

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE CIENCIAS QUIMICAS Y FARMACIA

**“SIMULACIÓN POR COMPUTADORA DE LA DISPERSIÓN  
DE PARTÍCULAS TOTALES EN SUSPENSIÓN EN SU  
FRACCIÓN RESPIRABLE (PM<sub>10</sub>), EN LA CIUDAD  
DE GUATEMALA**



**INFORME FINAL DE TESIS**

**Presentado por:**

**JHONI FRANK ALVAREZ CASTAÑEDA**

**Estudiante de la Carrera de:**

**QUIMICA**

**Guatemala, octubre del 2002**

DL  
06  
T (200)

**JUNTA DIRECTIVA**  
**FACULTAD DE CIENCIAS QUIMICAS Y FARMACIA**  
**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**

- Decano:** M.Sc. Gerardo Leonel Arroyo Catalán
- Secretaria:** Licda. Jannette Magaly Sandoval de Cardona
- Vocal I:** Licda. Gloria Elizabeth Navas Escobedo
- Vocal II:** Lic. Juan Francisco Pérez Sabino
- Vocal III:** Dr. Federico Adolfo Richter Martínez
- Vocal IV:** Br. Jorge José García Polo
- Vocal V:** Br. Liza Leonor Carranza Jui

## AGRADECIMIENTO

- A DIOS** Por permitirme vivir y compartir el mundo con los que amo.
- A MIS PADRES** Por su entrega incondicional, amor, confianza y comprensión.
- A MIS HERMANOS** Por su cariño, confianza y apoyo en todo momento.
- A MIS ABUELOS** Por su amor y ejemplo del trabajo.
- A MI ESPOSA** Por su amor y apoyo incondicional.
- A MIS AMIGOS** Por creer en mí
- A MI ASESOR** Lic. Pablo Ernesto Oliva Soto por su gran apoyo.

## ACTO QUE DEDICO

**A DIOS**

**A MIS PADRES**

Irma y Jaime con todo mi amor

**A MIS HERMANOS**

Harry y Jimmy con fraternidad y cariño

**A MIS ABUELOS**

Yolanda Soria, María Elia Cifuentes+ y Hermelindo Castañeda+

**A MIS TIOS**

Andina, Sandra, Oscar, José, Enrique, Gabriel, César y Rubí+

**A MIS PRIMOS**

Laura, Karla, Ana Lucia, Monica, Emilia, Xiomara, Bruno, Alejandro, Javier, Jorge Luis y William

**A LA FAMILIA**

Ortega van Beusekom; Elizabeth+, Edwin, Juan Manuel, Juan Pedro y Juan Andres

**A MIS AMIGOS**

Edna+, Lorena, Roxana, Ingrid, Waleska, Nancy, Patricia, Thelma, Yoli, Silvia, Rosemarie, Rosy, Julieta, Corina, Marcos, Edwin, Edgar, Pablo, Angel, Mario, Luis, Sergio y Vinicio.

**A MI PADRINO**

Lic. Edwin Ortega

**A LAS MADRES**

Por ser los instrumentos de Dios para la creación del ser humano, dedicado a la memoria de Elizabeth de Ortega.

## 1. RESUMEN

Anualmente se realiza el monitoreo de la contaminación atmosférica, en varios puntos estratégicos en la Ciudad de Guatemala desde 1996. Basándose en el banco de datos existente de material particulado en suspensión en su fracción respirable ( $PM_{10}$ ), se presentan los pronósticos del desarrollo de la contaminación atmosférica en la Ciudad.

