

01177

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**

10  
2ej.

TESIS

**“DISEÑO DE UNA RED AUTOMÁTICA DE MONITOREO ATMOSFÉRICO  
PARA LA TERMINAL MARÍTIMA DOS BOCAS, TABASCO, MÉXICO”**

PRESENTADA POR

**CARLOS ALBERTO GUZMÁN CARRANZA**

PARA OBTENER EL GRADO DE:

**MAESTRO EN INGENIERÍA  
(AMBIENTAL)**

DIRIGIDA POR:

**DRA. RINA AGUIRRE SALDIVAR**

Ciudad Universitaria, Agosto 1998

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

2652 71



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

mi estrategia es  
que un día cualquiera  
no sé como ni sé  
con qué pretexto  
por fin me necesites

***Mario Benedetti***

Recuerda que el amor y los grandes logros, involucran grandes riesgos

***H. Jackson Brown Jr.***

Sostenemos que en un tiempo relativamente breve la formación de la conciencia puede ser más eficaz para el desarrollo de la producción que el incentivo material

***Ernesto "Che" Guevara***

Sébase usted  
si no lo ha pensado  
que tan sólo pienso en estar  
a su lado

***Ana Diaz***

## DEDICATORIA

A mi padre:

Herman, ya que con tu ejemplo de trabajo diario y constante, por la responsabilidad que siempre has mostrado con tus deberes y por las ganas de vivir la vida, me enseñaste lo importante en este mundo.

A mi madre:

Guadalupe, por escucharme en todo momento, por darme consejo y consuelo en las duras y en las maduras, eres mi raíz y la base estable y fuerte desde la cual me levantó y soy lo que soy.

A mis hermanos:

Herman Ricardo, Luis Gerardo, Adriana Lucía y Horacio Arturo que han vivido su vida por ellos mismos, que a pesar de todo somos una familia que encuentra formas de seguir juntos, a través de la distancia y el tiempo. Con mucho cariño para Miguel, Michelle, Merlis y mis sobrinos Charlotte y Herman.

A Sofia:

Ya que sin darte cuenta me ayudaste a reencontrar mis sentimientos y valores intactos en este mundo que se reinventa a diario, y a través de ti me encontré con la imagen del México que quiero, deseo y por el cual trabajo a diario. Gracias Sofi.

A mis amigos los oaxaqueños:

Dora Luz, Ana, Francisco, José Carlos, Andrés, Alejandro D., Alejandro P., Alejandro M., Adelpho y Jorge a quienes los exhortó a seguir preparándose en la vida, profesional y personalmente, y podamos juntos construir un mejor Oaxaca.

## **AGRADECIMIENTOS**

Al finalizar este trabajo de tesis quiero dar las gracias a quien en su momento y capacidad me ayudaron a través de esta etapa de estudios.

A la Dra. Rina Aguirre Saldivar, porque a lo largo del tiempo que duró el proyecto tuvo la paciencia de escuchar mis dudas y explicarme la dirección que debía seguir mi trabajo.

A Ann Wellens Purnal por su ayuda durante mi estancia en la UNAM y por sus consejos en la revisión de la tesis. A mis revisores, los maestros Rodolfo Sosa Echeverría, Vicente Fuentes Gea, Hugo Padilla Gordon, quienes tuvieron a bien revisar los borradores y me hicieron las correcciones y sugerencias pertinentes.

A el personal de PEMEX Exploración y Producción de la Terminal Marítima Dos Bocas y de la Estación de Recompresión de Gas Atasta por brindarme el apoyo necesario para la realización de este trabajo.

A mis compañeros Jesús, Antonio, Germán, Gloria, Sergio, Elvia, Gladys y Gema, en orden de aparición, con quienes estudié, trabajé, conviví y al final nos hicimos amigos.

## INDICE

<b>Dedicatoria</b> .....	ii
<b>Agradecimientos</b> .....	iii
<b>Indice</b> .....	iv
<b>Lista de figuras</b> .....	vii
<b>Lista de tablas</b> .....	viii

### Introducción

Antecedentes .....	ix
Objetivo .....	xi
Alcances y limitaciones .....	xi

### 1. Planteamiento general

1.1 Consideraciones iniciales .....	1
1.1.1 Objetivos de la red de monitoreo .....	1
1.1.2 Disponibilidad económica .....	3
1.1.3 Versatilidad requerida .....	4
1.2 Información necesaria .....	4
1.2.1 Emisión de contaminantes .....	4
1.2.2 Características de la Terminal Marítima Dos Bocas .....	5
1.2.3 Ubicación y características de la población .....	8
1.2.4 Meteorología .....	9
1.2.5 Topografía .....	15
1.2.6 Usos del suelo .....	16
1.2.7 Información sobre calidad del aire .....	19

### 2. Metodología

2.1 Selección de contaminantes a monitorear .....	21
2.1.1 Bióxido de azufre .....	22
2.1.2 Óxidos de nitrógeno .....	23
2.1.3 Hidrocarburos .....	23
2.2 Determinación del área de estudio .....	24
2.2.1 Modelo Gaussiano .....	25
2.2.2 Datos de entrada al modelo .....	26
2.2.3 Resultados .....	29
2.3 Número y distribución de los sitios de monitoreo .....	30
2.4 Frecuencia y duración del muestreo .....	34

### 3. Equipo de monitoreo atmosférico

3.1 Requerimientos .....	36
3.2 Monitoreo automático y monitoreo manual .....	37
3.3 Monitoreo de bióxido de azufre .....	38
3.3.1 Métodos de referencia .....	38
3.3.2 Métodos de equivalencia .....	38
3.3.3 Equipo seleccionado .....	39
3.4 Monitoreo de óxidos de nitrógeno .....	40
3.4.1 Métodos de referencia .....	41
3.4.2 Métodos de equivalencia .....	41
3.4.3 Equipo seleccionado .....	41
3.5 Monitoreo de hidrocarburos .....	43
3.5.1 Métodos de referencia .....	43
3.5.2 Métodos de equivalencia .....	43
3.5.3 Equipo seleccionado .....	44

### 4. Sistema de adquisición de datos

4.1 Definiciones .....	45
4.2 Hardware del sistema de adquisición de datos .....	46
4.2.1 Equipo analizador de gases contaminantes .....	46
4.2.2 Computadora concentradora de información .....	50
4.2.3 Radio módem .....	51
4.2.4 Computadora central secundaria .....	52
4.2.5 Computadora central principal .....	51
4.3 Software del sistema de adquisición de datos .....	54
4.3.1 Programa de las CCI .....	54
4.3.2 Programas de la CCS .....	55
4.3.2.1 SERPEM1 .....	56
4.3.2.2 FIX-DMACS .....	57
4.3.3 Programas de la CCP .....	57
4.3.3.1 FIX-DMACS .....	57
4.3.3.2 MDA01 .....	58
4.3.3.3 Excel .....	59

### 5. Análisis de la información

5.1 Validación de la información .....	62
5.2 Presentación de la información sin procesar .....	62
5.3 Presentación de la información procesada .....	65
5.3.1 Medidas de tendencia central .....	65
5.3.2 Medidas de dispersión .....	66

5.3.3 Medidas gráficas .....	67
5.4 Caso de estudio .....	68
5.4.1 Generación de los datos .....	69
5.4.2 Validación de datos .....	70
5.4.3 Análisis de datos .....	70
<b>6. Conclusiones y Recomendaciones</b>	
6.1 Conclusiones .....	75
6.2 Recomendaciones .....	76
<b>Bibliografía</b> .....	77

## LISTA DE FIGURAS

Figura	Título	Página
1.1	Diagrama de proceso de la TMDB	6
1.2	Localización de la TMDB dentro de la República Mexicana	8
1.3	Localización de la TMDB dentro del Estado de Tabasco	9
1.4	Dirección del viento. Porcentaje anual, 1993 y 1994	13
1.5	Velocidad promedio anual (m/s), 1993 y 1994	14
1.6	Distribución de vientos para la TMDB, 1985	14
1.7	Usos de suelo en la TMDB, imagen de 40 x 35 km	18
1.8	Localización de los puntos del muestreo preliminar de SO <sub>2</sub>	20
2.1	Sistema de coordenadas para el modelo gaussiano	27
2.2	Delimitación del área de estudio	30
2.3	Ubicación de las casetas de monitoreo	33
4.1	Diagrama esquemático de las funciones de un analizador basado en un microprocesador	48
4.2	Conversión de un valor análogo a un valor digital	48
4.3	Diagrama de conexión entre analizadores, computadora concentradora de información y radio módem	51
4.4	Diagrama esquemático de la computadora central secundaria en la TMDB	53
4.5	Diagrama esquemático de la computadora central principal en Ciudad del Carmen, Campeche	53
4.6	Diagrama esquemático de la conexión física del sistema de adquisición de datos	54
4.7	Diagrama de flujo del programa que se ejecuta en las CCI	56
4.8	Diagrama de interacción de los programas SERPEM1 y FIX-DMACS	57
4.9	Pantalla de visualización de información en la CCP	58
4.10	Modelo de dispersión atmosférica instalado en CCP	59
4.11	Diagrama de relación entre cada programa que se ejecutan en la CCP	60
5.1	Gráfica de los promedios diarios de SO <sub>2</sub> en la caseta Confianza para el periodo 25 septiembre - 23 octubre 1997	64
5.2	Gráfica de los promedios horarios máximos de NO <sub>2</sub> en la caseta Confianza para el periodo 25 septiembre - 23 octubre 1997	64
5.3	Gráfica de percentiles para los datos presentados en la tabla 5.1	67
5.4	Histograma de intervalos de concentración construido a partir de los datos de la tabla 5.1	68
5.5	Pantalla de tendencias históricas	71
5.6	Gráfica de los promedios horarios para el periodo 25 septiembre a 23 octubre 1997 para la radiación solar	73

## LISTA DE TABLAS

Tabla	Título	Página
1.1	Características físicas de los quemadores de la TMDB	6
1.2	Características fisicoquímicas del gas quemado en la TMDB	7
1.3	Composición del gas quemado en la TMDB	7
1.4	Cálculo de emisiones a la atmósfera (balance de materia y factores de emisión)	7
1.5	Resumen de temperaturas mensuales en 1985, TMDB	11
1.6	Humedad relativa mensual en 1985, TMDB	11
1.7	Resumen de precipitación mensual en 1985, TMDB	11
1.8	Resumen de horas sol anual 1985 en la TMDB	12
1.9	Nubosidad anual 1985, en la TMDB	15
1.10	Presión atmosférica mensual, 1985	15
1.11	Principales especies encontradas en la zona de la TMDB	18
1.12	Concentraciones máximas medidas en 1 hora	19
2.1	Diferentes escenarios de emisión de contaminantes	27
2.2	Valores del exponente p para el perfil de velocidad del viento	28
2.3	Clasificación de categorías de estabilidad según Pasquill	29
3.1	Especificaciones técnicas del equipo API 100	40
3.2	Especificaciones técnicas del equipo API 200	42
3.3	Especificaciones técnicas del equipo DANI TNMH451	44
4.1	Líneas de información que se manejan en los equipos analizadores	49
5.1	Promedios horarios para NO <sub>2</sub> (ppb) caseta de Confianza, 1 - 15 octubre 1997	63

## INTRODUCCIÓN

### ANTECEDENTES

En los últimos años se ha incrementado considerablemente la preocupación por conocer los niveles de contaminación atmosférica a los que se encuentra expuesta la población, así como los efectos que estos niveles producen en la salud humana, la fauna, la flora y el medio en general.

El incontenible desarrollo industrial y el crecimiento urbano acelerado hacen indispensable el establecer programas de control de la contaminación atmosférica para la protección del medio en contra de los diferentes agentes contaminantes emitidos por las zonas industriales y urbanas.

En 1995, se establece en México el Programa de Medio Ambiente 1995-2000 fundamentado en las disposiciones jurídicas que regulan el sistema de planeación del desarrollo nacional, así como en las directrices del Plan Nacional de Desarrollo 1995-2000 y los principios y lineamientos estratégicos formulados por la SEMARNAP (INE, 1996).

El objetivo general del Programa del Medio Ambiente 1995-2000 es el siguiente: "Frenar las tendencias de deterioro del medio ambiente, los ecosistemas y los recursos naturales y sentar bases para un proceso de restauración y recuperación ecológica que permita promover el desarrollo económico y social de México, con criterios de sustentabilidad".

Y, como parte de una de las muchas estrategias establecidas para llevar a cabo el objetivo antes mencionado está la "Protección ambiental de las zonas costeras", cuyas metas más relevantes son:

1. "Establecer mecanismos de gestión ambiental en las zonas costeras de acuerdo al principio de sustentabilidad, que permitan armonizar el desarrollo económico con el uso de los recursos naturales".
2. "Establecer sistemas de monitoreo e información considerando los indicadores ambientales adecuados, que permitan evaluar la calidad del ambiente, especialmente en áreas críticas y en ecosistemas costeros frágiles".
3. "Promover la generación e integración de información sobre zonas y ecosistemas costeros, con el fin de contar con un soporte técnico sólido, en relación a recursos naturales, calidad ambiental y actividades socioeconómicas".

De acuerdo con las políticas empresariales de Petróleos Mexicanos (PEMEX) y tomando en cuenta lo anterior, PEMEX Exploración y Producción (PEP) se ha preocupado por conocer los niveles de contaminación atmosférica en la zona costera de los estados de Tabasco y de Campeche, ya que es en estos lugares donde se lleva a cabo la mayor actividad petrolera en

México y ha establecido dentro de sus programas de control de la contaminación atmosférica la integración de redes de monitoreo.

Para el diseño, establecimiento y seguimiento de un programa de control de la contaminación atmosférica se deben conocer: las diversas fuentes de emisión de contaminantes; los niveles de emisión y características fisicoquímicas de los compuestos emitidos; la meteorología y climatología del sitio en estudio; la concentración de estos contaminantes en el ambiente; y su efecto sobre la salud humana y el medio, lo cual dependerá en gran medida del ordenamiento urbano, el uso del suelo, etc. (OMS, 1977).

El conocimiento de las fuentes de emisión, los contaminantes emitidos y sus niveles de emisión son lo que en conjunto se conoce como un inventario de emisiones, el cual provee una imagen objetiva del problema y constituye la base de datos fundamental dentro del programa de control, ya que será directamente sobre el control de las fuentes donde el programa incidirá.

La climatología es una característica particular del sitio de implementación del programa de control, por lo que es indispensable considerar a la atmósfera como un sistema termodinámico en el cual los cambios meteorológicos ocurren como resultado de interacciones entre diferentes variables como son: temperatura, presión, humedad, etc., y que estos cambios dan lugar a variaciones en el comportamiento del aire y por lo tanto a la dispersión de sus contaminantes.

De la complicada interacción entre los factores arriba mencionados, emisiones y meteorología, además de las características químicas de los contaminantes, depende la concentración final de estos en el aire, la cual determina el efecto que estos podrán tener sobre la salud humana y el ambiente. Por lo tanto, parte importante de cualquier programa de control es sin duda el monitoreo atmosférico, el cual tiene como principal objetivo proveer la información necesaria para conocer la calidad del aire y, a partir de ésta, establecer medidas de prevención y control de la contaminación atmosférica.

Los programas de monitoreo de la contaminación atmosférica también se realizan con otras finalidades: juzgar el cumplimiento de las normas de calidad de aire, activar estados de emergencia o planes de contingencia, evaluar el riesgo para la salud humana y el ambiente, proveer una base de datos para la planeación del uso del suelo, investigar quejas específicas, evaluar las estrategias y medidas de control, elaborar inventarios de emisiones de contaminantes atmosféricos que permitan establecer políticas ambientales, conocer las variaciones de concentración de contaminantes a largo plazo y/o validar modelos de dispersión atmosférica.

Las políticas de control de la contaminación atmosférica tienen como base fundamental el cumplimiento con las normas de calidad de aire. Estas establecen las concentraciones máximas permisibles de contaminantes para asegurar el bienestar y la protección de la salud de la población, aunque en ocasiones existen normas más específicas, llamadas

*secundarias*, que tienen como base otros criterios como son efectos en la fauna, flora o aun en materiales específicos del sitio de estudio (Nevers et al., 1977).

El crecimiento que las grandes ciudades ha tenido durante los últimos 40 años ha rebasado las expectativas y planes de desarrollo urbano originales, obligando a la ubicación de viviendas, comercios, servicios e industrias dentro de la misma área geográfica. Por lo que se debe buscar, mediante el ordenamiento urbano, minimizar los efectos que una zona industrial tiene sobre una de viviendas.

Para la realización del presente trabajo y como parte del programa actual de control de la contaminación de PEP Región Marina Suroeste, se seleccionó a la Terminal Marítima Dos Bocas (TMDB), ubicada en el municipio de Paraíso, Tabasco para la instalación de una red de monitoreo de la contaminación atmosférica. La TMDB es el punto de recepción del crudo proveniente de la región marina suroeste del Golfo de México, así como de envío a las refinerías del interior del país y a buque-tanques para su transporte al extranjero. De aquí la preocupación, por parte de PEP, de poder garantizar la *operación limpia* de la TMDB y conocer el posible impacto que esta instalación pueda tener sobre el ambiente.

Las emisiones a la atmósfera de dicha instalación provienen principalmente del proceso de incineración del gas amargo de desfogue que se realiza por medio de quemadores elevados de operación continua. Estas emisiones son principalmente gases de combustión y bióxido de azufre que se forma al quemar el ácido sulfhídrico contenido en el gas amargo.

## OBJETIVO

El diseño e instalación de una red automática de monitoreo atmosférico para la zona de la Terminal Marítima de Dos Bocas ubicada en la zona costera del Golfo de México.

## ALCANCES Y LIMITACIONES

El diseño de esta red tiene los siguientes alcances:

- Identificar y aplicar los criterios necesarios para el diseño de la infraestructura básica de una red automática de monitoreo atmosférico para esta zona industrial.
- Determinar las características que deben cumplir los equipos de monitoreo para poder ser utilizados en una red automática de monitoreo, en esta región.
- Determinar las características que debe tener el sistema de adquisición de datos de dicha red.

Si bien la metodología planteada es de aplicación general, el diseño final obtenido no lo es, ya que el caso de estudio presenta las siguientes limitaciones:

- Las principales fuentes de contaminación atmosférica son fuentes fijas elevadas (se desprecia el efecto de las fuentes móviles o fuentes fijas a nivel de piso).
- La zona de estudio se encuentra ubicada en la zona costera del Golfo de México, con características climatológicas y de orografía particulares.
- La ubicación de la TMDB es predominantemente un medio rural, por lo que el diseño teórico de la red de monitoreo se ve modificada por cuestiones prácticas, como suministro de energía eléctrica, seguridad, accesibilidad, etc.

Este documento presenta detalladamente los alcances y limitaciones de la red de monitoreo atmosférico instalada en la TMDB y los principios generales de diseño para una red automática de monitoreo atmosférico.

Este trabajo se ha desarrollado en seis capítulos. El primero trata sobre las consideraciones básicas y el tipo de información necesaria para caracterizar el sitio de estudio.

En el segundo capítulo se presenta la metodología y la aplicación de la información para llevar a cabo el diseño de una red de monitoreo atmosférico.

En el tercer capítulo se recopilan los procedimientos de muestreo manual y automático existentes para cada contaminante a monitorear, los métodos de referencia y equivalencia aplicables y las características de los equipos automáticos de monitoreo para esos contaminantes.

El capítulo cuatro presenta el equipo de adquisición de datos en sus diferentes partes: la generación, almacenamiento, tratamiento y visualización de la información para que pueda ser integrada a un sistema automático de monitoreo.

Posteriormente, en el capítulo quinto se analizan algunas de las diferentes formas de manipulación de la información generada, con el objeto de ejemplificar cómo dicha información puede emplearse para cumplir con los objetivos de un programa de monitoreo.

Finalmente, en el capítulo seis se concluye sobre los aspectos relevantes en el desarrollo del presente trabajo y se proporcionan recomendaciones para el uso de los datos de esta red, su mantenimiento, actualización y otros aspectos que se considera deberán tomarse en cuenta en trabajos futuros.

## 1. PLANTEAMIENTO GENERAL

El monitoreo de la calidad del aire ambiente se ha interpretado como el muestreo y análisis de aire mediante el uso de equipos automáticos continuos o manuales. En un sentido más amplio se puede definir el monitoreo como un muestreo sistemático y planeado para determinar la calidad del aire, utilizando los medios apropiados en frecuencia de recolección e intervalos de reporte para cumplir con los objetivos.

Para el diseño de una red de monitoreo atmosférico es necesario plantear consideraciones iniciales generales tales como: los objetivos a cumplir por la red, disponibilidad económica para su instalación, etc.

### 1.1. CONSIDERACIONES INICIALES

#### 1.1.1. Objetivos de la red de monitoreo

Dentro de los objetivos que debe cumplir la red automática de monitoreo atmosférico de la TMDB, para cubrir las necesidades de PEMEX Exploración y Producción (PEP), se tienen los siguientes:

#### **Juzgar el cumplimiento de las normas de calidad de aire**

Se deben conocer a fondo los procedimientos para medir los niveles de concentración de los diferentes contaminantes atmosféricos para poder compararlos con las normas de calidad de aire. Las normas de calidad de aire establecen los niveles máximos permitidos de concentración para determinados contaminantes como medida de protección a la salud de la población.

A partir del cumplimiento de la normatividad se establecerán los planes generales de desarrollo urbano e industrial para la zona de estudio basándose en información real de los niveles de calidad de aire.

#### **Evaluar planes de control de emisión de contaminantes**

En caso de no cumplir con la normatividad existente se podrán establecer medidas de control para minimizar el impacto de la TMDB en la calidad de aire. La red de monitoreo servirá para evaluar las medidas de control, siendo necesario contar con la red de monitoreo funcionando por un periodo de tiempo prolongado, para el establecimiento de las medidas de control.

### **Evaluar los riesgos a la salud humana**

Este punto se encuentra en estrecha relación con el anterior, debido a que la protección de la salud humana es la base sobre la que se han desarrollado los estudios médicos de los cuales derivan las normas de calidad de aire. El incremento de los niveles de contaminación atmosférica influye directamente en la cantidad de casos de atención médica a la población. La magnitud del problema dependerá de varios factores, entre los que se pueden mencionar: tipo de contaminante, tiempo de exposición, historia clínica de los sujetos, etc. (Castillejos, 1992).

Para conocer los niveles y tiempos de exposición a los diferentes contaminantes, es necesario contar con un sistema de monitoreo continuo que proporcione la información necesaria.

Los riesgos en la salud humana pueden ser clasificados en: efectos agudos observados de un día para otro; efectos crónicos, los cuales se manifiestan después de años de exposición a la contaminación.

Para poder evaluar los efectos agudos en un grupo de control, es necesario contar con un sistema de medición que pueda responder a cambios rápidos en los niveles de concentración de contaminantes, así como si se quiere conocer los efectos crónicos se deberá contar con información de variaciones a largo plazo.

### **Evaluar riesgos para el ambiente**

El ambiente comprende todo aquello que rodea a los seres humanos, tanto en medios rurales como urbanos. La flora, fauna y el medio físico forman los llamados ecosistemas. A lo largo de la historia de la evolución de la raza humana, los ecosistemas han sufrido modificaciones, cambios y hasta han llegado a desaparecer debido a actividades humanas de subsistencia y desarrollo.

Es importante conocer los niveles y duración de los contaminantes a los que se encuentran expuestas las especies de flora y fauna del lugar de estudio para poder tener una base de información y poder inferir el posible daño a dichas especies o al ecosistema como un todo. El daño a edificios y construcciones se evalúa tomando en cuenta además de los contaminantes presentes en la atmósfera, las condiciones meteorológicas, el material de las edificaciones y los tiempos de exposición a los cuales son expuestos (OMS, 1977).

### **Juzgar quejas específicas**

En un sitio particular pueden existir quejas por parte de la población, atribuidas a las emisiones de contaminantes a la atmósfera de una fuente en particular. Para establecer la responsabilidad de dicha fuente de emisión será necesario conocer las características fisicoquímicas de la emisión, así como su magnitud, los parámetros meteorológicos de la zona, etc.

También se debe investigar acerca de las quejas de la población, realizando encuestas en cuanto a la duración y condiciones en que se presenta la emisión, afectaciones a la salud, daños en materiales, etc., tratando de establecer una relación entre los efectos y la emisión de dicha fuente.

### **Observar variaciones a largo plazo**

Para determinar el deterioro en la calidad de aire debido a la actividad industrial en la zona de estudio, es necesario contar con información confiable por periodos mayores a un año. Para este propósito específico es suficiente una red de monitores, manuales o automáticos, con periodos de 24 horas de muestreo y en 3 o 4 sitios dentro del área geográfica determinada.

Con este tipo de mediciones se pueden tener variaciones anuales de los contaminantes particulares de estudio. Se debe asegurar que las mediciones sean hechas durante todo el año, o durante periodos representativos .

*Si se utilizan equipos automáticos es posible tener mediciones ininterrumpidas, y analizando los datos estadísticamente se puede conocer no sólo las variaciones anuales, sino además las variaciones diarias y/o estacionales de contaminación.*

### **Validar modelos de dispersión atmosférica**

Los modelos de dispersión de contaminantes atmosféricos relacionan las emisiones de una o múltiples fuentes con las concentraciones medidas en un área en particular. Los modelos de dispersión calculan las concentraciones de contaminantes esperadas cuando se planea establecer una nueva fuente de emisiones. También son de utilidad cuando se desean establecer medidas de control y/o pronosticar situaciones de emergencia o contingencia.

Los modelos, al ser abstracciones o representaciones matemáticas de la realidad, contendrán un error inherente debido a las consideraciones hechas en su realización. Para conocer la magnitud del error, el modelo deberá ser “calibrado”, “validado” o al menos sujeto a una comparación con mediciones reales de los contaminantes.

Por lo tanto, una red de monitoreo sirve para la calibración de un modelo de dispersión de contaminantes, ya sea que calcule concentraciones para periodos largos de tiempo o si pronostica valores para periodos cortos, pues que al tener monitores automáticos se puede contar con las variaciones durante el día, o durante periodos más largos de tiempo. La red de monitoreo debe estar trabajando por un periodo de un año, o durante periodos significativos, para poder contar con datos suficientes para calibrar el modelo.

#### **1.1.2. Disponibilidad económica**

Los propósitos de monitorear la calidad del aire ambiente deben ser vistos en el contexto global de la administración de la calidad del ambiente. El tomador de decisiones debe

asignar prioridades entre una multitud de preocupaciones ambientales y decidir si un programa de monitoreo de la calidad del aire se justifica y hasta qué nivel de sofisticación debe llegarse.

En este sentido, es imperante establecer un programa de monitoreo adecuado a los objetivos planteados inicialmente, para poder tener el apoyo económico necesario para construir, operar y mantener la red de monitoreo.

Es importante señalar que la realización práctica de una red de monitoreo no podrá realizarse adecuadamente si no se conoce de antemano el presupuesto disponible para su instalación, operación y mantenimiento.

### 1.1.3. **Versatilidad requerida**

Se requiere que la red de monitoreo sea capaz de crecer, para en un futuro tener mediciones de otros contaminantes y en otros sitios diferentes a los establecidos como base de diseño. Esta versatilidad influye directamente en el sistema de adquisición de datos, por lo que se debe poner especial interés en el diseño del sistema para que pueda crecer conforme a los requerimientos del desarrollo industrial y urbano de la zona de estudio.

## 1.2. INFORMACIÓN NECESARIA

### 1.2.1. **Emisión de contaminantes**

Uno de los primeros pasos en el diseño de una red de monitoreo es recopilar información referente a las emisiones de los contaminantes atmosféricos en el área de interés. Las principales fuentes normalmente incluyen industrias, vehículos automotores, plantas de generación de energía eléctrica, incineradores y equipo de calefacción. La información que se debe recabar se refiere al número, tipo, tamaño, localización de cada fuente y deberá complementarse con información referente al tipo y cantidad de combustible utilizado y su composición (contenido de azufre). Los combustibles para fuentes estacionarias deben considerarse por separado del utilizado en fuentes móviles y del gas amargo que se quema en la TMDB.

Con esta información se podrá realizar un inventario de emisiones para estimar las concentraciones de contaminantes atmosféricos esperadas, utilizando modelos de dispersión de contaminantes.

Al considerar la distribución de las fuentes de emisión de contaminantes es importante hacer una distinción entre fuentes elevadas y fuentes a nivel de piso, ya que las segundas tendrán un impacto, en concentraciones a nivel de piso, proporcionalmente mayor que fuentes industriales elevadas. Por otra parte es importante hacer una distinción entre los contaminantes emitidos directamente de las fuentes (contaminantes primarios) y los contaminantes resultado de reacciones fotoquímicas (contaminantes secundarios). Los

últimos son particularmente importantes con respecto a las emisiones de las industrias de transporte y petroquímica. Dado que los contaminantes secundarios son formados en la atmósfera, las mayores concentraciones se encontrarán alejadas de las fuentes y este aspecto debe tomarse en cuenta al diseñar una red de monitoreo.

### 1.2.2 Características de la Terminal Marítima Dos Bocas

Las funciones principales de la TMDB son la recepción, almacenamiento y exportación del crudo proveniente de los complejos marinos de producción Akal-C, Nohoch-A, Pool-A y Abkatum-A, además del de las baterías de Puerto Ceiba, Cunduacán, Castarrical y Pijije.

