las concentraciones de contaminantes en un punto alejado del foco emisor y resolver la ecuación de continuidad, se han desarrollado varios tipos de modelos matemáticos para estimar la calidad del aire. Entre estos se incluyen, modelos gaussianos, urbanos o locales, regionales y globales:

**Modelos Gaussianos:** son de uso común en problemas de dispersión de contaminantes no reactivos de fuentes puntuales tales como chimeneas industriales. Básicamente suponen que el penacho de un efluente presenta una distribución normal o de Gauss (Gaussiana) de las concentraciones en torno al eje de simetría definido por la dirección del viento.

**Modelos urbanos y regionales:** Están orientados a ser herramientas de gestión de calidad del aire. Los problemas de escala urbana y regional son complejos pues hay que considerar los efectos de múltiples fuentes, contaminantes primarios y secundarios, procesos de deposición y meteorología local y regional. Eso requiere de modelos y base de datos. Los aspectos meteorológicos son tratados

a través de modelos meteorológicos de diagnóstico o pronóstico. En los primeros se estiman los campos de viento a partir de datos meteorológicos recopilados de estaciones de monitoreo utilizando métodos que buscan una interpolación y extrapolación óptima de las observaciones. En los segundos, se calculan los parámetros meteorológicos a partir de las ecuaciones que describen las relaciones físicas fundamentales del movimiento y la energía en el aire (Gallardo 2006).

**Modelos Globales:** Los modelos globales resuelven la ecuación de continuidad para toda la atmósfera. Estos modelos, al igual que los modelos locales y regionales, han ido creciendo en complejidad en la medida que más variables y trazas con tiempos de recambio más cortos han sido incorporados en ellos y el desarrollo de computadoras más rápidas lo han hecho factible (Granier 2003). Los modelos globales resuelven la ecuación de continuidad para toda la atmósfera. Estos modelos, al igual que los modelos locales y regionales, han ido creciendo en complejidad en la medida que más variables y trazas con tiempos de recambio más cortos han sido incorporadas en ellos y el desarrollo de computadoras más rápidas lo ha hecho factible. Problemas como la dispersión de clorofluorcarbonos y su subsecuente impacto sobre la capa de ozono, el aumento de gases que alteran el balance radiactivo del planeta (“gases de invernadero”), el aumento de las concentraciones de ozono cerca de la superficie, la presencia y formación de aerosoles etc., son ejemplos globales que han recibido la atención por parte de científicos, políticos y la comunidad en general.

## CAPITULO III.- MÉTODOS Y MATERIALES

### 3.1.- Método

#### 3.1.1.- Campaña de monitoreo

La investigación se llevó a cabo en tres zonas: zona urbana y rural en Mexicali y zona montañosa en la Rumorosa, dividida en dos temporadas: invierno (7 de enero al 8 de febrero del 2011) y verano (7 de agosto al 6 de septiembre del 2011). Se usaron cinco equipos de bajo volumen marca “*Minivol airmetrics*”, con filtros de teflón y de cuarzo, marca Whatman de 47 mm de diámetro y poros de 2  $\mu\text{m}$ , calibrados al principio y final de cada muestreo. Estos equipos operaron a un flujo de 5 L/min por períodos de 24 horas cada tercer día. Para realizar el análisis gravimétrico, los filtros a usar fueron ambientalizados en un desecador marca Desiccator Cabinet 3.0 por 24 horas y pesados en una micro balanza marca Sartorius ME 36 S (.0001 mg) tanto antes como después del muestreo, en el laboratorio de Bioingeniería y Salud ambiental que tuvo condiciones óptimas de humedad relativa (30 – 40%) y temperatura (promedio de 20 – 23 °C) y posteriormente almacenados en cajas de Petri tanto antes como después de los muestreos.

Se colocaron dos equipos en el techo del Instituto de Ingeniería, en Mexicali (32° 37' 52.47'' N, 115°26'41.13'' O), otros dos en el techo de una casa de un rancho cercano (32° 15' 46.16 N, 115° 05' 00.08 O) a la delegación Guadalupe Victoria a 43 km de la zona urbana de Mexicali y por ultimo uno en el techo de las oficinas de peaje del FIARUM (32° 33' 22.05'' N, 116° 33' 22.05'' O) en el poblado la Rumorosa (invierno) y en el techo del edificio de los bomberos (32° 32' 28.11'' N, 116° 02' 52.81'' O) del mismo poblado (verano), los equipos estuvieron a una altura de entre 10 y 15 metros a nivel del suelo. (Figura 3.1). Se tomaron 32 muestras en la zona urbana (16 con el filtro de teflón y 16 con el filtro de cuarzo), 32 muestras en la zona rural (16 con el filtro de teflón y

16 con el filtro de cuarzo) y 16 muestras en la zona montañosa (teflón), dando como resultado 80 muestras para la campaña de verano, mientras en la temporada de invierno se tomaron 34 muestras en la zona urbana (17 con el filtro de teflón y 17 con el filtro de cuarzo), 34 muestras en la zona rural (17 con el filtro de teflón y 17 con el filtro de cuarzo) y 17 muestras en la zona montañosa (teflón) dando como resultado 85 muestras para la campaña de invierno.



Figura 3.1.- Mapa de la ciudad de Mexicali, el Ejido Guadalupe Victoria y la Rumorosa

El fundamento para realizar los muestreos en la ciudad y valle de Mexicali fue con el fin de comparar la abundancia de partículas  $PM_{10}$  en cuanto a cantidad, características físicas y potenciabilidad química, (en el caso de la Rumorosa fue usada básicamente como blanco y solo se analizaron gravimétricamente) además de saber la trayectoria que toman estas partículas en el aire ambiente. En las figuras 3.2, 3.3, 3.4, 3.5 y 3.6 se ven los sitios seleccionados, que fueron tomados como representativos de cada zona en estudio tanto en invierno como en verano por motivos de aseguramiento del equipo y de los experimentos a realizar.



Figura 3.2.- Ubicación de los primeros dos monitores en el Instituto de Ingeniería



Figura 3.3.- Ubicación de dos monitores en un rancho cercano al ejido Guadalupe Victoria



Figura 3.4.- Ubicación del monitor en la caseta del FIUARUM en el poblado la Rumorosa en invierno.



Figura 3.5.- Ubicación del monitor en la Bombera del poblado la Rumorosa en verano.

### 3.1.2.- Caracterización química

A los filtros de teflón y cuarzo se les determinó gravimetría en UABC, mientras a los filtros de teflón se sometieron a análisis de los 38 metales (del Na al Pb) mediante espectroscopia de análisis de dispersión de rayos X (EDX) acoplado a un microscopio electrónico de barrido (MEB) JEOL

JSM-6060LV y llevado a cabo en Honeywell en Mexicali por la M. En C. Sharon Sandoval para las muestras de invierno, mientras que para las muestras de verano se usó un equipo JEOL JSM-5300 realizado en el Centro de Nanociencias y Nanotecnología (CNyN), UNAM por el Dr. Mario Curiel. A los filtros de cuarzo se les determino cationes ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ ) y aniones ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ) mediante cromatografía de iones, utilizándose un equipo IonPac AS9-HC y también se analizaron carbón orgánico y carbón elemental por transmitancia térmico-óptica por espectroscopia de absorción atómica electrotérmica con un equipo Perkin-Elmer modelo 2100, ambos realizados en el Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM, por la Dra. Telma Castro.

### **3.2.- Materiales**

#### **3.2.1.- Filtros**

Filtros de cuarzo y teflón: Tienen un diámetro de 47 mm, marca Whatman. Se caracterizan por ser resistente y capaces de soportar altas temperaturas ( $300^\circ\text{C}$ ), por períodos prolongados y sin sufrir ninguna clase de daño. Resistente a gran parte de los ácidos y bases existentes, e insoluble ante muchos de los disolventes orgánicos. Los filtros de cuarzo son fabricados con micro fibras de cuarzo puras ( $\text{SiO}_2$ ), con ausencia total de ligantes o aditivos, con características de retención, capacidad de carga y permeabilidad al aire, tienen mayor resistencia química a altas temperaturas, es utilizado en ambientes con condiciones extremas. En cambio el filtro de teflón es un es un polímero similar al polietileno con fórmula química del monómero, tetrafluoroeteno, es  $\text{CF}_2=\text{CF}_2$ , no reacciona con otras sustancias químicas excepto en situaciones muy especiales, es también un gran aislante eléctrico y sumamente flexible, no se altera por la acción de la luz y es capaz de soportar altas temperaturas, su cualidad más conocida es la antiadherencia, razón por la cual es muy utilizado para capturar partículas, En la Figura 3.6, se presentan los filtros usados dentro del anillo antogravitatorio que impide que se muevan.

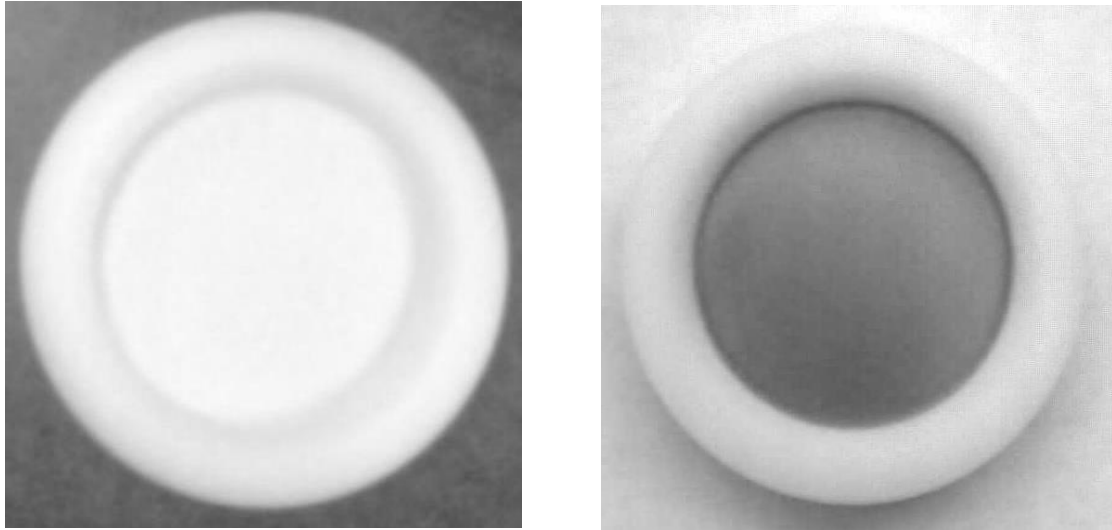


Figura 3.6.- Filtros de teflón y cuarzo.

### 3.2.2- Equipos

Micro-balanza: Se utilizaron para pesar los filtros en la temporada de invierno y verano, tanto al inicio y al final del muestreo, sus características principales es que puede pesar desde .0001 mg hasta 1  $\mu$ g. En la Figura 3.7, se muestra una micro-balanza Sartorius ME 36 S.



Figura 3.7.- Microbalanza

### 3.2.3.- Muestreador de partículas con equipo de bajo volumen.

Es un muestreador de material particulado. Se diseñaron para la obtención de muestras de partículas atmosféricas, totales y fracción respirable ( $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$ ) en sitios sin energía eléctrica o de difícil acceso (Figura 3.8). Funciona con carga de baterías portátiles. Este equipo cuenta con un controlador de tiempo programable, un sistema de control de flujo constante y un programador de tiempo electrónico. Está recubierto de material PVC para protegerlo de condiciones ambientales. Funciona conduciendo el aire por un tubo denominado módulo de impactación donde este es pasado a través de un filtro de cuarzo o teflón. El módulo de impactación lleva en su interior un seleccionador de partículas menores o iguales a 10 micrómetros y el flujo de operación debe de ser 5 litros por minuto, para hacer pasar alrededor de 7 metros cúbicos de aire en 24 horas de muestreo. Una vez terminado el muestreo, se retira el impactador con el filtro y se coloca otro filtro blanco para efectuar el siguiente muestreo, así como el recambio de baterías.



Figura 3.8.- Monitor de bajo volumen (“Minivol airmetrics”)

### 3.2.4.- Métodos analíticos

**Gravimétrico:** La masa se determina por diferencia de peso de los filtros, antes y después del muestreo. Los filtros se pesan en una microbalanza con una sensibilidad de  $\pm 0.001$  mg (INE 1999).

**Espectroscopia de análisis de dispersión de rayos X (EDX):** La mayoría de los electrones incidentes interactúan con los átomos de la muestra y son dispersados elástica e inelásticamente; en la primera la trayectoria del electrón cambia, pero su energía cinética y velocidad permanece esencialmente constante y en la inelástica, la trayectoria del electrón incidente es ligeramente perturbada, pero pierde energía a causa de su interacción con los electrones de la muestra. Las interacciones inelásticas son las causantes de la emisión de rayos X; los electrones de las capas internas de la muestra, son removidos por causa de los electrones incidentes, dejando vacantes que son ocupadas por los electrones de las capas externas, que emiten una radiación característica (rayos X).

Estos rayos X son analizados y se registra el número de fotones en función de la energía, obteniéndose gráficos que muestran picos cuyas posiciones brindan información sobre los átomos presentes y cuyas áreas son proporcionales a la cantidad de dichos átomos en la muestra, obteniéndose información sobre la composición de la misma. Dado que los haces de luz incidentes tienen alta energía (típicamente 0.5-30 kV) penetran en la muestra distancias del orden de algunas micras y, por tanto, debe tenerse siempre presente que la composición obtenida corresponde a una capa de algunas micras y no meramente a la superficie. La instrumentación para EDX es usualmente un accesorio de los microscopios electrónicos de barrido (Skoog 2005). El equipo usado para los experimentos de esta investigación fueron para invierno un equipo llamado JEOL JSM-6060LV (Figura 3.9), en cambio para verano se usó un equipo llamado JEOL JSM-5300 (Figura 3.10).



Figura 3.9.- jeol jsm-6060lv y jeol jsm-5300 usados para EDX.

**Cromatografía de intercambio iónico:** Actualmente se emplean dos tipos de cromatografía iónica, la basada en supresores y la de columna sencilla. Difieren en el método usado para impedir que la conductividad del electrolito eluyente (diluyente) interfiera en la medida de la conductividad del analito (muestra). La basada en supresores ya que tiene una columna supresora de eluyente, que se coloca inmediatamente después de la columna de intercambio. Esta columna supresora se empaqueta con una segunda resina de intercambio de iones, que convierte de forma efectiva los iones del disolvente eluido a una especie molecular de limitada ionizabilidad, sin afectar a la conductividad debida a los iones del analito. Por ejemplo cuando se separan y determinan cationes, se usa el ácido clorhídrico como reactivo eluyente, mientras que la columna supresora es una resina de intercambio de aniones en la forma de hidróxido. Esta segunda columna no retiene los cationes del analito. En la separación de aniones, el empaquetamiento supresor es la forma ácida de una resina de intercambio de cationes, con el bicarbonato o carbonato de sodio como eluyente. En cambio la de columna única no requiere columna supresora. Esta técnica depende de pequeñas diferencias de conductividad entre los iones de la muestra y los que predominan en el eluyente. Estas diferencias se amplifican con intercambiadores de baja capacidad, que permiten la elución con

disoluciones de baja concentración electrolítica. (Skoog 2005). Para la investigación se usó un equipo IonPac as9-hc (Figura 3.10).



Figura 3.10.- Equipo IonPac as9-hc usado para cromatografía de iones

**Reflectancia termo/óptica:** El método está basado en el principio de que el CO (Carbón Organico) y CE (Carbón Elemental) se evaporan a diferentes temperaturas. El analizador está conformado por un sistema óptico y uno térmico. Primeramente, la muestra se calienta a temperaturas de 120, 250, 450 y 550 °C en una atmósfera de helio, evaporándose algunos grupos del OC. Posteriormente, se lleva a cabo la combustión a temperaturas de 550, 700 y 800 °C en una atmósfera de 2% de oxígeno y 98% de helio para evaporar diferentes grupos del EC. Los grupos del OC y EC entran a una corriente de helio-oxígeno en donde los gases producidos pasan a través del catalizador de dióxido de manganeso (900 °C) y son oxidados a CO<sub>2</sub>. Posteriormente estos gases se exponen a un catalizador de níquel (420 °C) el cual reduce el CO<sub>2</sub> a metano (CH<sub>4</sub>) y éste último se cuantifica por un detector de ionización de flama. (Chow, 1995; Chow et al., 1996. 1996a; CASTNet 1997). El equipo usado para esta investigación fue un Perkin-Elmer modelo 2100 (Figura 3.11).



Figura 3.11.- Equipo Perkin-Elmer modelo 2100 usado para transmitancia térmica/óptica

### 3.2.5.- Modelación

Hysplit es un modelo híbrido lagrangiano de trayectoria integrada de partícula única (HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory – HYSPLIT) para modelar el transporte de masas de aire el cual es un servicio del Laboratorio de Recursos Atmosféricos (Air Resources Laboratory – ARL) de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (National Atmospheric and Oceanic Administration – NOAA) de Estados Unidos (AIR y NOAA, 2013). Se puede utilizar HYSPLIT para estimar la trayectoria progresiva o regresiva de una masa de aire, algo muy útil para efectos de interpretar un evento que afecta la calidad del aire. El análisis de trayectorias regresivas ayuda a determinar los orígenes y fuentes de los contaminantes, mientras que el análisis de trayectorias progresivas ayuda a determinar la dispersión de los contaminantes. (SERVIR, 2011).

Hysplit es un programa gratuito que se encuentra en línea, que realiza modelos de trayectorias, modelos de dispersión y desplazamiento de cenizas volcánicas en el ambiente, Figura 3.12.

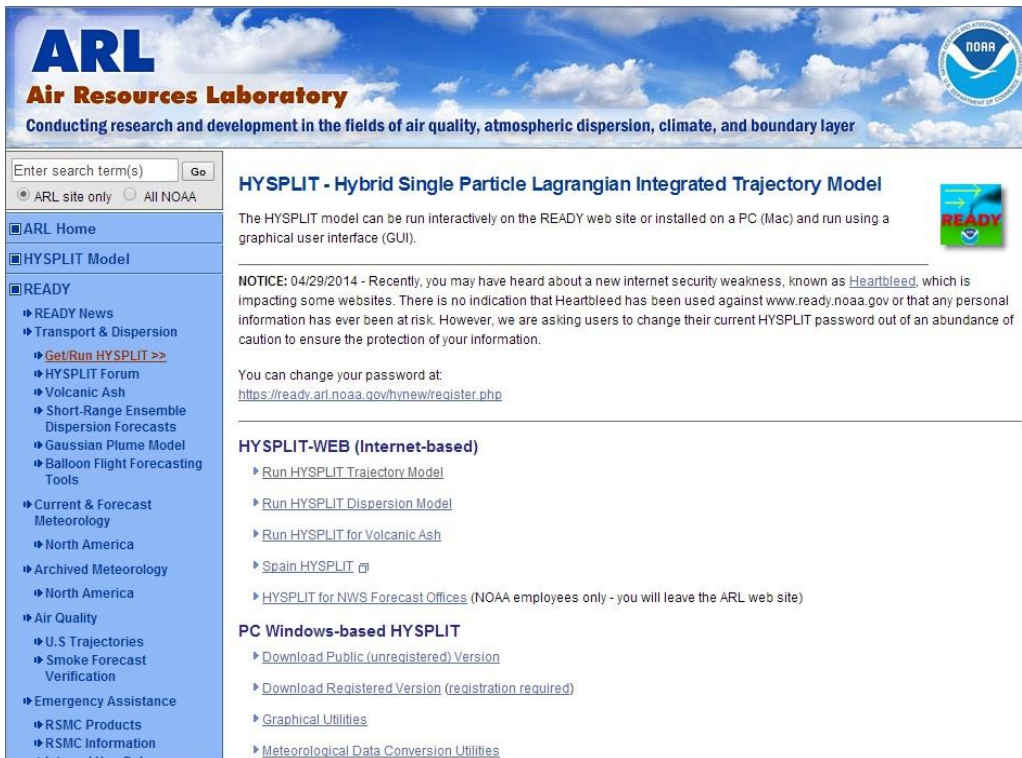


Figura 3.12.- Portada del Air Resources Laboratory.

Dentro de los modelos de trayectorias, tenemos varios apartados, entre ellos podemos encontrar trayectorias ya hechas de algunos puntos de la región, también podemos encontrar los diferentes archivos con lo que cuenta Hysplit para poder realizar trayectorias, además de resultados de modelación previamente hechos con globos de gas (Figura 3.13).



Figura 3.13.- Apartados de Hysplit trajectory model.

Dentro del siguiente punto se pueden escoger el número de trayectorias a realizar (de una a tres trayectorias en la misma imagen), así como el tipo de trayectorias que se pueden hacer ya sea normal, matrix o un ensamble (Figura 3.14).

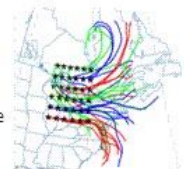
### Type of Trajectory(ies)

<b>Number of Trajectory Starting Locations</b>	<input type="radio"/> 1	Note: By choosing just one source location, more options for selecting the location will be presented on the next page, such as choosing by latitude/longitude, by WMO ID, or by plant location. Multiple source locations limit the input to just latitude/longitude positions.	
	<input type="radio"/> 2		
	<input checked="" type="radio"/> 3		
<b>Type of Trajectory</b>	<input checked="" type="radio"/> Normal	<input type="radio"/> Matrix	<input type="radio"/> Ensemble

### Details

#### Trajectory Matrix

The trajectory matrix option will run a grid of trajectories bounded by the first 2 source locations (trajectory 1 is the lower left grid point and trajectory 2 is the upper right grid point) and evenly spaced with a grid increment given by the distance between the lower left grid point (trajectory 2) and trajectory 3. Only one height is allowed.



#### Trajectory Ensemble

The trajectory ensemble option will start multiple trajectories from the first selected starting location. Each member of the trajectory ensemble is calculated by offsetting the meteorological data by a fixed grid factor (one grid meteorological grid point in the horizontal and 0.01 sigma units in the vertical). This results in 27 members for all-possible offsets in X,Y, and Z. Note: the starting height should be greater than 250 m for optimal configuration of the ensemble.



Figura 3.14.- Tipos de trayectorias

El paso siguiente consiste en escoger la meteorología, para esto se cuenta con varios modelos meteorológicos entre los cuales se encuentran: GDAS (Global Data Assimilation System), EDAS (Eta Data Assimilation System), NAM (North American Mesoscale Forecast System), MM5 (Mesoscale Model) y otros más (Figura 3.15).



Lo siguiente es buscar el día del cual se pretende realizar la trayectoria, en este caso 26 de abril del 2014 (Figura 3.17):

**Meteorology File**

**Meteorology:** Archived NAM12  
**Source Location:** Lat: 32.568500 Lon: -115.348500

Choose an archived meteorological file  
Archive File: 20140426\_nam12 ▾

Next>>

Figura 3.17.- Archivos del día.

Al tener la fecha para la trayectoria se pasa a los detalles de modelación, el primer dato es si esta será hacia delante (hacia dónde va la pluma de contaminación) o hacia atrás (de donde viene la pluma de contaminación), en este caso es hacia atrás, llamado coloquialmente Backward – trajectory, la fecha de empiezo de la trayectoria, así como el número de trayectorias que se encontraran, las coordenadas, así como la altura de estas trayectorias, que pueden ser desde los 20 a los 500 metros (Figura 3.18).

## Model Run Details

Request trajectory

The archived data file (NAM12) has data beginning at 04/26/14 0000 UTC.

### Model Parameters

**Trajectory direction:**  Forward  
 Backward (Change the default start time!) [More info](#)

**Vertical Motion:**  Model vertical velocity  
 Isobaric  
 Isentropic [More info](#)

**Start time (UTC):** Current time: 19:07  
year: 14 month: 04 day: 26 hour: 00 [More info](#)

**Total run time (hours):** 24 [More info](#)

**Start a new trajectory every:** 0 hrs **Maximum number of trajectories:** 24 [More info](#)

**Start 1 latitude (degrees):** 32.568500 [More info](#)

**Start 1 longitude (degrees):** -115.348500 [More info](#)

**Start 2 latitude (degrees):**

**Start 2 longitude (degrees):**

**Start 3 latitude (degrees):**

**Start 3 longitude (degrees):**

**Level 1 height:** 20  meters AGL  meters AMSL [More info](#)

**Level 2 height:** 0

**Level 3 height:** 0

Figura 3.18.- Detalles de la modelación.

También allí se elegirá si quiere que sea una imagen de google earth o una imagen gif, la resoluciones de la imagen, el zoom, la proyección, los intervalos entre imágenes, así como decidir qué datos meteorológicos son fundamentales para estas trayectorias: altura del terreno, temperatura de ambiente, humedad relativa, radiación, lluvia, profundidad (Figura 3.19).

**Display Options**

GIS output of contours?  None  Google Earth (kmz)  GIS Shapefile [More info ▶](#)

The following options apply only to the GIF, PDF, and PS results (not Google Earth)

Plot resolution (dpi):  [More info ▶](#)

Zoom factor:  [More info ▶](#)

Plot projection:  Default  Polar  Lambert  Mercator [More info ▶](#)

Vertical plot height units:  Pressure  Meters AGL  Theta [More info ▶](#)

Label Interval:  No labels  6 hours  12 hours  24 hours [More info ▶](#)

Plot color trajectories?  Yes  No [More info ▶](#)

Use same colors for each source location?  Yes  No [More info ▶](#)

Plot source location symbol?  Yes  No [More info ▶](#)

Distance circle overlay:  None  Auto [More info ▶](#)

U.S. county borders?  Yes  No [More info ▶](#)

Postscript file?  Yes  No [More info ▶](#)

PDF file?  Yes  No [More info ▶](#)

Plot meteorological field along trajectory?  Yes  No [More info ▶](#)

Note: Only choose one meteorological variable from below to plot

Dump meteorological data along trajectory:  Terrain Height (m)  Potential Temperature (K)  Ambient Temperature (K)  Rainfall (mm per hr)  Mixed Layer Depth (m)  Relative Humidity (%)  Downward Solar Radiation Flux (W/m\*\*2) [More info ▶](#)

Figura 3.19.- Opciones para modelar.

Por ultimo tenemos la trayectoria, tanto en google earth como para descargar (Figura 3.20).



RESULTS	Click on text link to view images in a new window.			
Trajectories	GIF Plots	PDF Plots	Google Earth	Flash Maps
	<a href="#">.gif</a>	<a href="#">.pdf</a>	<a href="#">.kmz</a>	<a href="#">.kmz</a>

Figura 3.20.- Imagen de la trayectoria.

Esta trayectoria nos muestra como la trayectoria del viento proviene del suroeste de la ciudad de Mexicali y primeramente va hacia el norte y luego regresa al sureste, dando vueltas por alrededor de la ciudad, llegando finalmente a la zona del Valle de Puebla.

### **3.2.6.- Rosa de los vientos**

El viento está definido como "el aire en movimiento" y se describe en base a dos características: a) la velocidad y b) la dirección (SINAICA 2007). Los meteorólogos crearon una gráfica llamada "*Rosa de los vientos*" (Figura 3.21), que permite representar simultáneamente la relación que existe entre las características que componen el viento (Dirección y velocidad del viento). La información de cada rosa de viento muestra la:

- 1) Frecuencia de ocurrencia de los vientos en 16 sectores de dirección: N (Norte), NNE (Norte - Noreste), NE (Noreste), ENE (Este – Noreste), E (Este), ESE (Este – Sureste), SE (Sureste), SSE (Sur – Sureste), S (Sur), SSO (Sur – Suroeste), SO (Suroeste), OSO (Oeste – Suroeste), O (Oeste), ONO (Oeste – Noroeste), NO (Noroeste), NNO (Norte - Noroeste).
- 2) Identificación de la estación, mes y periodo de registro.
- 3) Porcentaje de frecuencia de viento en calma.

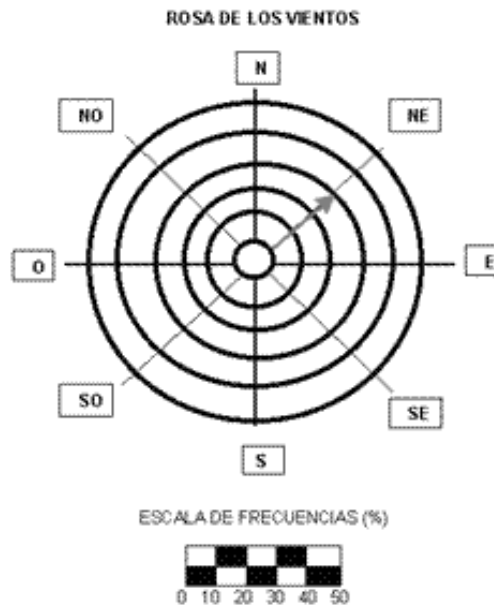


Figura 3.21.- Rosa de los Vientos

## CAPITULO IV.- RESULTADOS

### 4.1.- Análisis de series de tiempos

Uno de los objetivos de esta investigación es conocer la variabilidad de los niveles del material particulado en dos zonas de la región de Mexicali (rural y urbana) y poblado La Rumorosa, en dos temporadas (invierno y verano), mediante el uso de los dos tipos de filtros (teflón y cuarzo) con énfasis en los registros de  $PM_{10}$ .