El objetivo principal de esta investigación fue pronosticar por medio de una simulación en computadora usando el modelo de dispersión IMMPROG la situación actual y futura de la contaminación ambiental en la Ciudad de Guatemala, debido al material particulado en suspensión en su fracción respirable ( $PM_{10}$ ). Para ello se trabajaron con cinco años de datos meteorológicos (enero 1995 – diciembre 1999) y con cinco años de datos de dicho contaminante atmosférico (junio 1995 – diciembre 1999) medidos en el Laboratorio de Monitoreo del Aire de la Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Los datos fueron insertados y analizados por el modelo de dispersión IMMPROG en sus clases P y H adaptadas para la Ciudad de Guatemala, el número de datos meteorológicos oscila entre 20000 por año, cuyos resultados se encuentran en el anexo 7.

Los datos se analizaron para determinar si existe una correlación entre el modelo de dispersión IMMPROG y la contaminación real por el material particulado en suspensión en su fracción respirable ( $PM_{10}$ ) en la Ciudad de Guatemala. Este análisis se efectuó por medio de una regresión lineal para cada año estudiado, para luego extrapolarse dentro del modelo y conocer los pronósticos de dicho contaminante en el futuro.

De los pronósticos obtenidos, la situación de la contaminación por el material particulado en suspensión en su fracción respirable ( $PM_{10}$ ), presenta variaciones del 10% de crecimiento en la concentración de referencia para una situación ideal en cinco años y con medidas correctivas, mientras que presenta también un 20 % de crecimiento en la concentración de referencia para una situación grave en 5 años.

## 2. INTRODUCCION

Luego de haber monitoreado durante varios años la contaminación atmosférica, se conoce la calidad del aire en puntos estratégicos y también la calidad del aire en toda el área urbana de la Ciudad. Basándose en el banco de datos existente se pueden hacer pronósticos del desarrollo de la contaminación atmosférica.

Los contaminantes atmosféricos [Partículas totales en suspensión (PTS), Partículas totales en suspensión en su fracción respirable menores a 10 micrones ( $PM_{10}$ ), Dióxido de nitrógeno ( $NO_2$ ), Ozono ( $O_3$ ), Monóxido de carbono (CO) y Dióxido de azufre ( $SO_2$ )] están generalmente sometidos a tres procesos: emisión, transmisión e inmisión. La emisión es la expulsión del contaminante desde una fuente a la atmósfera. Ejemplos de fuentes de emisión son chimeneas o escapes de vehículos, pero existen también fuentes naturales como son los volcanes. La transmisión describe la distribución y las posibles transformaciones químicas (formación de los llamados contaminantes secundarios) del contaminante en la atmósfera. El término inmisión se entiende por la cantidad o concentración del contaminante que es recibido por un receptor y por ende es registrado también por cualquier equipo de medición de contaminación atmosférica.

Los modelos de dispersión requieren como datos de entrada, información sobre la situación de las emisiones de los contaminantes, datos de la meteorología ya que es un factor importante de la transmisión y por ende influye de manera decisiva en la distribución de los contaminantes en las tres direcciones del espacio. El resultado de un cálculo con un modelo de dispersión es la inmisión o concentración calculada del contaminante para uno o para miles de puntos en un espacio dado.

La tarea de esta investigación es dar a conocer la lógica del procedimiento y de la implementación de un modelo de dispersión en el área urbana de la Ciudad de Guatemala para obtener una simulación o pronóstico del estado de la contaminación específicamente de material particulado en suspensión en su fracción respirable ( $PM_{10}$ ), tomando como base los resultados obtenidos durante los últimos 5 años del monitoreo del aire e informaciones disponibles sobre las emisiones provenientes del tráfico motorizado.



### 3. ANTECEDENTES

#### 3.1 Los Contaminantes Atmosféricos y sus Procesos en la Atmósfera

##### 3.1.1. Emisión-Transmisión-Inmisión

Generalmente se distinguen tres procesos para los contaminantes atmosféricos, como los son:

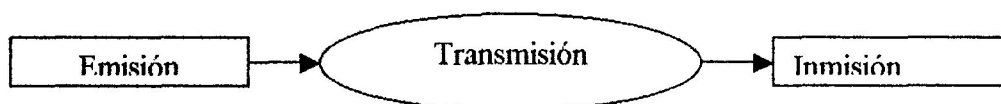


Figura 1

El modelo de Dispersión

Simula el comportamiento de Transmisión

*La Emisión*, se describe como la expulsión del contaminante a partir de una fuente emisora de contaminación, a la atmósfera.