Los procesos y actividades de servicio que se realizan en la TMDB son los siguientes:

- Recepción del petróleo crudo por tubería, tanto de plataformas como de pozos de tierra.
- Estabilización del crudo.
- Rectificado del gas/vapor obtenido en la separación.
- Compresión del gas y envío por gasoducto a Cunduacán, Tabasco.
- Almacenamiento de crudo.
- Bombeo de crudo.
- Envío de crudo a Nuevo Teapa, Tabasco.
- Quemado de los gases de desecho.
- Generación de energía eléctrica mediante generadores accionados por una turbina mixta (gas o diesel).
- Almacenamiento de diesel para accionamiento de motores y para abastecimiento de buques.
- Estación de servicio para suministro de carburantes a vehículos.
- Planta de tratamiento de efluentes.
- Puerto de carga para suministro a plataformas.

La figura 1.1 presenta el diagrama de proceso y la secuencia de las actividades mencionadas.

Las principales fuentes de contaminación atmosférica detectadas en la TMDB son los quemadores elevados, que se utilizan como dispositivos de seguridad para disponer del gas de proceso que no puede ser manejado. Además del gas excedente que se quema, se emplea gas dulce (gas natural sin ácido sulfhídrico) para mantener encendido el piloto del quemador con un gasto de 0.1 millones de pies cúbicos por día. Otras fuentes de emisión existentes en las instalaciones, como calderas, motores de combustión interna y motocompresoras, no se consideran de importancia para el presente estudio, debido a que su volumen de emisión es despreciable comparado con el de los quemadores.

Durante el proceso de la TMDB, al realizar la estabilización, separación y rectificación del crudo, se obtiene gas el cual se comprime y envía a Cunduacán para su posterior procesamiento.

En el momento de presentarse una interrupción en la línea de envío de gas y como medida de seguridad, el gas excedente, con un contenido promedio de 2% de ácido sulfhídrico, se envía a los quemadores elevados de la TMDB para su eliminación. El gasto de gas amargo (gas natural con ácido sulfhídrico) que se dispone en quemadores se calcula mediante un balance entre lo producido y lo enviado a Cunduacán, ya que no existe instrumentación para su medición directa. Este valor es en promedio de 0.1 millones de pies cúbicos por día.

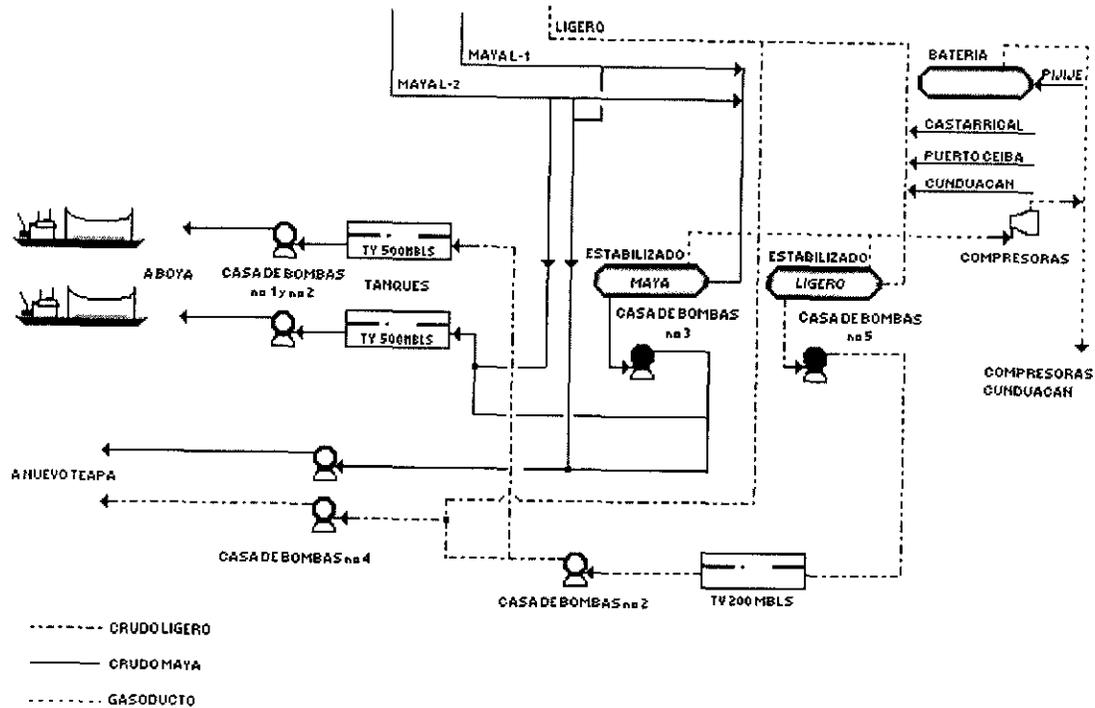


Figura 1.1. Diagrama de proceso de la TMTDB

Las características físicas de los quemadores de la TMDB se presentan en la tabla 1.1.

Tabla 1.1. Características físicas de los quemadores de la TMDB

Quemador	Altura (m)	Estado	Diámetro interno (m)	Posición	
				Longitud	Latitud
Compresión	24	Activo	0.30	18°26.329'	93°09.883'
Nuevo	65	Activo	0.91	18°26.326'	93°09.915'

Para estimar los volúmenes de gases contaminantes emitidos a la atmósfera y caracterizar las fuentes de emisión de la TMDB, se emplearon balances de materia, usando como base de cálculo un gasto diario de entrada a los quemadores de 0.1 millones de pies cúbicos por día de gas amargo con las características que se muestran en las tablas 1.2 y 1.3.

**Tabla 1.2.** Características fisicoquímicas del gas quemado en la TMDB

Condiciones de operación y propiedades	
Presión P (kg/cm <sup>2</sup> )	0.1
Temperatura T (°C)	37.0
Peso molecular promedio (g/gmol)	34.146
Densidad relativa (aire = 1 kg/m <sup>3</sup> )	1.179
Poder calorífico (BTU/ft <sup>3</sup> )	1780.911
Factor de compresibilidad (z)	0.989

**Tabla 1.3.** Composición del gas quemado en la TMDB

Compuesto	% mol
Nitrógeno (N <sub>2</sub> )	6.344
Bióxido de carbono (CO <sub>2</sub> )	2.064
Ácido sulfhídrico (H <sub>2</sub> S)	2.232
Agua (H <sub>2</sub> O)	0.000
Metano (C <sub>1</sub> )	27.060
Etano (C <sub>2</sub> )	24.364
Propano (C <sub>3</sub> )	24.368
Isobutano (iC <sub>4</sub> )	4.081
Butano normal (nC <sub>4</sub> )	6.879
Neopentano (neoC <sub>5</sub> )	0.000
Isopentano (iC <sub>5</sub> )	1.563
Pentano normal (nC <sub>5</sub> )	0.800
Hexanos y más pesados (C <sub>6</sub> +)	0.245
Total	100.00 %

Considerando que en los quemadores se lleva a cabo un proceso de combustión, utilizando como combustible gas amargo, los contaminantes que se pueden emitir son: bióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), partículas (PST y PM<sub>10</sub>) e hidrocarburos no quemados (HC). La tabla 1.4 presenta los resultados del balance de materia para CO, NO, SO<sub>2</sub> y HC como metano, a 1800°K, y la emisión de PST calculada a partir de factores de emisión para equipos de combustión externa. Estos valores se emplearon posteriormente para pronosticar las concentraciones de contaminantes por medio de modelación matemática (Wellens et al., 1997).

**Tabla 1.4.** Cálculo de emisiones a la atmósfera (balance de materia y factores de emisión)

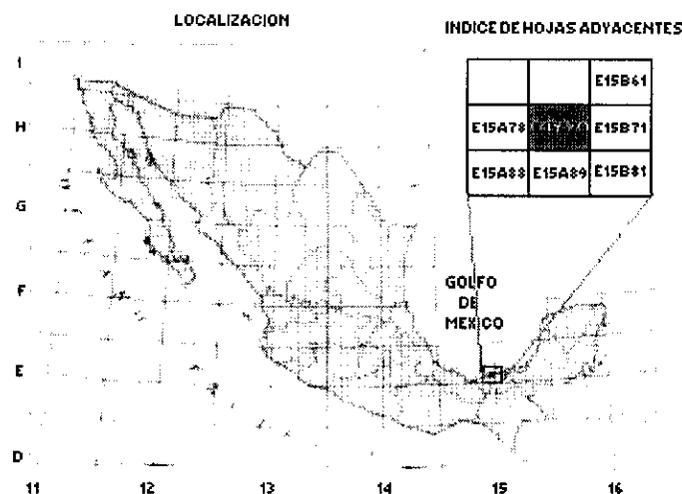
Emisión (g/s)				
CO	NO	SO <sub>2</sub>	HC (comoCH <sub>4</sub> )	PST
1.230	0.0976	2.066	0.22	0.003

### 1.2.3. Ubicación y características de la población

La decisión de comenzar un programa de monitoreo se basa frecuentemente en las quejas de los habitantes. En algunos casos estas quejas se basan en malos olores y polvo. El origen y la distribución geográfica de las quejas, su tipo y número pueden ayudar en el diseño de la red de monitoreo. Además, es necesario recabar información sobre el daño de los contaminantes sobre plantas, animales y materiales en el área de estudio como ayuda en la selección de los sitios de monitoreo.

La distribución geográfica de la población dentro del área de estudio es importante cuando se quiere evaluar el tiempo de exposición de la población. El monitoreo de la calidad del aire para estudios epidemiológicos se lleva a cabo en áreas pobladas que tienen niveles diferentes de contaminación. La información proporcionada por los censos de población, tal como edad y condición socioeconómica, es importante para complementar el diseño de la red.

La TMDB se encuentra ubicada el estado de Tabasco, según se muestra en la figura 1.2 (INEGI, 1991), en el municipio de Paraíso, en la región de la Chontalpa, la cual se caracteriza por terrenos planos e inundables, donde se practican fundamentalmente actividades de carácter agrícola. Existen también explotaciones de pesca e industrialización del cacao y de la caña de azúcar.



**Figura 1.2.** Localización de la TMDB dentro de la República Mexicana

La población total del municipio de Paraíso es de 58,403 habitantes, distribuidos principalmente en: el poblado de Paraíso (cerca de 20,000 habitantes); 13 poblaciones (de 1000 a 1999 habitantes); 18 poblaciones (de 500 a 999 habitantes) y 9 poblaciones (de 100 a 499 habitantes).

Las actividades principales en el municipio de Paraíso son la agricultura, ganadería, silvicultura y pesca (33.3 % de la población ocupada) y actividades relacionadas con la extracción del petróleo y de gas (13.7 % de la población ocupada).

La mayor parte de las quejas provienen de las personas relacionadas a la agricultura y la pesca y también de las personas localizadas en las poblaciones de Torno Largo y Puerto Ceiba (figura 1.3), poblaciones muy cercanas a los quemadores de la TMDB (800 m y 3,000 m, respectivamente). La población de Paraíso, localizada al SW de la TMDB, se encuentra en la dirección dominante de viento, a una distancia de aproximadamente 6.5 km de la TMDB, no ha presentado quejas por parte de la población.

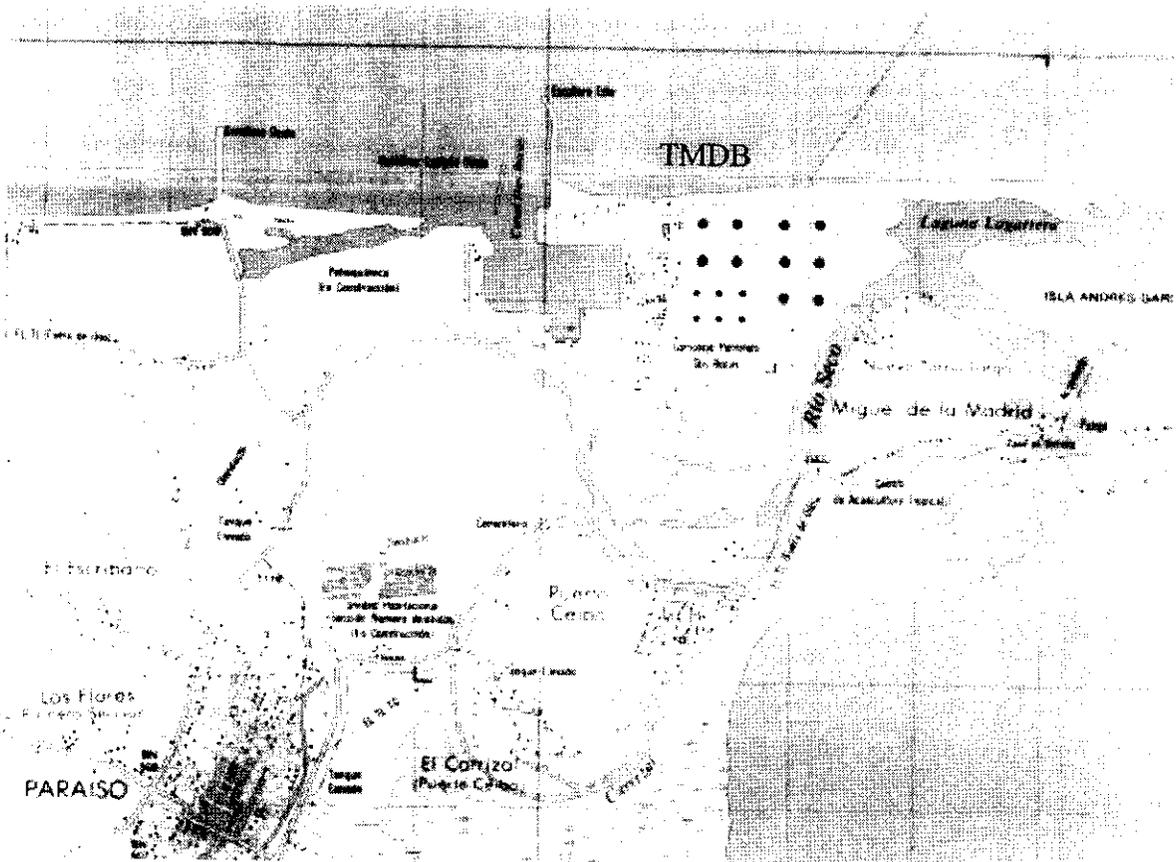


Figura 1.3. Localización de la TMDB dentro del Estado de Tabasco

#### 1.2.4. Meteorología

Se debe conocer de antemano la información meteorológica que existe en el área geográfica de interés, ya que de su análisis depende en gran medida la ubicación ideal de los sitios de monitoreo. La información meteorológica normalmente se recaba para otros fines diferentes que el monitoreo de la calidad de aire, por lo que es esencial la colaboración del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) para complementar la información existente para el diseño de la red.

La información perteneciente a los sistemas de navegación aérea también será de utilidad, muchas veces proveyendo información más completa que el SMN.

Las parámetros medidos más comúnmente son: dirección de viento, velocidad de viento y variaciones en la temperatura superficial a lo largo del día y durante todo el año. Otros parámetros que en ocasiones están disponibles son: precipitación pluvial, horas de sol, humedad relativa y presión barométrica. Los gradientes de temperatura con respecto a la altura y altura de la capa de inversión son muy útiles, pero pocas veces se conocen.

La información meteorológica disponible para este estudio fue proporcionada por el personal de PEP en dos formatos: 1) promedios mensuales basados en mediciones horarias durante los años 1979 a 1981 y 1983 a 1988 de los parámetros de temperatura ambiente, humedad relativa, precipitación, horas de sol, dirección y velocidad de viento, nubosidad y presión atmosférica tomados por el observatorio meteorológico de la TMDB; 2) mediciones puntuales diarias a las 0:00, 6:00, 12:00 y 18:00 horas de los parámetros velocidad y dirección de viento durante los años de 1993 y 1994 tomada por la estación meteorológica de la TMDB. Sobre el segundo formato se hizo un promedio de velocidad para cada dirección de viento presente.

A continuación se presenta un resumen de la información meteorológica analizada, presentando el año 1985 como representativo de la zona de estudio, además para el parámetro de velocidad y dirección de viento se presentan los años de 1993 y 1994, por ser los más recientes.

El tipo de clima que caracteriza la zona donde se halla ubicada la TMDB, de acuerdo a la clasificación climática de Köppen modificado por E. García, corresponde a un clima cálido húmedo con abundantes lluvias en verano (Secretaría de la Presidencia, 1970).

### **Temperatura ambiente**

La temperatura ambiente debe conocerse para estimar el efecto de flotación de los gases contaminantes al salir de la fuente de emisión, siendo este un factor importante en las ecuaciones del modelo de dispersión de contaminantes. También es indispensable conocer los valores de temperatura ambiente para realizar el diseño de la caseta de resguardo de los equipos de monitoreo.

La temperatura mínima absoluta observada en los datos meteorológicos disponibles fue de 11°C para febrero 1983 y la máxima absoluta fue de 37°C para abril del mismo año. La temperatura media tuvo un mínimo de 16°C y un máximo de 29.5°C, y el promedio anual oscila en el rango anterior. Los meses más calurosos son de abril a noviembre (temperaturas promedio mayor a 25°C) y los meses menos calurosos son de diciembre a marzo (tabla 1.5).

**Tabla 1.5. Resumen de temperaturas mensuales en 1985, TMDB**

Temp. (°C)	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Max. Abs	29	30	33	32	33	33	32	32	33	32	31	25
Media	23	23	26	26	27	28	27	27	27	27	26	24
Min. Abs	17	19	22	22	24	24	24	24	24	22	22	20

### Humedad relativa

La importancia de la humedad relativa en este estudio es establecer las características con que debe contar la infraestructura de los sitios de monitoreo (caseta de resguardo, equipo de monitoreo, sistema de adquisición de datos, etc.) para poder trabajar adecuadamente en tales condiciones, ya que la humedad ocasiona problemas de condensación de humedad dentro de la tubería de conducción de la muestra de aire y en los equipos analizadores de gases.

Para este sitio, la humedad mínima absoluta en la zona observada en los datos analizados fue de 60% y se registró en marzo de 1983 y la máxima absoluta fue de 92% en febrero de 1985. La humedad media tuvo un mínimo de 82 % y un máximo de 90 %, y en promedio oscila en todo el año alrededor de 85-90 %.

Como se puede ver (tabla 1.6), en el sitio de estudio se encuentran niveles de humedad relativa arriba del 85 % la mayor parte del año, por lo que se tomó en consideración para seleccionar una toma de muestra forrada por una resistencia que calienta la muestra a 50°C para evitar la condensación dentro de los equipos analizadores.

**Tabla 1.6. Humedad relativa mensual en 1985, TMDB**

H.R. (%)	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Max. Abs	92	92	91	91	90	89	89	89	89	90	90	91
Media	90	90	89	88	86	86	87	87	87	87	87	87
Min. Abs	88	86	82	82	82	82	82	82	81	83	84	85

### Precipitación pluvial

La precipitación pluvial sirve para determinar las condiciones de operación a las que se expondrá los equipos de toma de muestra, así como las previsiones que se deben tomar para la construcción de las casetas de resguardo (se construyen a un nivel superior al que el agua alcanza en temporada de lluvias).

El mes con mayor precipitación fue diciembre de 1985, con 320 mm de lluvia, y el menor registro fue abril de 1984 con 0 mm. En general, los meses con más de 50 mm de precipitación son de julio a enero (tabla 1.7).

**Tabla 1.7. Resumen de precipitación mensual en 1985, TMDB**

Precipitación (mm)	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Valor mensual	52	50	20	10	48	40	100	70	190	160	40	320

## Horas de sol

Las horas de sol es un parámetro útil sino se cuenta con una medición de la radiación solares. Este parámetro se analizó en el presente estudio, primero como indicador de la estabilidad de la atmósfera (Turner, 1994) de la cual depende directamente la dispersión de contaminantes; segundo, como fuente de energía para las reacciones fotoquímicas que producen los contaminantes secundarios tales como el ozono.

El mes con mayor número de horas de sol fue agosto de 1985 con 290 horas en total, y el de menor número fue febrero de 1984 con sólo 114 horas. Los meses con más de 200 horas de radiación son de marzo a noviembre.

Aunque la información revisada se presenta como horas mensuales de presencia de sol, como parte del proyecto conjunto PEP-UNAM se instalará una estación meteorológica automática que registra la radiación solar en  $\text{Watts/m}^2$ , que proveerá información mas precisa acerca de la radiación solar.

**Tabla 1.8.** Resumen de horas sol anual 1985 en la TMDB

Radiación (horas)	Ene	Feb	Már	Ab	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Valor mensual	164	184	256	252	258	225	270	290	222	250	222	124

## Velocidad y dirección de viento

La velocidad y dirección del viento son quizá los 2 parámetros más importantes en este estudio. Son la parte medular del diseño de la red de monitoreo, ya que indican con claridad las regiones que son más favorecidas por la dirección del viento, así como la rapidez del viento hacia esas regiones. Además, son necesarios para realizar corridas con el modelo de dispersión de contaminantes y pronosticar los niveles esperados de contaminantes.

El comportamiento general de los vientos para esta zona presenta 2 situaciones: 1) en los meses de otoño e invierno los vientos dominantes son del NE, además de la importancia de los *nortes* (vientos del norte) principalmente en invierno, los cuales provocan descensos en las temperaturas y fuertes vientos. 2) en los meses de primavera y verano se siguen presentando vientos del NE, los vientos alisios empiezan a adquirir fuerza y dominio sobre el área y comienzan a adquirir importancia los vientos del SE. La componente común es el E, indicando el dominio de los vientos alisios. Los ciclones o huracanes y las tormentas tropicales son sistemas de baja presión que se presentan en estos meses, con máxima probabilidad de ocurrencia en agosto y septiembre. (Cardoso, 1976).

La cercanía al mar determina el régimen de vientos, ya que a partir del mediodía la brisa del mar sopla hacia la tierra debido a las diferencias en el calentamiento de las capas de aire inmediatas a la superficie de la tierra y el mar. Al acercarse el anochecer se invierte la dirección de la brisa y la brisa sopla de tierra hacia el mar.

La figura 1.4 muestra la dirección de viento (dirección desde la cual sopla el viento) en porcentaje, siendo las más frecuentes las direcciones NNE y NE, y la figura 1.5 muestra la velocidad promedio del viento, teniendo una media de 8 m/s, para los años 1993 y 1994.

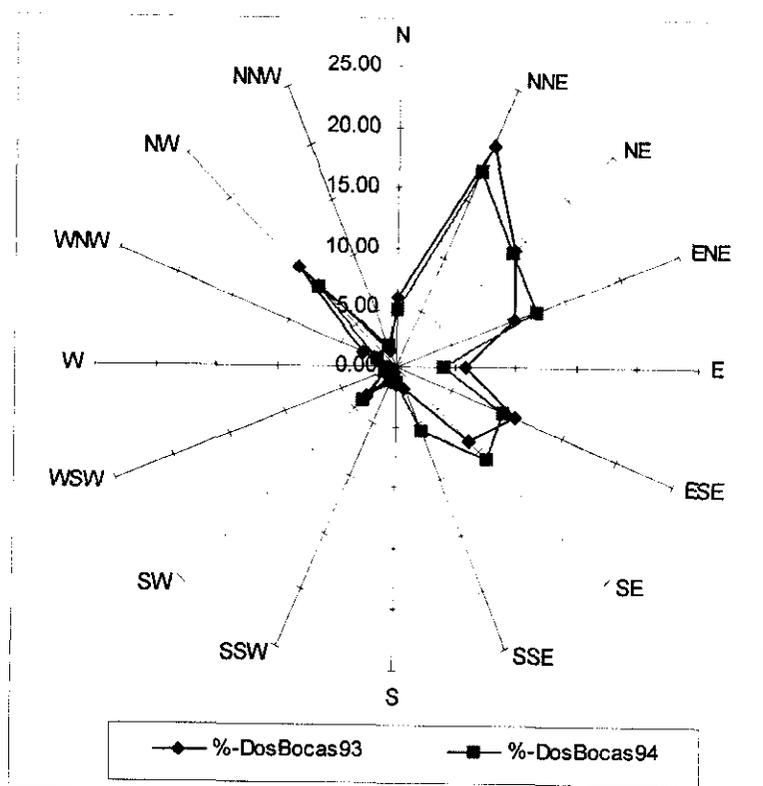


Figura 1.4. Dirección del viento. Porcentaje anual, 1993 y 1994

La figura 1.6 muestra la distribución de vientos (ocurrencia e intensidad) para el año 1985, representativo de las condiciones de viento que imperan en la zona de la TMDB. El análisis de dirección y velocidad de viento para los años analizados 1979 a 1988 (excepto 1982) es consistente con la información presentada anteriormente. En resumen, se puede observar que en la zona soplan vientos del NNE, NE, ENE y E durante todo el año, siendo la dirección E la característica de los vientos alisios del hemisferio norte.

### Nubosidad

La nubosidad es importante por que junto con la radiación solar es un indicativo de la estabilidad atmosférica y por lo tanto de la capacidad de la atmósfera de dispersar a los contaminantes.

La nubosidad se clasifica en 4 categorías: Oscuro, nublado, medio nublado y despejado. En general, la categoría predominante en todo el año es la categoría de medio nublado, con valores que oscilan de 32 % a 70 %. En invierno aumentan los días nublados y en verano los días con cielo despejado. La tabla 1.9 corresponde a los porcentajes de nubosidad observados para 1985.

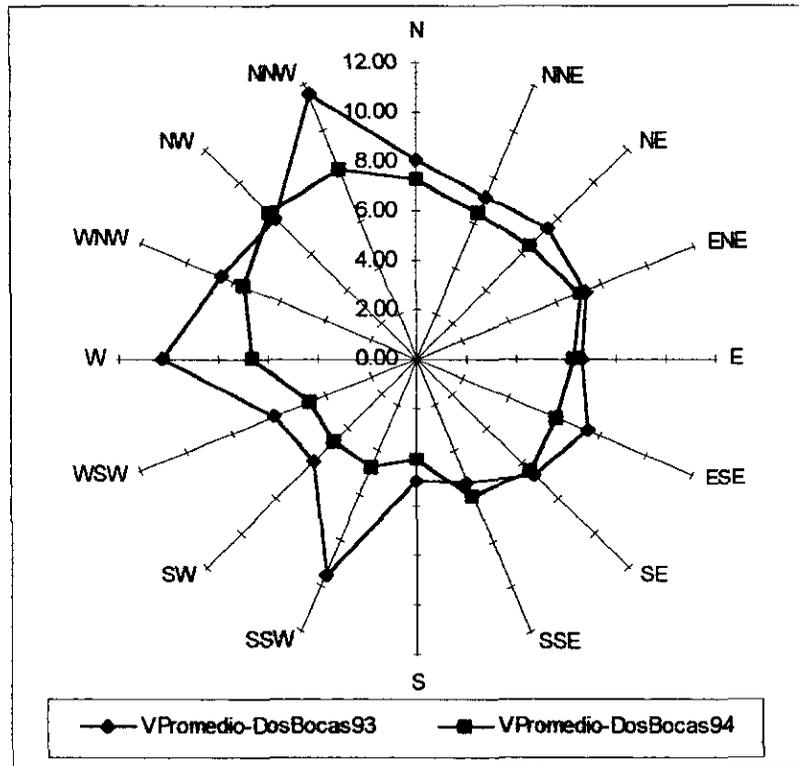


Figura 1.5. Velocidad promedio anual (m/s), 1993 y 1994

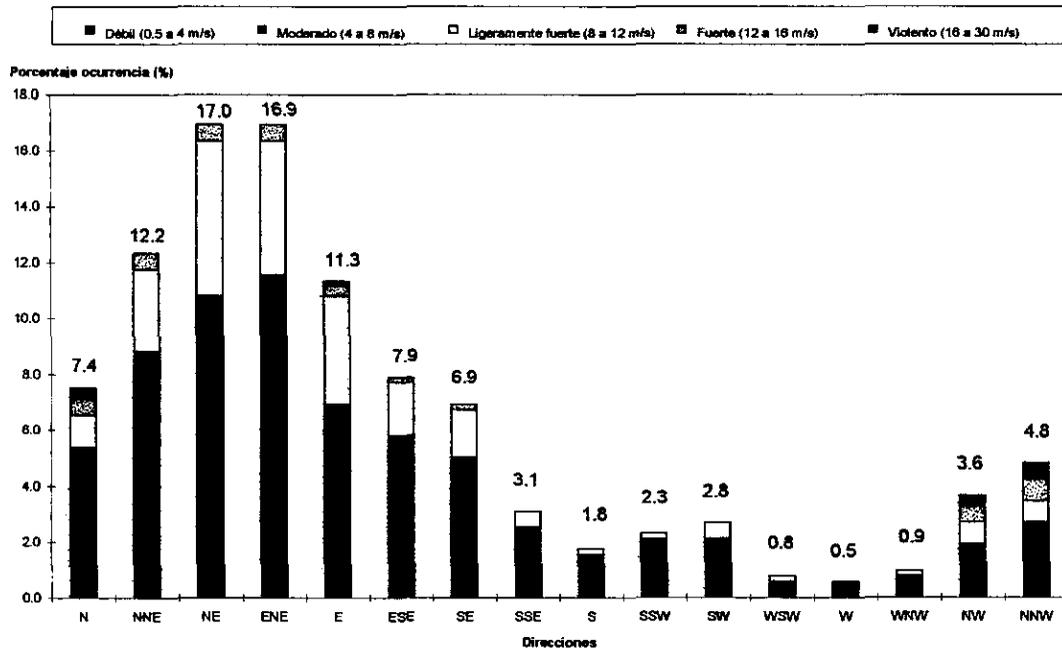


Figura 1.6. Distribución de vientos para la TMDB, 1985

**Tabla 1.9.** Nubosidad anual 1985, en la TMDB

Nubosidad (%)	Ene	Feb	Mar	Ab	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Oscuro	15	2	2	0	0	2	0	0	0	0	6	12
Nublado	17	36	16	10	10	40	16	26	2	19	4	42
Medio nublado	48	54	42	70	58	40	72	44	80	45	60	35
Despejado	20	8	40	20	32	18	12	30	18	36	30	11

### Presión atmosférica

Como parámetro dentro del modelo de dispersión de contaminación atmosférica se pide la presión atmosférica para estimar el efecto de flotación de la "pluma" contaminante, por lo que se hace un análisis de este parámetro. Nótese los valores cercanos a 1013 mb, 1 atmósfera de presión, ya que la TMDB se ubica a una altura de unos pocos metros sobre el nivel medio del mar.