El primer sitio donde se realizó el muestreo fue el poblado la Rumorosa debido a su distancia y la altura, el segundo sitio a evaluar fue la zona rural de Mexicali y por último la zona urbana de Mexicali. Esta última se caracteriza por tener una gran cantidad de automóviles, además de contar con caminos sin pavimentar y con pocas arterias importantes que crean embotellamientos que agravan la contaminación del aire.

Es de notar que investigaciones previas (Canales, 2010; Chow et al 1997) muestran que es en la zona urbana donde se presentan los mayores casos de contaminación, en perjuicio de la zona rural.

#### 4.1.1- Temporada de invierno

##### 4.1.1.1- La Rumorosa

Se dan a conocer los pesos finales e iniciales y la diferencia de peso (en  $\mu\text{g}$ ) en la Tabla 4.1 para los filtros colocados en poblado la Rumorosa:

Tabla 4.1.- Análisis gravimétrico para los filtros del poblado La Rumorosa

Filtro	Peso Inicial	Peso Final	Diferencia de Peso
Rt1	149.116	149.275	0.159
Rt2	153.156	155.0944	1.938
Rt3	147.064	148.4666	1.402
Rt4	149.218	151.0202	1.802
Rt5	159.364	160.8808	1.517
Rt6	147.423	148.6842	1.261
Rt7	145.311	145.8918	0.580
Rt8	148.565	149.7844	1.219
Rt9	147.509	147.8582	0.349
Rt10	147.317	148.999	1.682
Rt11	148.251	149.2898	1.038
Rt12	146.674	147.9562	1.282
Rt13	143.393	143.6516	0.259
Rt14	148.875	149.9922	1.117
Rt15	143.861	145.6756	1.814
Rt16	147.953	149.4828	1.529
Rt17	143.800	145.593	1.793

Para el cálculo del flujo se necesitaron las siguientes constantes (filtro de teflón)  $m_{vol}$ : 0.9854;  $b_{vol}$ : 0.5487 y  $Q_{ini}$ : 5 L/min; otros datos fueron la presión atmosférica ( $P_{atm}$ ) y temperatura del aire ( $T_a$ ), obtenidos en la estación de monitoreo del FIARUM en el poblado la Rumorosa.

Así en la Tabla 4.2 se muestran los diversos cálculos para llegar al flujo final.

Tabla 4.2 Flujo patrón del muestreador que contenía los filtros de la zona montañosa.

Fecha	Pact	Pest	Tact	Test	(Mvol Qind + Bvol)	Pres Atm 1	Tem atm 1	PA * TA	(PA * TA) <sup>1/2</sup>	Qact
07-ene-11	1025	1013	6.31	24.85	5.4757	0.9883	0.2538	0.2508	0.5008	2.7423
09-ene-11	1018	1013	9.12	24.85	5.4757	0.9951	0.3670	0.3652	0.6043	3.3092
11-ene-11	1024	1013	11.99	24.85	5.4757	0.9893	0.4826	0.4775	0.6910	3.7836
13-ene-11	1013.7	1013	15.29	24.85	5.4757	0.9993	0.6153	0.6149	0.7841	4.2936
15-ene-11	1010	1013	14.72	24.85	5.4757	1.0030	0.5925	0.5942	0.7709	4.2210
17-ene-11	1023.6	1013	11.66	24.85	5.4757	0.9896	0.4693	0.4645	0.6815	3.7317
19-ene-11	1022.5	1013	16.77	24.85	5.4757	0.9907	0.6749	0.6686	0.8177	4.4774
21-ene-11	1019.2	1013	19.74	24.85	5.4757	0.9939	0.7942	0.7894	0.8885	4.8649
23-ene-11	1011.9	1013	25.75	24.85	5.4757	1.0011	1.0362	1.0373	1.0185	5.5770
25-ene-11	1009	1013	21.85	24.85	5.4757	1.0040	0.8792	0.8827	0.9395	5.1445
27-ene-11	1016.8	1013	17.77	24.85	5.4757	0.9963	0.7150	0.7123	0.8440	4.6213
29-ene-11	1018.3	1013	16.95	24.85	5.4757	0.9948	0.6820	0.6785	0.8237	4.5103
31-ene-11	1016.8	1013	17.85	24.85	5.4757	0.9963	0.7182	0.7155	0.8459	4.6319
02-feb-11	1020.5	1013	17.32	24.85	5.4757	0.9927	0.6970	0.6919	0.8318	4.5547
04-feb-11	1014.6	1013	19.82	24.85	5.4757	0.9984	0.7977	0.7964	0.8924	4.8867
06-feb-11	1016	1013	15.70	24.85	5.4757	0.9970	0.6319	0.6300	0.7937	4.3462
08-feb-11	1015.6	1013	14.84	24.85	5.4757	0.9974	0.5971	0.5956	0.7717	4.2257

Pact: Presión actual; Pest: Presión estándar; Tact: Temperatura actual; Test: Temperatura estándar; (Mvol Qind + Bvol): Contante de succión del equipo; Pres Atm: presión atmosférica; Tem Atm: temperatura atmosférica; Pa \* Ta: multiplicación entre Pres Atm y Tem Atm; (PA \* TA)<sup>1/2</sup>: División de la multiplicación anterior; Qact: Flujo actual.

Teniendo el flujo se procedió a obtener la concentración de partículas menores a 10  $\mu$ m (micrómetro), utilizando las siguientes ecuaciones:

Flujo Patrón:  $F_{ptn} = (Q_{ini} + Q_{fin})/2$ ; El flujo patrón es la cantidad de aire promedio que ha entrado hacia la bomba de succión del muestreador en el transcurso de 24 horas.

CtPM<sub>10</sub>: ((W2 – W1)10<sup>6</sup>)/(Fp); La concentración de PM<sub>10</sub> es la división de la suma de pesos del flujo, todo esto multiplicado por 10<sup>6</sup> para poder expresarlo en micrómetros sobre metros cúbicos.

En la Tabla 4.3 se dan la concentración (µg) de PM<sub>10</sub> para los filtros, así como el proceso mediante el cual se obtuvo.

Tabla 4.3.- Concentraciones de las PM<sub>10</sub> en los filtros para la zona montañosa

Fecha	Flujo Inicial	Q act	F patron	Diferencia de Peso	Peso Patron	Flujo patron2	mg/m3
07-ene-11	5	2.7423	3.8711	0.1588	158800	5574.4308	28.4872
09-ene-11	5	3.3092	4.1546	1.9384	1938400	5982.6324	324.0045
11-ene-11	5	3.7836	4.3918	1.4022	1402200	6324.2138	221.7193
13-ene-11	5	4.2936	4.6468	1.8020	1802000	6691.4112	269.3004
15-ene-11	5	4.2210	4.6105	1.5170	1517000	6639.1344	228.4936
17-ene-11	5	3.7317	4.3659	1.2612	1261200	6286.8558	200.6090
19-ene-11	5	4.4774	4.7387	0.5804	580400	6823.7350	85.0561
21-ene-11	5	4.8649	4.9325	1.2192	1219200	7102.7336	171.6522
23-ene-11	5	5.5770	5.2885	0.3492	349200	7615.4432	45.8542
25-ene-11	5	5.1445	5.0722	1.6822	1682200	7304.0181	230.3116
27-ene-11	5	4.6213	4.8107	1.0384	1038400	6927.3530	149.8985
29-ene-11	5	4.5103	4.7551	1.2820	1282000	6847.3863	187.2247
31-ene-11	5	4.6319	4.8159	0.2588	258800	6934.9526	37.3182
02-feb-11	5	4.5547	4.7773	1.1172	1117200	6879.3786	162.3984
04-feb-11	5	4.8867	4.9434	1.8144	1814400	7118.4389	254.8873
06-feb-11	5	4.3462	4.6731	1.5294	1529400	6729.2874	227.2752
08-feb-11	5	4.2257	4.6129	1.7932	1793200	6642.5147	269.9580

Como se observa en la Tabla 4.3, de acuerdo a la norma mexicana de PM<sub>10</sub> (24 horas) que es de 120 µg/m<sup>3</sup>, hubo en total 13 violaciones, las cuales fueron desde el 9 a 17 de enero, 21 de enero, del 25 al 29 de enero y del 2 al 8 de febrero del 2011, esto es en proporción con el número de muestras tomadas, el 77% de las muestras fueron mayores a los estándares.

En la Figura 4.1 se muestra la concentración para PM<sub>10</sub> con el filtro de teflón, la línea horizontal es la norma mexicana:

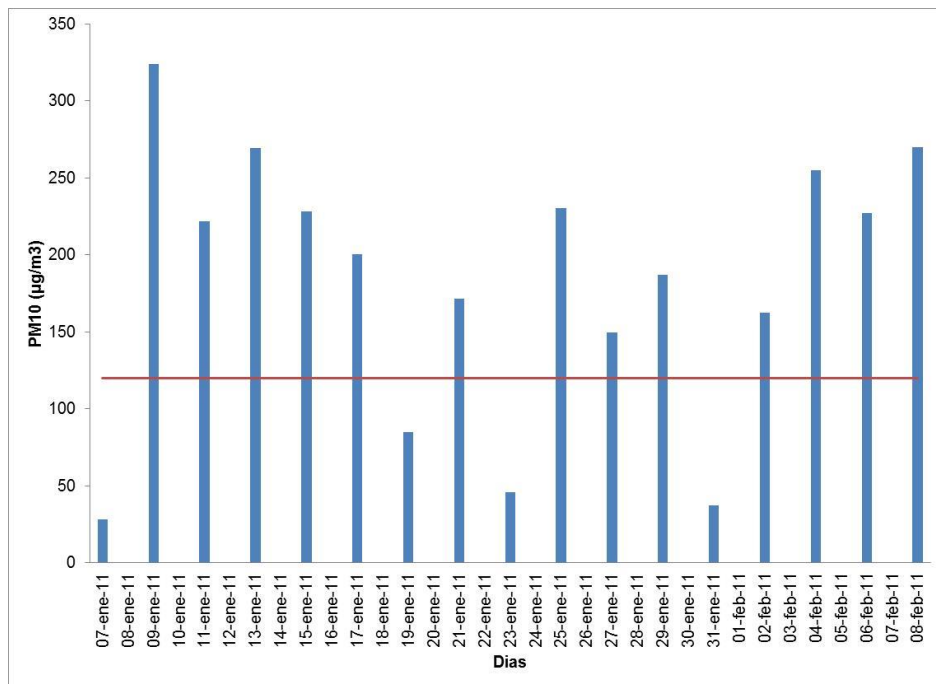


Figura 4.1.- Concentración de PM<sub>10</sub> de los filtros para la zona montañosa

De acuerdo a la rosa de los vientos (Figura 4.2) de la Rumorosa, los vientos en la región provenían en su mayoría del Oeste-Suroeste, con vientos promedio de 10.308 m/s, con rachas de viento de 14 m/s en su mayoría provenientes del Suroeste y como menos de 1% de calmas (Figura 4.3).

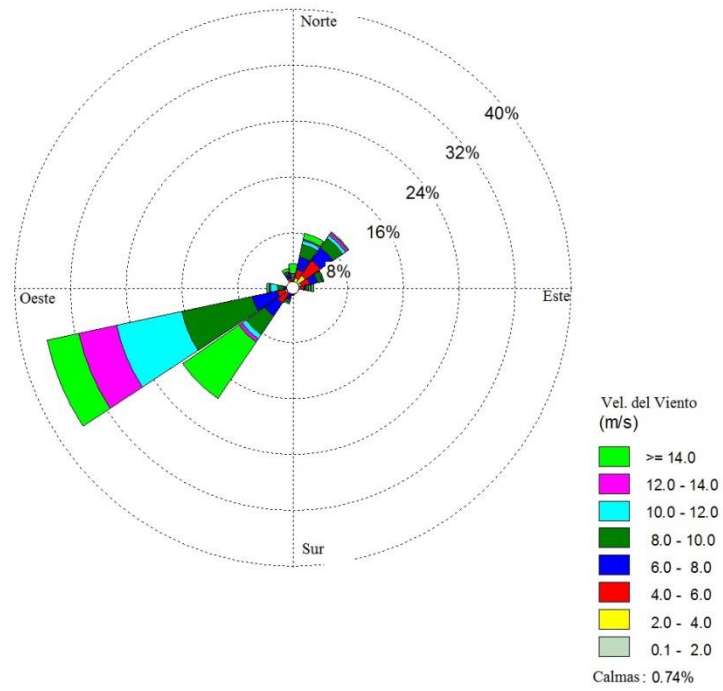


Figura 4.2.- Rosa de los vientos para la zona montañosa.

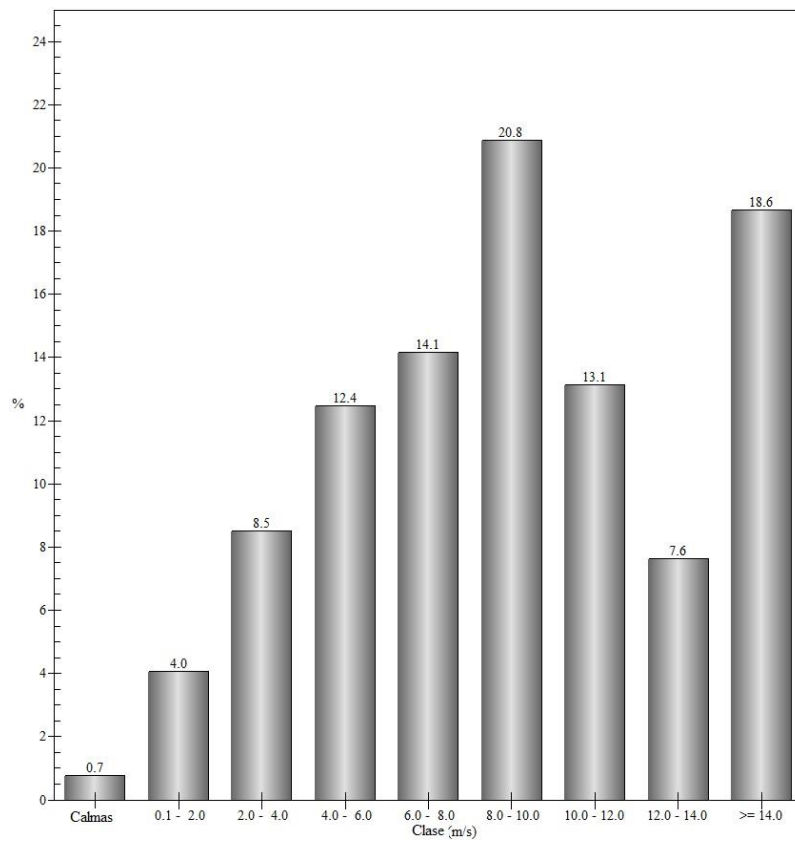


Figura 4.3.- Histograma de la velocidad de viento para la zona montañosa.

A pesar de no ser una zona donde se hayan hecho estudios sobre material particulado presenta unos niveles muy altos respecto a la norma mexicana ( $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) esto hace suponer que el sitio seleccionado como testigo no fue el mejor, debido a la meteorología y topografía del lugar, ya que presenta una cercanía a autopistas y caminos sin pavimentar, además de la velocidad de los vientos provoca una resuspensión de polvo y contaminantes propios del paso de estos automotores.

#### 4.1.1.2.- Zona urbana de Mexicali

En la Tabla 4.4 se dan a conocer el análisis gravimétrico ( $\mu\text{g}$ ) para los filtros de la zona urbana de Mexicali.

Tabla 4.4.- Análisis gravimétrico para los filtros de la zona urbana de Mexicali

Filtro	Peso Inicial	Peso Final	Diferencia de Peso
Mt1	146.488	146.7468	0.258
Mt2	146.289	147.2394	0.951
Mt3	143.986	145.727	1.741
Mt4	146.512	147.3938	0.881
Mt5	144.789	146.0058	1.217
Mt6	145.849	147.4566	1.607
Mt7	148.228	149.093	0.865
Mt8	145.472	146.394	0.922
Mt9	149.746	150.6798	0.933
Mt10	146.650	146.9374	0.288
Mt11	148.369	149.3588	0.989
Mt12	145.711	146.0558	0.345
Mt13	146.209	146.7272	0.518
Mt14	146.156	147.6516	1.496
Mt15	144.103	144.3024	0.199
Mt16	145.750	146.781	1.031
Mt17	146.476	147.6142	1.138

En las Tabla 4.5 se muestran los resultados de flujo patrón en los filtros tomándose en cuenta los datos analizados de la estación meteorológica de la UABC.

Tabla 4.5.- Flujo patrón del muestreador que contenía los filtros en la zona urbana

Fecha	Pact	Pest	Tact	Test	(MvolQind + Bvol)	Pres atm 1	Tem Atm 1	PA * TA	(PA * TA)1/2	Qact
07-ene-11	1022	1013	14.3	24.8500	5.4139	0.9909	0.5743	0.5691	0.7544	4.0841
09-ene-11	1020	1013	13.3	24.8500	5.4139	0.9935	0.5367	0.5332	0.7302	3.9533
11-ene-11	1032	1013	10.9	24.8500	5.4139	0.9819	0.4388	0.4308	0.6564	3.5535
13-ene-11	1031	1013	14.8	24.8500	5.4139	0.9826	0.5952	0.5848	0.7647	4.1401
15-ene-11	1028	1013	18.6	24.8500	5.4139	0.9858	0.7503	0.7396	0.8600	4.6561
17-ene-11	1021	1013	21.3	24.8500	5.4139	0.9921	0.8578	0.8511	0.9225	4.9945
19-ene-11	1018	1013	19.1	24.8500	5.4139	0.9952	0.7697	0.7660	0.8752	4.7382
21-ene-11	1025	1013	15.5	24.8500	5.4139	0.9881	0.6239	0.6165	0.7852	4.2508
23-ene-11	1026	1013	16.5	24.8500	5.4139	0.9872	0.6628	0.6544	0.8089	4.3794
25-ene-11	1025	1013	15.7	24.8500	5.4139	0.9882	0.6308	0.6234	0.7895	4.2745
27-ene-11	1029	1013	16.6	24.8500	5.4139	0.9847	0.6668	0.6566	0.8103	4.3868
29-ene-11	1024	1013	16.0	24.8500	5.4139	0.9897	0.6429	0.6363	0.7977	4.3184
31-ene-11	1024	1013	16.3	24.8500	5.4139	0.9893	0.6572	0.6501	0.8063	4.3653
02-feb-11	1037	1013	9.1000	24.8500	5.4139	0.9769	0.3662	0.3577	0.5981	3.2380
04-feb-11	1032	1013	11.1000	24.8500	5.4139	0.9816	0.4467	0.4385	0.6622	3.5849
06-feb-11	1027	1013	19.4000	24.8500	5.4139	0.9864	0.7807	0.7700	0.8775	4.7508
08-feb-11	1018	1013	18.8000	24.8500	5.4139	0.9951	0.7565	0.7528	0.8677	4.6974

Pact: Presión actual; Pest: Presión estándar; Tact: Temperatura actual; Test: Temperatura estándar; (Mvol Qind +Bvol): Contante de succión del equipo; Pres Atm: presión atmosférica; Tem Atm: temperatura atmosférica; Pa \* Ta: multiplicación entre Pres Atm y Tem Atm; (PA \* TA) ½: División de la multiplicación anterior; Qact: Flujo actual.

Una vez que se obtiene el flujo se procede a sacar la concentración de partículas menores a 10 µm, para lo cual se utilizan las siguientes ecuaciones:

Flujo Patrón:  $F_{ptn} = (Q_{ini} + Q_{fin})/2$  y  $CtPM_{10} = ((W2 - W1)10^6)/(Fp)$

En la Tabla 4.6 se dan las concentraciones ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) de  $PM_{10}$ , así como el proceso mediante el cual se obtuvieron.

Tabla 4.6.- Concentraciones de las PM<sub>10</sub> en los filtros para la zona urbana

Fecha	Flujo Inicial	Q act	F patron	Diferencia de Peso	Peso Patron	Flujo patron2	mg/m3
07-ene-11	5	4.0841	4.5421	0.2584	258400	6540.5686	39.5073
09-ene-11	5	3.9533	4.4766	0.9506	950600	6446.3454	147.4634
11-ene-11	5	3.5535	4.2767	1.7414	1741400	6158.4878	282.7642
13-ene-11	5	4.1401	4.5701	0.8814	881400	6580.9033	133.9330
15-ene-11	5	4.6561	4.8280	1.2166	1216600	6952.3801	174.9904
17-ene-11	5	4.9945	4.9973	1.6072	1607200	7196.0715	223.3441
19-ene-11	5	4.7382	4.8691	0.8650	865000	7011.5200	123.3684
21-ene-11	5	4.2508	4.6254	0.9222	922200	6660.5975	138.4560
23-ene-11	5	4.3794	4.6897	0.9334	933400	6753.2013	138.2159
25-ene-11	5	4.2745	4.6373	0.2878	287800	6677.6615	43.0989
27-ene-11	5	4.3868	4.6934	0.9894	989400	6758.5220	146.3930
29-ene-11	5	4.3184	4.6592	0.3448	344800	6709.2619	51.3916
31-ene-11	5	4.3653	4.6827	0.5184	518400	6743.0179	76.8795
02-feb-11	5	3.2380	4.1190	1.4960	1496000	5931.3934	252.2173
04-feb-11	5	3.5849	4.2924	0.1992	199200	6181.1063	32.2272
06-feb-11	5	4.7508	4.8754	1.0306	1030600	7020.5811	146.7970
08-feb-11	5	4.6974	4.8487	1.1384	1138400	6982.1221	163.0450

Mientras tanto en la Tabla 4.6, se observa como en la mayoría de los días se viola la norma mexicana para PM<sub>10</sub>: La contaminación por PM<sub>10</sub> en la zona urbana va desde el 9 al 23 de enero del 2011, el 27 de enero, el 2 de febrero y por último del día 6 al 8 de febrero, así el 71% de los muestreos está por arriba de la norma mexicana.

Así mismo se muestran la Figura 4.4 con las concentraciones ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) para PM<sub>10</sub>, la línea horizontal es la norma mexicana:

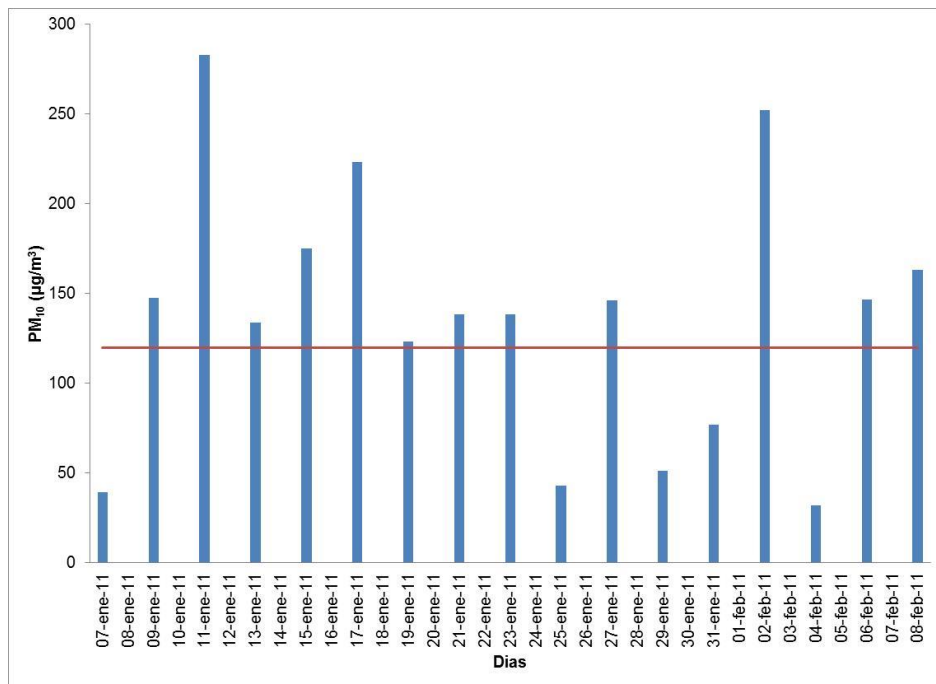


Figura 4.4.- Concentración de PM<sub>10</sub> con los filtros para la zona urbana

Como se ve en la figura la mayoría de los días son violaciones muy evidentes; aun así la zona urbana no fue la más contaminada en la temporada de invierno, ya que la zona de La Rumorosa presento 13 violaciones, en cambio la zona urbana tuvo 12 violaciones.

Respecto a la dirección de los vientos (Figura 4.5), en su mayoría provienen del Noroeste, con un promedio de 1.48 m/s y con rachas de viento que pasan los 2 m/s provenientes del norte, además de un 8% de calmas (Figura 4.6).

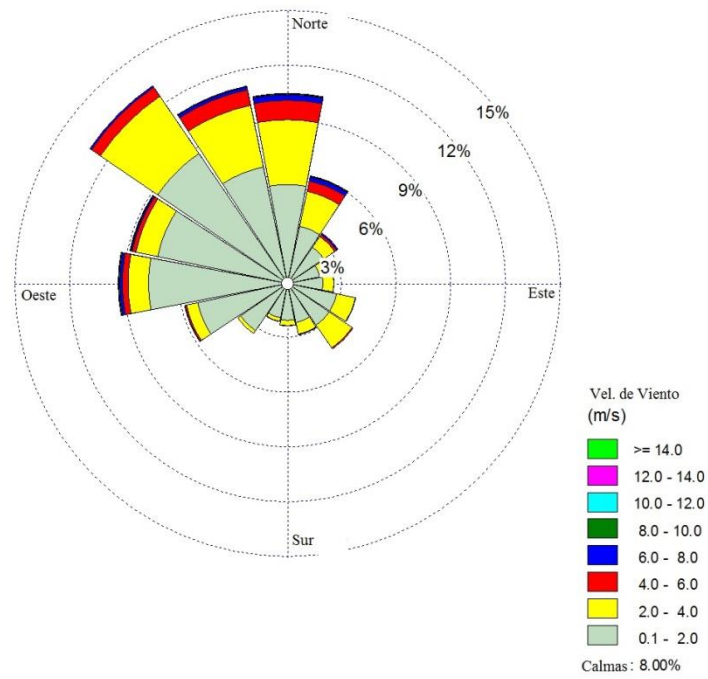


Figura 4.5.- Rosa de los vientos para la zona urbana de Mexicali.

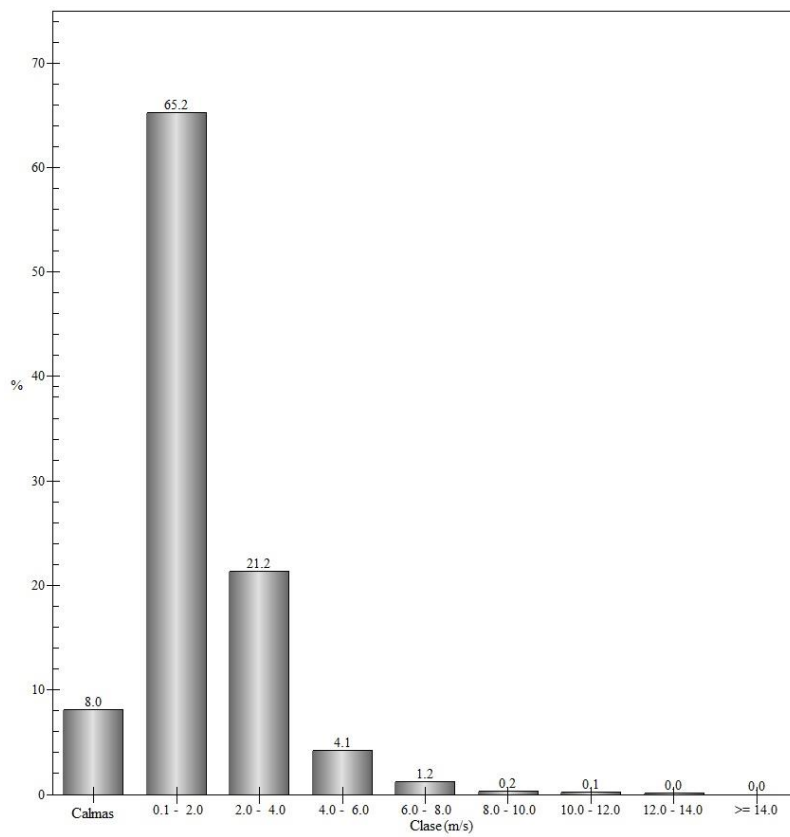


Figura 4.6.- Histograma de la velocidad del viento para la zona urbana de Mexicali.

Las bajas velocidades de viento que se caracterizan en la zona urbana pueden provocar que la contaminación proveniente de autos y de caminos pavimentados y sin pavimentar se queden en la región, a esto hay que agregar al posible efecto invernadero en la ciudad que impide que los gases escapen a la atmosfera, provocando que esta se quede en la región y por ende aumente la contaminación.