*La Transmisión*, por su lado incluye el transporte según el comportamiento físico y químico, la transformación del contaminante (reacción) y la deposición del contaminante atmosférico o el receptor de la Inmisión.

*La Inmisión*, finalmente es la concentración o cantidad de un contaminante que recibe un receptor (ser humano, animal, planta, bienes materiales, etc). (1).

El transporte del contaminante depende mucho de la meteorología. La turbulencia es el factor determinante de la dispersión y al mismo tiempo define la estabilidad de la atmósfera. Científicamente se hace la diferencia entre la turbulencia *mecánica* (frotamiento del viento con la topografía de la tierra) y la turbulencia *térmica*, la cual resulta del enfriamiento y calentamiento de la superficie de la tierra y depende de la radiación solar.

Los atributos físicos y químicos del contaminante influyen también en su transporte. Para los atributos físicos; la estación húmeda y la estación seca, son importantes por la deposición ya que puede ser por lluvia y precipitación.

Para los atributos químicos; son propiamente cambios en la estructura química de los contaminantes (1,2).

### 3.1.2. Contaminantes atmosféricos

Los contaminantes atmosféricos se dividen en dos grupos: los contaminantes primarios y los contaminantes secundarios. Los contaminantes atmosféricos primarios son aquellos expulsados directamente a la atmósfera, como por ejemplo monóxido de carbono (CO), bióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), las partículas totales suspendidas y los óxidos nitrógeno (NO<sub>x</sub>). NO<sub>x</sub> es un grupo entero de contaminantes distintos (NO<sub>2</sub>, NO, N<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, etc).

Los contaminantes atmosféricos secundarios se forman en la atmósfera como resultado de un proceso químico de los contaminantes primarios entre sí mismos, con componentes de la atmósfera y/o con la acción de la luz solar, siendo uno de los mas representativos el ozono (O<sub>3</sub>) (1).

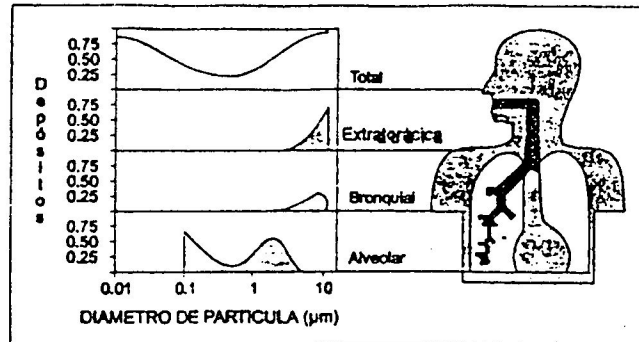
#### 3.1.2.1. Material Particulado

Se les llama partículas gruesas a las partículas cuyo diámetro es mayor a 2-3µm, y resultan principalmente de procesos mecánicos como la resuspensión, abrasión o fricción; son predominantemente de origen natural o geológico (como óxidos de aluminio, silicón, calcio, titanio y hierro), y se agrupan entre éstas las esporas, el polen, suelos, partículas de hojas, polvos generados por el tráfico o producto del desgaste de las llantas y partículas de emisiones industriales como fábricas de cemento y canteras. En la superficie de estas partículas gruesas pueden absorberse otras especies contaminantes.

La fricción de partículas aerotransportadas que son inhaladas por el cuerpo humano, dependen de las propiedades de las partículas, del movimiento del aire alrededor del cuerpo, velocidad y dirección, patrón de respiración y si ésta se lleva a cabo por la nariz o por la boca. Estas partículas inhaladas pueden depositarse en el tracto respiratorio o exhalarse, la probabilidad depende de una gran cantidad de

factores y varia de una persona a otra. Sin embargo es posible definir valores típicos promedio de depósito de partículas en el tracto respiratorio de acuerdo a sus diámetros.