La presión mínima absoluta registrada fue de 998 mb en marzo de 1983, y la máxima absoluta, de 1033 mb, ocurrió en enero del mismo año. La presión media anual registra mínimos de 1008 mb y máximos de 1027 mb. Los meses con menor presión atmosférica comprenden de abril a octubre y los meses con valores mayores son de noviembre a marzo (tabla 1.10).

**Tabla 1.10.** Presión atmosférica mensual, 1985

Presión atmosférica (mb)	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Max. Abs	1026	1027	1022	1021	1019	1020	1021	1020	1019	1018	1021	1024
Media	1020	1018	1017	1015	1014	1015	1017	1016	1015	1014	1015	1018
Min. Abs	1015	1012	1011	1010	1010	1012	1014	1012	1011	1010	1010	1012

### 1.2.5. Topografía

La topografía de un lugar juega un papel importante en la selección de sitios de ubicación para realizar monitoreos ya que afecta las condiciones de viento y estabilidad para un área específica. Se han desarrollado complejos industriales a lo largo de la cuenca de ríos, donde se tiene una tendencia mayor a desarrollar inversiones térmicas y poca dispersión de contaminantes, con el consiguiente incremento en la concentración de los mismos. En las ciudades construidas sobre terrenos montañosos se encuentran con diferencias notables en contaminantes en regiones dentro del área urbana. En general, entre más complejo es el terreno se necesitan un mayor número de estaciones de monitoreo.

El suelo del municipio de Paraíso forma parte de la llanura costera del Golfo de México, es plano y con ligero declive hacia el mar; lo forman tierras arenosas en la zona costera y a medida que se aleja tierra adentro se encuentran suelos arcillo-arenosos, hasta cambiar a terreno arcilloso en el resto de su territorio. La superficie está formada en gran parte por *bajorrelieves* que dan lugar a la formación de lagunas, esteros y pantanos.

En la zona costera se encuentran algunos montículos, siendo el más alto el que existe en la orilla de la laguna del Arrastradero, que tiene una elevación de 50 m, aproximadamente. En esa zona predominan áreas de selva densa y lagunas perennes e intermitentes debido a que el terreno está sujeto a inundaciones periódicas ocasionadas por tormentas tropicales y huracanes. De lo anterior, para los fines de este estudio y la aplicación del modelo de dispersión de contaminantes, se consideró la zona como un terreno plano.

#### 1.2.6. Usos del suelo

La información de los usos de suelo es un indicativo de las actividades que se realizan en un área geográfica en particular, la sensibilidad de la zona y por tanto la posible afectación por contaminante. Existen diferentes clasificaciones, siendo una de las más comunes el clasificar un sitio en residencial, comercial, industrial, rural o una mezcla de los anteriores. La anterior clasificación parte de un análisis del sitio de estudio en cuanto a densidad de población, densidad de vivienda, cercanía a industrias, cercanía a áreas verdes, número y tipo de actividades que se realizan dentro del área en particular.

En varios países las autoridades han elaborado mapas donde se muestra el uso de suelo, como es el caso de México donde el Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI) publica la cartografía sobre utilización de suelo para toda la República Mexicana. En los sitios donde no se dispone de esta información, generalmente es suficiente comprobar el uso de suelo mediante una visita al lugar de estudio.

Si los datos sobre contaminación atmosférica se van a utilizar para estimar las concentraciones esperadas en cualquier otro lugar en circunstancias similares de uso de suelo, es lógico suponer que áreas con usos de suelo similares tendrán niveles de afectación por contaminación atmosférica comparables, suponiendo que las condiciones meteorológicas son también similares.

En la elaboración de este estudio se revisó la cartografía correspondiente de uso de suelo, complementando con visitas al sitio. La TMDB se considera una zona industrial, mientras gran parte del área circundante a la TMDB es dominada por vegetación de dunas costeras sobre la franja del litoral del Golfo de México, pastizal inducido y cultivado, alternando con zonas de anegación intermitentes y perennes junto a comunidades de mangle. También se encuentran pequeños núcleos de población (menores a 1,000 habitantes) y la cabecera del municipio de Paraíso (población de 20,000 habitantes), clasificadas como áreas residenciales y de comercio.

#### Vegetación

La flora que se encuentra en el sitio de estudio comprende principalmente:

*Selva alta perennifolia*. Sumamente densa, donde predominan los árboles altos de hasta 30 m, con abundantes bejucos, plantas epífitas y permanece verde todo el año.

*Manglar.* Este tipo vegetativo alcanza grandes alturas, hasta de 20 m. En estas zonas se desarrolla en mayor proporción que en cualquier otra costa del país.

*Palmar.* Se encuentra asociado con las selvas, por lo que tiene una distribución semejante a la de éstas. Por lo general, los palmares son símbolos de áreas selváticas antiguas devastadas por el hombre. También se encuentra en las sabanas derivadas de la devastación de la selva por el hombre y su presencia se debe a condiciones edáficas especiales.

*Popal.* Prospera en sitios sujetos a inundaciones periódicas. Esta vegetación se extiende hasta Villahermosa, en donde la topografía propicia inundaciones constantes. Esta es la zona deltaica del Grijalva.

*Tular.* Vegetación acuática que se presenta profusamente en el interior de las áreas inundadas, estableciéndose en pequeñas lagunas y mezclándose a veces con los popales.

### **Cultivos**

Entre los principales cultivos que se producen en la zona de estudio se pueden mencionar: plátano, variedad Giant Cavendish; cacao, variedades Guayaquil de almendra morada, calabacillo, criollo de almendra color lila y nuevo criollo; maíz, variedades criollo e híbrido H507 y H503; arroz, variedades Sinaloa A-68 y Grijalva A-71 y sorgo, variedad BR-64.

### **Fauna**

La fauna característica de la zona de estudio, donde ahora yacen los pastizales, se ha visto desplazada por las actividades humanas como vivienda, desmonte, caza e introducción de especies de valor económico, por lo cual la diversidad y abundancia de las especies se encuentra disminuida. Sin embargo, las nuevas condiciones ambientales propician que algunos animales, como el ganado bovino, sean favorecidos haciéndose más abundantes a las nuevas asociaciones de pastizales y manglares.

La fauna marina de esta región se encuentra en los aprovechamientos de especies como el ostión, cultivado en las lagunas circundantes a la TMDB, así como en el robalo y camarón en menor cantidad.

La figura 1.7 es una sección del mapa de usos de suelo para la zona circundante a la TMDB (INEGI, 1971), en un área que comprende aproximadamente 40 km de oeste a este por 35 km de norte a sur. En esta figura se puede ver los principales tipos de vegetación: manglar, popal-tular, pastizal cultivado y pastizal inducido; así como también se encuentran marcados con pequeños círculos y un número los puntos de verificación, es decir puntos donde se ha hecho un análisis de la vegetación y cultivos presentes. La información de cada punto de verificación se presenta en la tabla 1.11.

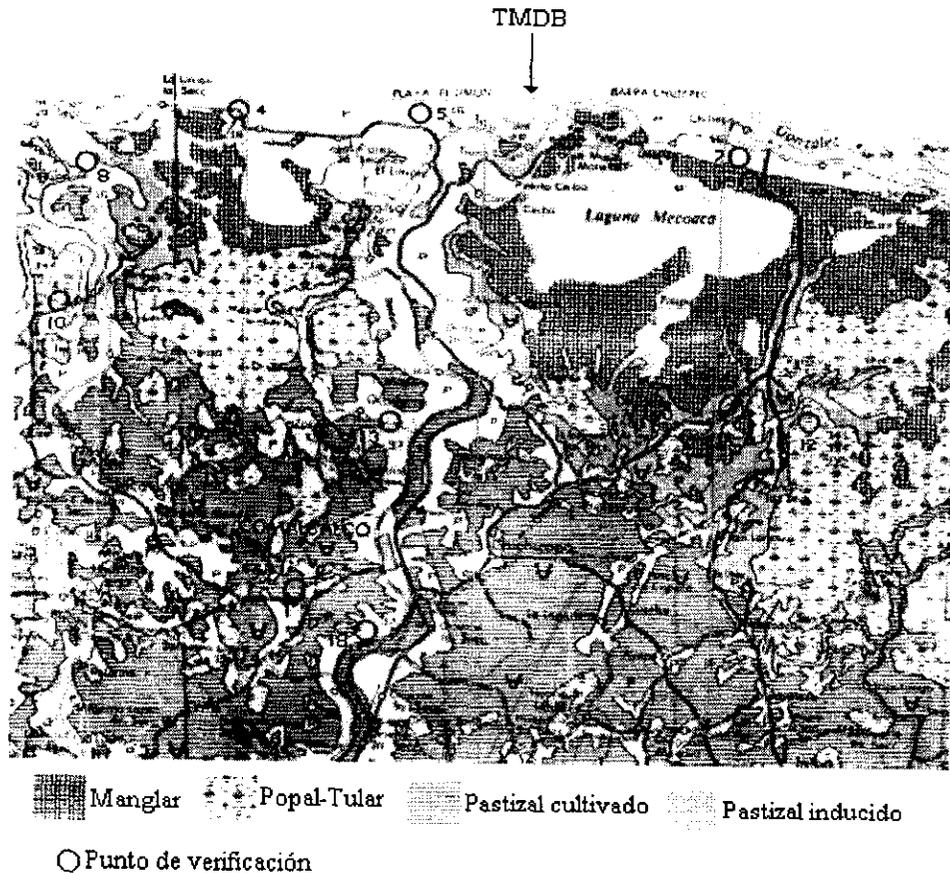


Figura 1.7. Usos de suelo en la TMDB, imagen de 40 x 35 km

Tabla 1.11. Principales especies encontradas en la zona de la TMDB

Punto de verificación	Especie y/o tipo de vegetación	Uso	Observaciones
1,9	Manglar	Madera	Nombre local: mangle negro, rojo y blanco
10	Popal	Ninguno	Nombre local: quento, espadaña
12	Tular	Ninguno	Áreas inundadas la mayor parte del año. Hacia las orillas de las lagunas se encuentra <i>Haematoxylum campechianum</i> (tinto).
4, 5, 7, 8	Coco	Consumo local	La producción se destina solamente a copra. La plaga del "picudo" se controla con pesticida Landen. Actualmente no se fertiliza. La cosecha se realiza cada 3 o 4 meses, en marzo, julio y noviembre.
13, 18	Cacao	Consumo local	La temporada de mayor producción de cacao es de octubre a enero, cosechándose cada 22 días, el resto del año la producción disminuye notablemente (2.5 kg de cacao verde equivalen a 1 kg de cacao seco).

### 1.2.7. Información sobre calidad del aire

Aun cuando no se haya establecido un programa de monitoreo atmosférico continuo en un área de estudio, con frecuencia existe información previa sobre la calidad de aire en la zona; por ejemplo, estudios especiales realizados por organizaciones de salud y servicios de meteorología, investigaciones científicas universitarias, etc. Toda esta información debe recopilarse, y de esta manera se obtiene un primer estimado sobre las condiciones del lugar. Dicha información debe emplearse con cautela debido a la variedad en los procedimientos de muestreo y análisis que se pudieron haber empleado para su obtención.

Para la zona de la TMDB no existe información previa de la calidad del aire, así que como parte de la elaboración de este estudio se realizó un muestreo preliminar de bióxido de azufre utilizando el método de la pararrosanilina en 7 ocasiones, con 4 y 5 muestreos simultáneos durante 1 hora, para un total de 30 puntos distribuido dentro de la TMDB.

Posteriormente, se realizó un análisis estadístico para asegurar la calidad de los datos teniendo como resultado las concentraciones máximas presentadas en la tabla 1.12. Dicho análisis consistió en la eliminación de aquellos datos que no eran consistentes con el resto de la información, debido principalmente a irregularidades y fallas del equipo de muestreo.

Tabla 1.12. Concentraciones máximas medidas en 1 hora

Muestreo	Concentración de SO <sub>2</sub>	
	µg/m <sup>3</sup>	ppm
1	11.13	0.0042
3	24.06	0.0092
4	14.68	0.0056
6	12.47	0.0048
7	13.42	0.0051

En la figura 1.8 se presenta la localización de los puntos máximos de concentración en el muestreo preliminar. Los datos presentados sirvieron para dos propósitos: el primero, la comparación con el modelo de dispersión utilizado a lo largo de este estudio; y segundo, conocer los niveles esperados de concentración de bióxido de azufre en el aire ambiente, para la selección del intervalo de operación del equipo automático.

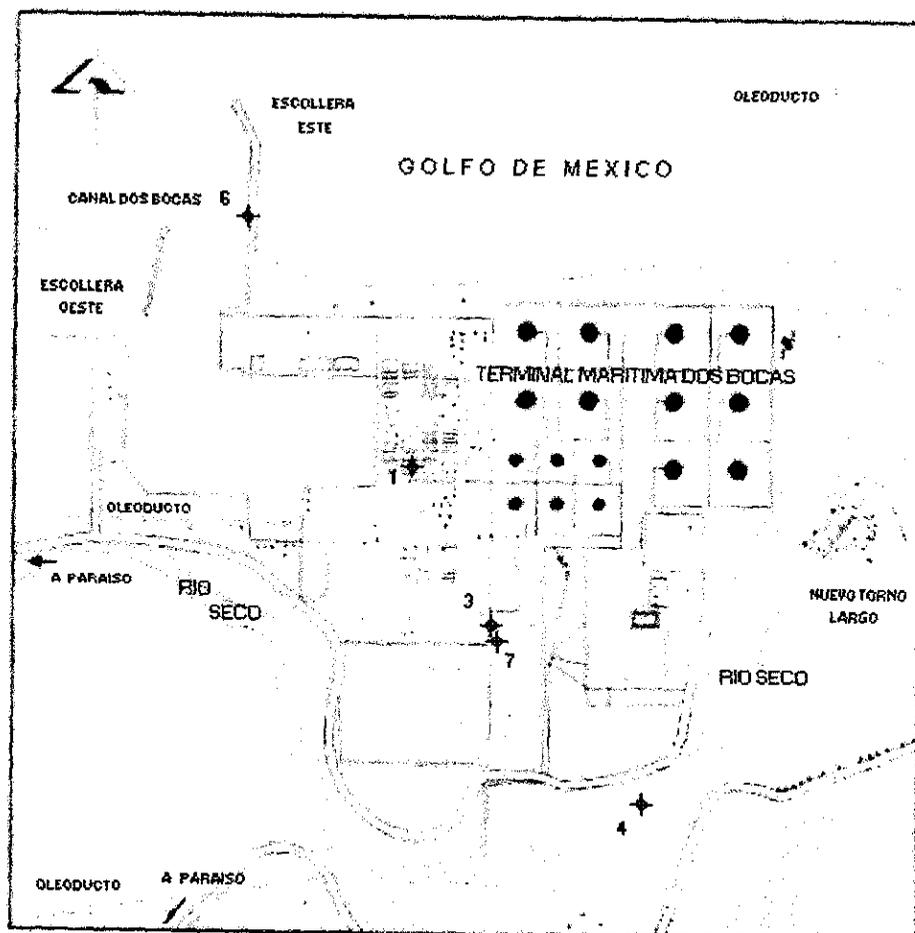


Figura 1.8. Localización de los puntos del muestreo preliminar de SO<sub>2</sub>

## 2. METODOLOGÍA

El diseño de un programa de monitoreo y de una red de monitoreo involucra la respuesta a una serie de preguntas: qué, porqué, dónde, cuándo y cómo monitorear, las cuales deberán responderse antes del diseño específico de la red de monitoreo.

El porqué monitorear se contestó al plantear los objetivos de la red de monitoreo de la TMDB. En cuanto a qué, dónde y cómo, existen dos puntos de vista para el diseño de redes de monitoreo: 1) varias estaciones con mediciones para uno o dos contaminantes en cada estación; 2) pocas estaciones con mediciones para varios contaminantes en cada estación. Aún esta división básica tiene otras consideraciones que se verán en los siguientes puntos.

### 2.1. SELECCIÓN DE CONTAMINANTES A MONITOREAR

La selección de contaminantes a monitorear normalmente se realiza de una de las dos maneras siguientes. El primer método reconoce que los contaminantes más comunes se encuentran en cantidades variables en todas las zonas urbanas. Por lo tanto un programa de monitoreo atmosférico comienza con la medición de bióxido de azufre y partículas suspendidas totales; en algunas circunstancias, garantizadas por la situación de tráfico vehicular de la zona, se puede incluir monóxido de carbono (OMS, 1977).

En este método también se indica la necesidad de comparar con zonas similares que muestren que las concentraciones de contaminantes exceden o se aproximan a niveles considerados como dañinos, o donde los niveles aún se encuentren por debajo de los criterios de calidad de aire, pero que se anticipa un crecimiento considerable de la población o de las zonas industriales. El programa se va desarrollando gradualmente para incluir otros contaminantes que se sospecha puedan existir en concentraciones importantes.

El segundo método de selección es menos empírico. Se basa en los inventarios de emisiones para identificar los contaminantes que pueden afectar el medio y para establecer las prioridades cuando el programa se va a desarrollar por etapas. Idealmente, este método se utiliza en conjunto con el pronóstico de los niveles de contaminación por el uso de modelos de calidad de aire.

Normalmente, el programa se inicia con el primer inventario de emisiones para los contaminantes más comunes y posteriormente se pueden desarrollar inventarios para tipos específicos de industria, que pueden emitir contaminantes que no son comunes en todas las zonas urbanas, tales como ácido sulfhídrico, arsénico, flúor, asbestos, etc.

En la mayoría de los casos la mejor selección es tomar una combinación de ambos métodos. En el presente caso de estudio, la selección de las especies químicas a monitorear en cada una de las estaciones está directamente relacionada con el tipo de instalación industrial de interés, esto es: una estación de transferencia de productos de petróleo.

Después del análisis de la información sobre las fuentes de emisión y condiciones ambientales, presentada en el capítulo anterior, las especies químicas que se determinarán en cada una de las estaciones y que servirán como parámetros indicativos de la calidad de aire local y de la afectación atmosférica debida a la TMDB son:

### 2.1.1. Bióxido de azufre

Uno de los contaminantes más frecuentes producido por fuentes antropogénicas es el bióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ). El  $\text{SO}_2$  se forma principalmente por la quema de combustibles fósiles con contenido de azufre (gas amargo, combustóleo) y se considera un indicador directo de la actividad petrolera. Otros procesos industriales que producen  $\text{SO}_2$  son la fundición, producción de ácido sulfúrico y refinación del petróleo.

El  $\text{SO}_2$  es un gas incoloro, no flamable y no explosivo que produce una sensación gustatoria a concentraciones de 0.3 a 1.0 ppm (Wark, 1994). Puede existir en el aire tanto como gas como disuelto en pequeñas gotas de agua. A concentraciones mayores de 3.0 ppm el gas tiene un olor acre e irritante. El  $\text{SO}_2$  se convierte a trióxido de azufre ( $\text{SO}_3$ ), ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) y sulfatos mediante procesos fotoquímicos o catalíticos en la atmósfera.

La mayoría de los estudios epidemiológicos tratan sobre los efectos de los compuestos del azufre combinados con otras especies (*sinergismo*). También existen otros agentes tales como las partículas en suspensión y la humedad relativa que afectan los efectos de los compuestos de azufre sobre la salud humana y el medio.

La primera reacción del ser humano a la exposición al  $\text{SO}_2$ , neblinas de ácido sulfúrico o de sulfatos es la broncoconstricción, la cual es un aumento de la resistencia al paso del aire en los bronquios. También se producen irritaciones agudas en el tracto respiratorio superior y en los ojos, agravamientos de las enfermedades cardiovasculares y la posibilidad del aumento de ataques asmáticos y enfermedades crónicas de obstrucción pulmonar (Coffin y Stokinger, 1977).

La interacción de las partículas y el aumento de la humedad relativa incrementa la reactividad o sensibilidad del ser humano al bióxido de azufre y neblinas de ácido sulfúrico, el cual es un irritante mucho más potente para el hombre que el bióxido de azufre.

Entre los daños más notables sobre el medio se tienen la reducción de la visibilidad por la presencia de neblinas, ya que absorben y dispersan la luz. La neblina atmosférica se debe a la formación de varios aerosoles resultantes de las reacciones fotoquímicas entre el  $\text{SO}_2$ , las partículas suspendidas, los óxidos de nitrógeno y los hidrocarburos presentes en la atmósfera.

Los óxidos de azufre son responsables de los daños más importantes ocasionados a los materiales. Aceleran la corrosión de metales al formar primero ácido sulfúrico ya sea en la atmósfera o sobre la superficie del metal. Los óxidos de azufre, así como los ácidos sulfuroso o sulfúrico son capaces de atacar una amplia variedad de materiales de

construcción, incluyendo caliza, mármol, pizarras de techo y mortero. Forman sulfatos bastante solubles, que luego son lavados por la lluvia.

### 2.1.2. Óxidos de nitrógeno

Óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) es el nombre conjunto que se da al monóxido de nitrógeno (NO) y al bióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>). El NO y el NO<sub>2</sub> son los óxidos de nitrógeno más comunes como contaminantes atmosféricos.

El NO se forma durante la combustión de cualquier tipo de material a altas temperaturas por la oxidación del nitrógeno atmosférico, siendo el producto de combustión más común. El bióxido de nitrógeno se forma en pequeñas cantidades durante los procesos de combustión, pero principalmente por la oxidación del NO en la atmósfera (Coffin y Stokinger, 1977; Katz, 1977).

El NO es un gas incoloro, inoloro, ligeramente soluble en agua. El NO<sub>2</sub> es un gas de color café-naranja con un olor acre característico, considerado como un agente altamente oxidante y corrosivo. Sin embargo, a concentraciones encontradas en la atmósfera, el NO<sub>2</sub> es sólo potencialmente irritante y ha sido potencialmente relacionado con la fibrosis pulmonar crónica.

Ni el NO ni el NO<sub>2</sub> causan un daño directo a los materiales; sin embargo, el NO<sub>2</sub> puede reaccionar con la humedad presente en la atmósfera para formar ácido nítrico el cual causa corrosión en las superficies metálicas.

Los óxidos de nitrógeno en combinación con hidrocarburos no quemados reaccionan con la luz solar y forman el smog fotoquímico. Los compuestos del smog fotoquímico más dañinos para la salud humana, la flora y fauna son los oxidantes fotoquímicos (Peavy et al., 1985).

### 2.1.3. Hidrocarburos

Los compuestos orgánicos que contienen sólo carbón e hidrógeno se clasifican como hidrocarburos. Los hidrocarburos presentes en la atmósfera provienen tanto de fuentes naturales como antropogénicas. La mayoría de los hidrocarburos de fuentes naturales provienen de fuentes biológicas, aunque una pequeña parte provienen de áreas geotérmicas, minas de carbón, gas natural de campos de petróleo e incendios forestales. Los hidrocarburos producidos por la naturaleza más complejos son los terpenos e isopropeno, producidos por plantas y árboles.

Las fuentes antropogénicas incluyen el transporte, la combustión de combustibles fósiles en fuentes estacionarias, procesos industriales, disposición de residuos sólidos y otros. Las fuentes industriales (principalmente refinerías) son la principal fuente antropogénica de hidrocarburos, seguida del transporte (incluye combustión incompleta, emisiones evaporativas de tanques, carburadores, etc.). La mayoría de los compuestos encontrados en

gasolinas y otros derivados del petróleo son hidrocarburos, los cuales se dividen en alifáticos y aromáticos.

Los hidrocarburos alifáticos se componen de los alcanos, alquenos y alquinos. Los alcanos generalmente no son activos en las reacciones fotoquímicas de la atmósfera, mientras que los alquenos son altamente reactivos. Los alquinos, aún a pesar de ser altamente reactivos, son relativamente raros y por ende prácticamente ignorados en los estudios de contaminación atmosférica (Peavy, 1985).

Los hidrocarburos aromáticos son bioquímica y biológicamente activos, están relacionados con o son derivados del benceno y algunos son potencialmente carcinogénicos. Los estudios de los efectos de la concentración de hidrocarburos sobre la salud humana indican que cierta clase de cáncer es causado por la exposición a hidrocarburos aromáticos que se encuentran en el hollín y en el alquitrán.

En este estudio una parte importante de la posible concentración de hidrocarburos en la atmósfera está asociada con la presencia de PEMEX en la región, por lo que se consideró importante su inclusión como uno de los tres indicadores de la calidad del aire.

Los hidrocarburos no parecen causar ningún daño apreciable por corrosión en materiales, sin embargo, las partículas y el hollín procedente de hidrocarburos no quemados ensucian las superficies. El etileno es el único hidrocarburo, estudiado a la fecha, que tiene un efecto adverso sobre el crecimiento de plantas.

## 2.2. DETERMINACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

En la mayoría de los casos, una red de monitoreo atmosférico debe cubrir un área geográfica específica, como puede ser una ciudad o una zona industrial. Esto se debe a que los contaminantes atmosféricos pueden viajar grandes distancias y sus efectos se pueden sentir a varios kilómetros del punto de emisión, particularmente en casos donde se tienen emisiones de quemadores o chimeneas de gran altura.

En casos en que el sistema de monitoreo deba proveer información acerca de las concentraciones de los contaminantes alrededor de una sola fuente, la selección del área de estudio depende principalmente de la altura de la fuente de emisión y de las condiciones topográficas y meteorológicas. Algunos de los sitios de monitoreo se seleccionan donde se espera la concentración máxima de los contaminantes atmosféricos. Esta distancia se conoce mediante el uso de modelos de dispersión de contaminantes utilizando las condiciones meteorológicas y de operación más comunes.

Existen modelos de dispersión de largo término que son los adecuados para describir el comportamiento de los contaminantes a través del tiempo en un área geográfica determinada. Debido a que este tipo de modelos requieren de datos horarios de estabilidad atmosférica, velocidad y dirección de viento de por lo menos dos años no fue posible

utilizarlo para este trabajo. El modelo seleccionado para llevar a cabo la determinación del área de estudio es el modelo gaussiano, que como se verá más adelante presenta datos confiables.

### **2.2.1. Modelo Gaussiano**

El modelo gaussiano de dispersión atmosférica es un modelo analítico de necesidades computacionales reducidas y de fácil uso en comparación con otros modelos numéricos, por lo que en muchos estudios se ha empleado para obtener resultados que proporcionan una buena aproximación al fenómeno de interés.

El fenómeno de dispersión atmosférica de contaminantes, en su forma general, corresponde a la *difusión tridimensional de un fluido dentro de una corriente de flujo turbulento*. Este fenómeno es controlado por los siguientes mecanismos de transferencia: *advección, difusión molecular, difusión turbulenta y la existencia de fuentes o sumideros*.

El modelo gaussiano es una solución particular de la ecuación general de transporte de concentración de contaminantes. Para aplicar el modelo gaussiano es necesario hacer las siguientes suposiciones:

#### **Condiciones estacionarias.**

Las condiciones meteorológicas se mantienen constantes en el tiempo, al menos durante el tiempo que tarda el contaminante en llegar de la fuente al receptor. La emisión de contaminantes en unidades de masa por unidad de tiempo es continua y constante en el tiempo.

#### **Especie químicamente inerte.**

La masa total de emisión de la fuente permanece en la atmósfera. Nada del material se remueve a través de reacciones químicas o se pierde en la superficie a través de reacciones, *sedimentación o impactación turbulenta*.

#### **Distribución de concentraciones en los ejes vertical, transversal y longitudinal a la trayectoria de la pluma.**

Se supone que solo existe difusión en dirección transversal al viento y en la vertical y solo hay transporte en el eje longitudinal. Las concentraciones promedio de una hora a cualquier distancia en los ejes transversal y vertical se representan adecuadamente por una distribución Gaussiana o normal. En este modelo los coeficientes de difusión en dirección y y z son valores empíricos correspondientes a la desviación estándar de una distribución probabilística de tipo gaussiano, y función únicamente de la distancia de la fuente y la condiciones meteorológicas. Con estas consideraciones se llega a la siguiente ecuación general para el modelo gaussiano :

$$\chi = \frac{Q}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \left\{ \exp\left(-\frac{(H-z)^2}{2\sigma_z^2}\right) + \exp\left(-\frac{(H+z)^2}{2\sigma_z^2}\right) \right\}$$

donde :

- $\chi$  es la concentración del contaminante en el aire ambiente, ( $\text{g/m}^3$ ).
- $Q$  es la razón de emisión del contaminante en unidades de masa por tiempo, ( $\text{g/s}$ ).
- $u$  es la velocidad de viento a la altura del punto de emisión, ( $\text{m/s}$ ).
- $\sigma_y$  la desviación estándar de la distribución de la concentración en la dirección perpendicular a la dirección del viento, a la distancia  $x$ , ( $\text{m}$ ).
- $\sigma_z$  la desviación estándar de la distribución de la concentración en la dirección vertical, a la distancia  $x$ , ( $\text{m}$ ).
- $H$  la altura efectiva de la pluma del contaminante, ( $\text{m}$ ).
- $y, z$  coordenadas transversal y vertical donde se busca conocer la concentración de contaminantes, ( $\text{m}$ ).