Como antecedente en investigaciones pasada, Chow et al, 1997, nos muestra tan solo un 33% de muestras por arriba de la norma mexicanas ( $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), mientras la investigación realizada por Canales en el 2010, nos muestra un aumento considerable respecto a Chow, pero apenas perceptible con la actual investigación, ya que Canales en 2010 nos enseña que el 90% de los datos tomados del muestreo de la zona urbana están por arriba de la norma mexicana, a diferencia de la actual donde solo el 70% presenta niveles altos de material particulado, esto nos hace pensar que posiblemente haya una disminución de contaminación del año 2008 al 2011, pero un aumento considerable desde el año de 1992 al 2008.

#### 4.1.1.3.- Zona rural de Mexicali

La zona rural de Mexicali es un lugar de contrastes, donde hay poblaciones con cerca de 10,000 habitantes, hasta pequeños ejidos de unas cuantas familias donde la mayoría de los caminos no están pavimentados. En el ejido Guadalupe Victoria cerca de donde se hizo el muestreo, la mayoría de las calles están sin pavimentar y aquellas pavimentadas están en mal estado. El flujo de automóviles es muy alto debido sobre todo al paso de autobuses de carga que producen una gran cantidad de contaminación, aunado a la contaminación propia de los campos de cultivos y de las ladrilleras. Se debe tomar en cuenta que es en esta zona donde la resuspensión del polvo es la más alta, ya que no existe un servicio de limpieza con barredoras.

En la Tabla 4.7 se dan a conocer el análisis gravimétrico ( $\mu\text{g}$ ) para los filtros de la zona rural de Mexicali:

Tabla 4.7- Análisis gravimétrico para los filtros de la zona rural de Mexicali

Filtro	Peso Inicial	Peso Final	Diferencia de Peso
Vt1	147.204	148.2116	1.008
Vt2	146.424	148.0212	1.597
Vt3	144.313	146.0594	1.746
Vt4	144.838	146.0348	1.197
Vt5	148.343	150.0418	1.698
Vt6	148.395	149.2664	0.872
Vt7	148.076	149.5812	1.506
Vt8	145.994	147.1122	1.118
Vt9	147.155	148.1688	1.013
Vt10	147.369	148.5948	1.226
Vt11	147.196	148.4272	1.232
Vt12	147.709	149.3916	1.683
Vt13	150.509	151.5774	1.069
Vt14	144.608	146.2242	1.616
Vt15	146.608	147.7646	1.157
Vt16	152.271	152.8812	0.610
Vt17	144.760	145.914	1.154

Se usaron las siguientes constantes para el muestreador (filtro de cuarzo)  $m_{\text{vol}}$ : 1.0219;  $b_{\text{vol}}$ : -0.2059 y  $Q_{\text{ini}}$ : 5 L/min, (filtro de teflón)  $m_{\text{vol}}$ : 0.9652;  $b_{\text{vol}}$ : 0.5934 y  $Q_{\text{ini}}$ : 5 L/min; se usó la presión atmosférica ( $P_{\text{atm}}$ ) y temperatura del aire ( $T_{\text{a}}$ ), obtenidos en la estación de monitoreo autónoma proporcionada por el departamento de Meteorología y climatología de la UABC y ubicada en el ejido Guadalupe Victoria.

En la Tabla 4.8 se muestran los resultados tomados de flujo en los filtros, usando datos de un equipo meteorológico portátil para medir las diferentes variables atmosféricas.

Tabla 4.8.- Flujo patrón del muestreo que contenía los filtros en la zona rural

Fecha	Pact	Pest	Tact	Test	(MvolQind + Bvol)	Pres Atm 1	Tem atm 1	PA * TA	(PA * TA)1/2	Qact
07-ene-11	1014.8	1013	20.0	24.85	5.4194	0.9982	0.8048	0.8034	0.8963	4.858
09-ene-11	1022.2	1013	21.1	24.85	5.4194	0.9910	0.8491	0.8415	0.9173	4.971
11-ene-11	1019.6	1013	19.0	24.85	5.4194	0.9935	0.7646	0.7596	0.8716	4.723
13-ene-11	1022.2	1013	19.6	24.85	5.4194	0.9910	0.7887	0.7816	0.8841	4.791
15-ene-11	1019.20	1013	24.8	24.85	5.4194	0.9939	0.9980	0.9919	0.9960	5.397
17-ene-11	1022.30	1013	19.2016	24.85	5.4194	0.9909	0.7727	0.7657	0.8750	4.742
19-ene-11	1025.50	1013	18.145	24.85	5.4194	0.9878	0.7302	0.7213	0.8493	4.603
21-ene-11	1017.60	1013	13.5792	24.85	5.4194	0.9955	0.5464	0.5440	0.7375	3.997
23-ene-11	1017.50	1013	12.5	24.85	5.4194	0.9956	0.5030	0.5008	0.7077	3.835
25-ene-11	1022.90	1013	15.9995	24.85	5.4194	0.9903	0.6438	0.6376	0.7985	4.327
27-ene-11	1016.20	1013	13.7157	24.85	5.4194	0.9969	0.5519	0.5502	0.7418	4.02
29-ene-11	1022.50	1013	14.0232	24.85	5.4194	0.9907	0.5643	0.5591	0.7477	4.052
31-ene-11	1028.10	1013	10.7099	24.85	5.4194	0.9853	0.4310	0.4247	0.6517	3.532
02-feb-11	1018.30	1013	5.3448	24.85	5.4194	0.9948	0.2151	0.2140	0.4626	2.507
04-feb-11	1014.70	1013	14.9418	24.85	5.4194	0.9983	0.6013	0.6003	0.7748	4.199
06-feb-11	1025.50	1013	15.8562	24.85	5.4194	0.9878	0.6381	0.6303	0.7939	4.303
08-feb-11	1021.10	1013	13.1125	24.85	5.4194	0.9921	0.5277	0.5235	0.7235	3.921

Pact: Presión actual; Pest: Presión estándar; Tact: Temperatura actual; Test: Temperatura estándar; (Mvol Qind +Bvol): Contante de succión del equipo; Pres Atm: presión atmosférica; Tem Atm: temperatura atmosférica; Pa \* Ta: multiplicación entre Pres Atm y Tem Atm; (PA \* TA) ½: División de la multiplicación anterior; Qact: Flujo actual.

Una vez que se obtiene el flujo se procede a sacar la concentración de partículas menores a 10 µm, para lo cual se utilizan las siguientes ecuaciones:

Flujo Patrón:  $F_{ptn} = (Q_{ini} + Q_{fin})/2$ ; y  $CtPM_{10} = ((W2 - W1)10^6)/(F_p)$

En la Tabla 4.9 se dan las concentraciones ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) de  $PM_{10}$  en los filtros, así como el proceso mediante el cual se obtuvieron.

Tabla 4.9.- Concentraciones de las PM<sub>10</sub> en los filtros de la zona rural

Fecha	Flujo Inicial	Q act	F patron	Diferencia de Peso	Peso Patron	Flujo patron2	mg/m3
07-ene-11	5	4.858	4.928776	1.008	1007800	7097.4378	141.994904
09-ene-11	5	4.971	4.985627	1.597	1597000	7179.3034	222.444978
11-ene-11	5	4.723	4.861699	1.746	1746400	7000.8472	249.455524
13-ene-11	5	4.791	4.895647	1.197	1196600	7049.7318	169.736955
15-ene-11	5	5.397	5.198726	1.698	1698400	7486.1661	226.871802
17-ene-11	5	4.742	4.871058	0.872	871800	7014.3242	124.288523
19-ene-11	5	4.603	4.801301	1.506	1505600	6913.8732	217.765059
21-ene-11	5	3.997	4.498533	1.118	1117800	6477.8872	172.556261
23-ene-11	5	3.835	4.417567	1.013	1013400	6361.2964	159.30715
25-ene-11	5	4.327	4.663712	1.226	1226200	6715.7446	182.585861
27-ene-11	5	4.02	4.509936	1.232	1231600	6494.3072	189.643016
29-ene-11	5	4.052	4.526071	1.683	1682800	6517.5421	258.195493
31-ene-11	5	3.532	4.265785	1.069	1068800	6142.7301	173.994297
02-feb-11	5	2.507	3.753403	1.616	1616200	5404.8998	299.024972
04-feb-11	5	4.199	4.599401	1.157	1156800	6623.1372	174.660431
06-feb-11	5	4.303	4.651268	0.610	610200	6697.8255	91.1041945
08-feb-11	5	3.921	4.46052	1.154	1154000	6423.1493	179.662647

Como se puede observar en la tabla anterior la mayoría de los días de la temporada de invierno se violó la norma mexicana de PM<sub>10</sub>, solo un día se mantuvo por debajo de esta norma, que fue el 6 de febrero del 2011. La zona rural fue la más contaminada en invierno, mucho más que la zona urbana y la zona montañosa, con un 95% de las muestras encima de la norma mexicana.

Así mismo se muestra la Figura 4.7 con las concentraciones ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) para PM<sub>10</sub>, la concentración de PM<sub>10</sub> es la línea horizontal es la norma mexicana:

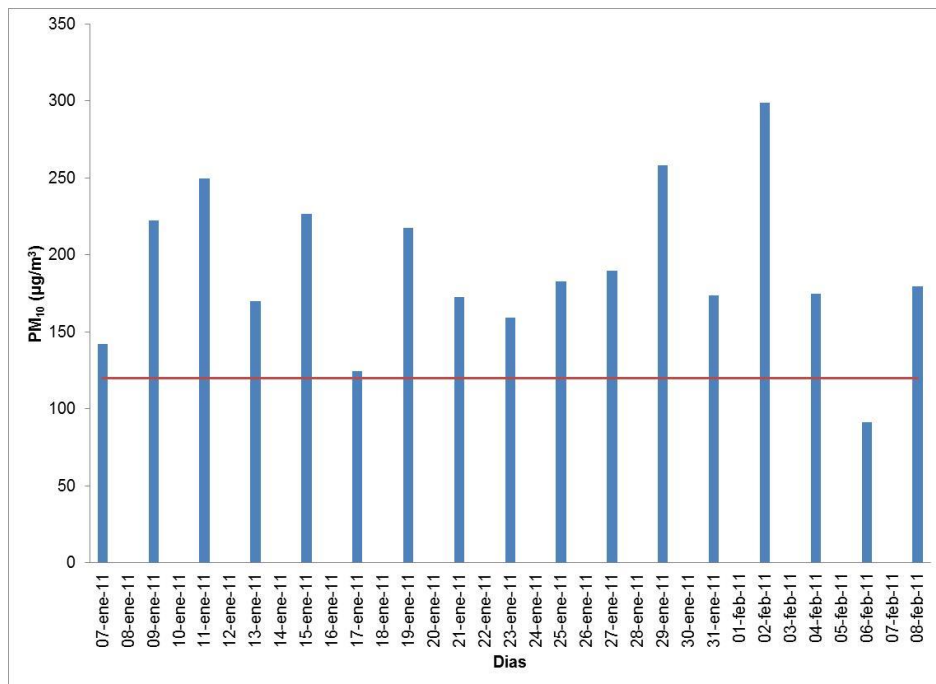


Figura 4.7.- Concentración de PM<sub>10</sub> con el filtro de teflón para la zona rural

Con respecto a la dirección del viento en la zona rural, la rosa de los vientos (Figura 4.8.) mostró que el viento venía en su mayoría de Noroeste con un promedio de 0.78 m/s, y con rachas provenientes del Norte en su mayoría mayores a 2 m/s (Figura 4.9).

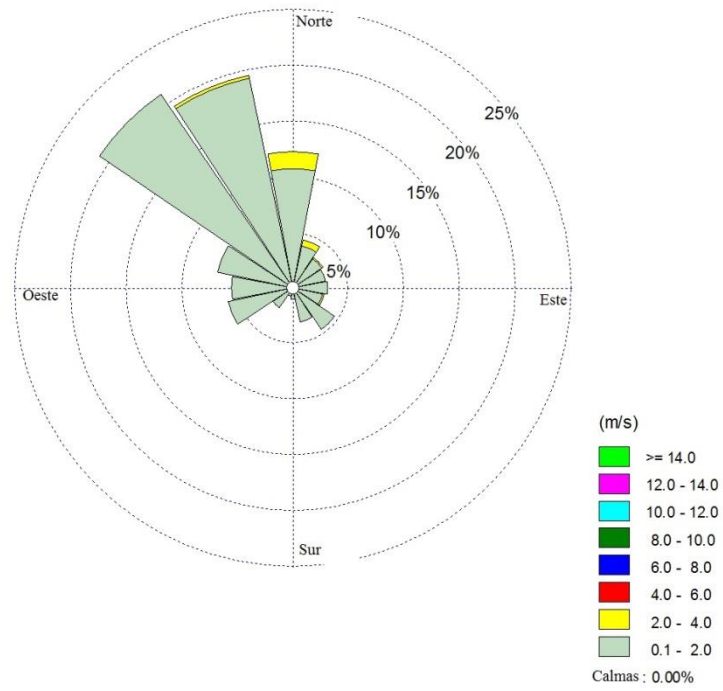


Figura 4.8.- Rosa de los vientos para la zona rural de Mexicali.

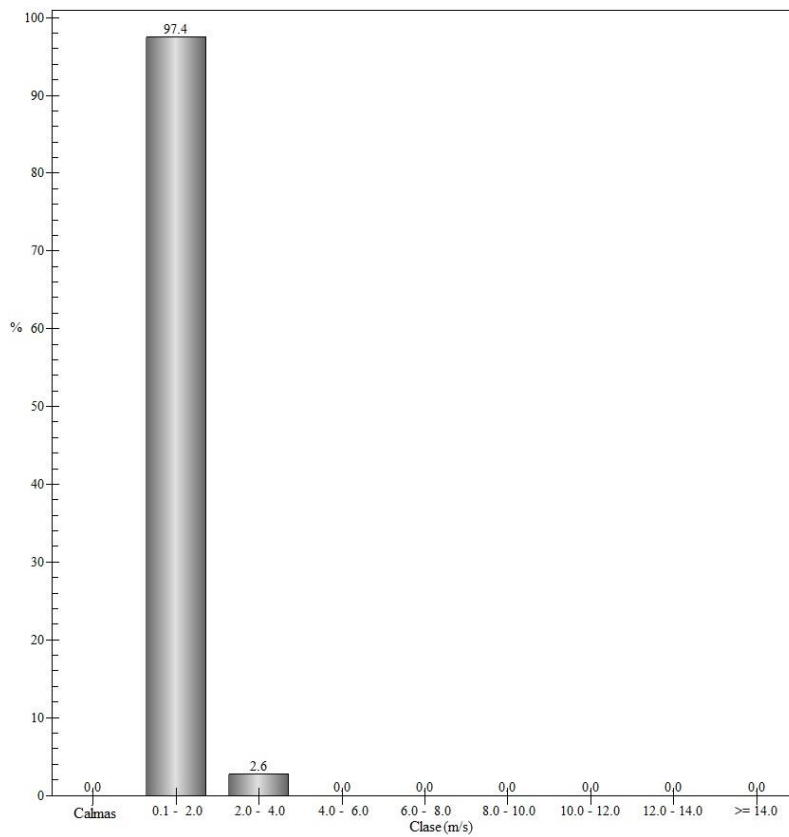


Figura 4.9.- Histograma de la velocidad del viento para la zona rural de Mexicali.

A pesar de ser una zona de estudio esporádica, solo canales en 2010, realmente realizo muestreó en la zona rural de Mexicali, en esa investigación el 80% de los datos estuvieron por encima de la norma mexicana, para esta investigación esta aumento al 90% de los datos, provocando un aumento en la percepción de la contaminación de la zona, posiblemente debido a que la mayoría de estrategias de mitigación de la contaminación no llegan a esa zona o simplemente debido a que se mantienen el alejamiento de servicios que normalmente se atribuyen a las zonas urbanas, a esto hay que agregar el aumento de tamaño de población de los antiguos ejidos, a la falta de planeación urbana y sobre todo a la quema a cielo abierto tanto de residuos de campos de cultivos como de basura doméstica y residencial, esto ha provocado que en la temporada de invierno, la zona rural de Mexicali sea la más contaminada para esta investigación.

#### 4.1.1.4.- Análisis estadístico

El análisis estadístico se hizo para verificar si había transportación de material particulado entre la zona urbana y la zona rural de Mexicali, así como la zona montañosa. Para esto se hace una comparación entre las tres zonas analizadas, lo cual se realizó con el programa Statistica 7. Para esto se le aplico a la totalidad de los datos de cada zona una prueba T para encontrar la probabilidad de similitudes entre zonas.

Se elaboró la siguiente tabla para tener las p encontradas de las pruebas T realizadas en cada zona de estudio (Tabla 4.10):

Tabla 4.10.- P encontradas mediante la prueba de T, para las zonas de estudio.

<b>Invierno</b>			
	<b>Zona Rural Teflón</b>	<b>Zona Rural Cuarzo</b>	<b>Zona Montañosa</b>
<b>Zona Urbana Teflón</b>	0.017555	-	0.106781
<b>Zona Urbana Cuarzo</b>	-	0.205945	-
<b>Zona Rural Teflón</b>	-	-	0.742542

Las únicas zonas que mantiene una relación muy cercana entre su contaminación son la zona urbana y la zona rural con el filtro de teflón con una de 0.017555. Con una p de .106781 se encuentran la zona urbana con la zona montañosa con el filtro de teflón. Las otras están muy alejadas y parece que no hay posibilidades de la relación entre contaminación encontrados en los filtros del muestreo.

Este resultado nos explica que en invierno es posible que la contaminación entre la zona urbana y la zona rural sean similares, más esto no explica que haya un transporte de material particulado entre zona y zona.

#### **4.1.2.- Temporada de verano**

Todos los filtros fueron colocados en un desecador por 24 horas con el fin de que sus pesos fueran constantes y no tuvieran humedad al pesarlos, debido al gran número de muestras, fueron desecados en dos grupos. Al sacar un grupo de filtros estos eran pesados en una microbalanza y al haber espacio en el desecador se procedía a colocar el segundo grupo de filtros mismos que al terminar de ser desecados eran pesados en la misma micro balanza.

#### 4.1.2.1.- La Rumorosa

Para esta nueva temporada se dispuso cambiar el sitio de muestreo de las casetas de la autopista La Rumorosa al edificio de la Estación de bomberos del mismo poblado a 500 metros de distancia buscando que las muestras fueran más parecidas a lo que se buscaba al principio de la investigación. Las razones para escoger la Estación fue que estaba más libre al aire y no tan encerrado, y sobre todo destacaba que constituía un lugar seguro para el equipo.

Para esta nueva experiencia solo se usó un equipo minivol, con filtro de teflón, debido a que solo se necesitaba para realizar el pesaje de material particulado y que sirviese como un blanco.

En la Tabla 4.11 se dan a conocer el peso inicial y final así como la diferencia de pesos ( $\mu\text{g}$ ) de los filtros del poblado La Rumorosa:

Tabla 4.11.- Análisis gravimétrico para los filtros del poblado La Rumorosa

Filtro	Peso Inicial	Peso Final	Diferencia de Peso
Rt1	150.6547	151.3815	0.7268
Rt2	154.935	155.4845	0.5495
Rt3	154.768	155.589	0.821
Rt4	147.1063	148.019	0.9127
Rt5	152.5847	153.73	1.1453
Rt6	153.246	153.5015	0.2555
Rt7	152.2927	153.548	1.2553
Rt8	154.649	155.3795	0.7305
Rt9	160.3477	160.57	0.2223
Rt10	146.229	146.4995	0.2705
Rt11	151.578	151.7415	0.1635
Rt12	157.1417	157.908	0.7663
Rt13	152.467	153.512	1.045
Rt14	152.1823	152.2055	0.0232
Rt15	144.5357	145.532	0.9963
Rt16	155.796	156.3045	0.5085

Para calcular el flujo final se necesitaron las siguientes constantes para el muestreador con filtro de teflón:  $m_{\text{vol}}$ : 0.9854;  $b_{\text{vol}}$ : 0.5487 y  $Q_{\text{ini}}$ : 5 L/min; otros datos fueron la presión atmosférica ( $P_{\text{atm}}$ ) y

temperatura del aire (Ta), obtenidos en la estación de monitoreo del FIARUM en el poblado la Rumorosa.

En la Tabla 4.12 se muestran los resultados sacados del flujo final en el filtro de teflón:

Tabla 4.12 Flujo patrón del muestreador que contenía los filtros de la zona montañosa.

Fecha	Pact	Pest	Tact	Test	(MvolQind + Bvol)	Pres Atm 1	Tem atm 1	PA * TA	(PA * TA)/2	Qact
07-ago-11	905.4875	1013	25.4531	24.85	5.4757	1.1187	1.0243	1.1459	1.0705	5.8615
09-ago-11	903.6753	1013	25.8032	24.85	5.4757	1.1210	1.0384	1.1640	1.0789	5.9076
11-ago-11	904.9761	1013	23.3750	24.85	5.4757	1.1194	0.9406	1.0529	1.0261	5.6187
13-ago-11	904.92	1013	25.3649	24.85	5.4757	1.1194	1.0207	1.1426	1.0689	5.8532
15-ago-11	904	1013	27.1979	24.85	5.4757	1.1206	1.0945	1.2265	1.1075	6.0641
17-ago-11	906.75	1013	28.0875	24.85	5.4757	1.1172	1.1303	1.2627	1.1237	6.1531
19-ago-11	903.43	1013	25.9375	24.85	5.4757	1.1213	1.0438	1.1704	1.0818	5.9238
21-ago-11	905.48	1013	25.2771	24.85	5.4757	1.1187	1.0172	1.1380	1.0668	5.8412
23-ago-11	904.98	1013	29.1813	24.85	5.4757	1.1194	1.1743	1.3145	1.1465	6.2779
25-ago-11	904.18	1013	29.3667	24.85	5.4757	1.1204	1.1818	1.3240	1.1506	6.3006
27-ago-11	906.29	1013	29.3396	24.85	5.4757	1.1177	1.1807	1.3197	1.1488	6.2903
29-ago-11	903.79	1013	28.9146	24.85	5.4757	1.1208	1.1636	1.3042	1.1420	6.2533
31-ago-11	901.58	1013	27.0271	24.85	5.4757	1.1236	1.0876	1.2220	1.1054	6.0531
02-sep-11	904.39	1013	26.8813	24.85	5.4757	1.1201	1.0817	1.2116	1.1007	6.0274
04-sep-11	903.94	1013	27.8271	24.85	5.4757	1.1206	1.1198	1.2549	1.1202	6.1340
06-sep-11	906.78	1013	25.8083	24.85	5.4757	1.1171	1.0386	1.1602	1.0771	5.8981

Una vez que se obtiene el flujo final se procede a obtener la concentración de partículas menores a 10 micrómetros, para lo cual se utilizan las siguientes ecuaciones:

Flujo Patrón:  $F_{pnt} = (Q_{ini} + Q_{fin})/2$ ; y  $PM_{10} = ((W2 - W1)10^6)/(F_p)$

En la Tabla 4.13 se dan la concentración ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) de  $PM_{10}$  en el filtro de teflón, así como el proceso mediante el cual se obtuvo, usándose datos proporcionados por el FIARUM:.

Tabla 4.13.- Concentraciones de las  $PM_{10}$  en el filtro de teflón para la zona montañosa

Fecha	Flujo Inicial	Q act	F patron	Diferencia de Peso	Peso Patron	Flujo patron2	mg/m3
07-ago-11	5	5.8615	5.4308	0.7268	726833.3333	7820.2968	92.9419
09-ago-11	5	5.9076	5.4538	0.5495	549500	7853.4808	69.9690
11-ago-11	5	5.6187	5.3094	0.8210	821000	7645.4881	107.3836
13-ago-11	5	5.8532	5.4266	0.9127	912666.6667	7814.2982	116.7945
15-ago-11	5	6.0641	5.5320	1.1453	1145333.3333	7966.1361	143.7753
17-ago-11	5	6.1531	5.5765	0.2555	255500	8030.2316	31.8173
19-ago-11	5	5.9238	5.4619	1.2553	1255333.3333	7865.1123	159.6078
21-ago-11	5	5.8412	5.4206	0.7305	730500	7805.6945	93.5855
23-ago-11	5	6.2779	5.6389	0.2223	222333.3333	8120.0800	27.3807
25-ago-11	5	6.3006	5.6503	0.2705	270500	8136.4230	33.2456
27-ago-11	5	6.2903	5.6452	0.1635	163500	8129.0493	20.1131
29-ago-11	5	6.2533	5.6266	0.7663	766333.3333	8102.3409	94.5817
31-ago-11	5	6.0531	5.5266	1.0450	1045000	7958.2398	131.3104
02-sep-11	5	6.0274	5.5137	0.0232	23166.66667	7939.7081	2.9178
04-sep-11	5	6.1340	5.5670	0.9963	996333.3333	8016.4947	124.2854
06-sep-11	5	5.8981	5.4490	0.5085	508500	7846.6130	64.8050

Como se observa en la Tabla 4.13, hubo en total 4 violaciones para la norma mexicana de  $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , los días violados fueron el 15 de agosto, el 19 de agosto, el 31 de agosto y por último el 4 de septiembre del 2011, aproximadamente el 24% de las muestras están por arriba de la norma mexicana.

Así mismo se muestra en la Figura 4.10 la concentración ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) para  $\text{PM}_{10}$  con el filtro de teflón, En línea horizontal se encuentra la norma mexicana:

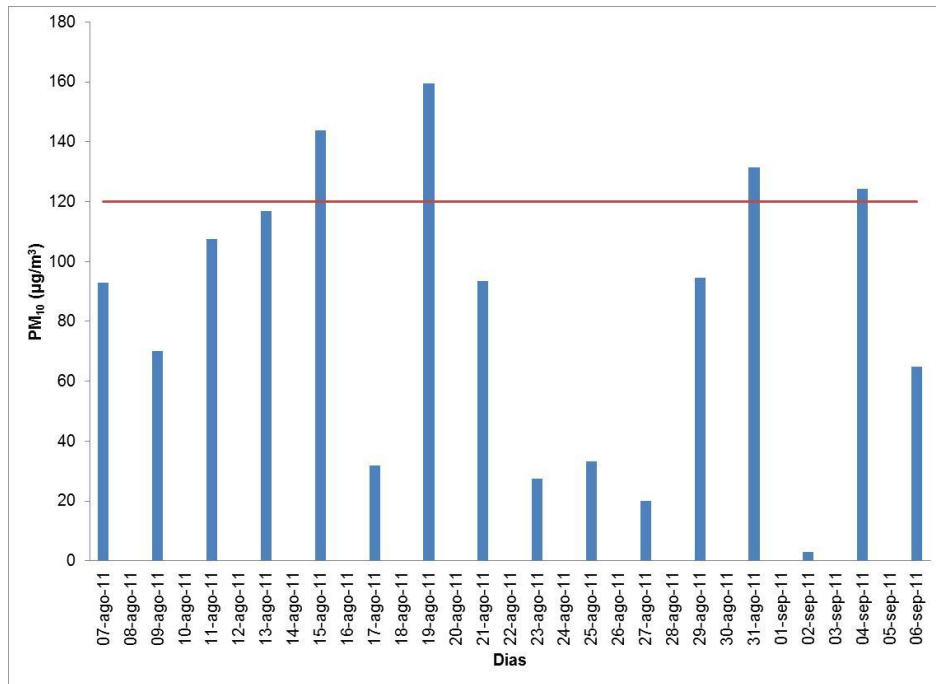


Figura 4.10.- Concentración de PM<sub>10</sub> con los filtros para la zona montañosa

Los datos para esta nueva temporada fueron significativos, ya que se violó la norma mexicana en 4 veces (Figura 4.10), lo cual se pensó que no pasaría, esto tal vez se deba a que está a menos de 20 metros de la carretera federal y la cercanía de minas de yeso que pudieron contaminar el lugar. Esto se discernirá en otra oportunidad ya que no se analizaron los filtros para composición química.

Tomando en cuenta la rosa de los vientos, se puede notar que proliferan los vientos provenientes del Sur – Suroeste (Figura 4.11), con una velocidad promedio de 8.28 m/s y con rachas de vientos provenientes del Sur – Suroeste mayores a 8 m/s, además se pueden notar un 1% de calmas (Figura 4.12).

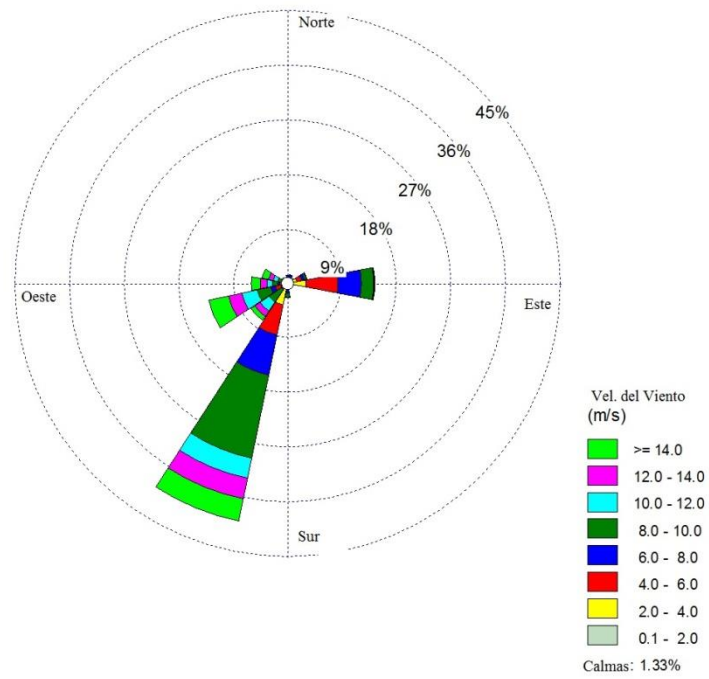


Figura 4.11.- Rosa de los vientos para la zona montañosa.