El último término de la ecuación anterior toma en cuenta que el piso actuará como una fuente reflectora de los contaminantes, los cuales permanecerán mayor tiempo en el aire ambiente. La simulación de este fenómeno se logra mediante la suposición de una fuente virtual de emisión bajo el nivel de piso, la cual emite la misma cantidad de contaminantes que la fuente real.

El sistema de coordenadas para este modelo se muestra en la figura 2.1 donde puede observarse que el origen del sistema de coordenadas se encuentra a nivel de piso en el punto de emisión, el eje  $x$  es longitudinal a la dirección de la línea central de la *pluma*, el eje  $y$  es transversal al eje  $x$  y el eje  $z$  es la vertical.

### 2.2.2. Datos de entrada al modelo

Las variables necesarias para correr el modelo son: la razón de emisión de contaminantes  $Q$ , la velocidad de viento  $u$ , las desviaciones estándar  $\sigma_y$ ,  $\sigma_z$  y la altura de emisión  $H$ .

#### Razón de emisión de contaminantes, $Q$ .

La emisión total para cada uno de los diferentes contaminantes está dada en la tabla 1.4. La concentración de especies contaminantes a nivel del suelo, en el perímetro del complejo, se calculará para las emisiones reportadas en esta tabla considerando el funcionamiento simultáneo de los dos quemadores: Nuevo y Compresión.

Al no existir información en relación al porcentaje del gasto total que se envía a cada quemador, se analizaron 3 escenarios :

1. Escenario I, el 90 % del gasto total se envía al quemador nuevo y el 10 % restante al quemador de compresión.

2. Escenario II, el 50 % del gasto total se quema en el quemador nuevo y el resto en el quemador de compresión.
3. Escenario III, el 10 % del gasto total se envía al quemador nuevo y el 90 % se quema a través del de compresión.

La tabla 2.1 resume los valores de gasto que se utilizaron en cada uno de los 3 escenarios.

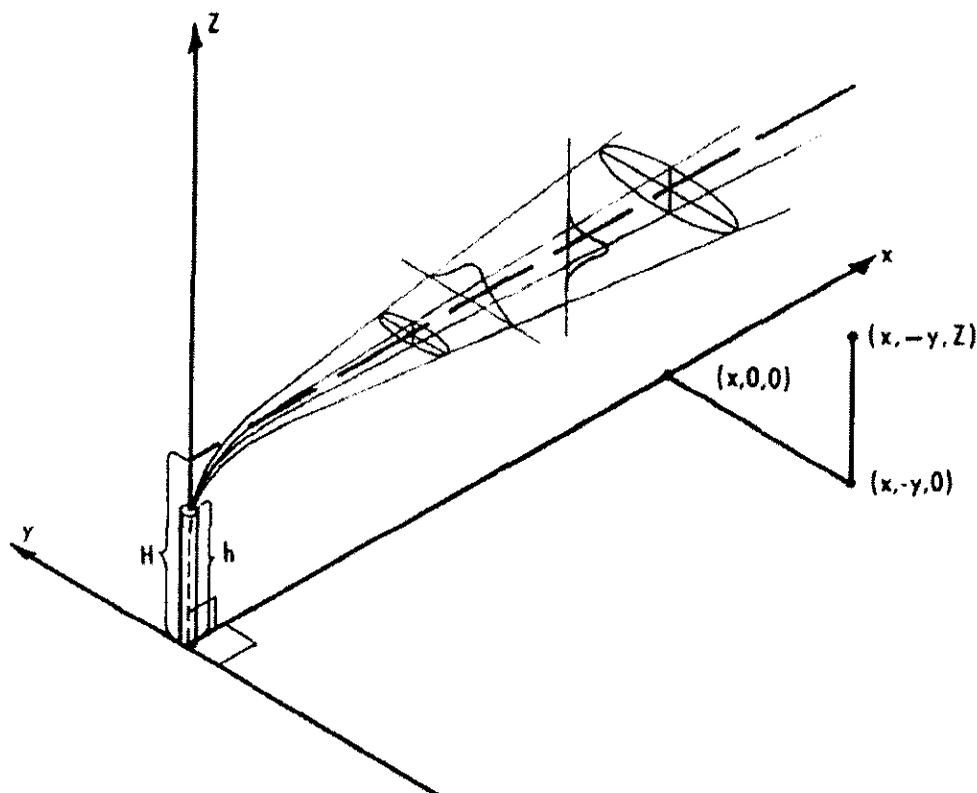


Figura 2.1. Sistema de coordenadas para el modelo gaussiano

Tabla 2.1. Diferentes escenarios de emisión de contaminantes

	Escenario I		Escenario II		Escenario III	
	Nuevo	Compresión	Nuevo	Compresión	Nuevo	Compresión
Velocidad salida (m/s)	0.4856	0.4856	0.2698	2.4280	0.0540	4.3705
CO (g/s)	1.1070	0.123	0.615	0.615	0.123	1.1070
NO (g/s)	0.0878	0.0098	0.0488	0.0488	0.0098	0.0878
SO <sub>2</sub> (g/s)	1.8602	0.2067	1.0334	1.0334	0.2067	1.8602
HC (g/s)	0.198	0.022	0.11	0.11	0.022	0.198
Partículas (g/s)	0.0027	0.0003	0.0015	0.0015	0.0003	0.0027

### Velocidad de viento a la altura de la emisión, $u$ .

La velocidad de viento que se emplea en el modelo corresponde a la velocidad a la altura del punto de emisión. Como esta velocidad no se encuentra disponible, se estima en base a la velocidad de viento reportada en los informes meteorológicos presentados en las figuras 1.3, 1.4 y 1.5 (velocidad tomada a una altura de 10 metros) mediante el uso de la siguiente ley exponencial (Turner, 1994):

$$u_z = u_a \left( \frac{z}{z_a} \right)^p$$

donde:

- $u_z$  es la velocidad de viento a la altura  $z$  sobre el nivel de piso, en m/s.
- $u_a$  es la velocidad de viento a la altura del anemómetro (10 m) sobre el nivel de piso, en m/s.
- $z$  altura sobre el nivel del piso, en m.
- $z_a$  altura del anemómetro sobre el nivel del piso, en m.
- $p$  exponente que varía principalmente para las condiciones de estabilidad de 0.07 para condiciones inestables hasta 0.55 para condiciones estables. Los valores para el exponente  $p$  se muestran en la tabla 2.2.

**Tabla 2.2.** Valores del exponente  $p$  para el perfil de velocidad del viento

Clase de estabilidad Pasquill	Exponente $p$ para sitios rurales	Exponente $p$ para sitios urbanos
A	0.07	0.15
B	0.07	0.15
C	0.10	0.20
D	0.15	0.25
E	0.35	0.30
F	0.55	0.30

Las condiciones de estabilidad atmosférica para el cálculo del exponente  $p$  corresponden a las clases de estabilidad de Pasquill (Turner, 1994), según se definen en la tabla 2.3. La estabilidad atmosférica se estima empíricamente a partir de la velocidad de viento, la radiación solar incidente (dependiendo de la latitud, la hora del día y el día del año) y la nubosidad.

### Las desviaciones estándar $\sigma_y$ y $\sigma_z$ .

Para conocer las desviaciones estándar  $\sigma_y$  y  $\sigma_z$  se necesita conocer la ubicación exacta de las fuentes de emisión con respecto a cada uno de los puntos de cálculo, ya que las desviaciones estándar son función de esta distancia y de la estabilidad atmosférica.

Los valores empleados para este trabajo se obtuvieron a partir de las gráficas proporcionadas por Turner (1994).

**Tabla 2.3.** Clasificación de categorías de estabilidad según Pasquill

Velocidad de viento a 10 m sobre el piso (m/s)	Insolación			Noche	
	Fuerte	Moderada	Ligera	Nublado	Despejado
<2	A	A - B	B	-	-
2 - 3	A - B	B	C	E	F
3 - 5	B	B - C	D	D	E
5 - 6	C	C - D	D	D	D
> 6	C	D	D	D	D

### La altura efectiva emisión, H.

La altura efectiva de inicio de la *pluma* H, es aquella a la cual se eleva la *pluma* después de salir del quemador o de la chimenea y se debe principalmente a dos efectos: el primero es el efecto del *momento* de los gases al salir del quemador debido a su velocidad y el segundo es el efecto de *flotación* debido a las diferentes densidades entre el gas de salida y el aire ambiente. Por lo tanto, la altura efectiva H es igual a la suma de la altura física del quemador más la elevación que sufre la *pluma* (ver figura 2.1).

$$H = h + \Delta h$$

donde :

H es la altura efectiva de la *pluma*, (m).

h es la altura física de la fuente, (m).

$\Delta h$  es la elevación de la *pluma* por encima de la altura física, (m).

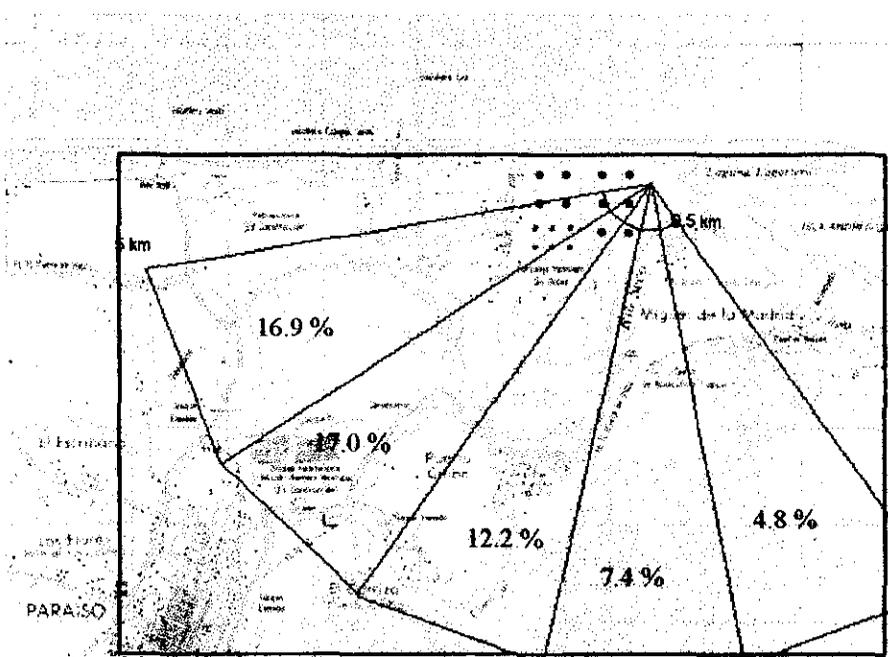
En este estudio se emplearon las ecuaciones empíricas propuestas por Holland (Zannetti, 1990), que estiman la elevación de la *pluma* como función de la velocidad y temperatura de salida de los gases y de la temperatura ambiente.

### 2.2.3. Resultados

Los resultados del modelo indican que concentraciones entre la máxima y un 60% de esta, se esperan a distancias entre 700 y 1800 m de la base de los quemadores (de acuerdo con las condiciones meteorológicas existentes) y se pueden encontrar concentraciones del 20% de la máxima hasta a 5 km de distancia de la fuente.

Considerando los resultados del modelo, la cercanía del mar que presenta una frontera natural para delimitar el área de estudio y la predominancia de dirección de viento, se estableció como área de interés la comprendida entre dos círculos concéntricos de 500 y

5,000 metros de diámetro, así como entre las secciones de circunferencia que representan las direcciones de viento más frecuentes, como se indica en la figura 2.2.



**Figura 2.2.** Delimitación del área de estudio

### 2.3. NÚMERO Y DISTRIBUCIÓN DE LOS SITIOS DE MONITOREO

Para cumplir con los objetivos planteados originalmente y establecer el número de sitios de monitoreo y su ubicación dentro del área de estudio, se deben tomar en cuenta diferentes aspectos como son la representatividad de cada sitio y los recursos disponibles.

Para tener una representación exacta de la calidad del aire en un área geográfica, se requiere un número muy grande de puntos de monitoreo distribuidos en una malla a lo largo y ancho del área de interés, lo cual presenta serias desventajas ya que los recursos con que se cuenta son limitados. Dichos recursos están representados por el número de equipos de monitoreo, los materiales que se ocupan para mantenimiento y operación del equipo, el personal encargado de la supervisión y mantenimiento de la red de monitoreo, etc.

Por lo tanto se debe buscar el equilibrio entre estos dos aspectos para obtener una representación justa de la calidad del aire para el área de estudio dentro de un presupuesto razonable. Existen además otros factores que ayudan a determinar el número de estaciones como se verá más adelante.

El número de estaciones se determinó basándose en las siguientes consideraciones:

1. El tamaño del área a ser cubierta por el sistema de monitoreo; aproximadamente 40 km<sup>2</sup>, tomando en cuenta el rectángulo marcado en la figura 2.2, de 8 km de largo x 5 km de ancho.
2. La variación en la concentración de los contaminantes, debido a las condiciones del proceso, así como a las variaciones en dirección y velocidad de viento debido al régimen de brisas tierra-mar.
3. Los requerimientos de la información, es decir la capacidad de contar con información que presente los niveles de contaminación atmosférica en las principales direcciones de viento durante la mayor parte del tiempo.

Aunque la zona de la TMDB no se considera urbana, si existen núcleos poblacionales cercanos por lo que es importante tomar en cuenta:

- Las recomendaciones de la OMS sugieren para áreas urbanas con poblaciones menores a un millón de habitantes, dos estaciones para monitorear SO<sub>2</sub> y una estación para monitorear NO<sub>x</sub>. También se sugiere que para zonas altamente industrializadas en donde se consume grandes cantidades de combustible pesado, el número de estaciones de monitoreo de SO<sub>2</sub> se debe incrementar (OMS, 1977).
- La Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA) recomienda la instalación de un equipo de monitoreo continuo para SO<sub>2</sub> para una población de 100,000 habitantes y de tres equipos de monitoreo manual para NO<sub>2</sub> para la misma población (Bryan, 1977).

Para este caso en particular se establecieron 3 sitios de monitoreo para los contaminantes SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> e HC, ya que se quiere monitorear el mayor porcentaje de tiempo posible (cubrir las direcciones de viento más frecuentes), tener mediciones a diferentes distancias de la fuente de emisión, en el rango de 2 a 5 km, y cubrir los núcleos de población más poblados cercanos a la TMDB.

Las estaciones de monitoreo pueden localizarse en lugares fijos ó una estación móvil de monitoreo puede ubicarse en diferentes localidades. En algunas circunstancias la combinación de estaciones fijas y móviles es la mejor opción. En este caso, las estaciones de monitoreo se colocaron fijas para evitar los gastos extras que conlleva operar una estación móvil.

Para la localización de las tres estaciones de monitoreo se tomaron en cuenta las siguientes consideraciones:

i) *Dirección de viento.* La dirección y velocidad del viento establecen las zonas sobre las que las emisiones tendrán mayor influencia. Para establecer las condiciones meteorológicas de la zona se emplearon los datos de velocidad y dirección de viento proporcionados por PEP correspondientes a la TMDB (figura 1.6).

Para cubrir las direcciones NNE, NE y ENE se recomendó instalar dos estaciones de monitoreo en dirección SW de la TMDB (hacia donde sopla el viento); una estación en Puerto Ceiba y la otra en la unidad habitacional de PEMEX llamada de Confianza.

La dirección N, NNW, NW será cubierta con una estación de monitoreo sobre la carretera al Bellote. Además de la dirección, se consideró la velocidad del viento y la estabilidad atmosférica, las cuales junto con la altura de la emisión y velocidad de salida de los gases determinan el *alcance de la pluma*.

ii) *Seguridad*. Se debe evitar la ubicación de las casetas en zonas de difícil acceso. Las zonas de difícil acceso son principalmente áreas inundables, en las cuales el equipo se dañaría por falta de mantenimiento o bien quedaría expuesto a actos vandálicos. Procurándose por tanto encontrar sitios que contaran con la suficiente vigilancia, ya sea de los elementos de seguridad locales o del mismo personal de PEMEX.

La necesidad de garantizar la integridad física de las casetas de resguardo y el equipo de monitoreo, así como el facilitar el servicio de mantenimiento que debe recibir este equipo, descartaron la instalación de estaciones de monitoreo al norte de los quemadores (direcciones de viento ESE, SE, S, WSW, SW y WSW) o en zonas inundables (direcciones de viento E y W).

iii) *Impacto social*. Se consideran como áreas prioritarias para la ubicación de casetas, aquellas zonas en las cuales PEMEX ha recibido mayor número de reclamaciones, por supuesta contaminación atmosférica.

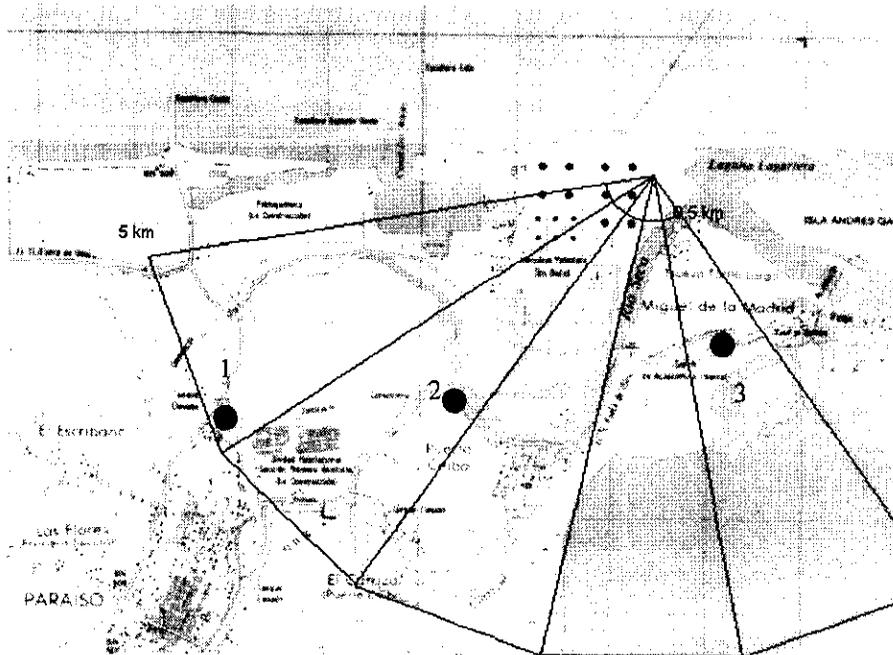
Considerando que el principal objetivo de esta red de monitoreo es la protección al ambiente y a los habitantes de la zona, es primordial que la ubicación de las casetas de resguardo formen parte del contexto urbano y social correspondiente. Por lo tanto, además de localizarse en las direcciones de mayor frecuencia de viento, es importante que el monitoreo cubra aquellas áreas en las cuales existe mayor demanda social o especialmente sensibles por ser densamente pobladas.

Esta consideración reforzó la intención de ubicar una estación en dirección SW de la TMDB, dentro de la Unidad Habitacional de Confianza y desechar la posibilidad de su ubicación en dirección W de los quemadores.

iv) *Infraestructura*. Se seleccionaron sitios en los cuales se contaba con infraestructura (vías de acceso y electrificación) para acelerar el proceso constructivo.

Finalmente, mediante visitas de inspección, se determinó el sitio más conveniente, dentro de las zonas delimitadas por los análisis anteriores, que además reuniese en lo posible, el mayor número de ventajas para la rápida y adecuada construcción de las casetas de resguardo y conexiones del equipo de monitoreo.

Preliminarmente, se definieron áreas de un kilómetro de largo sobre las principales vías de comunicación dentro de las cuales PEMEX podría decidir libremente el terreno a adquirir, para posteriormente, una vez identificado el propietario de cada sitio y realizados los trámites correspondientes y con el apoyo de la firma constructora, marcar los sitios seleccionados y proceder a la construcción. La selección de los sitios de monitoreo se presenta en la figura 2.3.



**Figura 2.3.** Ubicación de las casetas de monitoreo

Las posiciones finales descritas en la figura 2.3. son: 1) caseta de Confianza, 2) caseta de Codezpet y 3) caseta de Semarnap, se encuentran a una distancia del quemador de 5 km, 2.7 km y 1.7 km respectivamente, proporcionando mediciones a diferentes distancias de la fuente. Las tres casetas cubren el 58.3 % del total de direcciones de viento, es decir se tienen mediciones del impacto de la fuente de emisión en más de la mitad del tiempo. El resto del tiempo se tienen mediciones de las concentraciones de fondo.

Aquí cabe mencionar que las condiciones climáticas del lugar, altas temperatura y humedad relativa, provocaron 2 inconvenientes: 1) la condensación de humedad en las líneas de conducción de la muestra; 2) alta temperatura dentro de los equipos analizadores. Estos inconvenientes se solucionaron al realizar diferentes acciones como: instalación de equipo de aire acondicionado dentro de la caseta de resguardo, aislamiento y calentamiento de la toma de muestra por medio de una resistencia para evitar la condensación de la humedad, mejor ventilación al sistema de soporte de los equipos analizadores, monitoreo de la temperatura máxima y mínima dentro de la caseta.

## 2.4. FRECUENCIA Y DURACIÓN DEL MUESTREO

La duración de los diferentes programas de monitoreo se pueden clasificar en tres escalas de tiempo: periodos cortos, intermitente y permanente.

Los programas de periodos cortos se utilizan principalmente para dar una evaluación preliminar sobre los niveles de contaminación atmosférica, antes de empezar un programa extensivo. La principal desventaja de este tipo de monitoreo es que la información obtenida solamente es válida para las condiciones particulares de la fuente de emisión o de las condiciones meteorológicas que prevalecieron durante el periodo de muestreo.

Los programas de monitoreo intermitentes (por ejemplo un mes por temporada o un día de cada seis) pueden ahorrar costos, sobre todo al utilizar equipo manual. Si se tiene un registro de información lo suficientemente grande (varios años) se pueden establecer tendencias y evaluar medidas de control. Sin embargo, se debe tener cuidado ya que una información incompleta puede producir tendencias erróneas.

El monitoreo continuo se establece cuando se ha visto a través de los programas de periodos cortos o intermitentes que es necesario abundar más en las causas de los niveles de contaminación reportados. Al utilizar este tipo de monitoreo se puede realizar un análisis estadístico más completo de los datos para concluir acerca de las tendencias a largo plazo y poder establecer programas de control de la contaminación y cumplir con los estándares de calidad de aire.

Para el presente caso, se realizó un muestreo preliminar para conocer los niveles actuales de concentración de contaminantes y posteriormente se diseñó un programa de monitoreo continuo para cumplir con los objetivos originalmente planteados en este estudio.

Con respecto a la frecuencia de muestreo existen dos factores a tomar en consideración: la variabilidad inherente del contaminante (por ejemplo variación diaria, semanal, estacional, etc.) y la precisión requerida para la información sobre la calidad de aire.

Ciertos contaminantes normalmente muestran fluctuaciones durante el día las cuales se relacionan con las fuentes de emisión y las variaciones meteorológicas. Es decir, a lo largo de un día presentan un patrón de comportamiento en su concentración y este patrón se repite día a día.

Para determinar las fluctuaciones características de un determinado contaminante, el monitoreo debe tener una frecuencia mayor a la que tiene la variación del contaminante de interés. Si se emplea un monitoreo estacional para caracterizar una emisión, se puede aceptar como una regla conveniente, que el programa de monitoreo es adecuado si cada temporada (o cuarto de año) contiene más del 20 % del número total de observaciones hechas durante todo el año (OMS, 1977).

Las condiciones de operación de la TMDB combinados con las variaciones meteorológicas pueden modificar las concentraciones de  $\text{SO}_2$  (o de alguno de los otros contaminantes de interés,  $\text{NO}_x$  e HC) en un periodo promedio de 10 minutos. Es decir, suceden casos extraordinarios en los cuales se incrementa el gasto del gas de desfogue a quemadores, con el consiguiente aumento en la emisión de  $\text{SO}_2$ . Este aumento en la concentración de  $\text{SO}_2$  se verá reflejado en las estaciones de monitoreo entre 5 y 15 minutos posterior al evento (dependiendo de hacia que caseta se encuentra soplando el viento y la velocidad del viento). Si se fija el periodo de muestreo de cada equipo en 10 minutos, se puede observar las variaciones de concentración de los contaminantes y relacionarlos a eventos ocurridos en la operación de la TMDB y las condiciones meteorológicas reinantes.

La exactitud del promedio asociado con las diferentes frecuencias de muestreo ha sido calculada teóricamente en diferentes estudios y se ha demostrado que la exactitud decrece al bajar la frecuencia de muestreo (OMS, 1977).

Si la información generada por la red de monitoreo se va a comparar con las normas de calidad de aire, entonces el periodo de muestreo debe relacionarse con el tiempo promedio de la norma a comparar. Es decir que se deben comparar tiempos de muestreo y de promedio comparables.

Para cumplir con lo anterior, se determinó utilizar equipo automático que reporta un nuevo valor cada diez minutos para poder visualizar las variaciones que se presentan en la operación de la TMDB. Posteriormente se realiza un promedio de estos valores para poder comparar con las normas de calidad de aire vigentes en México, una hora para  $\text{NO}_2$  y 24 horas para  $\text{SO}_2$  (NOM-022-SSA1-1993, 1994 y NOM-023-SSA1-1993, 1994).

### 3. EQUIPO DE MONITOREO ATMOSFÉRICO

Como parte fundamental para la medición de los contaminantes presentes en el medio se han establecido métodos y procedimientos para monitorear.

El monitoreo de aire ambiente consta de dos procesos: el muestreo y el análisis. El muestreo es el proceso por el cual se colectan muestras de aire ambiente, mientras que el análisis se refiere a los diferentes métodos y técnicas fisicoquímicas que aprovechan alguna característica de un contaminante para determinar su concentración en el aire ambiente.

#### 3.1. REQUERIMIENTOS

Para poder medir los niveles de los diferentes contaminantes es necesario contar con métodos que produzcan resultados comparables, es decir que cumplan las siguientes características (Bravo et al., 1992):

##### **Especificidad**

El método debe ser específico únicamente para el contaminante de interés para que no detecte la presencia de otros gases que se encuentran mezclados en la atmósfera.

##### **Sensibilidad y rango**

El rango de operación del método es determinante para asegurar la detección de los contaminantes en la concentración existente en el aire ambiente, así como a las variaciones del contaminante con el tiempo.

##### **Estabilidad**

La muestra de aire ambiente debe permanecer sin cambio físico o químico durante el intervalo de muestreo y de análisis.

##### **Precisión y exactitud**

Los resultados deberán ser reproducidos con idénticos resultados bajo las mismas circunstancias y representar las concentraciones reales en la atmósfera.

##### **Tiempo promedio de muestreo**

El tiempo de muestreo deberá ser menor a los requerimientos del diseño de la red de monitoreo.

**Facilidades y costos**

Se deberá cumplir con las necesidades del objetivo y los recursos disponibles.

Además para el equipo automático se debe considerar:

**Calibración y estabilidad del cero**

El equipo automático debe ser estable en su rango de operación por un periodo mayor a tres días sin la atención del personal.

**Tiempo de respuesta**

El instrumento debe funcionar con suficiente rapidez para detectar exactamente los cambios en la concentración del contaminante que pueden ocurrir en un periodo corto en la muestra que está siendo analizada.

**Temperatura ambiente y humedad**

El instrumento debe operar en forma adecuada dentro de los rangos establecidos de temperatura y humedad para los cuales fue diseñado.

Los métodos y procedimientos utilizados para monitorear aire ambiente deben ser específico, evaluados y normalizados. Se conoce como método de referencia al método que cumple con lo anterior. También existen los métodos de equivalencia, que son aquellos que proporcionan resultados comparables con los obtenidos con el método de referencia. Ambos métodos pueden ser manuales o automáticos.

### 3.2. MONITOREO AUTOMATICO Y MONITOREO MANUAL

Los monitoreos se pueden clasificar como métodos automáticos o continuos y como métodos manuales o integrados. Los automáticos combinan el muestreo y el análisis en una sola etapa. Los manuales requieren complementar técnicas de muestreo y métodos analíticos por separado.

El equipo de monitoreo automático combina la colección y el análisis en un sólo instrumento. Estos aparatos realizan las mediciones de manera continua y envían la información a un registrador o dispositivo de almacenamiento. Estos instrumentos requieren de una calibración adecuada para obtener mediciones confiables.

Durante años se desarrollaron análisis químicos húmedos a fin de determinar las cantidades de contaminantes gaseosos en la atmósfera o en las muestras de corrientes gaseosas.

Al momento de seleccionar el equipo, para el caso de nuestro país, se debe tomar en cuenta

además la representación técnica del fabricante, la garantía del equipo, la experiencia y antecedentes de otros investigadores y de otras redes de monitoreo, etc. El equipo seleccionado cumple con los puntos anteriores, además que ha sido utilizado con éxito en la Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA) del Departamento del Distrito Federal.

### 3.3. MONITOREO DE BIÓXIDO DE AZUFRE

La normatividad actual en materia de calidad de aire para  $\text{SO}_2$  está especificada en 0.013 ppm, promedio en 24 horas (NOM-022-SSA1-1993, 1994).

Los procedimientos para monitorear  $\text{SO}_2$  pueden ser automáticos o manuales. Las técnicas manuales usan dispositivos de burbujeo de gases, mientras que los procedimientos automáticos se basan en conductividad, colorimetría, difusión electroquímica, fotometría de flama y fluorescencia por pulsos.

#### 3.3.1. Método de referencia

El método de la pararrosanilina se basa en la absorción de  $\text{SO}_2$  en una solución de tetracloromercurato de potasio. En este procedimiento se forma un complejo de diclorosulfitomercurato que es resistente a la oxidación por el oxígeno en el aire. El complejo se hace reaccionar con pararrosanilina y formaldehído para formar ácido metilsulfónico de pararrosanilina de coloración intensa. La intensidad del color producido se mide con un colorímetro o espectrómetro y es proporcional a la cantidad de  $\text{SO}_2$  presente en la muestra de aire (NOM-038-ECOL-1993, 1993).

Este método requiere dispositivos simples para coleccionar la muestra de aire ambiente, sin embargo, requiere de un laboratorio analítico muy bien equipado y de personal competente. Dentro de las precauciones en este método se tiene que proteger el reactivo absorbente de la luz solar directa y mantener la muestra a baja temperatura.

Con este método se ha eliminado o minimizado el efecto de los principales interferentes, por lo que es específico para  $\text{SO}_2$ . El rango de concentraciones que pueden ser medido por este método va de 25 a 1000  $\text{g/m}^3$ . Para concentraciones menores se puede muestrear volúmenes mayores de aire. Una ventaja de este método es la estabilidad de las muestras, que pueden mantenerse por 30 días si se almacenan a 5 °C, sin pérdidas detectables de  $\text{SO}_2$ . El costo para equipar y operar una estación de monitoreo basada en este método es moderado.

#### 3.3.2. Métodos de equivalencia

El método de análisis por pulsación de fluorescencia (en inglés, Pulsed Fluorescence Analysis) se basa en el principio de excitación del gas de interés por medio de una lámpara fluorescente. El gas a su vez emite radiación fluorescente, la cual es proporcional en

intensidad a la concentración del gas.

Para el caso de monitoreo de SO<sub>2</sub>, una muestra es irradiada por una fuente de luz ultravioleta intermitente que ha pasado a través de un filtro de interferencia con un pico a 216 nm con la mitad del ancho de banda de 23 nm. Cuando el SO<sub>2</sub> ha sido excitado y empieza a emitir luz fluorescente, ésta es pasada a través de un filtro óptico de banda ancha (240 nm a 420 nm) y es detectada por un tubo fotomultiplicador (TFM). La intensidad de luz emitida es linealmente proporcional a la concentración de SO<sub>2</sub> en la muestra (API, 1993).

La corriente del TFM es amplificada, acondicionada para eliminar las señales de ruido y la magnitud de la respuesta electrónica es transformada a una indicación visual.

El sistema de análisis y muestreo automático incluye una válvula multipuertos para permitir la selección de la muestra del gas problema, o del gas de calibración, y una línea de aire presurizado para retrolavar las líneas de conducción del gas problema durante el mantenimiento.

#### Sensibilidad y rango

Este método es aplicable a la determinación de SO<sub>2</sub> en el rango de 2.6 a 13,000 mg/m<sup>3</sup> (1 a 5,000 ppm). La sensibilidad, repetitividad y precisión del método son dependientes de varias variables como el material de construcción de las líneas de conducción de la muestra.

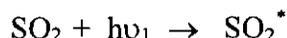
#### Interferencias

La acumulación de partículas y vapor de agua condensado en las superficies de contacto con los gases muestreados producirá un decremento gradual en la respuesta a la muestra y los gases de calibración. No existen otros compuestos reportados que produzcan fluorescencia ultravioleta a 216 nm dentro del mismo rango de concentración.

#### 3.3.3. Equipo seleccionado

El equipo seleccionado para el desarrollo del presente proyecto es el equipo marca Advanced Pollution Instrumentation (API) modelo 100, ya que cumple con los requerimientos del muestreo continuo vistos en el capítulo anterior. El equipo se basa en medir la fluorescencia de SO<sub>2</sub> debida a la absorción de energía UV. El bióxido de azufre absorbe en la región de 190 - 230 nm, sin que el aire cause inhibición y relativamente libre de otras interferencias. Las interferencias causadas por APN (aromáticos poli-nucleares) se reducen mediante la utilización de un supresor o cortador de hidrocarburos, "KICKER" en inglés (API, 1993a).

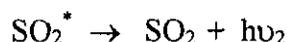
La lampara de UV emite radiación UV que atraviesa un filtro que deja pasar la luz a 216 nm, que excita las moléculas de SO<sub>2</sub>. El proceso está regido por la siguiente ecuación:



La fracción de luz ultravioleta absorbida,  $I_a/I_0$  viene dada por:

$$\frac{I_a}{I_0} = e^{-abc}$$

donde  $I_0$  es la intensidad inicial de luz UV,  $I_a$  es la intensidad después de la absorción por el  $\text{SO}_2$ ,  $a$  es el coeficiente de absorción del  $\text{SO}_2$ ,  $b$  la longitud del camino, y  $c$  la concentración de  $\text{SO}_2$ . El  $\text{SO}_2$  excitado decae a su estado básico emitiendo una fluorescencia característica:



Si la concentración de  $\text{SO}_2$  es relativamente baja, la longitud del camino de la luz de excitación es corta y el fondo es aire, la radiación fluorescente que incide sobre el TFM es directamente proporcional a la concentración de  $\text{SO}_2$ . Las especificaciones técnicas se presentan en la tabla 3.1.

**Tabla 3.1.** Especificaciones técnicas del equipo API 100

Especificación	Valor
Escalas	0.1, 0.2, 0.5, 1.0, 10.0 ppm
Ruido en cero	0.5 ppb
Limite detectable inferior	1 ppb
Deriva de cero	< 1 ppb en 24 h
Deriva de margen	< 1% en 24 h
Tiempo de retardo	20 s
Tiempo de subida/bajada	95% < 120 s
Flujo de muestra	500 cc/min +/- 10%
Margen de temperatura	5 - 40 °C
Alimentación	110V/60Hz, 250 W
Registrador	0-100 mV, 0-1, 0-5, 0-10V
Opción de comunicación	RS 232 C

### 3.4. MONITOREO DE ÓXIDOS DE NITRÓGENO

La normatividad actual en materia de calidad de aire para  $\text{NO}_2$  está especificada en que el valor de 0.021 ppm, promedio en 1 hora y establece que esta no se debe rebasar en un año (NOM-023-SSA1-1993, 1994).

Los procedimientos para monitorear  $\text{NO}$  y  $\text{NO}_2$  son automáticos o manuales. Las técnicas manuales usan dispositivos de burbujeo de gases, mientras que los procedimientos

automáticos se basan en quimioluminiscencia, colorimetría y fotometría de flama.

#### 3.4.1. Método de referencia

El método quimicoluminiscente es un método automático basado en la reacción de fase gaseosa de NO con ozono ( $O_3$ ) a condiciones de presión baja o cercana a la atmosférica. Las concentraciones atmosféricas de NO son medidas indirectamente al medir fotométricamente la intensidad de la luz resultado de la reacción de NO con  $O_3$ . El  $NO_2$  es reducido cuantitativamente a NO por medio de un convertidor catalítico o térmico antes de reaccionar con  $O_3$  para dar una medida de NO más  $NO_2$ . Después de las mediciones de NO y NO más  $NO_2$ , la medición de NO se sustrae de NO más  $NO_2$  para dar la medición final de  $NO_2$  (NOM-037-ECOL/1993, 1993).

El costo de los analizadores quimicoluminiscentes es elevado y su principal ventaja es la salida continua para el registro de las concentraciones de NO y  $NO_2$ . Los compuestos orgánicos nitrogenados son interferencias positivas para este método, sin embargo debido a sus bajas concentraciones en el aire ambiente se consideran despreciables. Todos los analizadores requieren del uso de los convertidor de  $NO_2$  a NO. La mayoría de los convertidores utilizan superficies de reacción de baja temperatura ( $225^\circ C$ ) o descomposición térmica a altas temperaturas ( $600^\circ C$ ) para la conversión de  $NO_2$  a NO.

Las mediciones por este método se consideran muy precisas si se utilizan las técnicas adecuadas de calibración y mantenimiento. La calibración requiere de equipo especial y técnicos experimentados para la generación de los estándares de NO y  $NO_2$ .

#### 3.4.2. Método de equivalencia

Existen diversos métodos de equivalencia manuales y continuos. Los métodos manuales utilizan química húmeda para determinar la concentración de  $NO_2$  en el aire ambiente, al hacer pasar la muestra de aire a través de una solución que absorberá el  $NO_2$  para su posterior análisis por métodos colorimétricos y de espectrometría. Entre las técnicas más conocidas se encuentran las técnicas de Griess-Saltzman y Jacobs-Hockheiser (Katz, 1977).

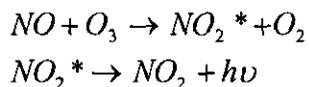
Los métodos continuos utilizan técnicas como quimicoluminiscencia, espectrometría ultravioleta, transductores eléctricos, espectrometría infrarroja dispersiva, laser y fluorescencia ultravioleta de pulsos.

#### 3.4.3. Equipo seleccionado

El equipo seleccionado para el desarrollo de este trabajo es el analizador de óxidos de nitrógeno marca API modelo 200, ya que cumple con los requerimientos del muestreo continuo vistos en el capítulo anterior (API, 1993b).

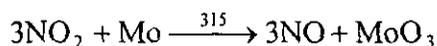
## Principio de funcionamiento.

El analizador API 200 se ha diseñado para medir la concentración de óxido nítrico NO, óxidos de nitrógeno totales NOx, bióxido de nitrógeno NO<sub>2</sub> y la diferencia entre NOx y NO<sub>2</sub>. El instrumento mide la intensidad luminosa de la reacción químicoluminiscente entre el óxido nítrico NO y el O<sub>3</sub>:



Se genera luz cuando las moléculas de NO<sub>2</sub> excitadas electrónicamente emiten un fotón y pasan a un estado de menor energía. Se sabe que la intensidad luminosa generada es directamente proporcional a la concentración de NO presente.

En primer lugar el analizador toma muestras del flujo de gas y mide la concentración de NO digitalizando varias muestras de la señal procedente del TFM del instrumento. Después, una válvula hace pasar el flujo de muestra a través de un convertidor, que contiene molibdeno calentado hasta reducir el NO<sub>2</sub> presente a NO mediante la siguiente reacción:



Después el analizador mide la concentración total de óxidos de nitrógeno NOx digitalizando la salida del TFM. Mediante la sustracción de los valores de NOx y NO en el procesador interno se obtiene la concentración de NO<sub>2</sub>. Luego se procesan los tres resultados, NO, NOx y NO<sub>2</sub>, para obtener diversos promedios (instantáneos y en el tiempo) de los tres componentes. Las especificaciones técnicas se presentan en la tabla 3.2.

**Tabla 3.2.** Especificaciones técnicas del equipo API 200

Especificación	Valor
Escalas	0.1, 0.2, 0.5, 1.0, 10.0 ppm
Ruido en cero	0.5 ppb
Límite detectable inferior	1 ppb
Deriva de cero	< 0.5 ppb en 24 h
Deriva de margen	< 0.5 ppb en 24 h
Tiempo de retardo	15 s
Tiempo de subida/bajada	95% < 60 s
Flujo de muestra	500 cc/min +/- 10%
Margen de temperatura	5 - 40 °C
Alimentación	110V/60Hz, 250 W
Registrador	0-100 mV, 0-1, 0-5, 0-10V
Opción de comunicación	RS 232 C

### 3.5. MONITOREO DE HIDROCARBUROS

El análisis de compuestos orgánicos es necesario debido a la participación de los hidrocarburos en las reacciones fotoquímicas atmosféricas que producen ozono y otros oxidantes, irritantes de ojos y vías respiratorias, fitotóxicos y aerosoles submicrométricos orgánicos e inorgánicos.

#### 3.5.1. Método de referencia

En México no se ha normado un método de referencia para la medición de hidrocarburos, así como tampoco existe una norma de calidad de aire para estos. El método de referencia que a continuación se presenta es el normado por la EPA.

El principio de determinación de hidrocarburos totales es el detector de ionización de flama de hidrógeno (DIF). Volúmenes medidos de aire son enviados semicontinualmente al DIF para medir su contenido de hidrocarburos totales (HCT). Una alícuota de la misma muestra de aire es introducida en una columna separadora la cual remueve agua, bióxido de carbono e hidrocarburos no metánicos. El metano y el monóxido de carbono son pasados cuantitativamente a una columna de cromatografía de gases donde son separados. El metano es arrastrado primero y es pasado sin alteración a través de un tubo de reducción catalítica dentro del DIF. El monóxido de carbono es arrastrado del tubo de reducción catalítica en donde es reducido a metano antes de pasar a través del detector. Entre cada análisis la columna separadora es sometida a contraflujo para prepararla para análisis subsiguientes. La concentración de hidrocarburos corregidos por metano es determinado por la sustracción del metano a los hidrocarburos totales (Altshuller, 1977).

En el detector de ionización de flama, la muestra de gas se inyecta dentro de la flama que se crea por la ignición del hidrógeno con aire u oxígeno. La flama está situada entre electrodos que tienen una caída de voltaje entre ellos de unos cuantos cientos de voltios. Cuando sólo se quema el hidrógeno, se forman pocos iones. Cuando la muestra de gas contiene hidrocarburos, se forman iones dentro de la flama y se dirigen al electrodo colector positivo. La señal de corriente directa resultante producida es proporcional al número de iones formados dentro de la flama. El número de iones formado es a su vez proporcional al número de átomos de carbono dentro de la flama. El DIF sólo es sensible a la cantidad total de hidrocarburos presentes y no establece diferencia entre especies.

#### 3.5.2. Método de equivalencia

Debido a la gran cantidad de hidrocarburos se han diseñado diversos métodos específicos para cada grupo de hidrocarburos. Para el análisis de compuestos orgánicos volátiles se han desarrollado métodos húmedos o colorimétricos. También se han desarrollado métodos infrarrojos dispersivos y no dispersivos. Cuando se requiere hacer una especiación se utiliza cromatografía de partición gas-líquido.

### 3.5.3. Equipo seleccionado

El equipo seleccionado para el desarrollo del presente trabajo es el analizador de hidrocarburos totales marca Dani Instrumentazione modelo TNMH 451, ya que cumple con los requerimientos del muestreo continuo vistos en el capítulo anterior (DANI, 1996).

#### Principio de operación

DANI TNMH 451 determina el contenido total de orgánicos no metánicos en el aire ambiente o gases inertes por el principio de detección de ionización de flama, después de sustracción catalítica. Una bomba incluida en el equipo succiona el aire para ser analizado y una pequeña parte se manda al analizador a flujo constante, mientras que el resto se ventea a través de un regulador de precisión. La porción del gas a ser analizado se envía al DIF directamente o a través de un removedor especial de todos los hidrocarburos excepto metano.

Los parámetros operativos son manejados por un microprocesador, el cual controla todas las fases operativas del instrumento. La actuación programada del removedor. La respuesta obtenida, relacionada con el contenido de metano solamente, es sustraída continuamente del total de la respuesta de acuerdo al llamado "Modo de referencia de Metano". La calibración automática se programa en intervalos que van de las 2 a 99 horas.

El procesamiento digital de las señales que vienen del detector DIF con las señales de la concentración de metano y de los otros hidrocarburos excepto metano brindan dinámica y estabilidad.

El removedor consiste de un reactor catalítico especial mantenido a temperatura constante. La vida promedio del catalizador depende estrictamente de la cantidad y naturaleza de los hidrocarburos a tratar: bajo condiciones normales de operación la vida promedio es de 10,000 horas. Las especificaciones técnicas se presentan en la tabla 3.3.

**Tabla 3.3.** Especificaciones técnicas del equipo DANI TNMH451

Especificación	Valor
Rango (equivalente a metano)	0-10, 0-100, 0-1000 ppm
Ruido	$\leq 0.01$ ppm
Limite de detectabilidad	$\leq 0.01$ ppm
Variación de la señal de cero en 24 horas	$\leq 0.02$ ppm
Variación de la señal de medición, 80% escala total	$\leq 0.02$ ppm
Duración del ciclo de medición	60 s
Precisión a 80% del rango de medición	$\leq 0.03$ ppm
Salida analógica	0-1 VDC o 4-20 mA
Salida serial	RS 232 C
Flujo de muestra	1000 cc/min

## 4. SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS

El sistema de adquisición de datos es el sistema que se va a encargar de manejar la información desde el momento en que se genera hasta que se realiza un análisis sobre la misma y se presenta al usuario.

El sistema de adquisición de datos es la parte medular de un sistema automático de monitoreo e incluye desde la recolección, almacenamiento, visualización y análisis de toda la información generada por el sistema.

Anteriormente estos pasos eran realizados por dispositivos externos a los analizadores y/o por computadoras de propósito específico. Actualmente y gracias al avance de la tecnología en computación y la electrónica estas funciones se pueden programar en el mismo analizador o en una computadora de propósito general.

### 4.1. DEFINICIONES

#### **Recolección de la información**

La información que genera la red de monitoreo es el valor de cada contaminante que se monitorea ( $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$  e HC) en cada caseta (Confianza, Codezpet, Semarnap), así como los parámetros meteorológicos de una estación conectada a la red, asociados a un periodo de tiempo en particular. Esta información se genera en cada caseta por lo que se debe recolectar dicha información en un sitio único para facilitar su manejo y análisis.

#### **Almacenamiento de la información**

Toda la información generada por la red de monitoreo debe almacenarse para mantener un registro de los niveles de contaminación en el sitio de estudio. La información de cada contaminante de cada caseta se guarda en un dispositivo de almacenamiento como unidad de cinta, discos ópticos, discos flexibles, discos duros, etc. La capacidad del dispositivo de almacenamiento dependerá del número de variables que se estén manejando (parámetros contaminantes y variables meteorológicas) y de la frecuencia de muestreo. El almacenamiento y manejo de la información se lleva a cabo utilizando una base de datos, que se encargará de llevar el registro de la información y mediante sencillos comandos se pueden realizar análisis y reportes para determinados periodos de tiempo.

#### **Visualización de la información**

La información almacenada se presenta de manera directa de dos maneras. La primera es mediante los valores analógicos tal y como se presentan en el analizador. Esta manera es útil ya que se presenta junto con un plano de ubicación de las casetas y se puede ver la zona geográfica que está resultando afectada en tiempo real.

La segunda se presenta en un sistema que se denomina “datos históricos”, es decir se puede ver una gráfica de las concentraciones de los contaminantes contra el tiempo. La variable del tiempo permite visualizar los datos de la última hora, el último día, o algún periodo de tiempo en particular del mismo día o de un día anterior.

### **Análisis de la información**

El análisis que se da a la información que genera la red de monitoreo va enfocado al cumplimiento de las normas de calidad de aire. Se calculan los promedios horarios durante el transcurso de un día. Se pueden observar las variaciones diurnas de los contaminantes y asociarlas con acontecimientos durante el funcionamiento de la TMDB. También se calculan los promedios diarios. Esto sirve para observar las variaciones debidas a condiciones de operación de la planta, cuantificar las medidas de control y los volúmenes de gas quemado durante ciertas temporadas.

Otro tipo de análisis que es útil es visualizar la relación que existe entre la concentración de los contaminantes y ciertas variables meteorológicas (velocidad de viento, radiación, humedad relativa, etc). Este tipo de representación sirve para poder pronosticar condiciones meteorológicas en las que se espera una mayor acumulación de algún contaminante.

En el siguiente capítulo se presenta en detalle el tipo de análisis estadístico que se realiza con la información que genera la red de monitoreo.

## **4.2. HARDWARE DEL SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS**

Para realizar el diseño de un sistema de adquisición de datos existen dos aspectos que están muy relacionados: el hardware y el software. El hardware se refiere a la parte física del equipo, conectores, cables, instrumentos, etc. que generan una señal eléctrica de voltaje o corriente la cual representa un dato de información. El software representa los programas que se ejecutan en una computadora de propósito general y que sirven para almacenar, transmitir, comparar, calcular y analizar la información generada por el hardware. Los programas que se ejecutan para realizar todas las tareas anteriores se elaboran para trabajar con el hardware específico.

### **4.2.1. Equipo analizador de gases contaminantes**

Anteriormente, los fabricantes de equipo de monitoreo desarrollaban analizadores utilizando electrónica analógica para obtener una señal eléctrica de voltaje o de corriente que representaba la concentración de un contaminante. Esta señal se enviaba a un registrador de papel o a un dispositivo de salida para visualizar su valor y posteriormente el registro impreso era analizado para concluir sobre los niveles de contaminación presentes.

A partir de la década de los años 80s, con la introducción del microprocesador 8086 de Intel y del 68000 de Motorola, se inicia un gran desarrollo de equipo electrónico. Se introduce la

primera computadora personal (PC) de propósito general y gracias a la demanda que tuvo entre el público, los diseños han evolucionado hasta alcanzar un nivel de procesamiento y capacidad de almacenamiento que satisfacen cualquier necesidad de computo.

Paralelamente a este desarrollo, también hubo cambios en el área de instrumentación, y en específico en el área de analizadores de gases contaminantes (AGC). El diseño electrónico de los analizadores, al utilizar estos microprocesadores como base, sustituyó muchas tareas que antes eran realizadas mediante electrónica análoga, e introdujeron nuevas funciones que ahora son realizadas en el mismo analizador. Los AGC que basan su diseño eléctrico/electrónico en un microprocesador se consideran como una computadora de estándares industriales de propósito específico, en este caso la medición de determinado contaminante.

Este diseño les permite una gran cantidad de funciones entre las que se puede mencionar: visualización de la información a través de un display digital, programación del equipo mediante el uso de un pequeño teclado integrado, comunicación con un dispositivo externo (computadora o impresora) mediante una interfase serial, programación de funciones a distancia utilizando una interfase serial, funciones automáticas de calibración, ajuste de rangos de medición, reporte de valores promediados en intervalos de 10 a 60 minutos, etc.

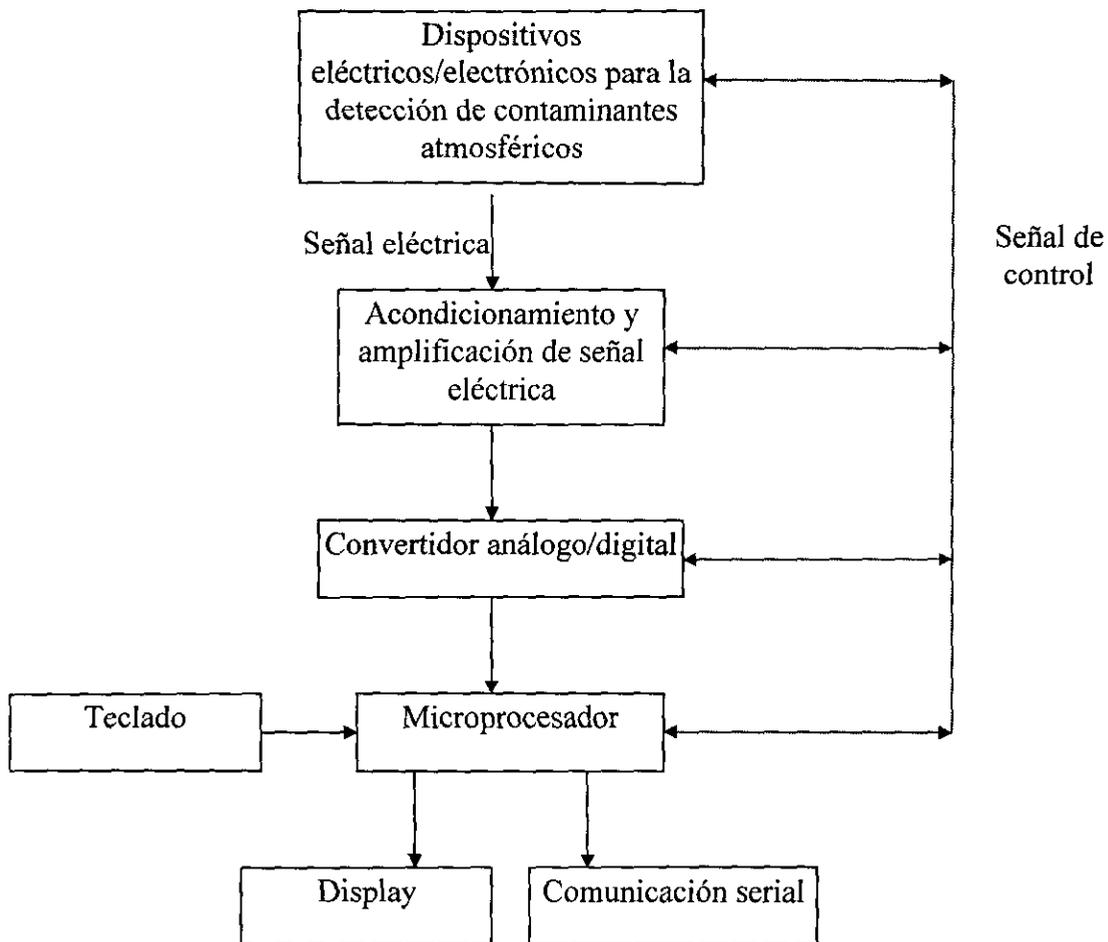
Un diagrama esquemático de este tipo de diseño se muestra en la figura 4.1. En el primer cuadro "Dispositivos eléctricos/electrónicos para la detección de contaminantes atmosféricos" representa la parte específica de cada analizador para detectar y medir cada contaminante. Aquí se aplica el principio de detección del contaminante en particular, utilizando sensores que miden una propiedad física del contaminante (radiación UV, temperatura, campo electromagnético, etc.) y lo traducen a una señal eléctrica de voltaje o de corriente.

En el siguiente cuadro "Acondicionamiento y amplificación de señal eléctrica" la señal eléctrica se normaliza. Es decir, mediante el uso de circuitos eléctricos, la señal se amplifica y se le da un rango fijo. Así por ejemplo, si la variable de interés es la concentración de un contaminante que tiene un rango de valores de 0 a 10 ppb, entonces la señal eléctrica tendrá valores de 0 a 10 volts.

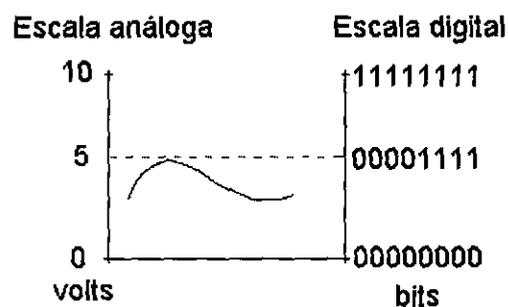
En el cuadro marcado "Convertidor análogo/digital" se realiza la conversión de una señal eléctrica análoga (valores continuos) a señales digitales (valores discretos). Como se sabe el sistema numérico de las computadoras utiliza el sistema binario, es decir, sólo hay 2 estados para representar las cosas: 0 o 1. Un dígito binario es lo que se conoce como bit en las computadoras. De esta manera, un grupo de 8 bits representa un byte que representa la unidad base del lenguaje de las computadoras. Existe circuitos especiales dedicados a esta tarea, que se muestra gráficamente en la figura 4.2.

Una vez que se tiene el dato en forma digital, se transmite al microprocesador representado por el cuadro "Microprocesador". Este cuadro representa, tanto el microprocesador, como circuitos adicionales y necesarios, tales como la memoria RAM y los circuitos de control de

display y teclado. Es en la memoria RAM (Random Access Memory) donde residen los programas que se ejecutan en el analizador y donde se guardan los valores de concentración para su posterior transmisión.



**Figura 4.1.** Diagrama esquemático de las funciones de un analizador basado en un microprocesador



**Figura 4.2.** Conversión de un valor análogo a un valor digital

Los cuadros marcados como “Teclado” y “Display” representan la entrada y salida de datos de y hacia el exterior. Mediante el teclado el usuario puede modificar algunos parámetros del equipo, puede realizar calibraciones, puede revisar las alarmas del analizador, etc. Y es a través del display que el analizador se comunica con el usuario para mostrar los datos que se le requieren.

Entre las características más importantes que brinda el diseño basado en microprocesador se tiene a la comunicación serial, como se ve en el cuadro marcado “Comunicación serial”. Para poder establecer la comunicación entre dos dispositivos electrónicos ellos se deben conectar de tal manera que las señales eléctricas de uno son recibidas por el otro.

Para poder realizar la comunicación entre equipos de diferentes fabricantes se han diseñados varios estándares. El estándar más utilizado es el conocido como: RS-232-C, publicado en 1969 por la Asociación de Industrias Electrónicas (Electronic Industries Association, en inglés). El estándar RS-232-C fue diseñado originalmente para especificar la conexión entre terminales y módems. Especifica las características eléctricas de circuitos entre los dos componentes y da número y nombres a los cables necesarios para conectarlos. Existen diferentes tipos de conectores tales como los conocidos conectores tipo D (por que tienen la forma de una letra D mayúscula) de 9 o 25 pines (Gofton, 1986; Dvorak, 1990).

Los diferentes equipos que se desean conectar se clasifican en dos grupos: Equipo Terminal de Datos (DTE, Data Terminal Equipment) y Equipo de Comunicación de Datos (DCE, Data Communication Equipment). Los equipos DTE, tales como terminales, utilizan la línea 2 para comunicación de la información, mientras que los equipos DCE, tales como los módems, utilizan la línea 2 para recepción de la información. Es necesario utilizar otra línea, la línea 7, como referencia de voltaje y polaridad para poder establecer una comunicación en un solo sentido. Para establecer la comunicación en ambos sentidos se debe utilizar otra línea, línea 3, para la comunicación del equipo DCE hacia el equipo DTE.