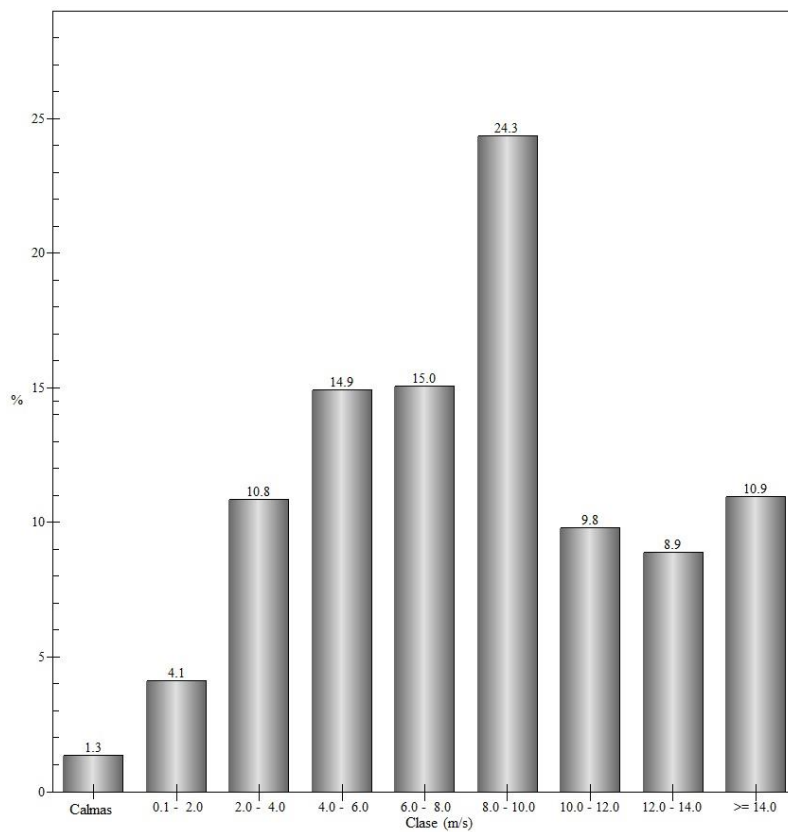


Figura 4.12.- Histograma de la velocidad del viento para la zona montañosa.

Aun cuando los resultados sobre material particulado PM10, se redujeron de una temporada a otra, algunos días se mantiene por arriba de la norma mexicana de  $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , provocando que con esto la zona montañosa señalada como testigo no sea la zona idónea, ya que al ser una zona donde el paso de automotores es continuo, puede provocar un aumento considerable de contaminación, además que la meteorología del lugar propicia la resuspensión del polvo colindante.

#### 4.1.2.2.- Zona urbana de Mexicali

Los sitios de muestreo son los mismos seleccionados de antemano, el techo del Instituto de Ingeniería de la UABC para la zona urbana de Mexicali.

En la Tabla 4.14 se dan a conocer los pesos iniciales y finales, además de la diferencia de peso ( $\mu\text{g}$ ) en los filtros de la zona urbana de Mexicali:

Tabla 4.14.- Análisis gravimétrico para los filtros de la zona urbana de Mexicali

Filtro	Peso Inicial	Peso Final	Diferencia de Peso
Mt1	146.9487	147.2307	0.2820
Mt2	146.3190	147.1023	0.7833
Mt3	144.7557	145.7783	1.0227
Mt4	146.5193	148.1897	1.6703
Mt5	145.5933	146.3710	0.7777
Mt6	145.4957	146.8670	1.3713
Mt7	146.4340	147.4595	1.0255
Mt8	147.3523	148.3520	0.9997
Mt9	146.0307	147.3415	1.3108
Mt10	145.8373	147.0150	1.1777
Mt11	144.9440	146.7350	1.7910
Mt12	146.1143	147.4645	1.3502
Mt13	143.6043	144.4695	0.8652
Mt14	150.5293	151.7870	1.2577
Mt15	146.5927	147.5695	0.9768
Mt16	145.0467	145.8875	0.8408

Para calcular el flujo final se necesitaron las siguientes constantes para el muestreador con filtro de teflón:  $m_{\text{vol}}$ : 1.0015;  $b_{\text{vol}}$ : 0.4064 y  $Q_{\text{ini}}$ : 5 L/min; con filtro de cuarzo:  $m_{\text{vol}}$ : 0.9854;  $b_{\text{vol}}$ : 0.5487 y

$Q_{ini}$ : 5 L/min; Otros datos fueron la presión atmosférica y temperatura del aire, obtenidos en la estación de monitoreo de UABC en el instituto de Ingeniería de la UABC en la ciudad de Mexicali.

En la Tabla 4.15 se muestran los resultados sacados de flujo final en los filtros.

Tabla 4.15.- Flujo patrón del muestreador que contenía los filtros en la zona urbana de Mexicali

Fecha	Pact	Pest	Tact	Test	(Mvol Qind + Bvol)	Pres atm 1	Tem Atm 1	PA * TA	(PA * TA) 1/2	Qact
07-ago-11	1015	1013	37.7	24.85	5.4139	0.9977	1.5171	1.5137	1.2303	6.6608
09-ago-11	1013	1013	35.8	24.85	5.4139	1.0001	1.4406	1.4408	1.2003	6.4984
11-ago-11	1016	1013	32.9	24.85	5.4139	0.9974	1.3239	1.3205	1.1491	6.2213
13-ago-11	1015	1013	34.4	24.85	5.4139	0.9983	1.3843	1.3820	1.1756	6.3644
15-ago-11	1013	1013	34.8	24.85	5.4139	0.9997	1.4004	1.4000	1.1832	6.4058
17-ago-11	1016	1013	36.8	24.85	5.4139	0.9970	1.4809	1.4764	1.2151	6.5783
19-ago-11	1013	1013	33.9	24.85	5.4139	1.0000	1.3642	1.3642	1.1680	6.3233
21-ago-11	1015	1013	34.9	24.85	5.4139	0.9980	1.4044	1.4017	1.1839	6.4096
23-ago-11	1013	1013	39.0	24.85	5.4139	1.0000	1.5694	1.5694	1.2528	6.7823
25-ago-11	1012	1013	38.2	24.85	5.4139	1.0010	1.5372	1.5387	1.2405	6.7157
27-ago-11	1015	1013	37.8	24.85	5.4139	0.9980	1.5211	1.5181	1.2321	6.6706
29-ago-11	1012	1013	37.7	24.85	5.4139	1.0010	1.5171	1.5186	1.2323	6.6716
31-ago-11	1011	1013	37.1	24.85	5.4139	1.0020	1.4930	1.4959	1.2231	6.6216
02-sep-11	1014	1013	35.8	24.85	5.4139	0.9990	1.4406	1.4392	1.1997	6.4949
04-sep-11	1012	1013	39.7	24.85	5.4139	1.0010	1.5976	1.5992	1.2646	6.8463
06-sep-11	1017	1013	35.3	24.85	5.4139	0.9961	1.4205	1.4149	1.1895	6.4399

Pact: Presión actual; Pest: Presión estándar; Tact: Temperatura actual; Test: Temperatura estándar; (Mvol Qind +Bvol): Contante de succión del equipo; Pres Atm: presión atmosférica; Tem Atm: temperatura atmosférica; Pa \* Ta: multiplicación entre Pres Atm y Tem Atm; (PA \* TA) 1/2: División de la multiplicación anterior; Qact: Flujo actual.

Una vez que se obtiene el flujo final se procede a sacar la concentración de partículas menores a 10 micrómetros, para lo cual se utilizan las siguientes ecuaciones:

Flujo Patrón:  $F_{ptn} = (Q_{ini} + Q_{fin})/2$ ; y  $PM_{10} = ((W2 - W1)10^6)/(F_p)$

En la Tabla 4.16 se dan las concentraciones ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) de  $PM_{10}$ , así como el proceso mediante el cual se obtuvieron.

Tabla 4.16.- Concentraciones de las PM<sub>10</sub> en los filtros de la zona urbana

Fecha	Flujo Inicial	Q act	F patron	Diferencia de Peso	Peso Patron	Flujo patron2	mg/m3
07-ago-11	5	6.6608	5.8304	0.2820	282000	8395.7829	33.5883
09-ago-11	5	6.4984	5.7492	0.7833	783333	8278.8477	94.6186
11-ago-11	5	6.2213	5.6107	1.0227	1022667	8079.3553	126.5778
13-ago-11	5	6.3644	5.6822	1.6703	1670333	8182.3986	204.1374
15-ago-11	5	6.4058	5.7029	0.7777	777667	8212.1841	94.6967
17-ago-11	5	6.5783	5.7891	1.3713	1371333	8336.3468	164.5005
19-ago-11	5	6.3233	5.6617	1.0255	1025500	8152.8085	125.7849
21-ago-11	5	6.4096	5.7048	0.9997	999667	8214.9175	121.6892
23-ago-11	5	6.7823	5.8912	1.3108	1310833	8483.2823	154.5196
25-ago-11	5	6.7157	5.8579	1.1777	1177667	8435.3251	139.6113
27-ago-11	5	6.6706	5.8353	1.7910	1791000	8402.8291	213.1425
29-ago-11	5	6.6716	5.8358	1.3502	1350167	8403.5761	160.6657
31-ago-11	5	6.6216	5.8108	0.8652	865167	8367.5541	103.3954
02-sep-11	5	6.4949	5.7475	1.2577	1257667	8276.3476	151.9591
04-sep-11	5	6.8463	5.9232	0.9768	976833	8529.3454	114.5262
06-sep-11	5	6.4399	5.7199	0.8408	840833	8236.7228	102.0835

En la Tabla 4.16, se observa como en la mayoría de los días, los filtros exceden la norma mexicana, haciéndose un total de 10 violaciones, siendo algo muy alto para una temporada de verano, y rebasando por mucho las expectativas que ya se tenían de muestreos anteriores.

Así mismo se muestra la Figura 4.13 con las concentraciones ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) para PM<sub>10</sub>, donde la línea horizontal es la norma mexicana de PM<sub>10</sub>:

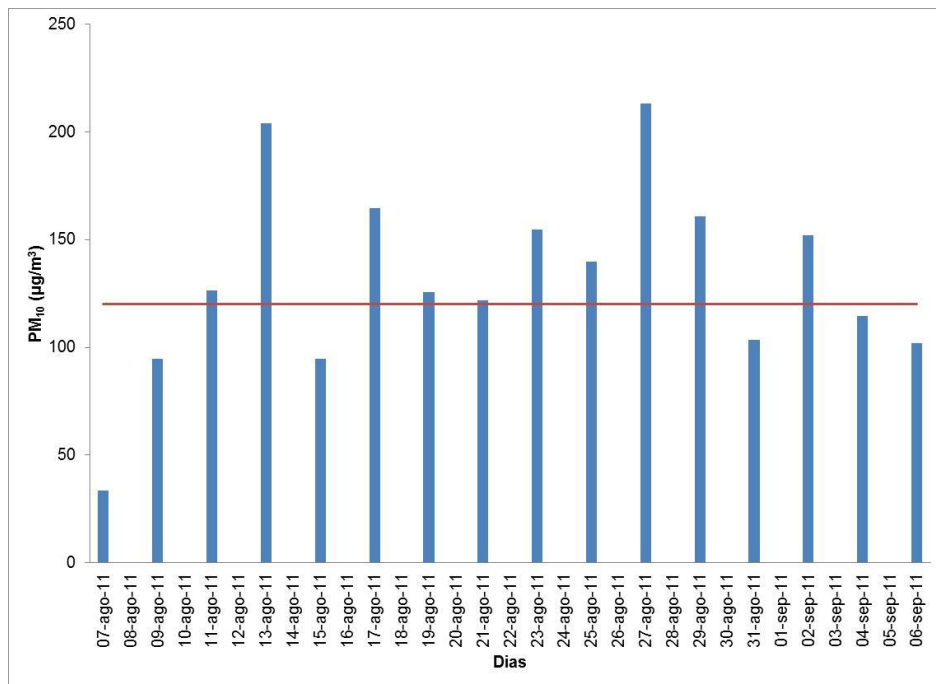


Figura 4.13.- Concentración de PM<sub>10</sub> para los filtros de la zona urbana

En la Figura 4.13 vemos que la mayoría de los días se violó la norma mexicana, dejando a la zona urbana como la más contaminada.

Respecto a la dirección de los vientos, la rosa de los vientos (Figura 4.14) nos enseñó que el viento procedió en su mayoría del Sureste con vientos promedios de 1.95 m/s, y con rachas provenientes del Sureste mayores de 4 m/s, además se encontraron un 8% de calmas (Figura 4.15).

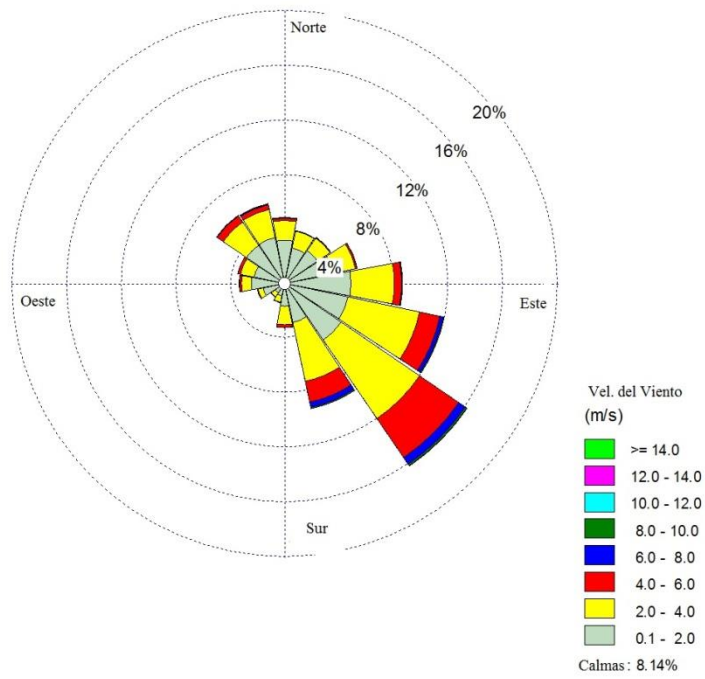


Figura 4.14.- Rosa de los viento para la zona urbana de Mexicali

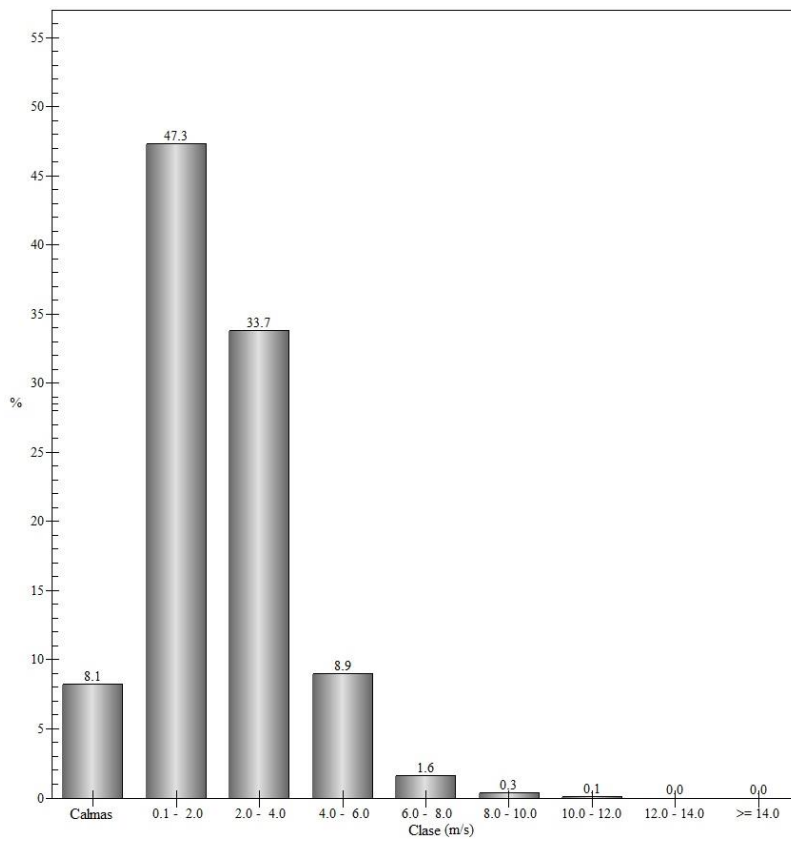


Figura 4.15.- Histograma de la velocidad del viento para la zona urbana de Mexicali

En una comparación entre temporadas, se encontró una pequeña diferencia en los niveles de material particulado en la región, esto posiblemente se debió al descenso de contaminantes en esta época del año y a la no aparición de la inversión térmica tan característica en invierno.

Como dato histórico, para Chow et al, 1997, la zona urbana de Mexicali para 1992, solo presenta un 30% de datos por arriba de la norma mexicana, pero para el 2008 según Canales, 2010, la contaminación ha aumentado al 40% de los datos, esto es un aumento del 10% de 1992 a 2008, para la investigación actual esta ha aumentado a 60% de los datos, provocando en solo 3 años un aumento considerable de contaminación por material particulado en la zona urbana, durante el verano, las razones de este aumento pueden ser variadas ya sea debido al polvo proveniente de camino pavimentados y no pavimentado, hasta de la quema de carbón por asaderos.

#### 4.1.2.3.- Zona rural de Mexicali

En la Tabla 4.17 se da a conocer los pesos iniciales y finales así como la diferencia de peso ( $\mu\text{g}$ ) de los filtros de la zona rural de Mexicali:

Tabla 4.17- Análisis gravimétrico para los filtros de la zona rural de Mexicali

Filtro	Peso Inicial	Peso Final	Diferencia de Peso
Vt1	147.3743	147.7535	0.3792
Vt2	147.1963	148.8935	1.6972
Vt3	145.7390	146.1885	0.4495
Vt4	146.2307	146.7380	0.5073
Vt5	145.3523	146.6685	1.3162
Vt6	145.4530	146.5900	1.1370
Vt7	145.2960		
Vt8	144.3373	145.5520	1.2147
Vt9	146.1397	147.2570	1.1173
Vt10	145.0770	145.9130	0.8360
Vt11	144.5407	147.9035	3.3628
Vt12	145.6190	146.2750	0.6560
Vt13	146.2273	147.2060	0.9787
Vt14	145.2760	146.4760	1.2000
Vt15	145.3927	146.0100	0.6173
Vt16	144.2460	145.3070	1.0610

Para calcular el flujo final se necesitaron las siguientes constantes para el muestreador con filtro de cuarzo:  $m_{vol}$ : 1.0219;  $b_{vol}$ : -0.2059 y  $Q_{ini}$ : 5 L/min; con filtro de teflón:  $m_{vol}$ : 0.9652;  $b_{vol}$ : 0.5934 y  $Q_{ini}$ : 5 L/min; Otros datos fueron la presión atmosférica y temperatura del aire, dados por CONAGUA de la estación de monitoreo que está en el Ejido Nuevo León, a 19 kilómetros del ejido Guadalupe Victoria.

En la Tabla 4.18 se muestran los resultados sacados de flujo final en los filtros.

Tabla 4.18.-  $Q_{fin}$  (flujo patrón) del muestreado que contenían los filtros en la zona rural

Fecha	Pact	Pest	Tact	Test	(MvolQind + Bvol)	Pres Atm 1	Tem atm 1	PA * TA	(PA * TA) <sup>1/2</sup>	Qact
07-ago-11	1008	1013	26.3	24.85	5.4194	1.0050	1.0584	1.0636	1.0313	5.5891
09-ago-11	1009.7	1013	26.0	24.85	5.4194	1.0033	1.0463	1.0497	1.0245	5.5524
11-ago-11	1007.1	1013	23.6	24.85	5.4194	1.0059	0.9497	0.9553	0.9774	5.2968
13-ago-11	1006.9	1013	25.4	24.85	5.4194	1.0061	1.0221	1.0283	1.0141	5.4956
15-ago-11	1007.70	1013	25.8	24.85	5.4194	1.0053	1.0382	1.0437	1.0216	5.5365
17-ago-11	1007.30	1013	27.5	24.85	5.4194	1.0057	1.1066	1.1129	1.0549	5.7172
19-ago-11	1006.90	1013	27.3	24.85	5.4194	1.0061	1.0986	1.1052	1.0513	5.6975
21-ago-11	1004.90	1013	24	24.85	5.4194	1.0081	0.9658	0.9736	0.9867	5.3473
23-ago-11	1007.50	1013	26.2	24.85	5.4194	1.0055	1.0543	1.0601	1.0296	5.5798
25-ago-11	1006.70	1013	29	24.85	5.4194	1.0063	1.1670	1.1743	1.0837	5.8728
27-ago-11	1006.30	1013	29.2	24.85	5.4194	1.0067	1.1751	1.1829	1.0876	5.8941
29-ago-11	1005.30	1013	28.7	24.85	5.4194	1.0077	1.1549	1.1638	1.0788	5.8464
31-ago-11	1004.10	1013	22.9	24.85	5.4194	1.0089	0.9215	0.9297	0.9642	5.2254
02-sep-11	1008.20	1013	27.8	24.85	5.4194	1.0048	1.1187	1.1240	1.0602	5.7457
04-sep-11	1006.00	1013	26.3	24.85	5.4194	1.0070	1.0584	1.0657	1.0323	5.5946
06-sep-11	1004.50	1013	27.4	24.85	5.4194	1.0085	1.1026	1.1119	1.0545	5.7147

Una vez que se obtiene el flujo final se procede a sacar la concentración de partículas menores a 10  $\mu\text{m}$ , para lo cual se utilizan las siguientes ecuaciones:

Flujo Patrón:  $F_{ptn} = (Q_{ini} + Q_{fin})/2$ ; y  $PM_{10} = ((W2 - W1)10^6)/(Fp)$

En la Tabla 4.19 se dan las concentraciones ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) de  $PM_{10}$ , así como el proceso mediante el cual se obtuvieron, usándose para este caso los datos de CONAGUA ejido Nuevo León.

Tabla 4.19.- Concentraciones de las PM<sub>10</sub> en los filtros de la zona rural

Fecha	Flujo Inicial	Q act	F patron	Diferencia de Peso	Peso Patron	Flujo patron2	mg/m3
07-ago-11	5	5.589080197	5.294540099	0.379	379166.6667	7624.1377	49.7324
09-ago-11	5	5.552431751	5.276215875	1.697	1697166.667	7597.7509	223.3775
11-ago-11	5	5.296786118	5.148393059	0.449	449500	7413.6860	60.6311
13-ago-11	5	5.495616528	5.247808264	0.507	507333.3333	7556.8439	67.1356
15-ago-11	5	5.536521068	5.268260534	1.316	1316166.667	7586.2952	173.4927
17-ago-11	5	5.717151003	5.358575502	1.137	1137000	7716.3487	147.3495
19-ago-11	5	5.697454771	5.348727385				
21-ago-11	5	5.347329314	5.173664657	1.215	1214666.667	7450.0771	163.0408
23-ago-11	5	5.579828508	5.289914254	1.117	1117333.333	7617.4765	146.6802
25-ago-11	5	5.872752491	5.436376246	0.836	836000	7828.3818	106.7909
27-ago-11	5	5.894139665	5.447069833	3.363	3362833.333	7843.7806	428.7261
29-ago-11	5	5.846363849	5.423181925	0.656	656000	7809.3820	84.0015
31-ago-11	5	5.225429476	5.112714738	0.979	978666.6667	7362.3092	132.9293
02-sep-11	5	5.745684628	5.372842314	1.200	1200000	7736.8929	155.1010
04-sep-11	5	5.594633185	5.297316592	0.617	617333.3333	7628.1359	80.9285
06-sep-11	5	5.714694835	5.357347418	1.061	1061000	7714.5803	137.5318

Como se observa en la Tabla 4.19, la mayoría de los días se mantuvo por arriba de la norma mexicana, siendo una de las zonas más contaminadas de la región, aun así la zona urbana fue la más contaminada.

Así mismo se muestra la Figura 4.16 con las concentraciones ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) para PM<sub>10</sub>, donde la línea horizontal es la norma mexicana:

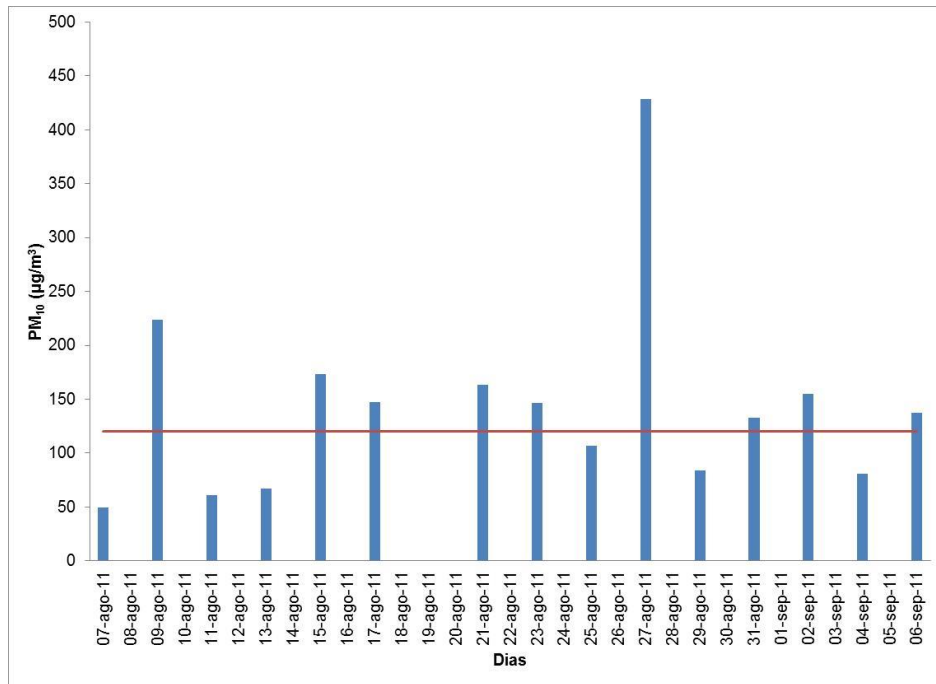


Figura 4.16.- Concentración de PM<sub>10</sub> con los filtros para la zona rural

Mientras tanto para el filtro de teflón se observa como la mayoría estuvo por encima de la norma Mexicana sobre todo el acaecido el 27 de agosto del 2011 que muestra unos niveles muy inusuales.

En la rosa de los vientos para esta zona (Figura 4.17) se notó como la dirección de los vientos dominante provino del Sureste con un promedio de 1.11 m/s, con rachas provenientes en su mayoría del este que sobrepasaban los 2 m/s (Figura 4.18).

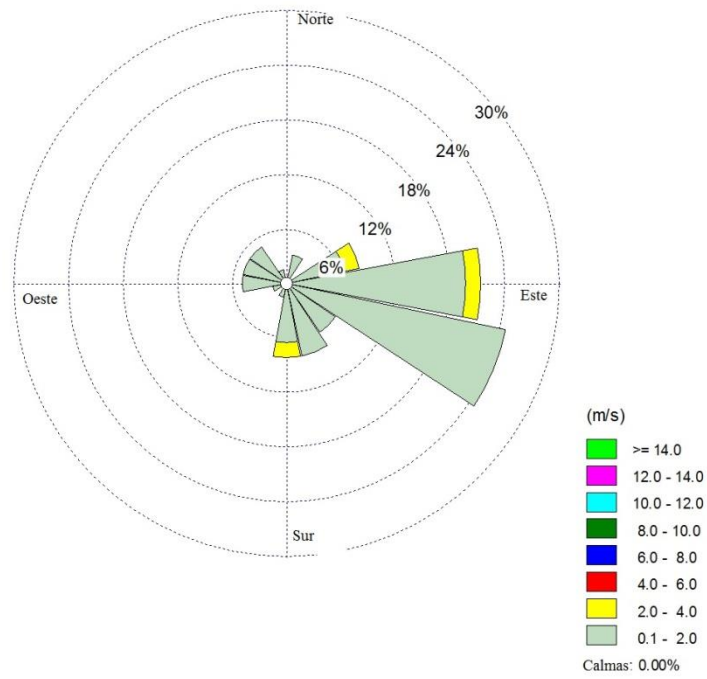


Figura 4.17.- Rosa de los vientos para la zona rural de Mexicali

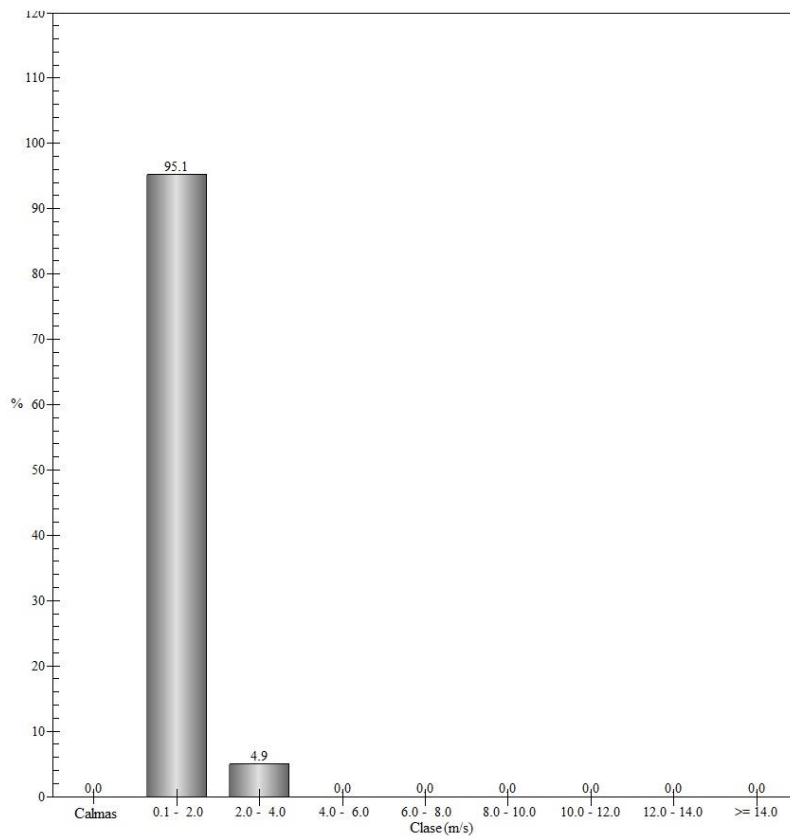


Figura 4.18.- Histograma de la velocidad de viento para la zona rural de Mexicali

Por temporadas hubo una leve disminución en comparación con invierno, aun así se mantienen muchos días por arriba de la norma mexicana de  $PM_{10}$ , 60% de verano contra el 90% de invierno, es apenas algo perceptible esta reducción. A esto hay que agregar que históricamente solo Canales, 2010, ha realizado investigaciones en la zona rural de Mexicali y que los equipos de la red de calidad del aire de SPA están muy lejanos.

Para Canales, 2010, solo 4 días de los 15 analizados presentaron niveles por arriba de la norma mexicana de  $PM_{10}$ , para esta investigación, 10 de los 16 días están por arriba, esto posiblemente se deba nuevamente al abandono de las autoridades a los diferentes ejidos que hay en la zona rural y a la falta de leyes para regular las quemadas de residuos agrícolas, así como incendios en algunas zonas conocidas como basureros.

#### 4.1.2.4.- Análisis estadístico

Para esta temporada se hizo algo similar, calcular la posibilidad de tener una similitud entre la contaminación entre las tres zonas bajo estudio, para eso se usó la prueba t. Para esto se aplicaron la totalidad de los datos encontrados en los análisis de muestreos durante la temporada de verano.

En la tabla 4.20 podemos encontrar las p encontradas con la prueba t, para las tres zonas bajo estudio:

Tabla 4.20.- P encontradas mediante la prueba de T, para las zonas de estudio.

<b>Verano</b>			
	<b>Zona Rural Teflón</b>	<b>Zona Rural Cuarzo</b>	<b>Zona Montañosa</b>
<b>Zona Urbana Teflon</b>	0.903229	-	0.005038
<b>Zona Urbana Cuarzo</b>	-	0.3258701	-
<b>Zona Rural Teflón</b>	-	-	0.059576

Las zonas que mantiene una relación muy cercana entre su contaminación son la zona urbana con la zona montañosa y la zona rural con la zona montañosa, esto con el filtro de teflón con una p de 0.005038 y .059576. Las otras están muy alejadas y parece que no hay posibilidades de la relación entre contaminación encontrados en los filtros del muestreo.

Este resultado nos explica que en verano es posible que la contaminación entre la zona urbana y la zona montañosa, además de la zona rural y zona montañosa sea similar, más esto no explica que haya un transporte de material particulado entre zona y zona.

Como un pequeño resumen comparativo con la investigación realizada por Canales, 2010, los niveles de material particulado  $PM_{10}$  de esta investigación fueron menores para la temporada de invierno, exceptuando para la zona rural/cuarzo, la cual en esta investigación fue mayor. Para la temporada de verano, los datos de esta investigación son mayores a los presentados por Canales en el 2010.

Tanto los niveles de  $PM_{10}$ , como el número de violaciones demuestran que la contaminación es mucho más alta en la temporada de invierno que en la de verano, e incluso aumentó en comparación con otra investigación similar del año 2010, donde las violaciones a la norma mexicana fueron menores (Canales, 2010). A diferencia de la anterior investigación en esta la mayor contaminación para la temporada de invierno se detectó en la zona rural, debido a las quema de combustibles

fósiles, mientras en la temporada de verano la mayor contaminación se asoció a la zona urbana, debido en su mayoría al polvo y al tráfico vehicular.

#### **4.2.- Caracterización química y orígenes de PM<sub>10</sub>**

Se establecieron 3 orígenes de material particulado: fuentes móviles, fuentes fijas y el material geológico, este último es el de mayor proporción en las zonas investigadas ya que procede directamente del polvo arrastrado por el viento, por la industria de la construcción, re-suspensión de las vías no pavimentadas o pavimentadas y por la generada por el tráfico vehicular. Los otros dos proceden de automóviles en mal estado e industrias contaminantes.

Se encontraron también nitratos, sulfatos y amonio, mismo que terminan siendo parte de las PM<sub>10</sub>, que provienen principalmente de fuentes móviles y que no aportan plomo. Asimismo se reportan carbón elemental y carbón orgánico, procedentes de la combustión de los automóviles y de las quemaduras de residuos agrícolas respectivamente y por último se puede decir que los iones derivados de los fluoruros, nitratos, sulfatos y amonios, son de origen mayoritariamente secundarios y provienen de la relación de precursores gaseosos naturales y antropogénicos, por lo tanto es posible que su presencia esté asociada con la dinámica de la atmósfera regional.

El análisis elemental se realizó mediante la técnica EDX (Espectroscopia de Análisis de Dispersión de Rayos x) la cual es ideal para determinar la composición química del material particulado PM<sub>10</sub>, dado que se puede analizar un gran número de elementos. La preparación de muestras es sencilla y segura, ya que no son de carácter destructivo y tienen excelentes niveles de detección sobre un gran número de elementos de la tabla periódica. Entre los elementos químicos detectados mediante esta técnica, se encuentran: sodio (Na), aluminio (Al), magnesio (Mg), silicio (Si), azufre (S), potasio (K), calcio (Ca), hierro (Fe), cloro (Cl) y titanio (Ti), principalmente.

Para la determinación de aniones y cationes fue necesaria la cromatografía iónica, la cual tiene como objeto determinar las concentraciones de iones inorgánicos solubles en agua presentes en los filtros de muestreo de PM<sub>10</sub>, siendo de interés los siguientes aniones: nitratos (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>), nitritos (NO<sub>2</sub><sup>-</sup>), sulfatos (SO<sub>4</sub><sup>-</sup>), cloruros (Cl<sup>-</sup>), fluoruros (F<sup>-</sup>), bromuros (Br<sup>-</sup>), fosfatos (PO<sub>4</sub><sup>-</sup>) y los respectivos cationes, amonio (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>), calcio (Ca<sup>2+</sup>), sodio (Na<sup>+</sup>), potasio (K<sup>+</sup>) y magnesio (Mg<sup>2+</sup>).

El método se basa en la aplicación de la cromatografía líquida de alta resolución, en su variante iónica, para la separación de los iones presentes en los extractos acuosos del material particulado depositado. Este tipo de cromatografía se subdivide en cromatografía de intercambio catiónico y de intercambio aniónico, que retienen especies catiónicas (M<sup>+</sup>) y aniónicas (B<sup>-</sup>), respectivamente, en la fase estacionaria.

La parte carbonácea del material particulado está compuesto por carbón elemental (CE) y materia orgánica o carbón orgánico (CO), el carbón elemental, también llamado black carbón o soot, es una especie que absorbe la luz eficientemente y tiene una estructura muy similar al grafito impuro y es producido solo en procesos de combustión. La materia orgánica es una mezcla compleja de muchas clases de compuestos orgánicos y es emitido directamente por fuentes primarias y formadas en procesos de reacción secundaria en la atmósfera siendo parte de los denominados compuestos orgánicos secundarios.

Para la determinación del carbono orgánico y elemental se usó el método de Transmitancia Óptica Térmica, este análisis es destructivo de la muestra y se basa en someter a la muestra a un tratamiento térmico y medir la reflectancia y/o transmitancia en el tiempo y bajo diferentes condiciones de temperatura y gases atmosféricos inyectados al equipo. Las especies presentes en las PM<sub>10</sub> se dividen en 5 grupos de especies: sulfatos de amonio, nitratos de amonio, carbón orgánico,

carbón elemental y material geológico. Como ya se ha comentado la materia proveniente del carbón está formada por carbón elemental y carbón orgánico.

Los iones inorgánicos solubles incluyen partículas secundarias como sulfato, amonio y nitrato. Dependiendo del lugar, la sal de nitrato o sulfato, domina la composición de partículas finas inorgánicas. En las partículas finas, el nitrato es el resultado de la acción entre el ácido nítrico gaseoso y amoniaco para formar nitrato de amonio. El nitrato de amonio se forma en áreas donde las concentraciones de amoniaco y ácido nítrico son altas y del sulfato son bajas. Dependiendo de la humedad del lugar, el nitrato de amonio, puede existir como sal sólida o como una gota con solución acuosa de  $\text{NH}_4^+$  y  $\text{NO}_3^-$ . La mayoría de los sulfatos finos son el resultado de procesos químicos que convierten el  $\text{SO}_2$  gaseoso en especies sulfato. En este caso, el sulfato representa la concentración total asociada con el azufre elemental, no solo el ión. Así, el sulfato es la masa del ión sulfato amoniacal.

El sodio y el cloro (sal marina) está presente en partículas con altas concentraciones de aerosoles marinos. El potasio y el calcio en la fracción gruesa, provienen del polvo terrestre. Además de eso, el potasio acuoso soluble se asocia con otras fuentes como la sal marina, quema de biomasa y origen biogénico. En cuanto a los elementos traza, más de 40 elementos se han identificado en las partículas atmosféricas. Estos provienen de procesos de combustión, incineración, polvo, desgaste de materiales, etc. El material geológico se estima usando los principales elementos asociados a esta, como son aluminio, silicio, fierro y calcio.

## 4.2.1.- Temporada de Invierno

### 4.2.1.1.- Zona urbana

Espectroscopia de Análisis de Dispersión de Rayos x (EDX)

Mediante el uso de EDX, se realizaron exámenes a los filtros que contenían las concentraciones de  $PM_{10}$  más elevadas de material particulado  $PM_{10}$  de la zona urbana. La muestra analizada fue del día 6 de febrero.

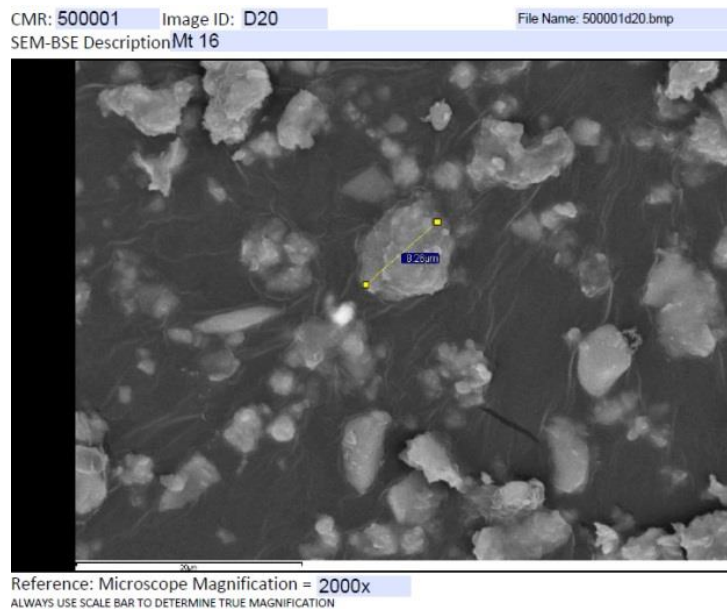


Figura 4.19.- Tamaño de las partículas dentro del filtro del día 6 de febrero

El tamaño promedio de las partículas fue de  $8.26 \mu m$  (Figura 4.19). Este análisis, muestra la totalidad de elementos químicos encontrados (Figura 4.20), así como su carga dentro de este; en algunos casos se muestran estos mismos elementos que reaccionaron con el oxígeno produciendo compuestos secundarios como  $FeO$ ,  $Fe_2O_3$ , etc. Así mismo se muestran en la Tabla 4.21, los altos

niveles de elementos como aluminio al 9% y silicio al 30%, siendo estos dos elementos mayoritarios en este análisis químico.

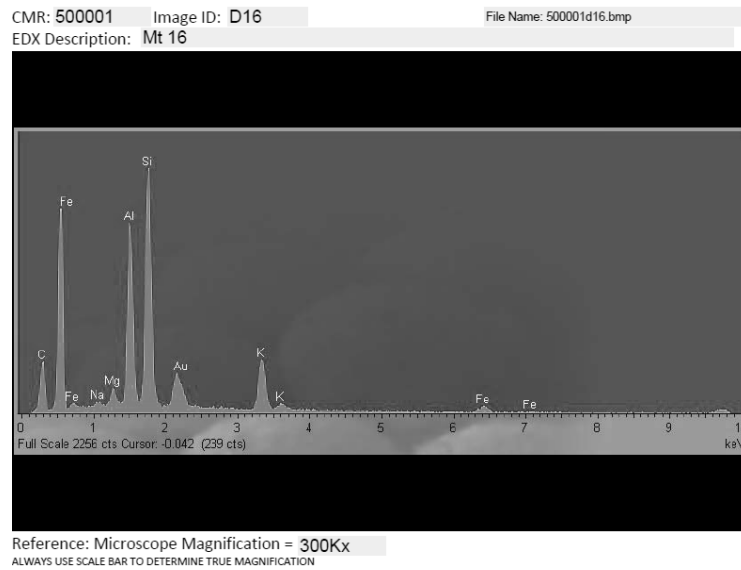


Figura 4.20.- Espectro de dispersión de energía del filtro del día 6 de Febrero

Elemento	% Peso
C	11.28
O	39.67
Fe	1.495
Na	0.01
Mg	5.89
Al	8.24
Si	29.255
Cl	0.57
K	2.095
Ca	1.495

Tabla 4.21.- Elementos químicos encontrados en el filtro del día 6 de Febrero

### Cromatografía de Iones y Transmitancia Óptica Térmica

Para conocer la cantidad de aniones, cationes y carbónaceas, se analizaron los niveles de sulfatos, nitratos y amonio presentes en la ciudad de Mexicali. Se encontraron además otros compuestos

primarios como nitritos, fosfatos, cloruros, fluoruros etc. Los cuales ayudaran a determinar los compuestos secundarios que pueden estar en la atmósfera. Entre los más importantes se encuentran los nitratos, los cloruros y el sodio, provenientes de los aerosoles marinos, pertenecientes a las  $PM_{10}$ , estos podrían convertirse en compuestos secundarios en la atmósfera, integrantes propios de los  $PM_{10-2.5}$ . Además de esto se identificaron el carbón elemental llamado “black carbón”, el cual procede exclusivamente de automotores, a diferencia del carbón orgánico que viene en su totalidad de la quema de residuos orgánicos, madera, asaderos, entre otros. Para este fin se presenta el peso total en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (Tabla 4.22).

Compuesto	Peso
Fluoruros	0.06
Cloruros	1.98
Nitritos	0.21
Calcio	2.72
Magnesio	0.19
Potasio	0.64
Nitratos	1.41
Fosfatos	0.24
Sulfatos	1.45
Sodio	0.49
Amonio	0.48
Carbon Organico	83.48
Carbón Elemental	20.12

Tabla 4.22.- Cantidad de aniones, cationes y carbónacea

Tomando en cuenta los resultados, se puede decir que más de  $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$  de un total  $113 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , puede ser producido por la quema de residuos orgánicos. En cambio solo  $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$  son producidos directamente por automotores. Estas dos tipos de componentes son los mayores precursores de contaminación de la ciudad, pudiendo inferirse que la contaminación se da por estos, por lo cual es muy importante poder regular estos procesos contaminantes en la ciudad sobre todo en invierno, mediante prohibiciones de quema de madera y la verificación vehicular.

## Balance de masas

Para el balance de masas, se dividió en 5 especies diferentes, además de los elementos trazas y sales. Así la primera especie se clasificó como material geológico (MG), que lo integra el polvo, el cual está formado principalmente por aluminio, hierro, calcio y silicio, con el fin de rescatar cualquier tipo de interferencia que haya sucedido durante los exámenes químicos se les asocian constantes químicas: el aluminio es multiplicado por 1.89 veces, el calcio por 1.4 veces, el hierro por 1.43 veces y al último, el silicio por 2.14 veces, para obtener la materia orgánica (MO): el carbón orgánico (CO) es multiplicado por 1.2 veces, el carbón elemental (CE) formado por el carbón negro o black carbón, las sales minerales (Sales), integrado solamente por cloro es multiplicada por 1.65 veces con el fin de suplantar cualquier error al separarlo del sodio.

Los elementos trazas (ET), que son todos aquellos elementos químicos contenidos en la tabla periódica que va desde el Na al Pb, excepto Al, Si, Ca, Fe, Cl, K y S, los cuales no sufren ningún cambio, y se consideran tal cual se encuentran en los exámenes químicos, los nitratos de amonio ( $\text{NH}_4\text{NO}_3$ ), compuestos secundarios formados principalmente por el compuesto primario nitrato, el cual fue multiplicado por 1.26 veces, con el fin de eliminar cualquier error por no haber usado el amonio como especie nativa ya que esta también puede formar parte de los sulfatos y por último los sulfatos de amonio [ $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ ], formados por el compuesto primario sulfato el cual fue multiplicado por 1.375 veces (Chow J. C. y Watson J. G, 1995). Para ordenar esto en cada una de las figuras se mostraran las especies determinadas en cada una de las zonas a estudio.

En la Figura 4.21 se muestra la contribución promedio de cada especie para la zona urbana en la temporada de invierno. Para la zona urbana se tiene al material orgánico como la especie más importante, contribuyendo a más del 54% del total de la contaminación en la ciudad. Como siguiente especie dominante se tiene al material geológico con un 31%, el cual comúnmente es

llamado polvo, que procede enayormente de los caminos no pavimentados y como tercer lugar tiene al carbón elemental, proveniente exclusivamente de los automóviles. En cantidades más pequeñas se cuenta con el nitrato de amonio y al sulfato de amonio.

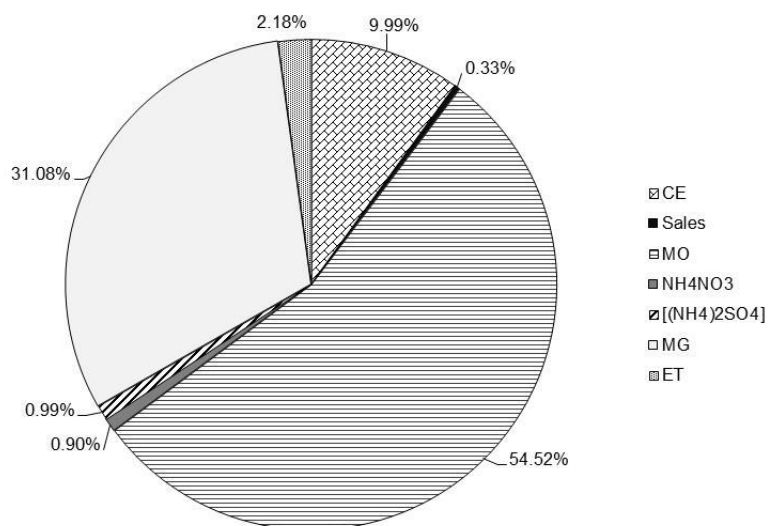


Figura 4.21.- Contribución promedio de especies en la zona urbana.

Considerando los datos tomados de la gráfica anterior se puede decir que la contaminación en la zona urbana de Mexicali fue producto de las quemas de madera muy recurrentes en estas épocas, en las cuales se sigue usando cocer alimentos en las afueras de las casas, además del uso de esto mismo para calentar el agua cuando se bañan, que posiblemente provoquen que aumente más esta contaminación, además de las quemas por accidente y/o a propósito de basura en drenes y lotes baldíos. Esta contaminación es muy común en todo el año, pero aumenta más en invierno debido a las bajas temperaturas que se llegan a registrar y a las condiciones paupérrimas de algunas familias que no tienen gas natural para poder cocinar.

#### 4.2.1.2.- Zona rural

##### Espectroscopia de Análisis de Dispersión de Rayos X (EDX)

Mediante el uso de EDX, se realizaron exámenes a una muestra de la zona rural para conocer su composición química, para eso se seleccionó el filtro del día 19 de enero (se usa un día diferente al del área urbana, ya que ese día no hubo alta contaminación). No se encuentra información previa sobre caracterización química en la zona rural de Mexicali, las investigaciones más cercanas son las tomadas tanto en la Delegación Progreso como en el Ejido Puebla (zonas suburbanas) de parte de SPA con sus equipos de  $PM_{10}$ . Estas dos estaciones de monitoreo el muestreo para la mayoría de los días se encuentra sobre el límite de la norma mexicana para  $PM_{10}$  y un buen número de análisis muestran grandes cantidades de material geológico. Este último proviene principalmente de los caminos no pavimentados de los poblados y debido a la cercanía con la zona rural, en la mayoría de los análisis hechos muestran a los elementos carbonaceos, como el CO que es derivado de la contaminación antropogénica. En un trabajo previo (Canales, 2010) se encontró carbono, derivado de la quema de madera y de la cocción de ladrillos. También es menester mencionar que el sitio de muestreo estuvo localizado en la vecindad de caminos sin pavimentar y adjunto a zonas de cria de animales y casa con cocinas a la intemperie.

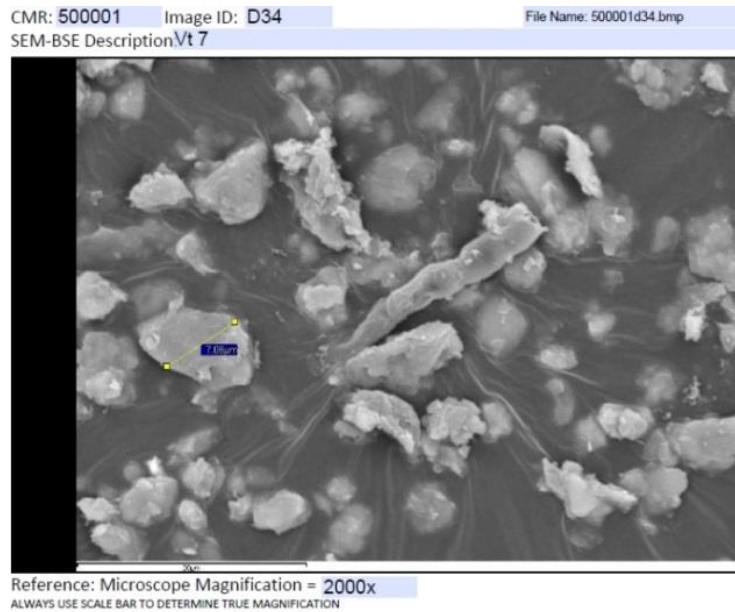


Figura 4.22.- Tamaño de las partículas en el filtro del día 19 de Enero

Las partículas analizadas mantuvieron un diámetro medio que iba entre 5 y 10  $\mu\text{m}$ , provenientes del desierto (Figura 4.22). Mediante EDX (Figura 4.23) se encontraron los siguientes elementos químicos: silicio, carbono, magnesio, aluminio y fierro proveniente del polvo de la región. Además de estos podemos encontrar potasio, sodio y azufre. Según la Tabla 4.23 los elementos químicos que se encuentran en la mayoría en esta zona de muestreo son el carbón con 22%, el silicio con 22% y el hierro con 12%; el aluminio se mantiene también como uno de los más altos con un 8%, incluidos el potasio (2.26%) y el magnesio (2.75).

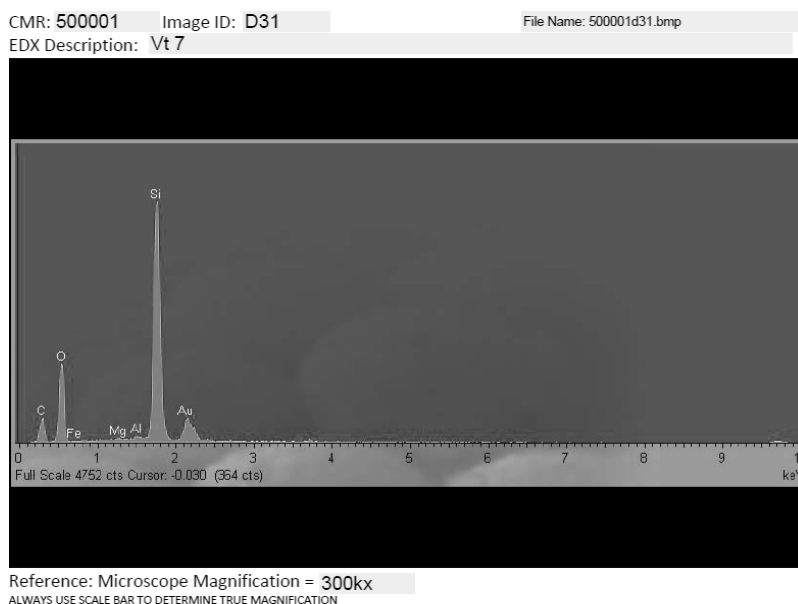


Figura 4.23.- Espectro de dispersión de energía del filtro del día 19 de Enero

Elemento	% Peso
C	21.21
Ti	0.155
O	26.585
Fe	12.16
Na	0.005
Mg	2.705
Al	8.61
Si	21.67
Cl	1.195
K	2.26
S	0.51
Ca	2.935

Tabla 4.23.- Tabla de elementos químicos en el filtro del día 19 de Enero

### Cromatografía de Iones y Transmitancia Óptica Térmica

Para la cromatografía de iones se tomaron en cuenta los compuestos primarios que se encuentran dentro de las  $PM_{10}$  como fueron los sulfatos, los nitratos, los amonios y en algunos casos los fluoruros, cloruros y cationes como  $K^+$  y  $Na^+$ . Los compuestos y elementos primarios con más presencia fueron el calcio con  $2.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , los sulfatos con más de  $2.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , los nitratos con 1.4

$\mu\text{g}/\text{m}^3$ , seguido muy de cerca por los cloruros con  $1,16 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y el sodio con  $1.24 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , también se encontraron potasio, magnesio, nitritos y amonio pero en menores proporciones. Las cantidades presentadas en la mayoría de los casos son más bajas que en la zona urbana, exceptuando los fosfatos, sulfatos y sodio, incluyendo al magnesio. Mediante la Transmitancia Óptica Térmica, se evaluó el material proveniente de los automóviles (carbón elemental) y de residuos orgánicos (carbón orgánico), para eso se presenta la Tabla 4.24, donde se dan a conocer los pesos de estos materiales ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ).

Compuesto	Peso
Fluoruros	0.06
Cloruros	1.16
Nitritos	0.19
Nitratos	1.40
Fosfatos	0.38
Sulfatos	2.45
Sodio	1.25
Amonio	0.19
Potasio	0.39
Magnesio	0.32
Calcio	2.53
Carbon Organico	73.76
Carbon Elemental	18.48

Tabla 4.24.- Cantidad de aniones, cationes y carbónacea

Del total del peso del filtro que corresponde a  $102.56 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , solo  $73.76 \mu\text{g}/\text{m}^3$  provenían de carbón orgánico propio de la quema de residuos agrícolas, así como de la basura domiciliaria, y  $18.47 \mu\text{g}/\text{m}^3$  proveniente de automóviles que no abundan en esa zona.

#### Balance de masas

Para la zona rural a diferencia de la zona urbana la especie dominante fue el material geológico con 53%, proveniente del suelo desnudo de la región y de los campos agrícolas (Figura 4.24). En segundo lugar se tiene al material orgánico con 37%, proveniente de la quema de residuos agrícolas,

madera y asaderos. En tercer lugar se considera al carbón elemental, proveniente de automóviles y/o tractocamiones; en menores proporciones se considera a los elementos trazas y sales. La razón del cambio de material orgánico de la zona urbana a material geológico de la zona rural, puede ser debido a la mayor cantidad de personas que usan leña para calentarse en la zona rural a diferencia de la zona urbana. La aparición del carbón elemental se debe sobre todo a la circulación de tractocamiones materialistas.