Es necesario también contar con líneas de control para que el equipo que va a enviar información “sepa” si el equipo que va a recibir la información está “listo”. A estas líneas se les llama líneas de control de flujo o de “apretón de manos” (handshake). Un resumen de las señales que se manejan en la comunicación serial se presentan en la tabla 4.1.

**Tabla 4.1.** Líneas de información que se manejan en los equipos analizadores

Pin	Señal	Descripción
2	TX DATA	Transmisión de datos
3	RX DATA	Recepción de datos
5	GROUND	Señal de referencia de voltaje y polaridad
6	DSR	Indica que el DCE está listo para recibir información
7	RTS	Indica que el DTE está listo para enviar información
8	CTS	Segunda línea de control que indica que DCE está listo para recibir información

Para la comunicación entre los equipos AGC del sistema, con la computadora concentradora de información (CCI) se utilizó el puerto serie (estándar RS-232-C) que tiene el equipo en la parte posterior. Este es un conector DB9 macho, el cual maneja las líneas de información que se presentan en la tabla 4.1.

Como se puede ver, los equipos AGC están contruidos de tal manera que representan al equipo DTE. Por lo tanto la CCI deberá configurarse como un equipo DCE.

Las señales eléctricas que se utilizaron en el estándar RS-232-C son las siguientes: ESPACIO, correspondiente al 0 binario, donde existe un valor positivo (entre +3 y +15 Volts) y MARCA, correspondiente al 1 binario donde existe un valor de voltaje negativo (entre -3 y -15 Volts). El estándar RS-232-C no fue diseñado para la comunicación a grandes distancias y 50 pies se considera como la distancia máxima utilizando cable estándar a velocidades normales.

Otro punto importante para establecer la comunicación exitosa entre dos dispositivos electrónicos es establecer una velocidad de transmisión igual para ambos dispositivos. El número de bits que se transmiten por segundo indica la velocidad de transmisión (bps).

#### 4.2.2. Computadora concentradora de información

El equipo CCI que se encuentra ubicado en cada caseta no es más que una computadora para uso industrial que puede trabajar en ambientes altamente corrosivos y agresivos para cualquier otro dispositivo electrónico. De esta manera se asegura la comunicación serial entre los analizadores y el concentrador de información.

Esta computadora tendrá a su cargo dos funciones: concentrar y transmitir los datos hacia la computadora central. Concentrar los datos se refiere a preguntar a cada uno de los tres analizadores (SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> e HC) por los valores de concentración de contaminantes durante el último periodo de análisis. Transmitir los datos se refiere a enviar los datos de contaminantes vía módem-radio a una computadora central que se encuentra ubicada en la TMDB y que recibirá la información de cada una de las casetas.

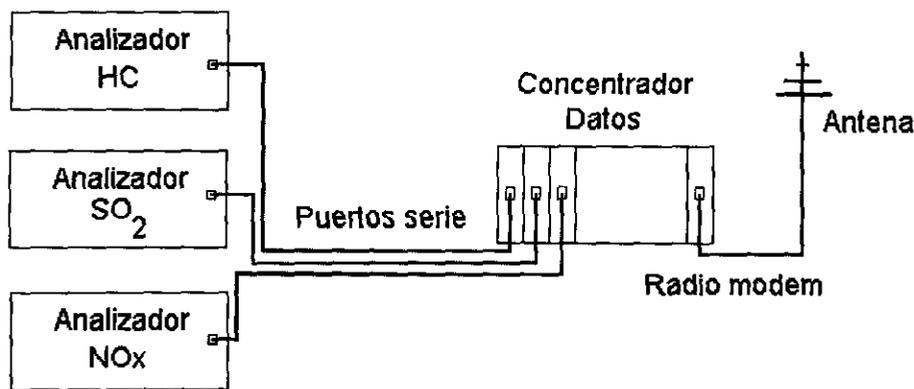
El CCI, al ser en sí mismo una computadora, provee compatibilidad con lenguajes de programación comunes (C, Basic, Pascal), sistema operativo y software comercial. El hardware está diseñado para aplicaciones industriales en donde se tienen vibraciones, golpes, alta humedad (90% no condensable) y alta temperatura. Estas condiciones evitan que una computadora común pueda trabajar satisfactoriamente, por lo que se requiere utilizar este tipo de computadoras para tener un sistema efectivo.

Otra de las ventajas que se tiene al utilizar este tipo de computadoras, es que pueden configurarse tanto en el microprocesador como en las tarjetas, de forma que se puede seleccionar desde un microprocesador 80286 hasta un PENTIUM y tarjetas de entradas analógicas, digitales y puertos seriales.

Para este caso se utilizó un microprocesador 80286, ya que la velocidad de proceso de este microprocesador es suficiente para esta aplicación, junto con una tarjeta de 4 puertos seriales para la comunicación con los 3 equipos analizadores. También cuenta con un disco duro de 1.2 GB para almacenar el sistema operativo y el programa que se ejecuta y un disco flexible de 1.44 MB para introducir el sistema operativo y los programas requeridos.

En la CCI se ejecuta un programa cuya función es preguntar a cada uno de los tres analizadores por el promedio de concentración de los contaminantes durante los últimos 10 minutos (periodo programado en cada analizador para calcular el promedio de las variaciones de concentración del contaminante). Al momento de recibir el pedimento por parte de la computadora central secundaria (CCS), envía la información de los datos almacenados de cada contaminante vía radio módem.

El diagrama de conexión entre los equipos analizadores y la CCI se ve en la figura 4.3. Las conexiones seriales entre la computadora y cada equipo cumplen con el estándar RS-232-C.



**Figura 4.3.** Diagrama de conexión entre analizadores, computadora concentradora de información y radio módem

#### 4.2.3. Radio módem

El radio módem es un dispositivo de comunicación serial que se utiliza para extender la distancia de comunicación entre dos dispositivos. Este dispositivo se conecta por un lado a la CCI para recibir la información que se va a transmitir, se modula la información utilizando diferentes técnicas digitales, y se envía a través de una antena aérea.

El radio módem está configurado para recibir y transmitir datos por medio de dos cristales piezoeléctricos, los cuales reciben y transmiten dicha información a la frecuencia de 455.800 MHz. Esta frecuencia fue asignada a PEP por la Secretaría de Comunicaciones y Transporte (SCT), autoridad federal encargada de organizar la distribución de frecuencias en el espectro electromagnético en México (ver figura 4.3).

#### 4.2.4. Computadora central secundaria

La CCS es una computadora comercial que se ubica en el laboratorio de PEMEX Exploración y Producción, Seguridad Industrial y Protección al Ambiente (PEP-SIPA) dentro de las instalaciones de la TMDB. Esta computadora tiene las siguientes características: microprocesador 80486 DX4, disco duro de 1.0 GB, 16 MB de memoria RAM, 3 puertos seriales, monitor, teclado y ratón.

Al puerto serial número 1 se conectó el radio módem, por donde transmite y recibe la información proveniente de cada caseta de monitoreo. La CCS inicia el proceso de comunicación cada 10 minutos, preguntando a cada caseta por los valores de contaminantes del último periodo de análisis.

En el puerto serial número 2 se conectó un módem telefónico que utiliza la línea telefónica para enviar la información a la computadora central principal ubicada en las oficinas centrales de PEP, en Ciudad del Carmen, Campeche.

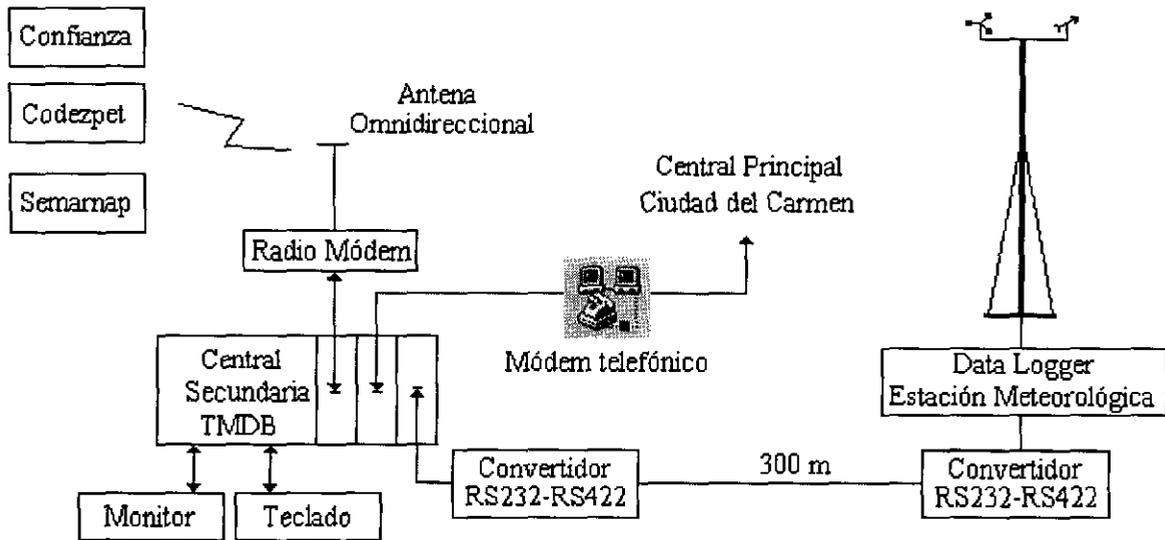
Por el puerto serie número 3 se conectó un convertidor de RS232-RS422, para que la CCS se comunique con el recopilador de datos de la estación meteorológica que PEP-SIPA tiene instalada dentro de la TMDB, de tal manera que se almacene la información (velocidad y dirección de viento, radiación solar, humedad relativa, temperatura, presión barométrica, precipitación pluvial). El convertidor RS232-RS422 es necesario debido a que la estación meteorológica se encuentra situada a 300 m de distancia de la CCS. En la figura 4.4 se muestra un diagrama de las conexiones de la CCS.

Esta computadora es la parte medular del sistema de adquisición de datos, debido a que es el lugar donde se recibe y almacena la información completa de las casetas y de la estación meteorológica. Para este propósito se genera una base de datos, con archivos de información diaria. Esta computadora debe operar las 24 horas, los 365 días del año para asegurar que se recolecte toda la información generada en la red. También se encargará de enviar la información a las oficinas centrales de PEP-SIPA, donde se analiza y reporta a las autoridades sobre las condiciones de calidad de aire en la zona de la TMDB.

#### 4.2.5. Computadora central principal

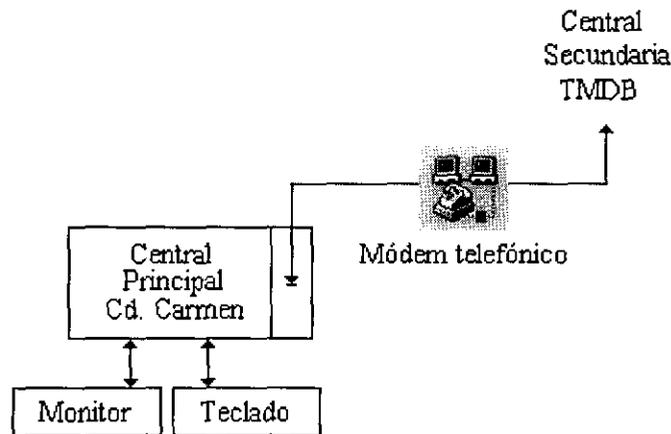
La computadora central principal (CCP) es una computadora comercial que se ubica en las oficinas del PEP-SIPA en Ciudad del Carmen, Campeche. Las características de esta computadora son las siguientes: microprocesador Pentium, disco duro de 2.0 GB de almacenamiento, 16 MB de memoria RAM, 2 puertos series, monitor, teclado y ratón.

Utilizando uno de los puertos series se conecta un módem telefónico para establecer la comunicación con la CCS ubicada en el laboratorio de PEP-SIPA en la TMDB. Utilizando el software de Windows 95 de conexión telefónica remota es posible transferir los archivos de la base de datos de cada día de operación.



**Figura 4.4.** Diagrama esquemático de la computadora central secundaria en la TMDB

Es en esta computadora donde se realiza todo el análisis de la información, se generan reportes para informar a las autoridades y la población sobre los niveles de contaminantes en la zona. En la figura 4.5 se muestra un diagrama esquemático de las conexiones de esta computadora.



**Figura 4.5.** Diagrama esquemático de la computadora central principal en Ciudad del Carmen, Campeche

En la figura 4.6 se presenta un diagrama del sistema de adquisición de datos en su totalidad.

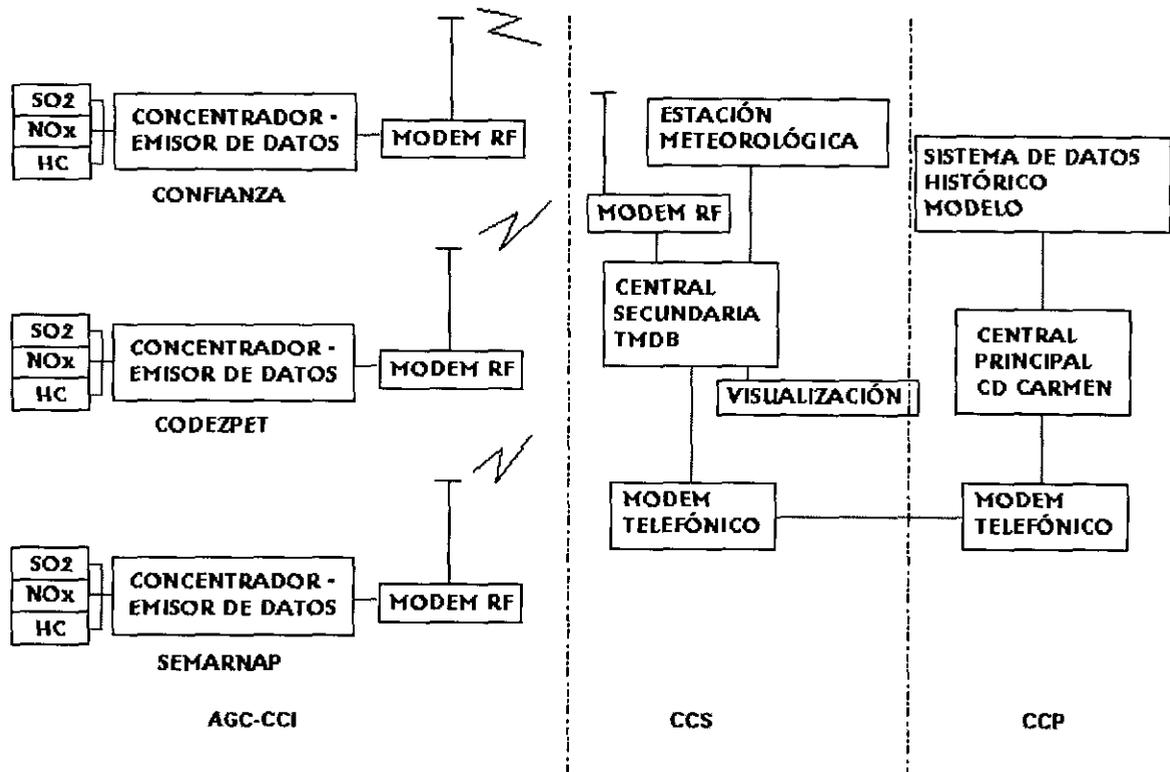


Figura 4.6. Diagrama esquemático de la conexión física del sistema de adquisición de datos

### 4.3 SOFTWARE DEL SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS

El software es el grupo de programas que se ejecutan en una computadora de propósito general y que sirven para realizar las siguientes tareas: almacenar, transmitir, comparar, analizar la información generada por los AGC. Los programas son una serie de instrucciones que se ejecutan en la computadora a través de su unidad central de proceso (CPU) para realizar las tareas mencionadas.

Cada programa se ejecuta en una computadora específica y puede realizar diferentes tareas tales como almacenamiento y visualización de información. A continuación se describirán los programas diseñados para este sistema y las tareas más importantes que realizan.

#### 4.3.1. Programa de las CCI

El programa que se ejecuta en las CCI se le llama DBPL, el cual es un nombre genérico para los programas de las tres casetas. Los programas de las 3 casetas fueron desarrollados utilizando el lenguaje C de programación.

Cada programa que se ejecuta en las CCI es similar con respecto a los otros, pero con 2 diferencias: el nombre del programa es específico para cada computadora, por ejemplo, el

programa que se encuentra instalado en la CCI Confianza es DBPL1, en la CCI Codezpet es DBPL2 y en CCI Semarnap es DBPL3; la segunda diferencia es que cada programa tiene una clave de identificación diferente que sirve para distinguir una CCI de otra.

La CCS envía información a través del radio módem y el medio de transmisión, en este caso el aire, es común para las tres CCI. Así, cualquier mensaje que envíe la CCS debe contener la clave de identificación de la CCI destinataria y sólo la CCI destinataria deberá responder. La CCS al "oír" el mensaje, revisa la clave de identificación, y si es la propia, entonces realiza el siguiente paso. Si no es la propia, entonces ignora el mensaje. En este caso, la clave de identificación para cada CCI es el nombre propio de cada una de las casetas.

Una vez que se recibe el pedimento de la CCS de enviar la información, la CCI destinataria verifica que el mensaje sea para ella. Si es así, comienza a preguntar a cada AGC por el valor de contaminantes del último periodo.

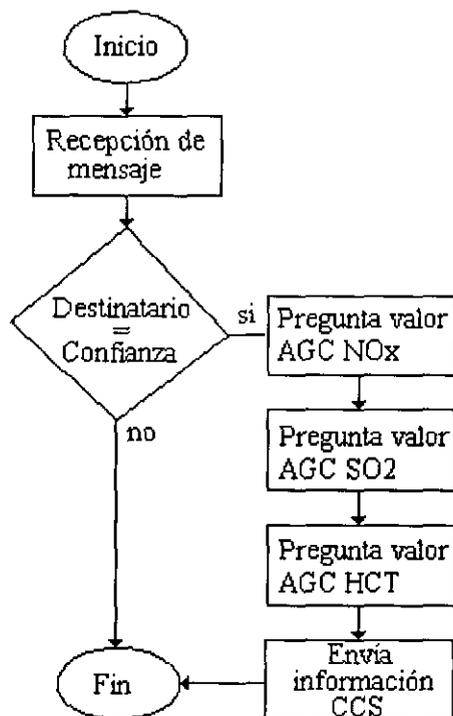
La CCI envía un código de control a cada analizador a través del puerto serie específico para cada analizador. El equipo analizador responde entonces a través del mismo puerto serie con la información de la fecha, la hora, el valor del contaminante e información sobre el estado de operación del equipo analizador. La última información es de gran importancia ya que indica las condiciones en que opera el equipo para así determinar la validez de la información de los contaminantes.

Una vez que se tiene un dato válido de concentración de contaminantes de cada AGC se envía a través del radio módem hacia la CCS. Junto con la información de concentración de cada contaminante se envía el estado de cada AGC. Esto es muy importante ya que el operador de la red tendrá información real de algún problema o alarma de los AGC desde el laboratorio de monitoreo y podrá tomar las acciones necesarias para corregir el problema.

En caso de estar desconectados los analizadores de SO<sub>2</sub> y NO<sub>x</sub>, el sistema marcará un error que repercutirá como una alarma en la información enviada a la CCS. El analizador de HC no presenta esta alarma debido a las especificaciones de diseño del mismo. En la figura 4.7 se presenta el diagrama de flujo para el programa DBPL1 caseta de Confianza.

#### 4.3.2. Programas de la CCS

En la CCS se encuentra instalado el ambiente de trabajo Windows 95, que permite que varios programas o aplicaciones se encuentren ejecutando al mismo tiempo (comparten recursos del sistema). Los programas más importantes para la red de monitoreo son: SERPEM1 y FIX-DMACS.



**Figura 4.7.** Diagrama de flujo del programa que se ejecuta en las CCI

#### 4.3.2.1. SERPEM1

El programa denominado SERPEM1 es el encargado de realizar la comunicación con las tres CCI. Además, envía la información al programa FIX-DMACS que se encarga de generar la base de datos y guardar la información de las CCI. El programa SERPEM1 fue realizado utilizando el lenguaje de programación Visual Basic.

El programa SERPEM1 utiliza un contador de 10 minutos, al final de los cuales genera una señal de software. Esta señal de software es la indicación para que el programa SERPEM1 comience a “preguntar” en forma secuencial a cada CCI de cada caseta por los valores de los AGC y a la estación meteorológica por los parámetros meteorológicos. Este sistema de recolección de información se conoce como “poleo” (polling, en inglés).

Este proceso se debe repetir cada diez minutos, y el tiempo total que consume por cada recolección es de aproximadamente dos minutos. Por ejemplo: si la primera recolección fue a las 14:32 la siguiente recolección será a las 14:42 y así sucesivamente.

Una vez que se tiene la información de las tres CCI, se le da un formato junto con la fecha y la hora para enviarla a la base de datos FIX-DMACS. El envío se realiza vía un intercambio de datos dinámico DDE (Dynamic Data Exchange, en inglés). Este recurso de Windows requiere que se disponga solamente del dato que se desea transmitir, es decir que hay que

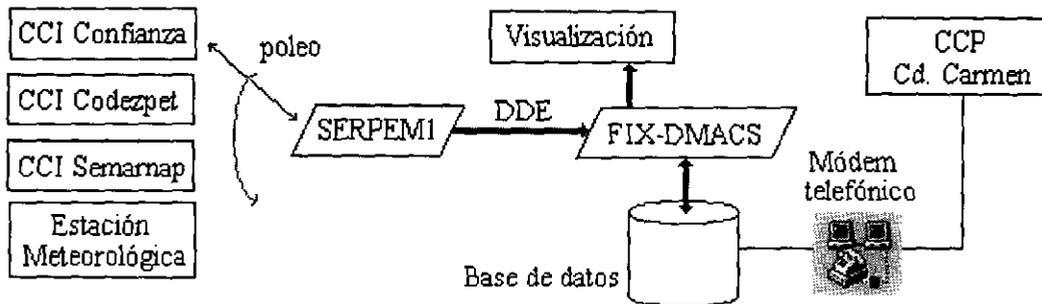
separar a la información recibida en forma de variables significativas. Para una mayor información sobre el enlace DDE, referirse al manual de Windows 95.

#### 4.3.2.2. FIX-DMACS

El programa FIX-DMACS es una aplicación comercial para el monitoreo de procesos en la industria, por lo que se utiliza en este caso para monitorear los valores de los AGC. FIX-DMACS es un programa de adquisición de datos que puede funcionar como servidor (enviar datos) y como cliente (recibir datos) vía DDE. En este caso específico, funciona como cliente, es decir, recibe datos provenientes del programa SERPEM1.EXE el cual funciona como servidor.

FIX-DMACS se hará cargo de desplegar y dar una presentación adecuada de los datos de la red de monitoreo para el usuario. FIX-DMACS se encarga de poner los datos de manera tal que el usuario tenga una interfaz gráfica de fácil manejo y comprensión, así mismo, crea archivos históricos (base de datos junto con la hora y la fecha).

En la figura 4.8 se presenta un esquema de la interacción de los programas SERPEM1 y FIX-DMACS en la CCS.



**Figura 4.8.** Diagrama de interacción de los programas SERPEM1 y FIX-DMACS

#### 4.3.3. Programas de la CCP

En la CCP tiene como ambiente de trabajo a Windows 95, con la facilidad de que se pueden ejecutar múltiples aplicaciones o programas al mismo tiempo. Entre estos programas se pueden mencionar a: FIX-DMACS, Excel y MDA01.

##### 4.3.3.1. FIX-DMACS

El programa FIX-DMACS cumple dos funciones importantes en la CCP. En primer lugar, crea, administra y actualiza la base de datos de la información de los AGC y variables meteorológicas, idéntica a la que se tiene en la CCS. En segundo lugar, permite visualizar la información en tiempo real, utilizando el enlace telefónico de redes de Windows, o de manera histórica accediendo directamente a la base de datos de FIX-DMACS.

En el tiempo real, la información se despliega en pantalla sobre un mapa donde se tiene la ubicación exacta de las casetas de monitoreo y la TMDB. Se presenta la información para todos los contaminantes que se están monitoreando:  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ , HCNMetano, HCNNoMetano. También se pueden ver las variables meteorológicas que reporta el recopilador de datos de la estación meteorológica (ver figura 4.9).

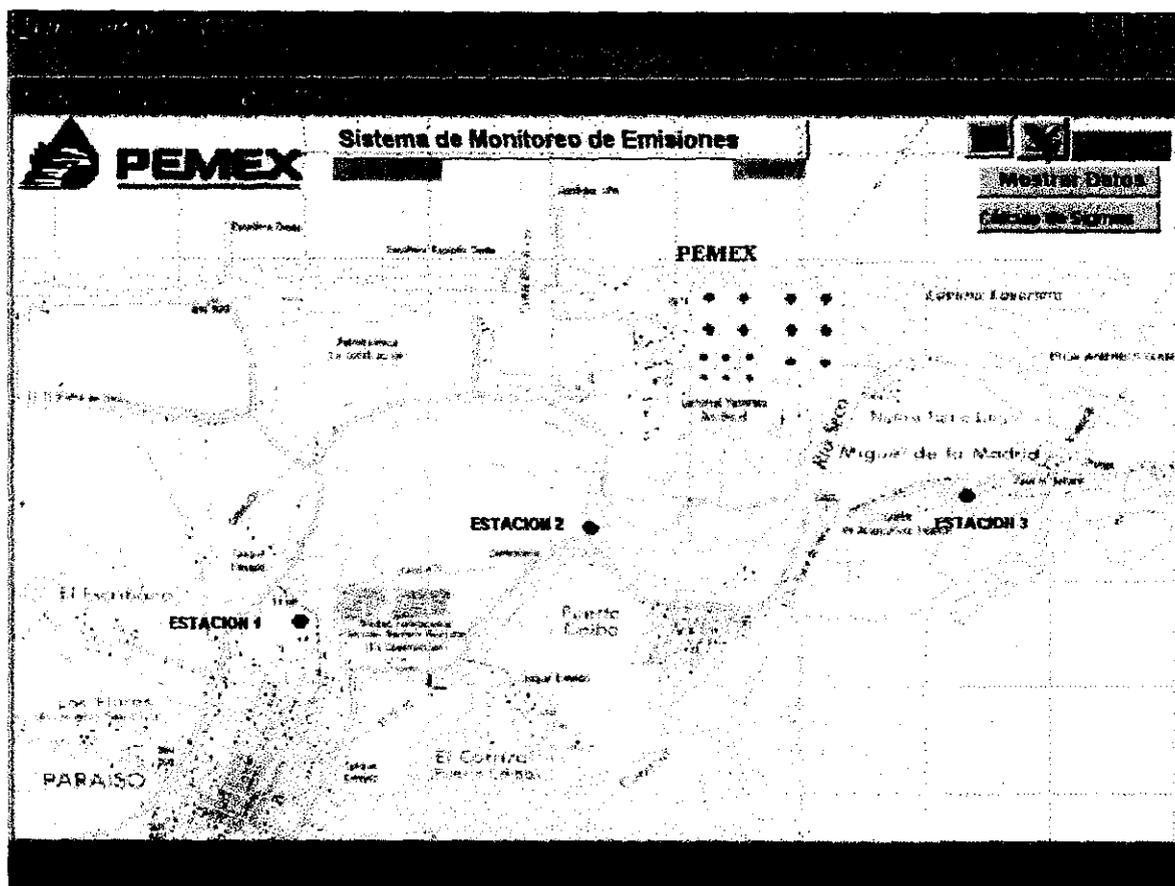


Figura 4.9. Pantalla de visualización de información en la CCP

Una vez que se tiene creada la base de datos, la información se puede ver en tiempo histórico, es decir en una gráfica de tiempo se pueden ver las variables que se deseen, siempre y cuando formen parte de la base de datos. Se puede ver la información completa del día anterior o de cualquier otro periodo anterior. En una sola pantalla se puede ver una hora o un mes, es decir la escala del tiempo puede ajustarse a los requerimientos del usuario. Se pueden escoger las variables a visualizar para un periodo de tiempo determinado. También se puede observar las variaciones que se tienen en la concentración de los contaminantes durante el transcurso del día, de la semana o del mes.

#### 4.3.3.2. MDA01

El Modelo de Dispersión Atmosférica versión 1 (MDA01), es un programa hecho en el lenguaje de programación Visual Basic y utiliza todas las consideraciones hechas para el modelo gaussiano descritas en la sección 2.2.1.

Este programa fue instalado en la CCP como ayuda al personal de PEP-SIPA de la TMDB para pronosticar las concentraciones de contaminantes para diferentes condiciones atmosféricas y de proceso. Puede acceder a la base de datos de FIX-DMACS para obtener las condiciones meteorológicas de un día en particular, realizar una corrida, calcular la concentración del contaminante deseado y compararlo contra el valor medido en los AGC. Se realizaron diferentes corridas del modelo, bajo las condiciones meteorológicas y de operación de la TMDB que se encontraron durante un muestreo preliminar de  $\text{SO}_2$ , y se estimó un error de 47.8 % (Aguirre et al., 1997).

En la figura 4.10 se ve una corrida de MDA01, donde se puede ver un acercamiento de la TMDB, así como la pluma donde cada color indica un nivel de concentración de contaminante, las coordenadas UTM y el valor de concentración en dicho punto.

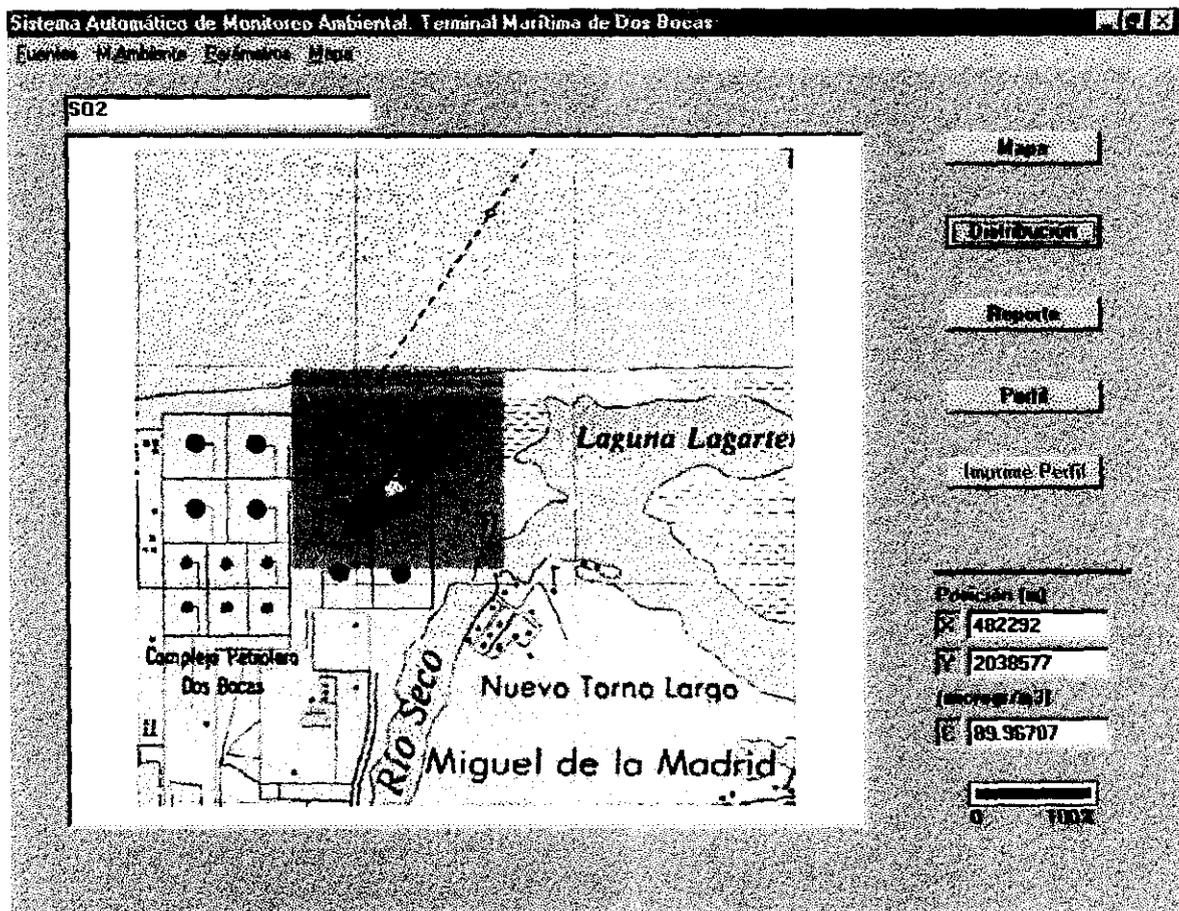


Figura 4.10. Modelo de dispersión atmosférica instalado en CCP

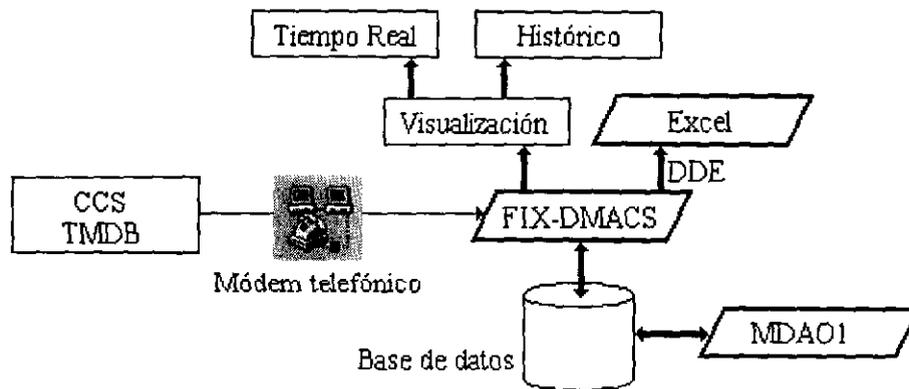
#### 4.3.3.3. Excel

El análisis y procesamiento de la información se realiza utilizando la aplicación Excel, que se encuentra cargada en la CCP. Se tiene la opción de analizar la información para 1, 7 o 30 días antes a la fecha actual, de cada una de las variables de cada una de las casetas.

Al procesar la información para un día se mostrarán los valores promedios aritméticos de cada hora durante las 24 horas para cada contaminante y de cada una de las casetas. Al procesar la información para periodos de 7 o 30 días, se mostrarán para  $\text{SO}_2$  el promedio diario y para  $\text{NO}_x$  e HC el promedio horario máximo que se halla presentado en cada día. De esta manera se podrá comparar estos valores contra la norma mexicana de calidad de aire para cada contaminante.

También se elabora un grupo de gráficas que relacionan las variables meteorológicas y las variables de concentración de contaminantes. Este tipo de gráficas es importante ya que permite asociar diferentes fenómenos meteorológicos con los incrementos o reducciones en la concentración de un contaminante.

En la figura 4.11 se presenta el diagrama de relación entre cada uno de los programas y aplicaciones que se ejecutan en la CCP.



**Figura 4.11.** Diagrama de relación entre cada programa que se ejecuta en la CCP

## 5. ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN

Como se definió en el primer capítulo, los objetivos que se buscan alcanzar con el diseño e instalación de la presente red de monitoreo son: a) juzgar el cumplimiento con las normas de calidad de aire, b) evaluar planes de control de emisión de contaminantes, c) evaluar los riesgos a la salud humana, d) evaluar riesgos para el ambiente, e) juzgar quejas específicas, f) observar variaciones a largo plazo y g) validar modelos de dispersión atmosférica.

La red de monitoreo debe ser capaz de proveer la información necesaria para llevar a cabo cada uno de los objetivos anteriores y así tener bases para determinar la calidad del aire en la zona de estudio.

Ahora bien, para llevar a cabo dichos objetivos es necesario hacer una planeación cuidadosa del tipo de análisis estadístico que se hará de los datos de concentración de contaminantes.

Para cumplir el primer objetivo, juzgar el cumplimiento con la normas de calidad de aire, es necesario conocer las normas existentes para México y determinar el análisis estadístico necesario para la información generada por la red de monitoreo.

Así por ejemplo, la Norma Oficial Mexicana NOM-022-SSA1-1993 que indica el criterio para evaluar la calidad del aire ambiente, con respecto al bióxido de azufre indica el valor normado para la concentración de bióxido de azufre en el aire ambiente, como medida de protección a la salud de la población.

En dicha norma se indica que: “La concentración de bióxido de azufre como contaminante atmosférico, no debe rebasar el límite máximo normativo de 0.13 ppm o lo que es equivalente a  $341 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , en 24 horas una vez al año y 0.03 ppm ( $79 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) en una medida aritmética anual, para protección a la salud de la población susceptible”.

Ahora bien, la norma da a entender que se deben realizar una medición con duración de 24 horas si se utiliza el método de referencia (método de la pararrosanilina, método manual) en cada uno de los 365 días del año y comparar contra el valor de 0.13 ppm, el cual no se debe rebasar en ningún día. Si se utilizan analizadores automáticos se toma el promedio de todas las mediciones hechas en un día (que dependen de la programación del analizador) y esto representa el promedio diario (en 24 horas) y se compara contra el valor de 0.13 ppm.

También se calcula una media aritmética anual con cada uno de los valores diarios para poder comparar contra el valor de 0.03 ppm, el cual no se debe rebasar, de lo contrario se violaría la norma de calidad de aire para bióxido de azufre.

Como se puede ver, existen diferentes análisis estadísticos que se pueden llevar a cabo, por lo que se necesitan conocimientos básicos de estadística para realizarlos. A continuación se presentarán algunas bases estadísticas y posteriormente el análisis realizado con los datos disponibles a la fecha.

## 5.1. VALIDACIÓN DE LA INFORMACIÓN

La evaluación crítica de la validez de los datos recopilados es el primer paso en el análisis de la información. El propósito de la validación de datos es detectar y corregir cualquier valor que puede no representar las condiciones de calidad de aire en una estación en específico (Zimmer, 1977). La validación de la información debe ser realizada independientemente de los procedimientos utilizados para su recolección.

Cada medición debe comprobarse individualmente y como parte de un conjunto de datos consecutivos en el tiempo o simultáneos en el espacio. La mayor parte de la validación se da al examinar la información en busca de fenómenos extraordinarios, tales como cambios drásticos en las mediciones de contaminantes o en variables meteorológicas. Si se encuentran anomalías, los valores deben desecharse o corregirse antes de proceder con el análisis. Es importante también tener presente la relación que existe entre la calidad de la información y el funcionamiento y mantenimiento que se da al equipo para asegurar la confiabilidad de la información.

Mediante una inspección manual se buscan valores inusualmente altos o bajos, que pueden indicar un error en el sistema de recolección de datos. Los datos sobre los que se tenga duda, serán revisados más a fondo a fin de determinar la causa de su valor. Otra comparación útil es comparar la diferencia entre mediciones sucesivas. Normalmente, no se espera encontrar variaciones muy rápidas en la concentración de los contaminantes de un periodo de muestreo al siguiente. Si la diferencia es mayor a un valor predeterminado, el valor se investigará más a detalle para determinar la causa. El uso de las computadoras es muy útil, ya que pueden realizar comparaciones y chequeos en grandes cantidades de datos en periodos cortos de tiempo.

Algunas consideraciones importantes de recalcar son:

- Se debe tener más del 20% del total de observaciones, por cada periodo de temporada anual (primavera, verano, otoño e invierno), es decir aproximadamente el 80 % o más de las mediciones para asegurar una muestra anual representativa.
- Descartar los valores que se capturen cuando se conozca de antemano (por medio de la bitácora de funcionamiento del equipo y las alarmas generadas por el equipo) que son datos dudosos en su validez.

## 5.2. PRESENTACIÓN DE INFORMACIÓN SIN PROCESAR

Los datos de calidad de aire son una serie de mediciones de la concentración de contaminantes atmosféricos tomados continua o intermitentemente (OMS, 1980). Cada medición individual representa una concentración promedio tomada sobre un intervalo de tiempo. Debido a que las concentraciones de un contaminante en un sitio varían de una u

otra manera con respecto al tiempo, es necesario reportar el tiempo utilizado para realizar un promedio.

Para presentar la información sin procesar basta con ordenarla en tablas y gráficas en el tiempo. El formato dependerá en medida en la extensión y naturaleza del sistema de monitoreo. Se pueden agrupar promedios horarios para un determinado contaminante en diferentes estaciones de la misma red de monitoreo en tablas diarias en función del tiempo y del sitio de monitoreo. Promedios diarios podrán ser incluidos en tablas mensuales y anuales para cada sitio de monitoreo. Se recomienda que cada tabla incluya el nombre del contaminante, las técnicas de medición (Pulsación de fluorescencia UV, quimiluminiscencia, ionización de flama, etc.), el tipo de información (promedio horario, promedio diario, etc.), ubicación del sitio de monitoreo, periodo de tiempo sobre el que fue recolectada la información y unidades de medición. La tabla 5.1 presenta en forma tabular algunos datos de información de NO<sub>2</sub>.

**Tabla 5.1. Promedios horarios para NO<sub>2</sub> (ppb) caseta de Confianza, 1 - 15 octubre 1997**

Hora	Promedios horarios de NO <sub>2</sub> en la caseta Confianza, octubre, 1997														
	Día=1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
0:00	8.17	1.83	6.67	7.67	1.17	5.50		2.17	3.33	3.83	3.33	4.00	3.00	8.83	3.33
1:00	5.50	2.80	4.67	7.33	5.17	3.33		2.00	5.50	1.67	2.67	1.00	1.67	11.00	4.67
2:00	3.50	2.50	7.60	4.50	12.00	2.83		1.50	2.17	3.17	1.17	1.67	2.50	3.33	4.33
3:00	2.17	4.67	0.83	2.50	12.67	9.00		2.33	3.50	5.00	2.33	0.75	2.20	3.00	1.67
4:00	1.33	1.17	1.20	10.67	11.17	6.50		2.83	1.50	3.60	0.83	1.33	1.83	1.83	2.17
5:00	2.33	1.75	3.50	9.00	5.00	4.83		1.83	1.40	2.40	1.67	2.83	1.83	2.17	3.17
6:00	1.67	1.00	1.20	17.00	3.50	4.67		1.00	16.17	2.83	1.20	3.00	2.67	10.50	2.67
7:00	8.67	1.33	3.25	11.67	6.17	11.67		2.17	12.50	6.33	3.50	2.67	1.60	13.83	1.50
8:00	4.17	3.20	63.67	6.83	4.33	2.50		2.00	4.33	2.00	3.67	1.83	1.83	4.67	1.50
9:00	3.50	1.67	4.67	6.40	5.50	3.20		2.20	0.67	2.00	1.83	1.83	1.00	3.17	2.67
10:00	2.14	3.33	1.40	2.57	2.71	2.43	0.00	1.29	2.50	1.00	2.29	1.50		2.29	2.57
11:00	1.33	1.50	3.50	6.00	1.50	2.00	1.20	3.33	1.83	21.80	2.50	1.80		1.67	2.33
12:00	1.50	22.50	2.00	3.00	2.60	1.90	3.00	1.80	1.33	2.00	2.80	1.67		2.67	2.40
13:00	13.33	7.50	1.50	3.33	4.00	2.80	2.33	5.67	1.50	1.80	2.83	1.17		0.60	5.00
14:00	8.00	1.50	1.17	5.17	4.50	11.33	2.00	1.80	2.33	2.60	2.20	0.67	1.33	9.17	7.67
15:00	4.67	4.40	4.17	16.00	10.50	2.80	1.20	2.00	2.33	11.00	3.67	2.83	7.00	5.50	2.00
16:00	2.67	12.40	7.80	3.80	4.67	4.00	1.33	37.80	4.80	4.00	3.60	4.17	5.50	17.17	2.83
17:00	6.33	4.00	1.50	6.17	2.17	4.40	6.33	7.83	9.33	4.33	2.83	5.83	9.33	4.50	3.50
18:00	8.00	13.17	2.50	4.17	6.67		7.67	5.33	9.00	5.67	11.33	6.00	4.50	8.20	3.00
19:00	7.60	8.67	4.67	10.33	6.50		17.83	3.67	5.83	5.50	13.50	18.17	6.17	5.50	4.50
20:00	11.00	11.17	3.33	7.50	3.50		7.17	3.17	6.80	4.00	11.00	16.83	10.50	2.67	4.33
21:00	13.83	12.67	22.67	5.33	5.67		5.17	7.67	7.60		11.00	16.17	6.60	9.00	4.33
22:00	5.60	10.33	6.40	13.17	8.20		6.33	6.67	2.67	2.50	8.33	14.83	2.83	8.17	2.50
23:00	10.80	6.17	9.83	2.83	4.83		7.17	2.33	3.00	9.33	2.33	11.17	7.00	6.83	2.83

La información presentada en tablas puede entenderse más claramente al presentarse en gráficas de tiempo. Es decir graficar los valores de concentración de determinado contaminante contra el tiempo. En dichas gráficas se puede observar los datos faltantes, datos máximo y mínimo, patrones de variación temporal, etc.

La comparación entre gráficas realizadas para el mismo contaminante en diferentes sitios de monitoreo puede ser útil al ayudar a visualizar tendencias comunes para dicho contaminante. También es útil comparar las gráficas para diferentes contaminantes medidos en el mismo sitio de monitoreo, donde pueden encontrarse posibles interrelaciones. Lo mismo puede decirse para las relaciones que pueden existir entre los niveles de concentración y las variables meteorológicas. Por ejemplo, la influencia de una fuente puntual sobre un sitio de monitoreo determinado se presentará tan pronto el viento sopla en dirección del sitio de monitoreo.

Como ejemplos de lo anterior se presentan las figuras 5.1 y 5.2, donde se muestra la información de promedio diario de concentración de bióxido de azufre y el promedio

horario máximo, respectivamente. De estas gráficas se pueden observar los datos que representan picos máximos y mínimos, sobre los cuales se requiere un análisis más detallado para opinar sobre su origen.

Promedio diario de concentraciones de dióxido de azufre en la caseta de Confianza, 25 septiembre a 23 octubre de 1997

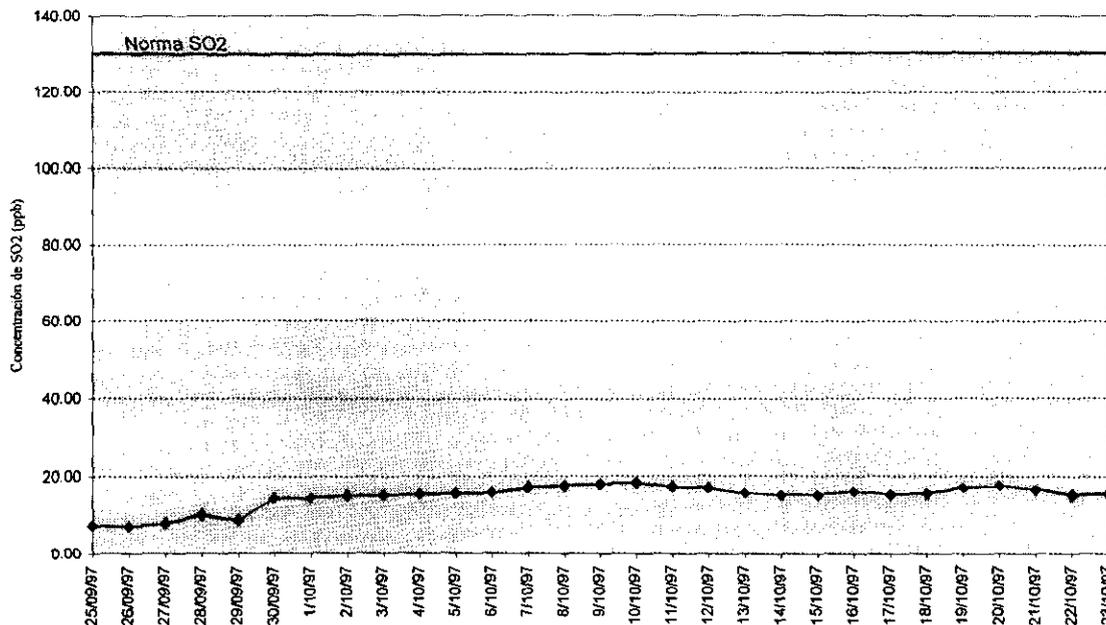


Figura 5.1. Gráfica de los promedios diarios de SO<sub>2</sub> en la caseta Confianza para el periodo 25 septiembre - 23 octubre 1997

Promedio horario máximo NO2 caseta Confianza, 25 septiembre - 23 octubre 1997

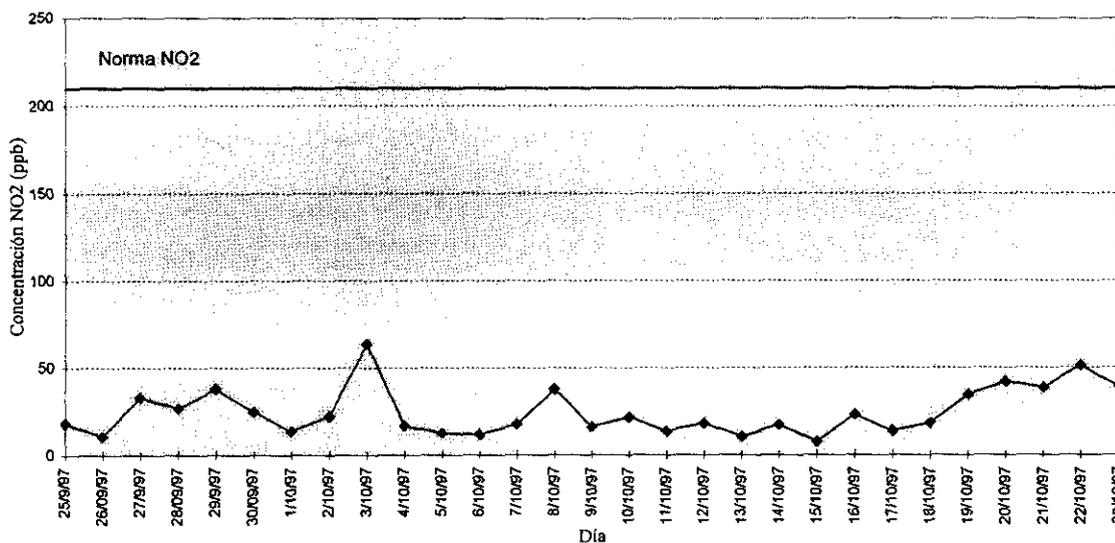


Figura 5.2. Gráfica de los promedios horarios máximos de NO<sub>2</sub> en la caseta Confianza para el periodo 25 septiembre - 23 octubre 1997

### 5.3. PRESENTACIÓN DE LA INFORMACIÓN PROCESADA

Aun cuando la presentación de la información sin procesar sea de utilidad, después de cierto tiempo de funcionamiento, la red de monitoreo producirá grandes cantidades de datos, que no será práctico analizar de dicha manera. Para solucionar este problema, se utilizarán los sumarios estadísticos para obtener una idea clara de la contaminación local.

#### 5.3.1. Medidas de tendencia central

Las medidas de tendencia central tienen una aplicación directa al compararse con estándares de calidad de aire, debido a que estos especifican los valores promedio de concentración de contaminantes.

Entre las principales medidas de tendencia central se pueden mencionar las siguientes: la mediana, la moda, la media aritmética y la media geométrica.

El primer paso es acomodar los datos del menor al mayor valor. La diferencia entre el mayor valor (máximo) y el menor valor (mínimo) es el rango del conjunto de datos. El valor intermedio o promedio aritmético de los dos valores intermedios, si el total del conjunto es número par, se le conoce como la *mediana*.

Al extender esta idea, se obtienen los cuartiles (los que dividen el conjunto de datos en 4 partes) y los deciles (los que dividen el conjunto de datos en 10 partes). De esta manera, se puede definir cualquier percentil P, especificando qué P porcentaje de los datos del conjunto son menores o iguales que el valor del percentil P. En un conjunto de datos de tamaño N, el P percentil corresponde al  $\left(P \frac{N}{100}\right)$ -ésimo valor cuando los datos están ordenados.

La *moda* de un conjunto de datos es el valor que ocurre con mayor frecuencia. La moda puede no existir, e incluso no ser única en caso de existir.

La *media aritmética* o promedio es la suma de todas las observaciones dividida por el número de observaciones. Refleja todos los valores y se ve influenciado por los valores extremos (valores mínimos y máximos). La forma de calcular la media aritmética es la siguiente (Mendenhall, 1983):

$$\mu = \bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$$

en donde :

$n$  es el número de datos

$y_i$  es el dato  $i$ .

La *media geométrica* es el antilogaritmo del promedio aritmético de los logaritmos de los datos del conjunto. La forma de calcular la media geométrica es la siguiente:

$$\bar{y}_g = e^{\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln y_i\right)}$$

en donde:

$n$  es el número de datos

$y_i$  es el dato  $i$ .

Ahora bien, debido a que los valores de las concentraciones de contaminantes son variables, reflejando cambios en emisiones de las fuentes, condiciones meteorológicas y química atmosférica, se debe especificar junto con el valor promedio, un valor que represente la variabilidad en las observaciones.

### 5.3.2. Medidas de dispersión

La dispersión o variación de los datos intenta dar una idea de cuán esparcidos se encuentran éstos. Hay varias medidas de dispersión, siendo las más comunes el rango, la desviación estándar y la desviación geométrica.

El *rango* se define como la diferencia entre el mayor valor y el menor. El rango de un conjunto de datos es una medida de variabilidad o dispersión de los mismos. Sin embargo, el rango depende únicamente de los datos extremos y no proporciona información de la dispersión de otros datos.

La *desviación estándar* es la medida de variabilidad más comúnmente usada y se calcula como la raíz cuadrada del promedio del cuadrado de las desviaciones de los valores de la media aritmética. De la misma manera, si se utiliza la media geométrica, entonces, la *desviación geométrica* estándar es la medida de variabilidad apropiada. La forma de calcular la desviación estándar de una población es la siguiente:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \mu)^2}$$

en donde:

$n$  es el número total de datos

$y_i$  es el dato  $i$

$\mu$  es la media aritmética

### 5.3.3. Representación Gráfica

La presentación de la información estadística en forma gráfica es una manera fácil de presentar los resultados y conclusiones obtenidos de los datos de calidad de aire. Entre los gráficos que son de utilidad se tiene: gráficas de percentiles, histogramas y curvas de frecuencia acumulativa.

En la figura 5.3 se presenta un ejemplo de gráficas de percentiles en donde se presentan medidas de las distribuciones de frecuencia de  $\text{NO}_2$  con los datos de la tabla 5.1.

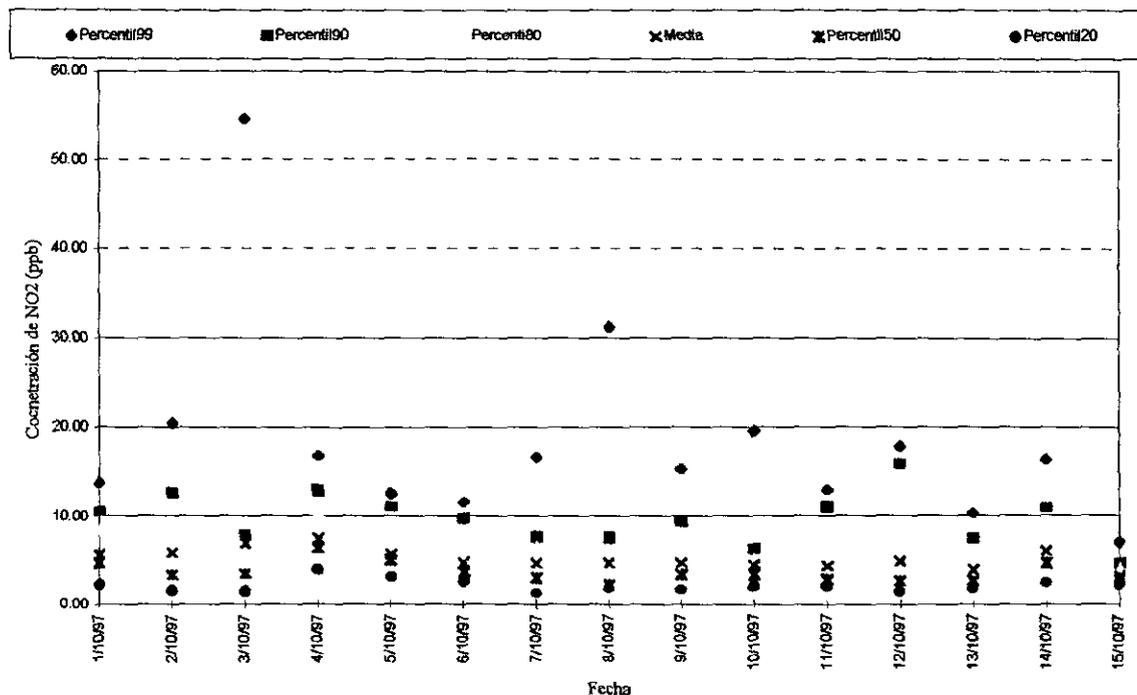


Figura 5.3. Gráfica de percentiles para los datos presentados en la tabla 5.1

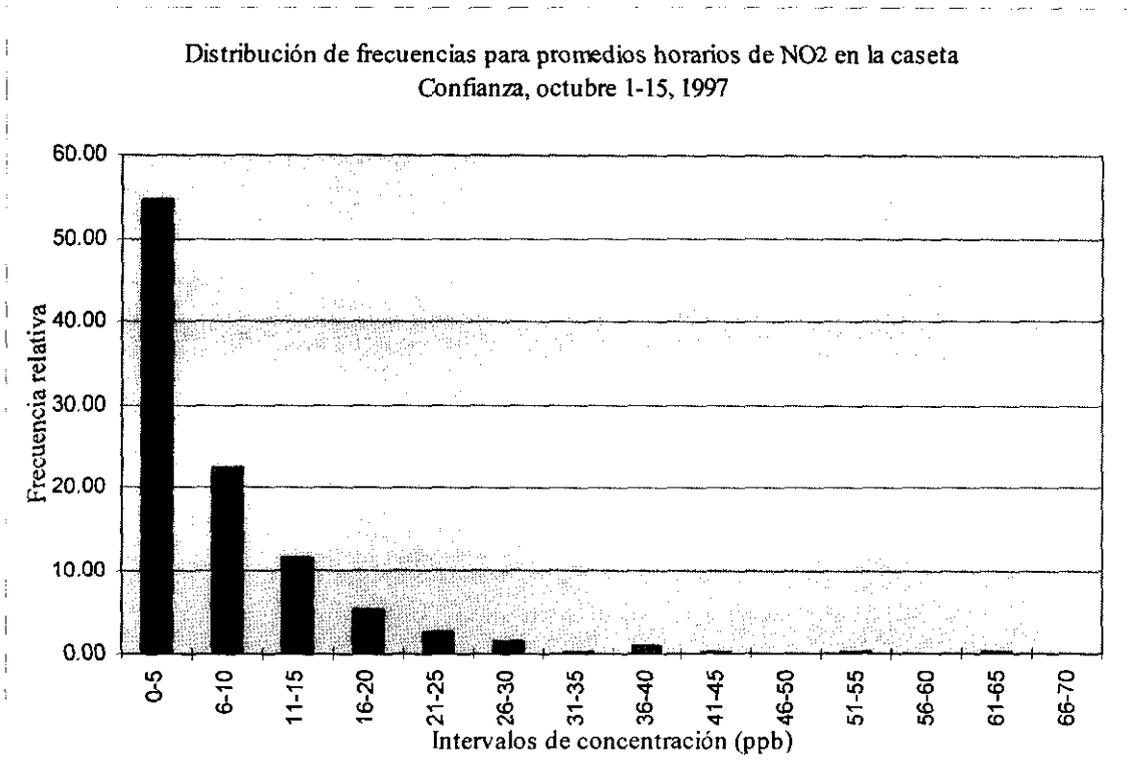
Al analizar grandes cantidades de datos es útil distribuirlos en clases o categorías, y determinar el número de individuos que pertenecen a cada clase que se conoce como frecuencia de clase. Cuando los datos se presentan en una tabla por clase junto con la correspondiente frecuencia de clase, se le conoce como distribución de frecuencias.