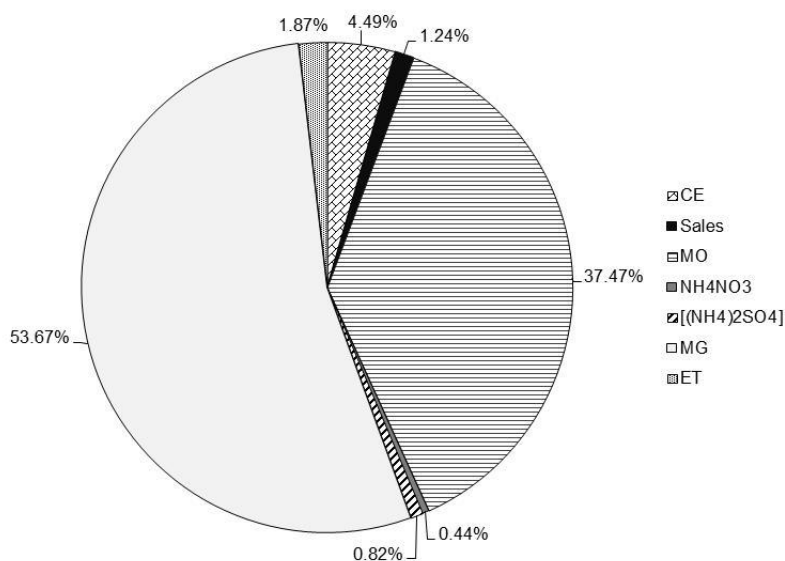


Figura 4.24.- Contribución promedio de especies en la zona rural.

## 4.2.2.- Temporada de Verano

### 4.2.2.1.- Zona Urbana

#### Espectroscopia de Análisis de Dispersión de Rayos X (EDX)

Mediante la aplicación de la técnica del EDX a un grupo de muestras de verano, tomado el día 2 de Septiembre del 2011, el cual fue uno de los más contaminados, se detectó la presencia de cantidades

importantes de compuestos químicos. El tamaño de partículas contenidas en este filtro se encuentra dentro del rango de interés (2.5 a 10 micrómetros de diámetro), mismos que se ven en la Figura 4.25. Asimismo se realizó el espectro de dispersión de energía del filtro colectado el 27 de agosto, en el cual fueron identificados varios elementos, entre ellos aluminio, silicio y hierro (Figura 4.26), además del calcio y el titanio.

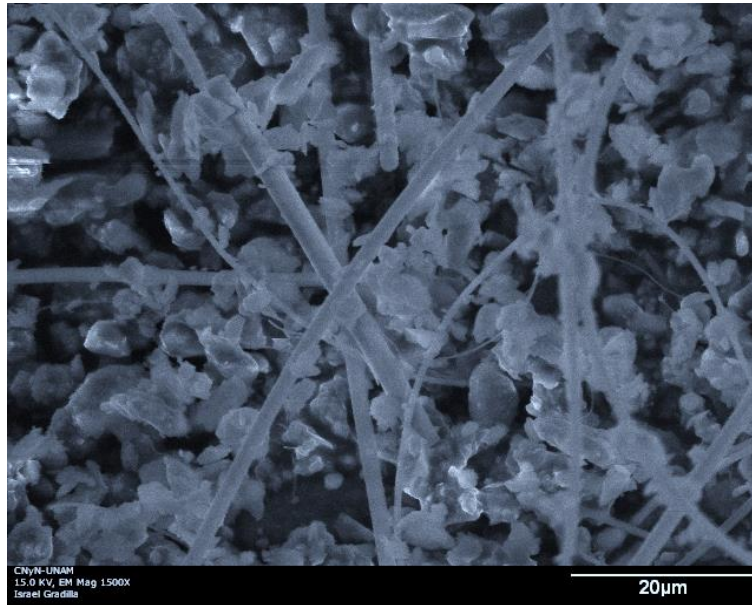


Figura 4.25.- Tamaño de las partículas en el filtro del día 2 de Septiembre

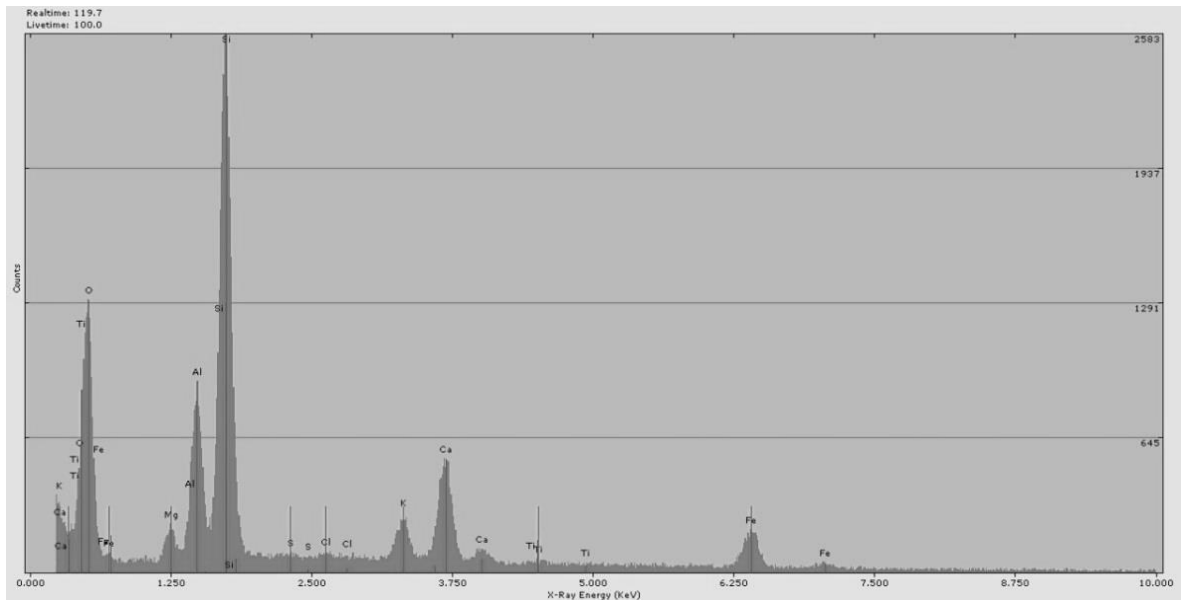


Figura 4.26.- Espectro de dispersión de energía del día 2 de Septiembre

La mayor cantidad de los elementos encontrados provienen del material geológico como lo son: aluminio, hierro, silicio o calcio. Además de los anteriores se encontraron elementos como cloro o sodio, derivados de sales como el cloruro de sodio y otros elementos trazas como magnesio o titanio.

Los pesos más grandes se pueden encontrar en la Tabla 4.25, entre los cuales se hallan el silicio, el más significativo, con 28%, seguido del aluminio con 8% y el hierro con más de 6%, elementos integrantes de la corteza terrestre. Además se encontraron otros elementos como lo son el potasio, hierro, cloro y sodio.

Elemento	% de Peso
O	46.155
Mg	0.685
Al	8.24
Si	28.31
S	0.065
Cl	0.18
K	5.33
Ca	4.465
Ti	0.195
Fe	6.3700
Na	0.005

Tabla 4.25.- Tabla de elementos químicos en el filtro del día 2 de Septiembre.

### Cromatografía de Iones y Transmitancia Óptica Térmica

Para esta temporada en la zona urbana, se procedió a realizar el análisis mediante Cromatografía de Iones, con el fin de encontrar los compuestos primarios más significativos. Entre ellos se hallaron a los sulfatos con  $2.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , los cloruros con  $1.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , el sodio con  $1.69 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , el calcio con  $1.55 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , nitratos con  $1.29 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y en menores cantidades se tiene al potasio, magnesio, fosfatos y nitritos y usando la Transmitancia Óptica Térmica se determinaron el carbón orgánico y el carbón elemental para lo cual se presentan los datos ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) en la Tabla 4.26.

Compuesto	Peso
Fluoruros	0.06
Cloruros	1.78
Nitritos	0.14
Bromuros	0.15
Nitratos	1.30
Fosfatos	0.33
Sulfatos	2.31
Sodio	1.69
Amonio	0.45
Potasio	0.30
Magnesio	0.29
Calcio	1.55
Carbón orgánico	50.17
Carbón elemental	21.97

Tabla 4.26.- Cantidad de aniones, cationes y carbónacea

Del análisis de la tabla 5.6 se puede notar que el material más abundante fue el carbón orgánico, con  $50.17 \mu\text{g}/\text{m}^3$  de  $82.49 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , mientras que el carbón elemental fue de  $21.96 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Parecería que el efecto contaminante es más pronunciado por la quema de basura y asaderos que por los automóviles.

### Balance de masas

Para la zona urbana en la temporada de verano, se tomó en cuenta la contribución promedio de especies para esta zona. La contribución promedio de especies según la Figura 4.27 indica como predominante al material geológico con 75%, debido a la aridez del lugar, en adición a la resuspensión del polvo debido a la velocidad del viento proveniente del sureste, principalmente. En segundo término se tiene al material orgánico con 16%, y finalmente en tercer sitio al carbón elemental.

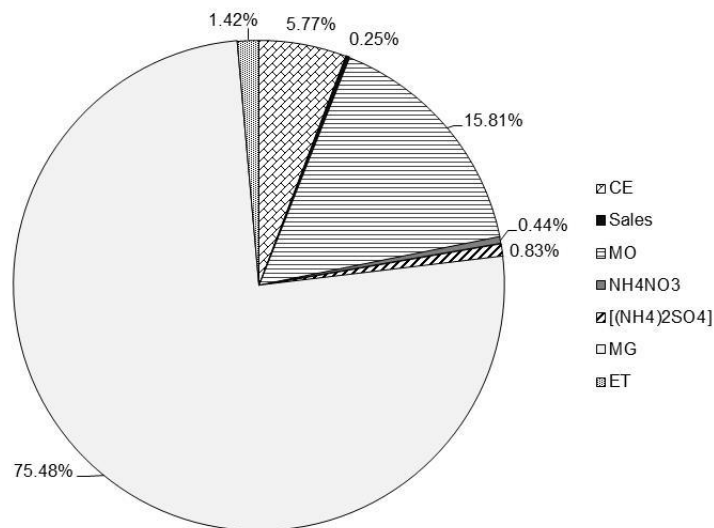


Figura 4.27.- Contribución promedio de especies en la zona urbana.

Hay diferencia sustanciales entre las zonas estudiadas, la urbana en invierno contenía en su mayoría material orgánico, debido al mayor uso cada vez mayor de madera, quema de residuos residenciales, asaderos y carbón natural por las temperaturas bajas del invierno, en cambio en verano fue material geológico, debido más que todo a la larga exposición de polvo en la región producto de caminos pavimentados y no pavimentados, además de la arena del desierto.

#### 4.2.2.2.- Zona Rural

#### Espectroscopia de Análisis de Dispersión de Rayos x (EDX)

Para la zona rural de Mexicali se realizó este mismo tipo de examen al filtro del 27 de Agosto, con el fin de identificar los distintos elementos químicos que puedan encontrarse en esta zona. En la Figura 4.28 se presenta una imagen directa sobre todo los tipos de partículas presentes.

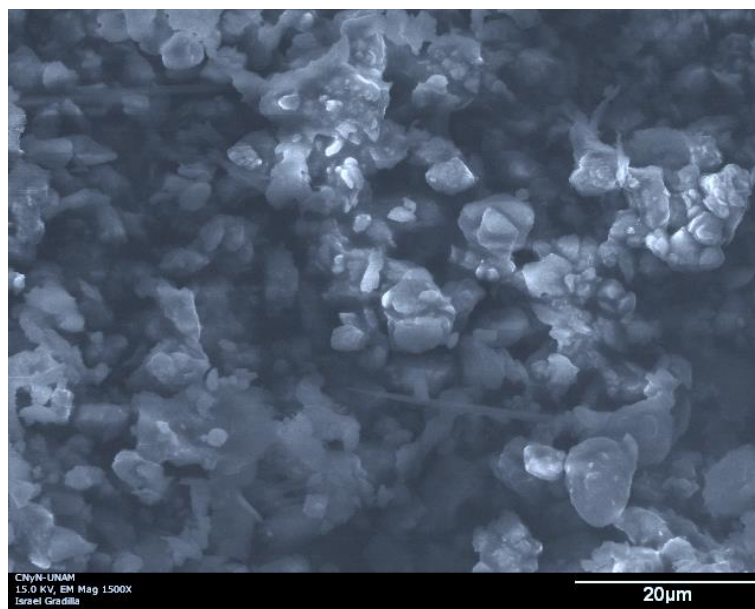


Figura 4.28.- Tamaño de las partículas en el filtro del día 27 de Agosto

En la Figura 4.29 se presenta el espectro de dispersión donde se puede ver la totalidad de los elementos químicos que se encuentran en el filtro, tomándose como mayoritarios al silicio, en cantidades menores se pueden ver al hierro, calcio y potasio.

El elemento químico más abundante fue el silicio con más de 31%, los otros se acercaron al 5% como el magnesio, el aluminio, el calcio y el potasio (Tabla 4.27).

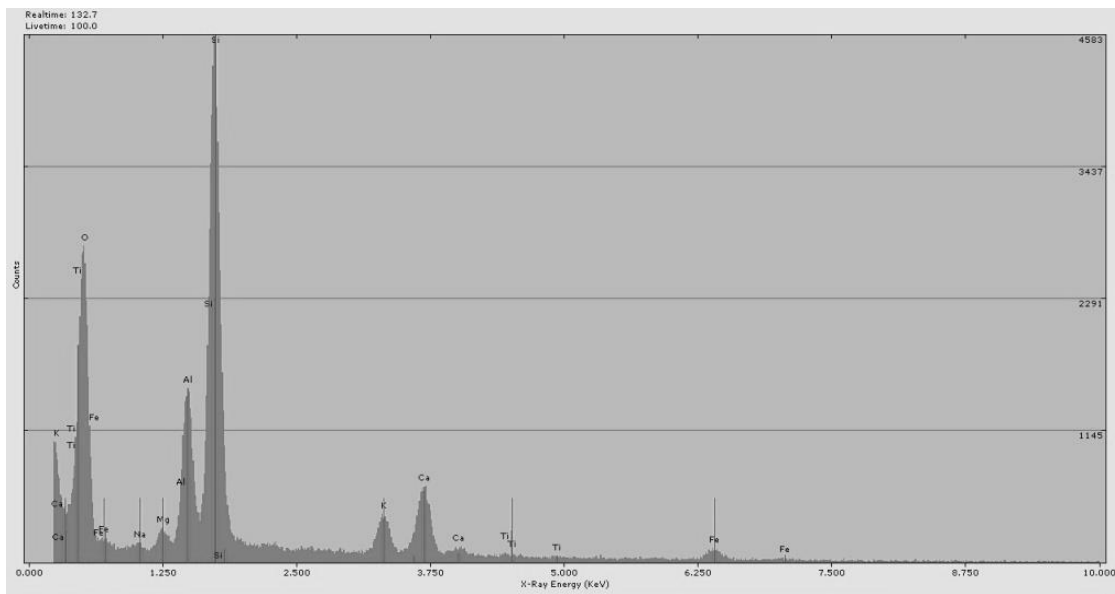


Figura 4.29.- Espectro de dispersión de energía del día 27 de Agosto

Elemento	% de Peso
O	48.675
Mg	4.74
Al	4.725
Si	31.88
S	0.355
Cl	0.875
K	2.3
Ca	3.885
Ti	0.175
Fe	1.975
Na	0.415

Tabla 4.27.- Descripción de elementos químicos en el filtro del día 27 de agosto

## Cromatografía de Iones y Transmitancia Óptica Térmica

Se hizo uso de la Cromatografía de Iones para poder separar los aniones y cationes disponibles dentro de los filtros. Los datos más significativos se asocian al sulfato con  $2.39 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , al calcio con  $1.74 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , al sodio con  $1.23 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y a los cloruros con  $1.21 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , en proporciones pequeñas se identifican a los nitritos, nitratos, y amonio. También mediante Transmitancia Óptica térmica se tomaron los datos de carbón orgánico y carbón elemental (Tabla 4.28).

Compuesto	Peso
Fluoruros	0.03
Cloruros	1.21
Nitritos	0.14
Nitratos	0.99
Fosfatos	0.30
Sulfatos	2.39
Sodio	1.23
Amonio	0.51
Potasio	0.36
Magnesio	0.26
Calcio	1.75
Carbon Organico	47.46
Carbon elemental	8.42

Tabla 4.28.- Cantidad de aniones, cationes y carbónacea

Los resultados mostraron que el carbón orgánico fue el más significativo con  $47.46 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y en segundo término el carbón elemental con  $8.42 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , de un total de  $65.07 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

### Balance de masas

Para la zona rural de esta nueva temporada de estudio, se tomaron en cuenta la contribuciones promedios de especies donde destaca el material geológico con 52% (Figura 4.30), siendo muy similar a la que se tuvo en la temporada de invierno, y bajo esta consideración, los orígenes de los contaminantes de invierno son los mismos que en el verano.

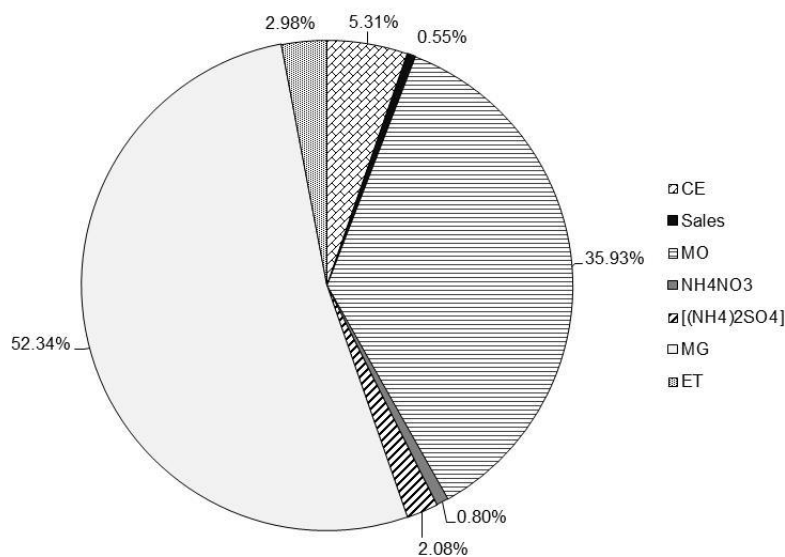


Figura 4.30.- Contribución promedio de especies en la zona rural.

El material orgánico que representa el 35%, tiene un origen o fuente semejante en ambas temporadas. En tercer término se tiene al carbón elemental con 5.3% proveniente de automóviles. Con cantidades muy bajas se tienen a los sulfatos de amonio, los nitratos de amonio y las sales.

Se puede asumir que las fuentes contaminantes en la zona rural, durante las dos temporadas son muy similares, ya sea debido a la contaminación natural del polvo de la región conocido como material geológico, mismo que fue el más alto, seguido muy de cerca por el material orgánico, que tiene su origen en la zona rural en las quemas de residuos agrícolas, quema de residuos domésticos (hojas, madera), quema de estiércol, etc. Mientras que para el carbón elemental, generado exclusivamente por automóviles se mantuvo en el mismo bajo rango, entendiéndose así que no hubo gran flujo vehicular aledaño al lugar de muestreo.

Como un modo de comparación con la investigación realizada por Chow et al, 1997, la contaminación por material particulado PM<sub>10</sub> es muy similar a esta investigación, solo presentan

pequeñas diferentes porcentuales, pasando el material geológico de 63.9 de chow et al, 1997 a 53.14% de esta investigación, mientras que para el material orgánico se pasó de 25.7% de Chow et al, 1997 a 35.93%, mientras el carbón elemental paso de 2.5% a 6.39%. Cambios que hacen suponer una mayor contaminación producto por el hombre que “natural”.

#### **4.3.- Trayectorias de PM<sub>10</sub>**

Para este capítulo se utilizó un programa especializado en trayectorias y modelos de dispersión llamado Hysplit, con el fin de saber el origen de los contaminantes, mediante un punto de final de trayectoria ya dispuesto en las tres zonas de muestreo bajo estudio. El Hysplit es un programa que se encuentra en línea, el cual realiza trayectorias a diferentes alturas sobre el nivel del mar, todo esto apoyado por la dirección de los vientos de la región. Este programa en particular ayuda a dirimir el curso de las partículas dentro del torrente ventoso, con el objeto de saber hacia dónde se precipitaran los contaminantes, tomando en cuenta la re-suspensión, la precipitación y una altura no mayor a 20 metros sobre el nivel del mar (SMN).

Para la realización de la investigación se tomaron en cuenta dos temporadas: verano e invierno, empezando con el uso del programa Hysplit como un medio para encontrar los días más característicos (aquellos que seguían la dirección de la rosa de los vientos) de cada temporada. Como primer paso mediante el uso del Hysplit se tomaron trayectorias de todos los días de las dos temporadas en cada una de las zonas de muestreo, en total se tuvieron 96 trayectorias para las tres zonas en estudio, zona montañosa (La Rumorosa), Valle de Mexicali (Guadalupe Victoria) y Zona urbana de Mexicali.

El segundo paso fue tomar los tres días más característicos (aquellos que provenían del norte para la Invierno y el sur para verano) de las temporadas con las tres trayectorias y tomar direcciones cada 6

horas con el fin de saber cuál es el posible origen del material geológico ya que los otros contaminantes pueden ser locales según la información encontrada en el anterior capítulo. Para la realización de cada trayectoria se toman en cuenta 24 horas de datos, esto es, las trayectorias de las primeras horas del día corresponden a los vientos generados un día anterior, debido a que los vientos re-suspenden polvo de los lugares de origen de los contaminantes y al mismo tiempo las partículas más grandes se van depositando.

#### **4.3.1.- Temporada de Invierno**

Para esta temporada las tres trayectorias (Backwadr-trajectory) más características fueron tomadas los días: 15, 17 y 21 de enero de 2011, ya que las tres presentaban direcciones de viento típicas de la temporada de invierno, en total se dan 15 imágenes, donde la trayectoria roja es para la zona urbana de Mexicali, la trayectoria azul es para la zona rural de Mexicali y la trayectoria verde para la zona montañosa (La Rumorosa). La dirección del viento para todas las estaciones de monitoreo en la temporada de invierno es predominantemente norte a sur (predominantemente desde el estado de Nevada o California en los Estados Unidos hacia el estado de Baja California en México), con una velocidad promedio de 2 m/s, para la zona urbana y rural de Mexicali, y de 10 m/s para la zona montañosa (La Rumorosa), debido a la topografía del lugar.

##### **4.3.1.1.- 15 de Enero del 2011**

Las trayectorias de las tres zonas de muestreo para las 0 horas (Figura 4.31), 6 horas (Figura 4.32), 12 horas (Figura 4.33), 18 horas (Figura 4.34) estos del día 15 de enero del 2011 y 24 horas (0 horas) del día 16 de enero del 2011 (Figura 4.35), provienen del norte de la región, donde los puntos de origen se encuentran en la mayoría de los casos a más de 3,000 metros SNM en el Estado de Nevada para el 15 de enero y para el día 16 de enero a 2000 metros SMN sobre el Estado de

California, EE UU, dirigiéndose hacia el sur por el Mar del Salton donde se mantiene a 50 metros SNM, manteniéndose a ese nivel hasta llegar a la zona urbana y rural de Mexicali, no así para La Rumorosa donde llega a los 1100 metros SNM (Línea verde: zona montañosa; línea roja: Zona Urbana; línea azul: zona rural).

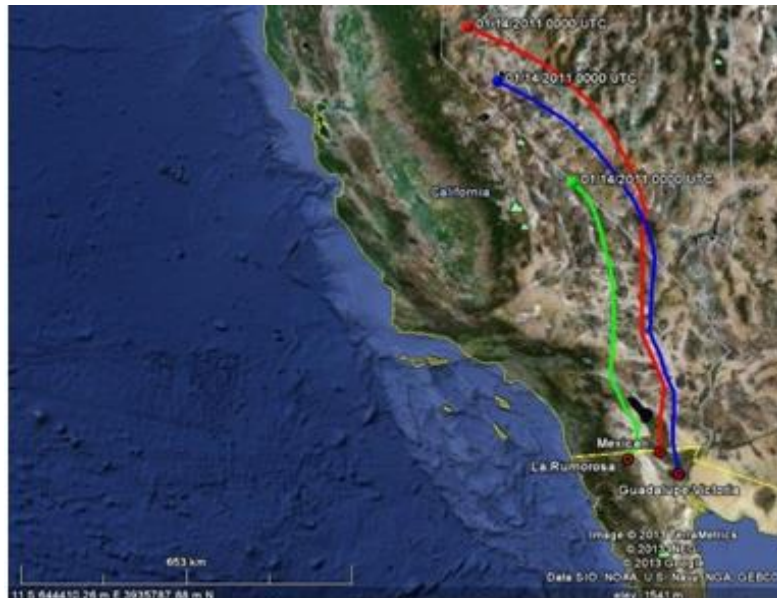


Figura 4.31.- Trayectoria a las 0:00 horas am del día 15 de Enero del 2011

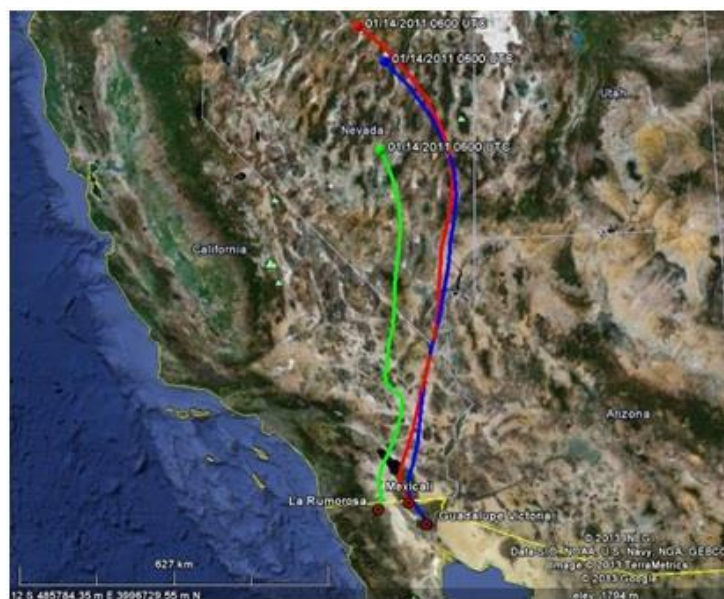


Figura 4.32.- Trayectoria a las 6:00 horas a.m. del día 15 de Enero del 2011



Figura 4.33.- Trayectoria a las 12:00 horas p.m. horas del día 15 de Enero del 2011



Figura 4.34.- Trayectoria a las 18:00 horas pm del día 15 de Enero del 2011



Figura 4.35.- Trayectoria a las 0 horas am del día 16 de Enero del 2011

#### 4.3.1.2- 17 de Enero del 2011

Las trayectorias de este día, para las 0 horas (Figura 4.36), 6 horas (Figura 4.37), 12 horas (Figura 4.38) y 18 horas del día 17 de enero del 2011 (Figura 4.39) y 24 horas (0 horas) del día 18 de enero del 2011 (Figura 4.40) proviene en su mayoría directamente de norte – sur, provenientes del estado de California a 500 metros SMN, donde el origen de los contaminantes que llegan al Valle de Mexicali provienen del norte del Valle Imperial a 400 metros SNM, mientras los orígenes de los contaminantes para la zona urbana y rural de Mexicali provenían del oeste del Mar del Salton, para la Rumorosa provienen del norte- este a 200 metros SNM, dirigiéndose hacia el sureste a 50 metros, no así la trayectoria hacia La Rumorosa, donde la altura fue de 1200 metros.



Figura 4.36.- Trayectoria a las 0:00 horas am del día 17 de Enero del 2011



Figura 4.37.- Trayectoria a las 6:00 horas am del día 17 de Enero del 2011

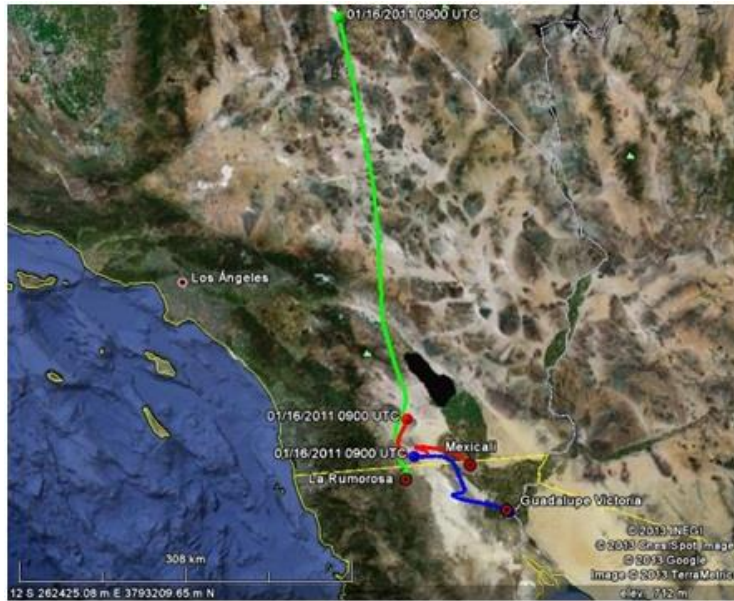


Figura 4.38.- Trayectoria a las 12:00 horas pm del día 17 de Enero del 2011



Figura 4.39.- Trayectoria a las 18:00 horas pm del día 17 de Enero del 2011



Figura 4.40.- Trayectoria a las 0:00 horas am del día 18 de Enero del 2011

#### 4.3.1.3.- 21 de Enero del 2011

Para las trayectorias de este día, la dirección del viento proviene directamente de norte – sur, las cuales empiezan a las 0 horas del día 21 de enero del 2011 (Figura 4.41), viajan desde los estados de Utah y Nevada a una altura de 3000 metros SNM, enfilados hacia el sur, pasando por el Mar del Salton en California y llegando a La Rumorosa a una a los 1200 metros sobre el nivel del mar, mientras que la altura para las trayectorias de la zona urbana y rural de Mexicali fue de 20 metros.



Figura 4.41.- Trayectoria a las 0:00 horas am del día 21 de Enero del 2011

Para las 6 horas del día 21 de enero del 2011 (Figura 4.42), las trayectorias provienen de los estados de Colorado y Nevada, a una altura de 2500 metros, las cuales se orientan hacia el suroeste hacia el estado de California, llegando al Valle Imperial a una altura de 50 metros, exceptuando la trayectoria hacia La Rumorosa que pasa al oeste del Mar del Salton a 100 metros SNM, dirigiéndose hacia el poblado a más de 1200 metros, mientras las trayectorias de la zona urbana y rural se dirigen al sur a 20 metros SNM en ambas puntos de muestreo.

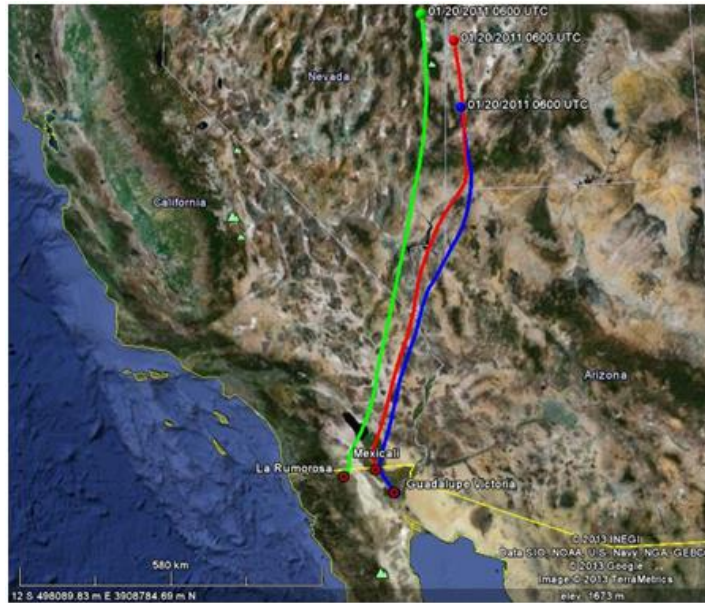


Figura 4.42.- Trayectoria a las 6:00 horas am del día 21 de Enero del 2011

Para la trayectoria de las 12 horas del día 21 de enero del 2011 (Figura 4.43), las tres provenían del estado de Nevada a 3000 metros SNM, dirigiéndose hacia el sur sobre el estado de California, llegando al Mar del Salton, a 200 metros SNM, las tres trayectorias siguen hacia el sur, uno hacia La Rumorosa con 1200 metros, y las dos restantes van hacia la zona urbana y rural de Mexicali a solo 20 metros SNM.



Figura 4.43.- Trayectoria a las 12:00 horas pm del día 21 de Enero del 2011

Para las trayectorias de las 18 horas del día 21 de enero del 2011 (Figura 4.44), el origen de la contaminación del Valle de Mexicali proviene del estado de Arizona a 1500 metros sobre el nivel del mar, esta se dirige el suroeste hacia el Mar de Salton y posteriormente llega a la Rumorosa a 1200 SNM. Mientras las otras dos trayectorias provienen del estado de California a una elevación de 500 metros y se dirigen hacia el sureste, para posteriormente dirigirse hacia las dos zonas de muestreo tanto en el valle de Mexicali como la zona urbana de Mexicali.

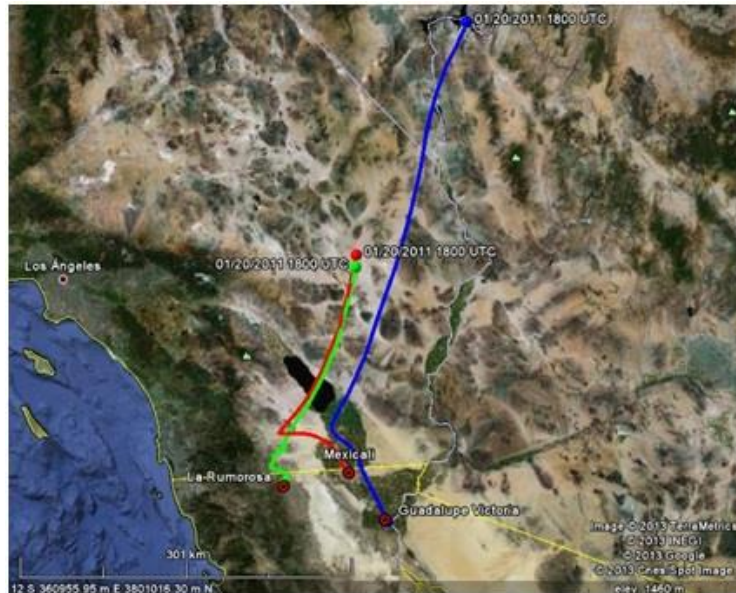


Figura 4.44.- Trayectoria a las 18:00 horas pm del día 21 de Enero del 2011

Para las trayectorias de las 0 horas del día 22 de enero del 2011 (Figura 4.45), se encuentran al norte de las zonas de muestreo. La trayectoria que va hacia el Valle de Mexicali, viene desde el estado de Nevada, con una altura de 2500 metros, y se dirige hacia el sureste hacia el Mar del Salton, donde toma hacia el suroeste donde llega al punto de muestreo en el Valle de Mexicali a 20 SMN. Mientras las otras dos trayectorias provienen en un principio en el estado de California al norte del Mar del Salton, siguiendo hacia el sureste a 100 metros SMN, llegando a sus respectivas zonas de muestreo, la de la Rumorosa a 1200 SMN y la de la zona urbana a 20 SMN

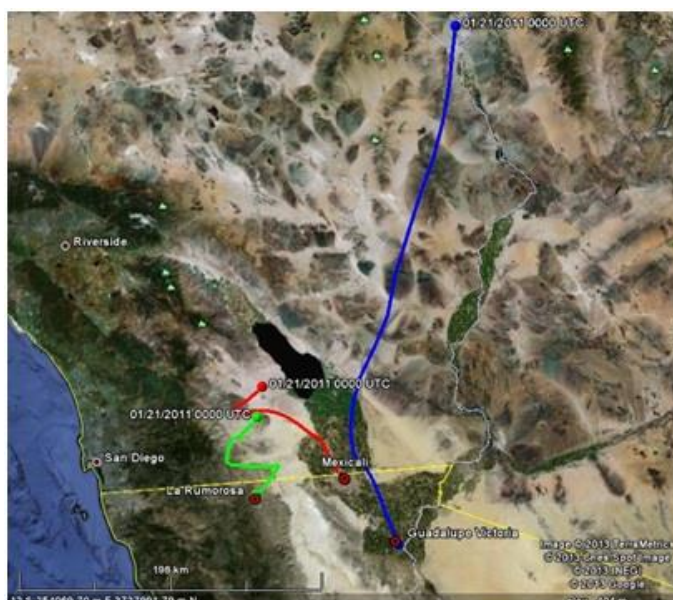


Figura 4.45.- Trayectoria a las 0:00 horas am del día 22 de Enero del 2011

Las trayectorias (Backward-trajectory) para los tres días en general para las tres estaciones en estudio, provenían del norte de las zonas de muestreo, especialmente las que corresponden a la zona montañosa, la zona rural de Mexicali, mientras para la zona urbana de Mexicali, solo los días 17 y 21 de enero presentaban esta dirección. El día 17 de enero para la zona urbana los vientos provenían exclusivamente del noroeste, así como las 6 am y 12 pm de la zona rural para el mismo día. Las trayectorias que se dirigen a las zonas urbana y rural de Mexicali pasaban por el Mar de Salton, a 20 SMN exceptuando la que se dirigía a la Rumorosa que su altura fue de 1200 SMN.

Esto mismo sucede en el artículo de Mendoza, 2013, donde al igual que en nuestra investigación, las direcciones para la zona urbana procedían tanto del norte como del noroeste, tanto para Mendoza como para nosotros, estas trayectorias pudieron ser la causante de una cantidad mayor de material particulado en especial en la fuente de material geológico.

### 4.3.2.- Temporada de Verano

Para esta temporada las tres trayectorias (Backward – trajectory) más características fueron tomados los días: 15, 17 y 27 de agosto de 2011, ya que las tres presentaban direcciones de viento características de la temporada de verano esto es: de sur a norte. La dirección del viento para la temporada de verano tiene vientos predominantemente dirigidos del sur al norte, con una velocidad promedio de 1 a 2 m/s, esto es en la zona urbana y rural de Mexicali, no así en la zona montañosa (La Rumorosa) donde debido principalmente a la topografía del lugar esta dirección de vientos no se da en la mayoría de los días, además que en este lugar la velocidad promedio fue de 8 m/s. La trayectoria de color azul es para la zona rural de Mexicali, la de color rojo es para la zona urbana de Mexicali, en cambio la trayectoria verde es para la zona montañosa.

#### 4.3.2.1.- 15 de Agosto del 2011

Para las trayectorias de este día, la dirección del viento proviene del sur a norte en general para las estaciones de monitoreo de la zona urbana y rural de Mexicali, en cambio para la estación de muestreo de la Rumorosa es cambiante proveniente casi en todas sus trayectorias del oeste, exceptuando a las 0 horas del día 15 de Agosto del 2011, que provino del sureste, en su mayoría su origen proviene del Mar de Cortés, siendo una de las razones por la cual en estas fechas el aire ambiente está muy cargado de humedad.

Las trayectorias de las 0 horas del día 15 de Agosto del 2011 (Figura 4.46), en especial la que incide en el Valle de Mexicali tuvo su origen en el sur de la península del estado de Baja California, justo sobre la sierra de Picacho, cerca de San Quintín, Ensenada a una altura de 1000 metros SNM. Se desplazó posteriormente hacia el Mar de Cortés, a una altura de 20 metros, terminando hacia el noroeste donde llega al valle de Mexicali a una altura de 20 metros, trayendo consigo gran cantidad

de humedad. En cambio el origen de los contaminantes para la zona urbana de Mexicali, proviene del Mar de Cortés a una altura de 20 metros, desplazándose hacia el noroeste y arriba a la ciudad de Mexicali a una altura de 20 metros SNM; para la estación de monitoreo de la Rumorosa es la única hora donde su trayectoria provino del sureste, siendo su origen en el Delta del Colorado y tiempo después es desplazada hacia el noreste donde alcanza la Rumorosa a una altura de 1200 metros, trayendo consigo material geológico de las montaña circundantes y humedad del Mar de Cortés.



Figura 4.46.- Trayectoria a las 0:00 horas am del día 15 de Agosto del 2011

Para las trayectorias de las 6 horas del día 15 de Agosto del 2011 (Figura 4.47), la dirección de viento proviene del sur, para las zonas de muestreo de las zonas urbana y rural de Mexicali, específicamente de las zonas montañosas de centro del estado, un poco al sur de San Quintín, moviéndose las trayectorias posteriormente hacia el noreste hacia el Mar de Cortés y luego tomando dirección al noroeste hacia las zonas de muestreo, a una altura de 20 metros SNM, trayendo consigo humedad. Para la zona de muestreo de la Rumorosa su trayectoria provino del noreste, desde el Océano Pacífico y pasando por la ciudad de Tijuana, trayendo posiblemente material particulado de esa región, esto a 1200 metros sobre el nivel del mar.



Figura 4.47.- Trayectoria a las 6:00 horas am del día 15 de Agosto del 2011

Para las trayectorias de las 12 horas del día 15 de Agosto del 2011 (Figura 4.48), los orígenes de las trayectorias de la zona urbana y rural de Mexicali provienen del sur de la península, en el Mar de Cortés, posteriormente estas siguen su curso hacia el noroeste llegando a las zonas de muestreo a 20 metros SNM. Para la trayectoria de la Rumorosa, esta proviene del oeste del poblado, desde el Océano Pacífico, pasando por la ciudad de Tijuana solo a una altura de 1200 metros, transportando consigo material particulado de la zona Metropolitana de Tijuana.



Figura 4.48.- Trayectoria a las 12:00 horas pm del día 15 de Agosto del 2011

Para la trayectoria de las 18 horas del día 15 de Agosto del 2011 se presentan (Figura 4.49), las tres zonas de muestreo que muestran una influencia de vientos de diferentes orígenes: para la zona urbana de Mexicali esta proviene del sur de la península, en un punto sobre el Mar de Cortés, dirigiéndose posteriormente al noroeste a una altura de 20 metros. Mientras para la trayectoria de la zona rural de Mexicali su origen se encuentra en el Océano Pacífico, pasando por toda la península en su parte media, al sur de la sierra de Picacho, dirigiéndose al este hacia el Mar de Cortés, y posteriormente hacia el noroeste rumbo a la zona de muestreo a una altura de 20 metros sobre el nivel del mar, trayendo consigo la humedad hacia la región. Para la zona de muestreo de La Rumorosa su origen proviene del Océano Pacífico al este de San Diego, California, luego toma hacia el sureste pasando por la ciudad de Tijuana y por Valle de las Palmas, terminando a una altura de 1200 metros sobre el poblado La Rumorosa.



Figura 4.49.- Trayectoria a las 18:00 horas pm del día 15 de Agosto del 2011

Las trayectorias para las 0 horas del día 16 de Agosto del 2011 (Figura 4.50), son muy diferentes ya que el origen de la contaminación para la zona urbana de Mexicali proviene del sur del estado, justo en el Mar de Cortés, dirigiéndose al noreste hacia la ciudad de Mexicali a una altura de 20 metros. Mientras el origen de los contaminantes para la zona rural de Mexicali, está en el Océano Pacífico al oeste de la península, este pasa por encima de la red montañosa del estado para dirigirse al Mar de Cortés, posteriormente se dirige al noroeste hacia la estación de monitoreo en el poblado Guadalupe Victoria. Para el origen del viento que llega al poblado La Rumorosa este se localiza al oeste de la ciudad de Tijuana, atraviesa la misma internándose en Tecate, para posteriormente llegar a La Rumorosa a 1200 metros de altura.



Figura 4.50.- Trayectoria a las 0.00 horas am del día 16 de Agosto del 2011

#### 4.3.2.2.- 17 de Agosto del 2011

Para las trayectorias de este día, la dirección del viento proviene del sur a norte en dos estaciones de monitoreo de la zona urbana y rural de Mexicali, para las 18 horas la dirección de los vientos para la zona urbana de Mexicali cambia hacia el oeste, para la estación de muestreo de la Rumorosa proviene totalmente del oeste. El origen de las trayectorias para la zona rural y en parte para la zona urbana proviene del Mar de Cortés, en cambio para La Rumorosa y parte del tiempo de la zona urbana (después de las 18 horas) proviene del Océano Pacifico.

Las trayectorias para las 0 horas del día 17 de Agosto del 2011 (Figura 4.51), la zona urbana y rural de Mexicali provienen del sur, para la zona rural su origen de halla en el desierto de Sonora, siguiendo hacia el noroeste por todo el Mar de Cortés, llegando al poblado de Guadalupe Victoria a 20 metros, mientras la trayectoria hasta la zona urbana de Mexicali, proviene a unos kilómetros del poblado de San Felipe por el Mar de Cortés, dirigiéndose hacia el noroeste con dirección a la ciudad de Mexicali, las dos trayectorias acarrear humedad a la región. Mientras para el poblado la

Rumorosa su origen se localiza hacia el oeste, en la ciudad de San Diego, California, y luego se dirige hacia el este a una altura de 1200 metros en el poblado la Rumorosa.



Figura 4.51.- Trayectoria a las 0:00 horas am del día 17 de Agosto del 2011

Las trayectorias a las 6 horas del día 17 de Agosto del 2011 (Figura 4.52), provienen principalmente del sur para las estaciones de monitoreo del valle y ciudad de Mexicali, del Mar de Cortés y del desierto del Altar en Sonora, estas dos trayectorias se dirigen hacia el noroeste hasta llegar a las estaciones de monitoreo de la zona urbana y rural de Mexicali a 20 metros SNM, mientras para la Rumorosa el origen se encuentra hacia el oeste al norte de San Diego, California, dirigiéndose nuevamente hacia el poblado la Rumorosa.



Figura 4.52.- Trayectoria a las 6:00 horas am del día 17 de Agosto del 2011

La trayectoria para las 12 horas del día 17 de Agosto del 2011 (Figura 4.53), muestra que el origen de las trayectorias para la zona urbana y rural de Mexicali se localizan al sur del estado, sobre el Mar de Cortés, luego estas se dirigen hacia el noroeste con dirección a las zonas de muestreo a 20 metros SNM para la trayectoria de La Rumorosa, el origen se sitúa al norte de la ciudad de San Diego, California, para luego dirigirse hacia el suroeste y luego al este por la ciudad de Tijuana, para llegar al poblado de La Rumorosa.



Figura 4.53.- Trayectoria a las 12:00 horas pm del día 17 de Agosto del 2011

Para las trayectorias de las 18 horas del día 17 de Agosto del 2011 (Figura 4.54), la que se orienta al Valle de Mexicali proviene del sur del estado, específicamente del Mar de Cortés, su trayecto es hacia el noroeste hasta llegar a la zona de muestreo del poblado Guadalupe Victoria. Para las otras dos zonas de muestreo se observa que provienen del Oeste, desde el Océano Pacifico y se dirigen hacia el este pasando por San Diego, California, una de ellas queda en la zona de muestreo de La Rumorosa a 1200 metros, mientras la otra sigue su viaje por el norte de la Rumorosa para bajar al sur del Mar del Saltón y llegar a la ciudad de Mexicali a una altura de 20 metros.



Figura 4.54.- Trayectoria a las 18:00 horas pm del día 17 de Agosto del 2011

Para las trayectorias de las 0 horas del día 18 de Agosto del 2011 (Figura 4.55), la que llega al Valle de Mexicali proviene del Sur del estado, en las inmediaciones del puerto de San Felipe y se dirige hacia el Noroeste donde gira en un circuito cerrado sobre la zona de muestreo a 20 metros sobre el nivel del mar. La trayectoria que va hacia el poblado la Rumorosa, tiene su origen en la ciudad de Tijuana, para luego dirigirse hacia el este pasando por Tecate y llegando al poblado a 1200 metros de altura. Para la zona urbana de Mexicali, esta proviene del este de la península, teniendo su origen en el Océano Pacifico y luego dirigiéndose hacia el sureste con dirección al Mar del Salton y llegando a la zona urbana de Mexicali a 20 metros de altura.



Figura 4.55.- Trayectoria a las 0 horas del día 18:00 pm de Agosto del 2011

#### 4.3.2.3.- 27 de Agosto del 2011

En general se puede decir que para las trayectorias de este día, la dirección del viento proviene del sur a norte e influencia a las dos estaciones de monitoreo de la zona urbana y rural de Mexicali; para la estación de muestreo de la Rumorosa proviene totalmente del oeste. El origen de las trayectorias para la zona rural y de la zona urbana proviene del Mar de Cortés, en cambio para La Rumorosa proviene del Océano Pacífico.

Las trayectorias para las 0 horas del día 27 de agosto del 2011 (Figura 4.56), proviene del Oeste desde el Océano Pacífico para dos estaciones de monitoreo, la zona urbana de Mexicali y la Rumorosa, en cambio para la estación de monitoreo de la zona rural esta proviene del sur, del Mar de Cortés. Esta última su trayectoria es hacia el noroeste desde su punto de origen llegando hacia la zona rural a una altura de 20 metros sobre el nivel del mar, en cambio para las otras estaciones de monitoreo, las trayectorias proceden del Océano Pacífico y de la ciudad de Tijuana en dirección

Oeste para llegar a sus respectivas estaciones de monitoreo en la Rumorosa y zona urbana de Mexicali, a una altura de 1200 metros y 20 metros de altura respectivamente.



Figura 4.56.- Trayectoria a las 0:00 horas am del día 27 de Agosto del 2011

Las trayectorias para las 6 horas del día 27 de agosto del 2011 (Figura 4.57), provenían del sur para dos estaciones de monitoreo, la zona urbana y la zona rural de Mexicali, tomando como su origen al Mar de Cortés, mientras para la Rumorosa su origen se encuentran al Oeste en el Océano Pacífico, donde luego se dirige hacia el Este para llegar a La Rumorosa a una altura de 1200 metros, mientras a la zona urbana y rural a 20 metros de altura.



Figura 4.57.- Trayectoria a las 6.00 horas am del día 27 de Agosto del 2011

Las trayectorias para las 12 horas del día 27 de agosto del 2011 (Figura 4.58), provinieron del Sur para las estaciones de monitoreo de la zona urbana y rural de Mexicali, teniendo su origen en el Mar de Cortés y luego reorientándose hacia el Noroeste a una altura de 20 metros sobre el nivel del mar. En cambio para la Rumorosa su origen lo tiene en el Océano Pacifico en dirección este a una altura de 1200 metros.



Figura 4.58.- Trayectoria a las 12:00 horas pm del día 27 de Agosto del 2011

Las trayectorias para las 18 horas del día 27 de agosto del 2011 (Figura 4.59), para las zonas urbanas y rurales de Mexicali provienen del Sur de la península, del Mar de Cortés, luego se redirigen hacia el oeste hasta llegar a las zonas de monitoreo urbana y rural a 20 metros SNM; mientras para la Rumorosa su trayectoria proviene del Oeste, desde el Océano Pacífico redirigiéndose hacia el Este a una altura de 1200 metros SNM.



Figura 4.59.- Trayectoria a las 18:00 horas pm del día 27 de Agosto del 2011

La trayectoria general para esta temporada en las estaciones de monitoreo de la zona urbana y rural de Mexicali fue de Sur a Norte, teniendo su origen principalmente en el Mar de Cortés o en el sur de la península, exceptuando algunas horas durante la madrugada en las cuales la zona urbana de Mexicali cambiaba la influencia de la trayectoria desde el noroeste. En cambio para la zona de muestreo de la Rumorosa su trayectoria general provenía del oeste, del Océano Pacífico y de la ciudad de Tijuana.

Las trayectorias para las 0 horas del día 28 de agosto del 2011 (Figura 4.60), muestran que dos estaciones de muestreo tienen su origen en el sur del estado, por el Mar de Cortés, luego se redirigen hacia el noroeste y llegan a las zonas de monitoreo. En cambio para la estación de muestreo de la Rumorosa la influencia proviene del Oeste del Estado, por el Océano Pacífico y llega al poblado a 20 metros de altura.



Figura 4.60.- Trayectoria a las 0:00 horas am del día 28 de Agosto del 2011

Las trayectorias en general para las estaciones de muestreo de la zona urbana y rural de Mexicali provenían del sureste, a diferencia de la estación de monitoreo de la Rumorosa, que procedía en su mayoría del noroeste, exceptuando algunas horas de la madrugada donde provenían del oeste. Es de notar un hecho que aconteció desde el día 17 de agosto en la noche, donde las trayectorias para la zona urbana de Mexicali procedió del noroeste, siendo un cambio repentino a lo que estuvo pasando durante todo la temporada. Las trayectorias que se dirigen a la zona urbana y rural de Mexicali pasaban por el Mar de Cortés a 20 SMN a diferencia de la Rumorosa que su altura fue de 1200 SMN y procedió del Océano Pacífico.

## CAPITULO V.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 5.1.- Conclusiones

El análisis presentado muestra que la ciudad de Mexicali, no tiene una calidad del aire satisfactoria tanto en la zona urbana como en la zona rural que fueron los objetos de análisis de este trabajo en

las dos temporadas bajo estudio (invierno y verano), donde la principal causa de esta contaminación es diferente para cada caso.

Como conclusión de la serie de tiempos, la diferencia de los niveles de muestreos de  $PM_{10}$  entre las tres zonas de estudio son más notorios en los filtros de teflón que en los de cuarzo, debido posiblemente a la característica de dicho filtro, donde su característica principal es la retención de más cantidad de polvo.

Los niveles de  $PM_{10}$  ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) registrados en las estaciones de las tres zonas de estudio por cada temporada fueron:

- Invierno: Zona montañosa =  $182.02 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ; zona urbana/teflón =  $136.12 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ; zona urbana/cuarzo =  $62.12 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ; zona rural/teflón =  $190.19 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ; zona rural/cuarzo =  $91.42 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .
- Verano: Zona montañosa =  $82.15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ; zona urbana/teflón =  $131.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ; zona urbana/cuarzo =  $45.14 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ; zona rural/teflón =  $159.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ; zona rural/cuarzo =  $58.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

En lo que corresponde a las violaciones a la norma mexicana para las  $PM_{10}$  ( $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) para la temporada de invierno se tuvieron en total cuarenta y seis violaciones (trece para la zona montañosa, doce para la zona urbana/teflón, tres para la zona urbana/cuarzo, diez y seis para la zona rural/teflón y dos para la zona rural/cuarzo), en cambio para la temporada de verano hubo en total veintiséis violaciones (cuatro para la zona montañosa, diez para la zona urbana/teflón, dos para la zona urbana/cuarzo, nueve para la zona rural/teflón y uno para la zona rural/cuarzo)

En relación a la dirección de viento se pudo observar que esta varía en cada temporada. Para invierno predominó la norte - noroeste en la zona urbana y rural de Mexicali con una velocidad de viento promedios de 1 a 2 m/s, con rachas de vientos mayores a 2 m/s, esto pudo haber provocado un estancamiento del polvo en la región, imposibilitando que se limpiara el ambiente. En cambio para la Rumorosa fue oeste-suroeste, con una velocidad de viento promedio de 10 m/s, con rachas de vientos de 14 m/s, este aumento considerable de la velocidad promedio en la zona montañosa pudo haber provocado la resuspensión de polvo en la zona de muestreo. En cambio para la temporada de verano la dirección de vientos predominante proviene del este – sureste para la zona urbana y rural de Mexicali con vientos de 1 a 2 m/s, con rachas de vientos mayores a 2 m/s y para la Rumorosa del suroeste con velocidades de 8 m/s, con rachas mayores a 8 m/s, estos cambios en velocidad en las tres zonas, pudieron haber provocado una menor resuspensión de polvo para la zona montañosa pero un posible aumento de contaminación en las otras dos zonas.

Es importante destacar que la concentración de partículas asociada a la zona urbana, está relacionada a la cercanía al boulevard Benito Juárez y la intersección de esta con el Boulevard Lázaro Cárdenas donde circulan cientos de autos al día, lo cual pudo haber contribuido a que algunos días aumentase la concentración de  $PM_{10}$ , ya sea por las descargas de partículas generadas por el motor o por la resuspensión de polvo callejero generado por los automóviles al pasar, además del polvo generado en los alrededores de la zona urbana. En el valle de Mexicali fueron otros los contribuyentes para la generación de  $PM_{10}$ : los caminos sin pavimentar, la quema de residuos agrícolas y los hornos ladrilleros. Para la zona montañosa (la Rumorosa), la mayoría de la contaminación es producto posiblemente de los caminos no pavimentados, de las montañas cercanas, y derivada de la operación de una compañía yesera establecida en el sitio.

Según el análisis hecho mediante la prueba T para la temporada de Invierno muestra que hay similitud entre la zona urbana y la zona rural con el filtro de teflón, si bien esto no nos dice que

haya transporte de material particulado entre zonas, si nos dice que la contaminación que hay en estas zonas es muy similar, no así en las comparaciones de las otras zonas donde no hay similitudes ni en el tipo de contaminación del lugar. En cambio para la temporada de invierno solo hay similitud entre la zona rural con la zona montañosa y la zona urbana con la zona montañosa esto con el filtro de teflón.

En el análisis químico llevado a cabo se identificaron C, Fe, Si, K, Al, y en algunos casos Mg, Na, Cl, Ti, Ca, S y F, donde el carbono y el silicio fueron los más abundantes, probablemente debido a la contaminación procedente de los campos de cultivo tanto del norte y sur de la ciudad, ya que una gran mayoría de los cultivos del valle usan fertilizantes que son difíciles de asimilar por el suelo agrícola y las plantas los cuales son arrastrados por el viento.

Debido a la diversidad de la composición de las partículas atrapadas en los filtros se obtuvieron elementos diversos en su análisis, así que para la temporada de invierno y verano, los elementos químicos mayoritarios tanto en la zona urbana como en la zona rural fue el silicio, seguido muy de cerca por el carbono y el aluminio, siendo el primero y el tercero elementos comunes encontrados en la tierra o polvo, mientras el segundo como residuo de las quemas de esquilmos.