Los pasos para construir una distribución de frecuencias son los siguientes:

1. Determinar el número de clases. Normalmente es mejor tener entre 5 y 20 clases, dependiendo del número de datos que se tengan, entre mayor número de datos mayor número de clases se deben emplear.
2. Determinar el ancho de la clase. Como regla general para determinar el ancho de la clase, se divide el rango entre el número de clases deseadas y se redondea el número obtenido para encontrar un número conveniente. Todas las clases deberán ser de igual ancho para permitir hacer comparaciones entre las frecuencias de clases.

3. Localizar las fronteras de clases. Las fronteras de clases se deben escoger de tal manera que sea imposible para una medición ser igual a una frontera.

Un histograma es una representación gráfica de la distribución de frecuencias. Consiste de un conjunto de rectángulos que tienen base en el eje x (horizontal), el ancho de la base es proporcional al intervalo de la clase, y la altura (sobre el eje y) es proporcional a la frecuencia, como se muestra en la figura 5.4 (Spiegel, 1991).



**Figura 5.4.** Histograma de intervalos de concentración construido a partir de los datos de la tabla 5.1

Una curva de frecuencias representa una curva continua ajustada a un histograma, que puede representarse en una forma matemática simple. La mayoría de los conjuntos de datos de contaminantes atmosféricos presentan histogramas que muestran un pico hacia la izquierda con una cola larga hacia la derecha (sesgo hacia la derecha).

#### 5.4. CASO DE ESTUDIO

A continuación se presenta la validación y el análisis realizado para los datos generados por la red de monitoreo instalada en la TMDB.

### 5.4.1. Generación de los datos

Los equipos analizadores seleccionados para el monitoreo de los contaminantes de NO<sub>x</sub> y SO<sub>2</sub> tienen la capacidad de analizar una muestra en 14 segundos. Es decir, puede generar un nuevo dato de concentración cada 14 segundos. Sin embargo, las concentraciones de aire ambiente en la zona de estudio no varían tan rápidamente, por lo que es más importante contar con valores promediados en un periodo mayor de tiempo.

El analizador se puede programar para que genere un promedio en periodos que van de 1 a 60 minutos y la selección del periodo dependen de diversos factores tales como: velocidad y dirección de viento, número, tipo y distribución de fuentes de contaminantes, etc.

Para este caso en particular se seleccionó un periodo de 10 minutos debido a las siguientes razones:

1. Si se toma en cuenta la distancia a la que se encuentran los equipos de monitoreo de los quemadores elevados y la velocidad promedio del viento, el tiempo que tardan en llegar los contaminantes a los analizadores es de 10 minutos.
2. La cantidad de información generada al utilizar un periodo de 10 minutos era adecuada para manejarse por la computadora del laboratorio. Teniendo en cuenta el número de variables de los analizadores (3 contaminantes/caseta, total 9 variables), más 7 variables meteorológicas, en total 16 variables. Cada variable se guarda como un número real que ocupa 4 bytes, en un día ocuparían 9,216 bytes (más un 50% del formato de archivo excel), aproximadamente 14 Kbytes. En un año de datos ininterrumpidos, se tendrán poco más de 5,000 Kbytes lo que es equivalente a 5 Mbytes, que es un valor razonable para el tamaño del dispositivo de almacenamiento con que se cuenta (1 Gbyte de disco duro).
3. Aunque la EPA (Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos) recomienda que el periodo de muestreo sea de 5 minutos (Zimmer, 1977), para este caso en particular un periodo de 10 minutos es suficiente ya que se monitorean contaminantes primarios provenientes de una sola fuente de emisión.

Por lo anterior, los equipos analizadores se programan para reportar un nuevo valor de concentración cada 10 minutos. Este valor representa el promedio aritmético de todos los valores de concentración de contaminantes obtenidos en un periodo de 10 minutos, aproximadamente:

$$n = \frac{\left(10 \text{ min} * 60 \frac{s}{\text{min}}\right)}{20s} \approx 30$$

donde n es el número de muestras analizadas en un periodo de 10 minutos.

Es decir, en un periodo de 10 minutos, se calcularon 30 nuevos valores de concentración de contaminantes, se calcula un promedio aritmético y se reporta como representativo de ese periodo. Este valor se toma de cada analizador por la computadora concentradora y se envía a la computadora de la central secundaria para su almacenamiento y posterior análisis.

#### 5.4.2. Validación de los datos

Una ayuda importante en la validación de la información está la bitácora de registro del mantenimiento que se da a los equipos analizadores, así como el registro de alarmas que genera cada equipo. En la bitácora se registra todas las acciones de mantenimiento correctivo y preventivo que se aplica a cada equipo analizador. En esta bitácora se pueden ver los periodos en que los equipos analizadores funcionaron correctamente, en qué periodos se les dió mantenimiento a los equipos y en qué periodos no funcionaron correctamente o estuvieron fuera de operación.

En el registro de alarmas se puede observar qué tipo de alarmas se generaron durante el funcionamiento de los equipos, en qué fecha y hora se generó dicha alarma, cuánto tiempo duró y cuál fue la acción correctiva que se le dió. En estos periodos de malfuncionamiento o de funcionamiento dudoso se deben desechar los datos generados, ya que no existe certeza en su validez.

#### 5.4.2. Análisis de los datos

Una vez que se encuentra validada la información, se procede formalmente al análisis de la misma.

##### a) Análisis sin procesamiento de datos

En primer lugar se presenta la información sin procesar, es decir se presenta la información "cruda". Como parte del sistema de adquisición de datos se cuenta con un programa conocido como "tendencias históricas", que presenta la información almacenada en la base de datos en forma gráfica. En este programa se presenta la información de los datos de concentración de contaminantes y variables meteorológicas almacenados en la base de datos, se pueden realizar diferentes funciones tales como:

1. Ajustar la ventana del tiempo para mostrar el periodo de tiempo de interés tales como 1 hora, 8 horas, 24 horas, 1 mes, 3 meses, 1 año, etc.
2. Mover la escala del tiempo hacia adelante o hacia atrás para buscar un periodo de tiempo en específico.
3. Escoger los contaminantes de interés, la estación de monitoreo y las variables meteorológicas en un determinado tiempo.
4. Ajustar las escalas en que se presentan los contaminantes o las variables meteorológicas.

Las funciones anteriores hacen de las tendencias históricas una función muy poderosa para poder hacer un primer análisis sobre la información. Se puede relacionar los diferentes

contaminantes de una caseta de monitoreo específica, se puede monitorear un mismo contaminante en diferentes estaciones de monitoreo, e inferir acerca de las relaciones que guardan los niveles de contaminantes con las variables meteorológicas tales como velocidad de viento, dirección de viento, temperatura, humedad relativa, radiación solar, etc.

Para ayudar a comprender la utilidad de esta herramienta, puede verse como un graficador de hoja continua, sobre el cual se presentan los valores de cada variable en cualquier punto de la gráfica (ver figura 5.5.)

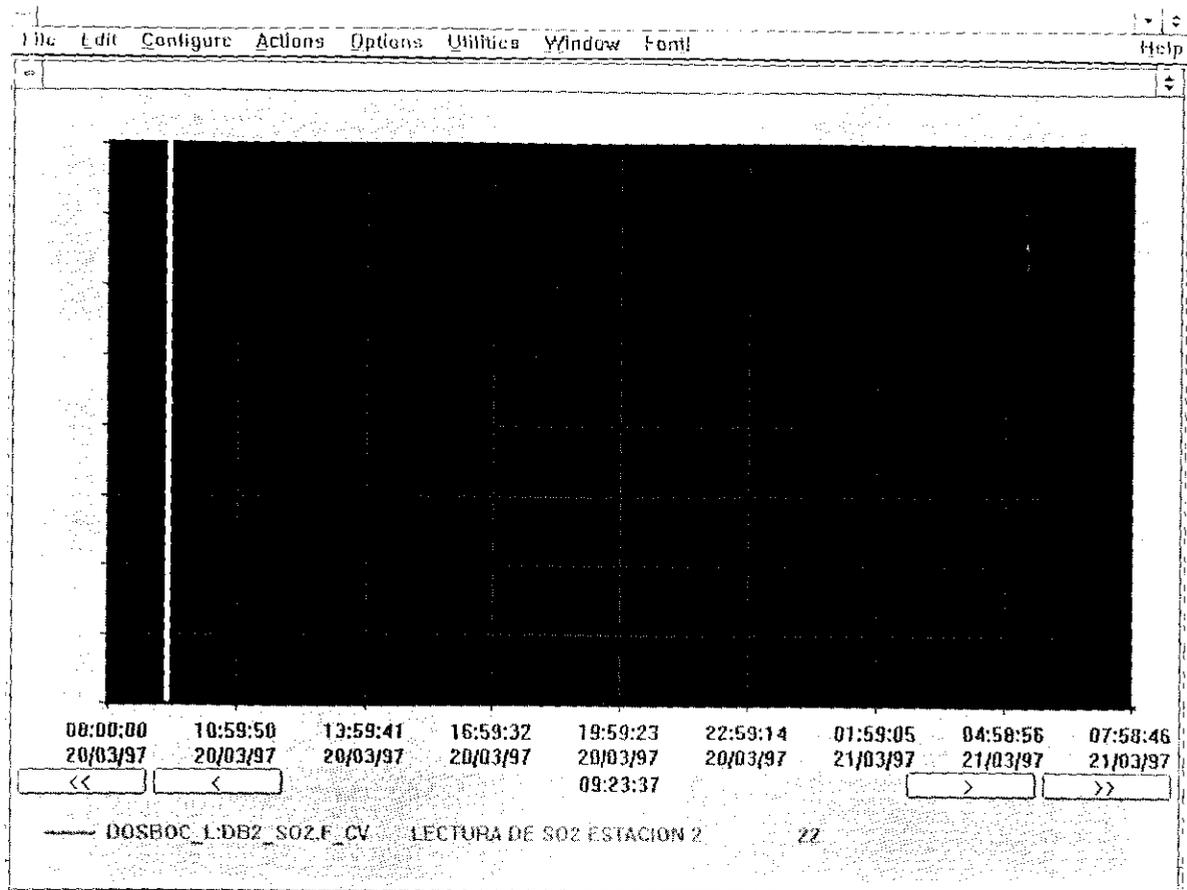


Figura 5.5. Pantalla de tendencias históricas

#### b) Análisis con procesamiento de información

Para este tipo de análisis se involucran los conceptos estadísticos que se vieron en la sección 5.3. Se tiene la opción de realizar un análisis para periodos de un día, una semana, un mes o un año en particular.

Cuando se requiere hacer un análisis para un día se tiene programada una rutina que ejecuta los siguientes pasos:

1. Buscar en la base de datos todos los valores promedio de 10 minutos guardados para las variables de contaminantes y las variables meteorológicas.
2. Ejecutar una aplicación en excel, para construir una tabla con los valores provenientes de la base de datos.
3. La misma aplicación calcula los promedios horarios con los seis datos tomados para una hora en particular y construye una tabla de promedios para cada contaminante para los 24 valores de un día
4. Calcular un promedio horario para las variables meteorológicas: velocidad de viento, dirección de viento, humedad relativa y radiación.
5. Graficar los promedios horarios de cada contaminante contra las variables meteorológicas.

Cuando se requiere hacer un análisis para un mes o una semana se tiene programada una rutina similar a la anterior pero el paso 3 se modifica como sigue:

- 3.- Para los valores de concentración de NO<sub>x</sub> y de HCT, calcular promedios horarios con los 6 datos tomados para 1 hora en particular y escoger el mayor promedio horario de los 24 calculados como representativo de un día en particular. Esto se repite para todos los días. Para los valores de concentración de SO<sub>2</sub>, calcular promedios diarios con todos los valores leídos y se toma como representativo de un día en particular. Esto se repite para todos los días.

Para el SO<sub>2</sub> se hace un promedio diario debido a que así lo estipula la norma de calidad de aire; para el NO<sub>x</sub> se estipula un promedio horario. Para los HCT, aunque en la actualidad no existe norma de calidad, se calcula un promedio horario debido a que son compuestos muy variados y que tienen un papel importante en la generación de ozono fotoquímico, para el cual existe normatividad horaria.

Cuando se requiere hacer un análisis para un año se sigue el mismo procedimiento que para un mes, sólo que la cantidad de días es mayor. Para calcular un promedio anual se toman los promedios diarios calculados de SO<sub>2</sub> y se procede de manera similar a la vista en la sección 5.3.

Se han presentado ya el tipo de tablas y gráficas que se obtienen utilizando las técnicas estadísticas vistas en las secciones 5.1, 5.2 y 5.3. En la tabla 5.1. se observan los promedios horarios de NO<sub>2</sub> para el periodo comprendido de 1 al 15 de octubre de 1997 en la caseta Confianza. Se pueden observar horas para los que no existen valores, y esto se debe a que en esos periodos esta caseta se quedó sin energía eléctrica o hubo problemas de comunicación entre las CCI y la CCS. Se descartaron estos valores en virtud de que no representan valores reales de concentración de contaminantes.

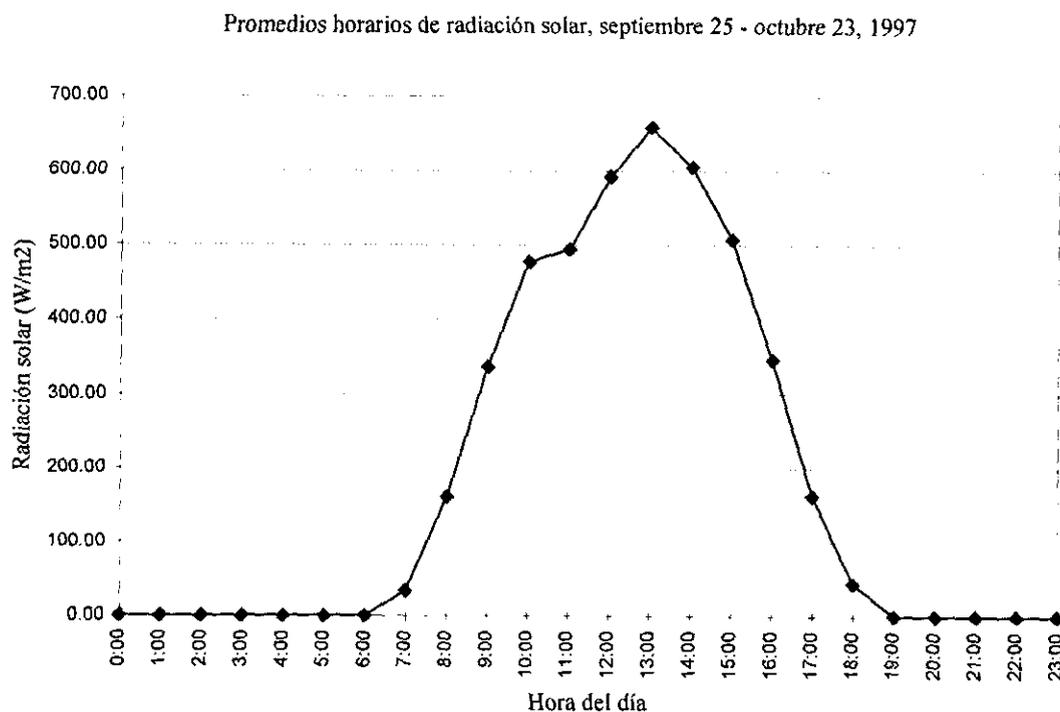
En la figura 5.1 se observan los promedios diarios de bióxido de azufre para la caseta Confianza en el periodo del 25 septiembre al 23 de octubre de 1997, notando un incremento en los valores de los últimos días de este periodo. Para poder establecer la causa, es necesario revisar las bitácoras de operación y los valores de los parámetros meteorológicos

para establecer relaciones entre las variables involucradas, que en este caso es la mayor incidencia de viento en dirección hacia la caseta Confianza.

En la figura 5.2 se presentan los promedios horarios máximos para bióxido de nitrógeno en el mismo periodo, los cuales pueden ser comparados contra la norma de calidad de aire, observando que esta norma nunca se rebasa (la NOM-023-SSA1-1993 establece el límite máximo normado 0.21 ppm de  $\text{NO}_2$  ).

En la figura 5.3 se presenta una gráfica con los percentiles más importantes: percentil 99, percentil 90, percentil 80, percentil 50 (mediana) y percentil 20, así como la media de la distribución de los datos horarios presentados en la tabla 5.1. En la figura 5.4 se presenta el histograma construido a partir de los datos de distribución de frecuencia para valores horarios de  $\text{NO}_2$  donde se nota la característica particular de la distribución de las concentración de los contaminantes, el sesgo derecho.

Finalmente, en la figura 5.6 se presentan los promedios horarios en este periodo para la variable de radiación solar de la estación meteorológica de la TMDB. Puede verse el comportamiento típico en el día, teniendo un pico máximo alrededor de las 13:00 horas, con el amanecer a partir de las 6:00 horas y el anochecer de las 19:00 horas.



**Figura 5.6.** Gráfica de los promedios horarios para el periodo 25 septiembre a 23 octubre 1997 para la radiación solar

Las figuras anteriores son solo un ejemplo de los posibles análisis que pueden realizarse con los datos recopilados en la red automática de monitoreo, debiendo recordar que esta

información adquiere un nuevo valor cuando se asocia con las condiciones particulares del sitio (flora, fauna, asentamientos humanos, etc.) permitiendo establecer de forma contundente la posible afectación de la TMDB sobre el ambiente.

## 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 6.1 CONCLUSIONES

El establecimiento de programas para el control de la contaminación atmosférica es un proceso que involucra diferentes especialistas, tomadores de decisión y autoridades. Así mismo, comprende diferentes etapas en su desarrollo: obtención de información confiable, propuestas de control de emisiones y/o establecimiento de medidas de mitigación y observación y evaluación de efectos ambientales.

En el presente estudio se abordó la primer etapa: obtención de información confiable de la calidad del aire. Esta etapa representa toda la información recopilada para el diseño teórico de una red de monitoreo atmosférico, así como la construcción e instalación de la red automática de monitoreo atmosférico para la Terminal Marítima Dos Bocas (TMDB), ubicada en la costa del Golfo de México del estado de Tabasco, que proveerá información adecuada para conocer la calidad del aire en el área de estudio y el efecto de la TMDB sobre la atmósfera.

- Con base en un análisis teórico de la situación (muestreo y modelación) y considerando criterios prácticos, tales como la seguridad física de los equipos, accesibilidad al sitio de monitoreo, infraestructura de la ubicación e impacto social, se definieron los contaminantes a monitorear, el número de estaciones y su localización en el área de estudio.
- Se diseñó la red automática de monitoreo atmosférico como una infraestructura básica, que cumpla con los requerimientos y objetivos planteados por PEP: juzgar el cumplimiento de las normas de calidad de aire y servir como fuente de información para determinar la necesidad de aplicar medidas de control de la contaminación atmosférica en diferentes procesos dentro de la TMDB.
- Se seleccionó el equipo de monitoreo atmosférico que mejor cumple con los requisitos necesarios, es decir: que brinde la mayor información posible acerca del contaminante que está analizando; posea condiciones de funcionamiento adecuado para la zona; indique mediante un autodiagnóstico las condiciones a las que está operando; y cuente con una interfase de comunicación compatible con las computadoras personales actuales, para su fácil integración a un sistema de adquisición de datos.
- Se desarrolló un sistema de adquisición de datos que permite un manejo sencillo de la información que genera la red de monitoreo; y permite crecer de acuerdo con el desarrollo de la TMDB, según las exigencias de PEP, así como de la zona poblacional circundante a la TMDB. Es flexible en su manejo y cuenta con la facilidad de poder ser accesado en diferentes puntos para el análisis de la información con el único requisito de contar con un módem y una línea telefónica.

- La información generada por el sistema de adquisición de datos se puede presentar en dos maneras: en tiempo real y en modo histórico. La primera sirve para monitorear en el momento actual, donde se presenten condiciones especiales de funcionamiento de la TMDB. La segunda manera sirve para generar reportes de información de la calidad de aire a las autoridades y público en general. El formato de la información es compatible con la mayoría de las hojas de cálculo actuales, permitiendo la aplicación de múltiples herramientas estadísticas para el análisis de la información obtenida.
- La experiencia del presente estudio es aplicable a otras zonas industriales destacando que se realizó el diseño de la red de monitoreo para determinar el impacto de fuentes puntuales de emisión de contaminantes.

## 6.2 RECOMENDACIONES

Para aprovechar lo mejor posible la red de monitoreo atmosférico de la TMDB se recomienda realizar:

- Un análisis más detallado de la información meteorológica, particularmente los parámetros de humedad relativa y temperatura, así como de las plagas del sitio de estudio para ajustar el programa de mantenimiento de los equipos de monitoreo, ya que el programa actual no es específico para la zona.
- Un análisis técnico y económico para planificar el crecimiento de la red de monitoreo, si es que se comprobare que esto es necesario.
- Una encuesta exhaustiva entre la población para poder responder, con los datos de la red, a sus inquietudes en materia ambiental.
- Un estudio conjunto con instituciones de salud para poder relacionar la operación de la TMDB con posibles afecciones o síntomas en la salud de la población de la zona.
- Estudios conjuntos para conocer el impacto de la TMDB sobre calidad de agua en precipitaciones pluviales y lagunas, y su posible afectación al desarrollo de la vegetación y fauna del lugar, así como la corrosión y deterioro en los materiales.
- La elaboración de estudios y proyectos tecnológicos como éste, resulta de gran apoyo en la industria nacional y son la forma más adecuada de aplicar los conocimientos adquiridos a la problemática actual de nuestro medio por lo que su realización es ampliamente recomendable.

## BIBLIOGRAFÍA

Aguirre R., Guzmán C., Wellens A., Soler F., Villarreal A., 1997, *Sistema Automatizado de Monitoreo Ambiental, DOS BOCAS. Informe final*, DEPFI-UNAM

Altshuller A.P., 1977, *Hydrocarbons and Carbon Oxides, Vol III, Measuring, Monitoring and Surveillance of Air Pollution*, editor Stern, A. C., Academic Press

API, 1993a, *Analizador de SO<sub>2</sub> fluorescente, Manual de Instrucciones, Modelo 100*, Advanced Pollution Instrumentation Inc.

API, 1993b, *Analizador de Oxidos de Nitrógeno, Manual de Instrucciones, Modelo 200*, Advanced Pollution Instrumentation Inc.

Bravo H., Sosa R., Torres R., 1992, *Criterios y Metodologías para medir la Calidad del Aire, La contaminación atmosférica en México, sus causas y efectos en la salud*, coordinador Restrepo I., CNDH

Bryan R.J., 1977, *Ambient Air Quality Surveillance, Air Pollution, Vol III, Measuring, Monitoring and Surveillance of Air Pollution*, editor Stern, A. C., Academic Press

Cardoso, M.D., 1976, *El clima de Tabasco y Chiapas*, Instituto de Geografía, UNAM

Castillejos M., 1992, *La contaminación atmosférica y la salud: algunas consideraciones sobre el tema, La contaminación atmosférica en México, sus causas y efectos en la salud*, coordinador Restrepo I., CNDH

Coffin D.L., Stokinger H.E., 1977, *Biological Effects of Air Pollutants, Air Pollution, Vol II, The Effects of Air Pollution*, editor Stern, A. C., Academic Press

Cheremisoff P., Morresi A., 1978, *Air Pollution Sampling and Analysis Handbook*, Ann Arbor Science

DANI, 1996, *Instruction Manual model TNMH 451*, Dani Instrumentazione

Dvorak J.C., Anis N., 1990, *Dvorak's guide to PC Telecommunications*, Osborne McGraw Hill

Godish T., 1991, *Air Quality*, Lewis Publishers

Gofton P.W., 1986, *Mastering Serial Communications*, Sybex

INE, 1996, Programa de Medio Ambiente 1995-2000, Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca

INEGI, 1971, *Carta de uso de suelo y vegetación, escala 1:250,000, Tabasco, Campeche.*

INEGI, 1990, *XI Censo General de Población y Vivienda, Tabuladores Básicos, Resultados Definitivos, Tabasco*

INEGI, 1991, *Carta topográfica E15A79, escala 1:50,000, Comalcalco*

Katz M., 1977, *Nitrogen Compounds and Oxidants, Air Pollution, Vol III, Measuring, Monitoring and Surveillance of Air Pollution*, editor Stern, A. C., Academic Press

Mendenhall W., 1983, *Introduction to Probability and Statistics*, PWS Publishers

Nevers N.H., Neligan R.E., Slater H.H., 1977, *Air Quality Management, Pollution Control Strategies, Model and Evaluation, Air Pollution, Vol V, Air Quality Management*, editor Stern, A. C., Academic Press

NOM-022-SSA1-1993, 1994, Norma Oficial Mexicana, Salud Ambiental. Criterio para Evaluar la Calidad del Aire Ambiente con respecto al Bióxido de Azufre (SO<sub>2</sub>). Diario Oficial de la Federación, 23 de diciembre de 1994.

NOM-023-SSA1-1993, 1994, Norma Oficial Mexicana, Salud Ambiental. Criterio para Evaluar la Calidad del Aire Ambiente con respecto al Bióxido de Nitrógeno (NO<sub>2</sub>). Diario Oficial de la Federación, 23 de diciembre de 1994.

NOM-037-ECOL-1993, 1993, Norma Oficial Mexicana que Establece los Métodos de Medición para Determinar la Concentración de Bióxido de Nitrógeno en el Aire Ambiente y los Procedimientos para la Calibración de los Equipos de Medición. Diario Oficial de la Federación, 18 de octubre de 1993.

NOM-038-ECOL-1993, 1993, Norma Oficial Mexicana que Establece los Métodos de Medición para Determinar la Concentración de Bióxido de Azufre en el Aire Ambiente y los Procedimientos para la Calibración de los Equipos de Medición. Diario Oficial de la Federación, 18 de octubre de 1993.

Office of the Federal Register, 1991, National Archives and Records Administration, *Code of Federal Regulations 40 Part 58 Subpart A, B, C, D, E, F, Protection of the environment*

Office of the Federal Register, 1991, National Archives and Records Administration, *Code of Federal Regulations 40 Part 50 Appendices A, B, C, D, E, F, G, H, Protection of the environment*

OMS, 1980, *Analysing and Interpreting Air Monitoring Data*

- OMS, 1977, *Air Monitoring Programme Design for Urban and Industrial Areas*
- OPS, OMS, 1979, *Criterios de Salud Ambiental, Bióxido de Azufre*
- Oullete R. P., Greeley R.S., Overbey J. W., 1975, *Computer Techniques in Environmental Science*, Mason / Chester Publishers Inc.
- Peavy H.S., Rowe D.R., Tchobanoglous G., 1985, *Environmental Engineering*, McGrawHill,
- Secretaría de la Presidencia, 1970, *Carta de Climas MEXICO 14Q-IX*, Instituto de Geografía, UNAM
- Spiegel M.R., 1991, *Estadística*, McGraw Hill
- Turner D.B., 1994, *Workbook of Atmospheric Dispersion Estimates*, Lewis Publishers
- Van Dop H., 1988, *Air Pollution Modeling and its Applications*, Plenum
- Wark K., Warner C., 1990, *Contaminación del Aire*, Limusa Noriega
- Wellens A., Soler F., Aguirre R. Gómez C, 1997, *Estimación de la emisión de los contaminantes atmosféricos en el complejo Abkatum A, Informe final*, DEPMI-UNAM
- Wight G.D., 1994, *Fundamentals of Air Sampling*, Lewis Publishers
- Winegar E., Keith L., 1993, *Sampling and Analysis of Airborne Pollutants*, Lewis Publishers
- Zimmer C.E., 1977, *Air Quality Data Handling and Analysis, Vol III, Measuring, Monitoring and Surveillance of Air Pollution*, editor Stern, A. C., Academic Press

**ESTA TESIS NO DEBE  
SALIR DE LA BIBLIOTECA**