El tamaño de las partículas encontradas en los filtro de teflón y cuarzo fueron muy similares, oscilaron entre 3 a 9  $\mu\text{m}$ . El tamaño de las partículas en los filtros se deriva del material propio de los desiertos que rodean a los valles de Mexicali e Imperial, que constituye la fracción mayoritaria del material particulado, sus medidas van desde 3.5 hasta 14.2  $\mu\text{m}$ .

Según la caracterización química llevada a cabo por Mendoza, 2010, en filtros de cuarzo y teflón se vieron detectaron altas concentraciones de compuestos orgánicos y carbón elemental, así como de cationes y aniones tales como:  $\text{K}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{SO}_4^{2-}$ . La presencia del carbón generalmente

indica procesos de combustión en áreas industriales y urbanas. El origen principal del carbón elemental son los escapes de los vehículos (vehículos de gasolina y diesel) quema de madera y de llantas. Adicionalmente, los estudios indican que el  $K^+$  es uno de los componentes de las prácticas de quema de residuos agrícolas o esquilmos. Finalmente,  $NO_3^-$ ,  $SO_4^{2-}$  y  $NH_4^+$  provienen principalmente de los nitratos y sulfatos de amonio, preferentemente. Basado en esto el origen principal de las  $PM_{10}$  proviene de emisiones industriales y de automóviles, actividades de quema y formación secundaria de contaminantes.

En el balance de masas los especies químicas se clasificaron en material geológico (MG), material orgánico (MO), elementos trazas (ET), nitrato de amonio ( $NH_4NO_3$ ), sulfato de amonio [ $(NH_4)_2SO_4$ ], sales minerales (sales) y carbón elemental (CE).

En base a los elementos identificados en los análisis de los filtros y asociándolos a su potencial origen, los resultados obtenidos identifican al material geológico como el principal contaminante con un 53.67% para la zona rural, en cambio para la zona urbana el material orgánico es el principal contaminante con un 54.52% en invierno, mientras en verano, el principal contaminante tanto para la zona rural como la zona urbana es el material geológico con 52.34% y 75.48%, respectivamente.

Así el segundo mayor contaminante tanto en la temporada de invierno como en la de verano fue el material orgánico (zona rural en invierno con 37.47%, zona rural en verano con 35.93%, zona urbana en verano con 15.81%), exceptuando que para la zona urbana fue en la temporada de invierno donde hubo mayor registro de material geológico con 31.08%. En ese tenor el tercer contaminante fue el carbón elemental en las dos temporadas: para el invierno se registraron un 4.49% en la zona rural y un 9.9% en la zona urbana, en cambio para el verano los porcentajes variaron en 5.31 y 5.77% para zona rural y urbana, respectivamente.

Estos resultados dejan de manifiesto cierta similitud con los trabajos hechos en la zona urbana de Mexicali por Chow et al. (1997). Esto nos lleva a pensar que en el transcurso de los años, se ha diversificado la composición química del material particulado  $PM_{10}$  en la región, mas no ha disminuido la contaminación, pasando de una contaminación natural propia de la región, a una contaminación provocada por el hombre, aumentando la contaminación por material orgánico (material fosil) y carbón elemental (automotores).

Las trayectorias del transporte de contaminantes para las dos temporadas difieren significativamente debido a la dirección del viento prevaleciente en cada una de ellas; mientras que para la temporada de invierno las trayectorias en su mayoría provenían del norte – noreste, en verano estas fueron de sur – sureste, solo algunos cambios se pudieron observar sobre todo en la estación de monitoreo de la Rumorosa, donde tanto en invierno como verano provenía del oeste y también algunos casos sobre todo en la noche y madrugada de la zona urbana de Mexicali donde esta misma provenía del oeste. Tomando en cuenta el origen de las trayectorias, las de la temporada de invierno venían en su mayoría de los estados de Nevada y California, EEUU, las cuales se enfilaban sucesivamente a las estaciones de muestreo; mientras en verano, estas provenían del sur del estado de Baja California y del Mar de Cortés; en cambio para la Rumorosa provenían en su mayoría del Océano Pacífico.

Como conclusión final podemos deducir que la calidad del aire de la ciudad de Mexicali no es satisfactoria y que esta procede en su mayoría por material geológico tanto para la zona urbana (exceptuando verano donde es material orgánico) como para la zona rural de Mexicali, debido posiblemente al transporte de polvo que se da en las zonas circundante de las zonas de muestreo debido a la acción del viento, que levanta grandes cantidades de polvo y que logra contaminar a las dos zonas en cuestión. Aun así la composición química de las  $PM_{10}$  han cambiado durante el transcurso de los años desde la investigación realizada por Judith C. Chow en 1997 (Chow et. Al,

1997), pasando de una contaminación “natural” propiciada por el material geológico (63%) a una producida por el hombre (47%) que la hacen más peligrosa para la salud humana.

## 5.2.- Alcances y limitaciones

Alcances:

- Se realiza una comparación de los niveles de material particulado PM10 entre la zona rural y la zona urbana de Mexicali.
- Se logró establecer que la contaminación está aumentando en la zona rural de Mexicali y que está siendo superior a la contaminación de la zona urbana en algunos días.
- Se evidencia que la contaminación del aire es mayor en la temporada de invierno.
- La zona montañosa aun a pesar de tener poca población, mantiene unos niveles altos de contaminantes.
- La caracterización química nos muestra como la mayor parte de la contaminación es producto del material geológico (polvo) de la región.
- La caracterización química evidencia un cambio del tipo de contaminantes de 1992-1993 hasta la fecha, convirtiéndola en una contaminación “natural” a una producida por el hombre.
- Si bien las trayectorias no pudieron decirnos si hay transporte de material entre zonas de muestreo, si nos dicen que los vientos pudieron haber re-suspendido el material geológico en las zonas circundantes de la zona de muestreo y contaminado nuestros filtros, con ello mostrarnos una contaminación natural en las zonas de muestreo.

Limitaciones:

- Los niveles de material particulado  $PM_{10}$ , mostrados en la investigación solo representan a las temporadas de estudio (invierno y verano).
- Aun cuando los equipos de muestreo utilizados tienen una zona de influencia bastante grande, no representan a la totalidad de la región, ya sea la zona urbana de Mexicali, como la zona rural de Mexicali.
- Los niveles de material particulado  $PM_{10}$ , no pueden ser comparados con otro medio de captación de contaminación, debido al retraso de información de los monitores de calidad del aire.
- Son pocos filtros para realizar un análisis estadístico más amplio.
- Para las trayectorias se pudieron utilizar otros programas más eficaces como el CALPUFF, mas no se tuvo el tiempo necesario para poder usarlo.

### **5.3.- Líneas futuras**

Líneas futuras:

- Determinar el origen del material particulado  $PM_{10}$ , mediante Factorización de matrices positivas (Positive Matrix Factorization).
- Realizar un modelo de dispersión, transporte y deposición mediante el programa CALPUFF en la zona urbana de Mexicali.
- Determinar la composición química y altura de la capa de mezcla atmosférica de Mexicali.
- Determinar si la contaminación por material particulado (MP) ha provocado un recrudecimiento del cambio climático en la región.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Air Resources Laboratory (ARL), National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), April, 25, 2013, Last Modified, Run HYSPLIT Trajectory Model, <http://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT.php>, Enero 2012 – Mayo 2013.

Albert, L. A., Curso básico de toxicología ambiental, 2ª edición, Limusa, México DF, México (2013).

Alcalá J, Sosa M, Moreno M, Quintana C, Campos A, Holguin C (2008) Retención de polvo atmosférico en especies arbóreas indicadoras de la planeación urbana sustentable: ciudad de Chihuahua, México. *Multequina* 17: 17-28.

Alfaro S.C., Gaudichet A., Gomes L. y Maillé M., 1998, “Mineral aerosol production by wind erosion: Aerosol particle sizes and binding energies”. *Geophysical Research Letters* 25, pp. 991-994.

Andreae M.O. y Crutzen P.J, 1997, “Atmospheric aerosols: Biogeochemical sources and role in atmospheric chemistry”. *Science* 276, pp. 1052-1058.

Avino P., Brocco D. y Cecinato A., 2002, “Carbonaceous material, alkanes, long-chain carboxylic acids and PAHs in PM10: concentration levels and source in Rome”, *Management of Natural Resources, Sustainable Development and Ecological Hazards*, WIT Press Edit, 2002, pp. 693 - 700

Bascom R, Bromberg PA, Costa DA, Devlin R, Dockery DW, Frampton MW, Lambert W, Samet JM, Speizer FE y Utell M (1996) Health effects of outdoor air pollution. *Am J Resp Crit Care Medical* 153 (1): 3-50.

Ballester F (2005). Contaminación atmosférica, cambio climático y salud. *Revista Española de salud pública*, 79 (2): 159-175.

Borras G. E. M. “Caracterización del material particulado atmosférico generado en reactores fotoquímicos y procedente de muestras ambientales”, Tesis doctoral, Departamento de Química, Universitat Politècnica de Valencia, 2013

Bustos S., C., F., 2004, “Aplicación de modelos de dispersión atmosférica en la evaluación de impacto ambiental: análisis del proceso”, Universidad de Chile, departamento de postgrado y postitulo, magister en gestión y planificación ambiental, Santiago de Chile

California Air Resources Board (CARB), 2008, “¿Cómo afectan las partículas a mis pulmones?”, <http://www.imperialvalleyair.org/es/health.cfm>, 28 de junio.

Camargo B. A. y R. O. García, *Evaluación de dos modelos de reducción de escala en la generación de escenarios de cambio climático en el valle de Mexicali en México*. *Información tecnológica* 23(3), 11-20 (2012).

Canales R. M. A., 2010, “Caracterización física y distribución de masa de PM<sub>2.5</sub> en la ciudad y valle de Mexicali”, Tesis de Maestría, área de medio ambiente, Universidad Autónoma de Baja California.

- CASTNet: Clean Air Status and Trends Network Program (1997).  
<http://www.primenet.com/~scipol/projects/ease/casnet.html>.
- Ceballos J. E. y Melgar E. M. (2005) Estimación de costos y gastos directos de los efectos en la salud humana asociados a la contaminación del aire. En: V simposio de contaminación atmosférica 179-184.
- Chow J.C., Watson J.G., Green M.C., Lowenthal D.H., Bates B., Oslund W. y Torres G. (2000).  
Cross border transport and spatial variability of suspended particles in Mexicali and California's Imperial Valley. *Atmos. Environ.* 34, 1833-1843.
- Chow, J.C. (1995). Critical review: "Measurement methods to determine compliance with ambient air quality standards for suspended particles". *JAWMA*, 45, 320-382.
- Chow J., Watson J., Zhiqiang L., Lowenthal D., Frazier C., Solomon P., Thuillier R. and Magliano K. (1996). Descriptive analysis of PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> at regionally representative locations during SJVAQS/AUSPEX. *Atmospheric Environment* 30 (12):2079-2112.
- Chow J., Watson J and Divita F. Jr. (1996a). Particulate matter with aerodynamic diameters smaller than 10  $\mu\text{m}$ . Measurement methods and sampling strategies. In: *Principles of environmental sampling*, Chapter 26. pp. 539-573. American Chemical Society.
- Chow J. C. y Watson J. G., Imperial Valley / Mexicali Cross Border PM<sub>10</sub> Transport Study, DRI Document No. 8623.2d1 (1997).

Chow, J. C. y Watson J. G., 2006, "Overview of ultrafine particles and human health", Management of Natural Resources, Sustainable Development and Ecological Hazards, WIT Press Edit, 2007, pp, 619 / 632

Chuang C.C., Penner J.E., Taylor K.E., Grossman A.S. y Walton J.J., 1997, "An assessment of the radiative effects of anthropogenic sulfate". *Journal of Geophysical Research* 102, pp. 3761-3778.

Duce R.A., 1995, "Sources and distributions and fluxes of mineral aerosols and their relationship to climate". In *Aerosol forcing of climate* (ed. Charlson R.J. y Heintzenberg J.), John Wiley & Sons, pp. 43-72.

De la Rosa J. D., Sanchez de la C. V. A. M., Gonzales C. Y. y Fernandez C. R., 2014, "Evolución geoquímica del material particulado atmosférico en zonas cerámicas y mineras de Andalucía. Implicaciones en calidad del aire", *Macla*, número 18, enero, pp. 29 – 32.

Echeverri Londoño, Carlos Alberto; Maya Vasco, Gabriel Jaime; 2008, "Relación entre las partículas finas (PM<sub>2.5</sub>) y respirables (PM<sub>10</sub>) en la ciudad de Medellín", *Revista de Ingenierías Universidad de Medellín*, Vol. 7, Núm. 12, enero-junio, pp. 23-42, Universidad de Medellín, Colombia

Enciclopedia de los Municipios de México, 15 de Marzo de 2009, <http://www.e-local.gob.mx/work/templates/enciclo/bajacalifornia/municipios/02002a.htm>

EPA, 1996, "Air Quality Criteria for Particulate Matter". EPA. Vol. 1.

Fuchs V. R. y Rosen F. S, 2012, “Aire pollution and medical care use by older americans: A cross-area analisis”, Health affairs, Vol. 21, Núm. 6.

García O. R., E. Jáuregui, D. Toudert, A. Tejeda, *Detection of the urban heat island in Mexicali, B. C., México and its relationship with land use*. *Atmósfera*. 20(2), 111-131 (2007)

García O. R., A. Tejeda y G. Bojórquez, *Urbanization effects upon the air temperature in Mexicali, B. C., México*. *Atmósfera*, 22(4), 349-365 (2009)

Gallardo, K., L, 2006, “Trazas atmosféricas y su modelación”; En Contaminación atmosférica urbana, Episodios críticos de contaminación ambiental en la Ciudad de Santiago

GobBC (Gobierno de Baja California), 2012, verificación vehicular, Internet: “[http://www.bajacalifornia.gob.mx/sedeco/2008/boletin\\_ge/imgs/2012/01012012/volante.jpg](http://www.bajacalifornia.gob.mx/sedeco/2008/boletin_ge/imgs/2012/01012012/volante.jpg)

Gómez, Alfredo; Henao, Enrique; Molina, Eliana; Molina, Francisco; 2003, “Evaluación de las partículas suspendidas totales (PST) y partículas respirables (PM10) en la zona de guayabal, Medellín, Colombia, Revista facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia, diciembre, numero 030, Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia, pp. 24-33

Granier, G. P.; 2003; “Modeling”. In the changing atmosphere: an integration and synthesis of a decade of tropospheric chemistry research. Brasseur et al. (Eds.) Springer-Verlag.

Hansen A.D.A. y Rosen H., 1990, “Individual measurements of the emission factor of aerosol black carbon in automobile plumes”. *Journal of the Air and Waste Management Association* 40, pp. 1654-1657.

Higashi, M. y Burns, T.P, 1991. "Enrichment of ecosystem theory". In: Higashi M & T.P. Burns. (Eds.). Theoretical Studies of Ecosystems. The network perspective. London, Cambridge University Press.

Horak Jr. F., Studnicka M., Gartner C., Spengler J. D., Tauber E., Urbanek R., Veiter A. y Frischer T., 2002, "Particulate matter and lung function growth in children: a 3-yr follow-up study in Austrian schoolchildren", European respiratory journal, 19: 838 – 845.

INE (Instituto Nacional de Ecología), 2010, Inventarios Nacional de Emisiones en Internet: <http://www.ine.gob.mx/dgicur/calair/index.html>

INE (Instituto Nacional de Ecología), 1999, "Programa para Mejorar la Calidad del Aire de Mexicali 2000-2005 ", Litografía Helio, México, D.F, pp. 30 - 60.

INEGI (2010). México en cifras: información nacional, por entidad federativa y municipios (en línea). <http://www.inegi.org.mx/default.aspx> Enero del 2013.

IPCC, 1996, "IPCC: Climate change. The science of climate change". Meira Filho LG Houghton JT, Callander BA, Harris N, Kattenberg A, Maskell K (Eds.). Cambridge University Press, pp 584.

Jaimes de Pino, M. et al, 1990, "Determinación de niveles sanguíneos de carboxihemoglobina como función de la exposición al monóxido de carbono", Revista colombiana de ciencias químico-farmacéuticas No. 18, pp. 21-27.

Kelly KE, Jaramillo IC, Quintero-Nuñez M, Wagner DA, Collins K, Meuzelaar HL (2010) Low-Wind/High Particulate Matter Episodes in the Calexico/Mexicali Region. *Journal of the Air & Waste Management Association* 60 (12): 1476-1486.

Kim E. y Hopke P.K., 2003, "Source identification of Washington DC aerosol using temperature resolved carbon fractions in positive matrix factorization". *Proceedings de la European Aerosol Conference (EAC 2003)*, Madrid, 911-913.

Künzli N., Kaier R., Medina S., Studnicka M., Chanel O., Filliger P., Herry M., Jr F.H., Puybonnieux-Texier V., Quénel P., Schneider J., Seethaler R., Vergnaud J.C. y Sommer H., 2000, "Public health impact of outdoor and traffic related air pollution: a European assessment". *The Lancet* 356, 795-801.

Lacasaña-Navarro M, Aguilar-Garduño C, Romieu I (1999) Evolución de la contaminación del aire e impacto de los programas de control en tres mega-ciudades de América Latina. *Salud Pública de México* 41 (3): 203-215.

La flecha, <http://www.laflecha.net/canales/ciencia/noticias/caracteristicas-de-la-atmosfera-de-la-tierra>, 10 de abril de 2010.

Marticorena B., Bergametti G. y Aumont B., 1997, "Modeling the atmospheric dust cycle 2. Simulation of Saharan dust sources". *Journal of Geophysical Research* 102, pp. 4387-4404.

Mendoza D.A. y Pardo C.E. (2005). Niveles de PM<sub>2.5</sub> y su composición química en la atmósfera de Mexicali, BC durante el otoño de 2004. En: V simposio de contaminación atmosférica. Universidad Autónoma Metropolitana, Iztapalapa, México, pp 55-59.

Mészáros E., 1993, “Global and Regional Changes in Atmospheric Composition.” Lewis Publications, Boca Raton, pp 30.

Mészáros E., 1999, “Fundamentals of Atmospheric Aerosol Chemistry kadémiái Kiado”. Lewis Publications, Boca Raton, pp 56.

Meulenert Peña, et al, 2007, “Estudio de las inversiones térmicas en la Zona Metropolitana de Guadalajara (ZMG) y su relación con la calidad del aire”. Propuesta de diagnóstico y predicción utilizando el modelo WRF (Weather Research Forecasting)”, Instituto de Astronomía y Meteorología, Universidad de Guadalajara.

Meza-Trejo LM, Quintero-Núñez M, García R, Ramírez J (2009) Estimación de Factores de Emisión de PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub>, en Vías Urbanas en Mexicali, Baja California, México. Información Tecnológica 21 (4): 45-56.

Moreno M. J. A. y López L. M. G., 2005, “Desarrollo agrícola y uso de agroquímicos en el valle de Mexicali”, Estudios Fronterizos, julio – diciembre, año/vol. 6, número 12, Universidad Autónoma de Baja California, Mexicali, México, pp. 119 – 153.

Muñoz-amador, Omar, et al, 2001, “Partículas suspendidas, hidrocarburos aromáticos policíclicos y mutagenicidad en el suroeste de la ciudad de México”, Revista Internacional de Contaminación Ambiental, año/vol. 17, numero 004, Universidad Nacional Autónoma de México, Distrito Federal, México, pp. 193-204

Muñoz-Cruz R, Pérez-Núñez V, Ortuño-Mojica C, Palomera M del C, Páramo VH, Ramos R, Cicero-Fernández P (2005) Evaluación de la exposición de la población de la zona

metropolitana del Valle de México a ozono y partículas menores a 10 micrómetros. En: V simposio de contaminación atmosférica 109-114.

Muñoz M. G., Quintana J. E. P., Quintero, N. M., Rodríguez V. J. G., 2013, “Libro Blanco: Impactos en la salud de Iso cruces fronterizos en México – Estados Unidos, puertos de entrada: deficiencias, necesidades y recomendaciones para acciones”, Reporte de la conferencia de impactos a la salud de los cruces fronterizos 2012, 3 y 4 de mayo, 2012 en san ysidro, CA.

Negrete N. D., 2007, “Modelación de la Emisión de Contaminantes NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, CO, NH<sub>3</sub>, COV, PM<sub>10</sub> Y PM<sub>2.5</sub>”, Tesis de doctorado, Instituto de Ingeniería, UABC, Pp. 15 - 17.

Odle R. J., Burt P. J. A. y Slipper I. J., 2002, “Characterisation of particulate matter using microanalysis”, Management of Natural Resources, Sustainable Development and Ecological Hazards, WIT Press Edit, 2002, pp, 571 - 580

Ourtirane K. y Alkama R., 2002, “Analisis of vehicular pollution in the road tunnel of Kherrata (Algeria)”, Management of Natural Resources, Sustainable Development and Ecological Hazards, WIT Press Edit, 2002, pp, 773 - 782

Ponciano Rodríguez, G., Alfaro Moreno, E., Rosas Pérez I., 2001, “La exposición a partículas atmosféricas” Ciencia y Desarrollo, Julio - Agosto, 4 - 13.

Pósfai M. y Molnár A., 2000, “*Aerosol particles in the troposphere: a mineralogical introduction*”. Environmental Mineralogy. David J. Vaughan & Roy A. Wogelius. pp. 434.

- Pope C.A., Burnett R.T., Thun M.J., Calle E.E., Krewski D., Ito K. y Thurston G.D., 2002, “Lung cancer, cardiopulmonary mortality, and long-term exposure to fine particulate air pollution”. *JAMA* 287(9), pp. 1132-1141.
- Prospero J.M., 1999, “Long range transport of mineral dust in the global atmosphere: impact of African dust on the environment of the south-eastern United States”, *Proceedings of the National Academy of Science USA* 96, 3396-403.
- Putaud J.P., et al .2002, “A European aerosol phenomenology: physical and chemical characteristics of particulate matter at kerbside, urban, rural and background sites in Europe”. *Eurotrac* European project.
- Querol X (2008) Calidad del aire, partículas en suspensión y metales. *Revista Española de salud Publica* 82 (5): 447-453.
- Quintero N. M., Sweedler A., 2003, “El aire que respiramos en los valles Imperial y Mexicali”, *Revista Universitaria de la UABC*, Año 1, Número 41, Enero – Marzo de 2003, Pág. 42 – 53.
- Quintero N. M., “Programa ambiental universitario de la UABC”, 1ra edición, 289 – 325, editorial universitaria, Mexicali, México, 2011.
- Reyna-Carranza MA, Quintero-Núñez M, Collins K, Vildósola-Reyes L (2003) Análisis de la relación del PM<sub>10</sub> con las enfermedades respiratorias en la población urbana de Mexicali, Baja California: Un estudio de series de tiempo. *Revista Mexicana de Ingeniería Biomédica* 24 (2): 116-125.

Rodríguez J. M., Los desastres naturales en Mexicali, B. C.: Diagnóstico sobre el riesgo y la vulnerabilidad urbana. *Frontera Norte* 14(27), 123-153 (2002).

Rojas, Nestor Y., 2004, “Revisión de las emisiones de material particulado por la combustión de diesel y biodiesel”, revista de Ingeniería, Universidad de los andes, núm. 20, noviembre, 2004, pp. 58-68, Universidad de los andes, Colombia.

Romero M., Diego F. y Álvarez M. (2006) La contaminación del aire: su repercusión como problema de salud. *Revista Cubana de Higiene y Epidemiología*. Instituto Nacional de Higiene, Epidemiología y Microbiología, Cuba 44 (2); 1-14.

Rosales C. J. A., 2001, “Los efectos agudos de la contaminación del aire en la salud de la población: Evidencias de estudios epidemiológicos”, *Salud Pública de México*, Instituto Nacional de salud Pública, vol. 43, núm. 6, noviembre – diciembre, 2004, pp. 544 – 555, Cuernavaca, México.

Saldarriaga, M., J., C., 2004, “Partículas suspendidas (PST) y partículas respirables (PM<sub>10</sub>) en el valle de aburra, Colombia”, *Revista facultad de ingeniería universidad de Antioquia*, diciembre, núm. 032, Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia, pp. 7 - 16

Secretaría de planeación y finanzas del estado, 2010, Gobierno del estado de Baja California.

Seinfeld J.H. y Pandis S.N., 1998, “Atmospheric Chemistry and Physics: from air pollution to climate change”. John Wiley & Sons, Inc., pp 1323.

Semarnat, 2000, Programa para mejorar la calidad del aire de Mexicali 2000-2005, Mexicali, B.C. México.

Semarnat, 2011, Programa para mejorar la calidad del aire de Mexicali 2011-2020, Mexicali, B.C. México.

SERVIR: Sistema Regional de Visualización y Monitoreo de Mesoamerica (2011).  
<http://www.servir.net/hysplit>

Skoog D A, West D M, Holler F J, Crouch S R (2005). Fundamentos de química analítica. 8a ed.. Ed Thomsan. 1182 pp.

SINAICA, 15 de noviembre de 2006, “Sistema Nacional de Información de la Calidad del Aire”,  
[http://sinaica.ine.gob.mx/Rosa\\_de\\_viento.html](http://sinaica.ine.gob.mx/Rosa_de_viento.html)

Sloane C.S., Watson J., Chow J., Pritchett L. y Richards L.W., 1991, “Size-seggregated fine particle measurements by chemical species and their impact on visibility impairment in Denver”.  
*Atmospheric Environment* 25 (Part A), pp 1013-1024.

SPA, SEMARNAT, ECOLOGÍA (2011). Pro-Aire Mexicali 2011 – 2020. Programa para mejorar la calidad del aire en Mexicali 2011 – 2020. Secretaría de Protección al Ambiente, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Dirección de Ecología. Programa, Mexicali, Baja California, 181 pp.

Tzintzun Cervantes, Ma. Guadalupe et al, 2005, “Las partículas suspendidas en tres grandes ciudades mexicanas”, gaceta ecológica, Núm. 074, enero – marzo, pp. 15 – 28

- Viana M. M., Salas R. (2003) Niveles, composición, y origen del material particulado atmosférico en los sectores norte y este de la península Ibérica y Canarias. Barcelona: Universidad de Barcelona 386 pp.
- Villalobos-Pietrini R, Amador-Muñoz O, Flores-Márquez AR, Guzmán-Rincón J, Munive-Colín Z, Hernández-Mena L, Murillo-Tovar M, Gómez-Arroyo S, Waliszewski SM (2008) Materia orgánica extraída de las aeropartículas de la ciudad de México y sus efectos genotóxicos. *Tip Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas* 11 (2): 105-109.
- Warneck P., 1988, "Chemistry of the natural atmosphere". International Geophysics Series. Wiley & Sons. Vol. 41. Academy Press, pp. 757.
- Watson J.G., Zhu T., Chow J.C., Engelbrecht J., Fujita E.M. y Wilson W.E., 2002, "Receptor modeling application framework for particle source attribution". *Chemosphere* 49, pp. 1093-1136.
- Watson, J.G. y J.C. Chow, *Visibility and air pollution*. En Management of natural resources, sustainable development and ecological hazards. WIT Transactions on Ecology and the Environment, pp. 839, Southamton, UK (2006).
- White W.H. y Macias E.S., 1989, "Carbonaceous particles and regional haze in the western United States". *Aerosol Science and Technology* 10, pp. 111-117.
- WHO, 2003, "Health aspects of air pollution with particulate matter, ozone and nitrogen dioxide". World Health Organization.

Wichmann H.E. y Peters A., 2000, "Epidemiological evidence on the effects of ultrafine particle exposure". *Phil. T. Roy. Soc. A* 358, pp. 2751-2769.

Wolff G.T., Ruthkosky M.S., Stroup D.P. y Korsog P.E., 1991, "A characterization of the principal PM-10 species in Claremont (summer) and Long Beach (fall) during SCAQS". *Atmospheric Environment* 25 Part A, pp. 2173-2186.

## ANEXO



Centro de Información Tecnológica (CIT)  
c/ Monseñor Subercaseaux 667  
La Serena - Chile <http://www.citrevistas.cl>



La Serena - Chile, 21 de Junio de 2014

**Margarito Quintero-Núñez**  
Universidad Autónoma de Baja California  
Instituto de Ingeniería  
Blvd. Benito Juárez y Calle de la Normal s/n  
Col. Insurgentes Este, (21280) Mexicali  
Baja California, México

Estimado(a) autor(a):

Informamos a Ud. que el artículo titulado "*Las Partículas PM10 y su Composición Química en la Zona Urbana y Rural de Mexicali, Baja California*" de los autores Miguel Á. Canales-Rodríguez, Margarito Quintero-Núñez, Telma G. Castro-Romero, Rafael O. García-Cuento, ha sido aceptado para publicación en nuestra revista internacional "*INFORMACIÓN TECNOLÓGICA*", y será publicado en el volumen 25 número 6 (Noviembre-Diciembre) del año 2014.

Si debe citar el trabajo en otras publicaciones puede hacerlo colocando: Autores, título, Inf. Tecnol. 25(6), en prensa (2014)

Agradeciendo su interés en nuestra revista, le saluda muy atentamente,



*Dr. José O. Valderrama*  
Editor