Grafica No.1



Relación Depósitos – Diámetro de Partículas

**Depósitos de partículas en el tracto respiratorio de acuerdo a sus diámetros.**

Debido a que el daño en la salud del individuo estará en función de donde se depositen las partículas y del tipo de partícula que entra al tracto respiratorio, se han implementado muestreos selectivos en cuanto al tamaño de las partículas sobre todo cuando los muestreos se relacionan con la salud. De esta manera la ISO (International standard official), ha dado definiciones para las diferentes fracciones de partículas suspendidas, con la finalidad de establecer convenciones que fijen curvas objetivo de muestreo para los instrumentos de colección de una fracción dada. Siendo estas definiciones las que se resumen a continuación (17,18):

- 3.1.2.1.1. Total de partículas Aerotransportadas: Se definen como todas las partículas rodeadas por aire en un volumen de aire dado.
- 3.1.2.1.2. Fracción Inhalable: Fracción de la masa del total de partículas aerotransportadas, el cual es inhalado por la boca o la nariz. Por convención el 50% de estas partículas corresponden a un diámetro aerodinámico de  $100\mu\text{m}$ .

- 3.1.2.1.3. Fracción Extratorácica: Fracción de la masa de las partículas inhaladas, las cuales no penetran más allá de la laringe. En esta fracción se incluye el polen.
- 3.1.2.1.4. Fracción Torácica: Fracción de la masa de las partículas inhaladas, las cuales penetran más allá de la laringe, refiriéndose a la región de los bronquios. Convención: el 50% de estas partículas corresponde a diámetros aerodinámicos de 0 a  $10\mu\text{m}$ , conocidas como  $\text{PM}_{10}$  ( $D_{50} = 10\mu\text{m}$ ), no aceptando mayores a  $30\mu\text{m}$ . (diámetro de corte superior)(17,19).
- 3.1.2.1.5. Fracción Traqueobronquial: Fracción de la masa de las partículas inhaladas que penetran más allá de la laringe, pero que no llegan a los conductos aéreos no ciliados. Aproximadamente el 50% de estas partículas corresponden también a diámetros de 0 a  $10\mu\text{m}$ .
- 3.1.2.1.6. Fracción Respirable: Fracción de la masa de las partículas inhaladas que penetran a los conductos aéreos no ciliados. También se les conoce como Fracción Alveolar. Convención: 50% de estas partículas corresponden a diámetros de  $4\mu\text{m}$ . para población adulta saludable y de  $2.5\mu\text{m}$ . para población de alto riesgo ( $\text{PM}_4$  y  $\text{PM}_{2.5}$ ), no siendo mayores a  $12\mu\text{m}$ (17).

## 3.2 Modelos de Dispersión

Los modelos de dispersión calculan las inmisiones en cualquier punto dentro de un área determinada, por lo cual extrapolan de unos puntos a miles de lugares. Además de reproducir el estado actual de las inmisiones, dichos modelos pueden hacer pronósticos sobre la futura situación de la concentración de los contaminantes atmosféricos.

Los modelos de dispersión necesitan datos de entrada ("input"), especialmente sobre las emisiones, y unos modelos trabajan adicionalmente con datos meteorológicos. En general, el input más importante para todos los modelos

de dispersión son los datos sobre las fuentes emisoras. El output ó datos de salida de los modelos son las inmisiones. Recordando los procesos de los contaminantes en la atmósfera, los modelos de dispersión describen la parte de la transmisión (1).

Para entender la estructura interna de la lógica con la cual actúa el modelo de dispersión, hay que saber que existen distintos grupos de modelos, de acuerdo a diferentes condiciones de macrosistemas. Una posibilidad de dividirlos es según la manera como resuelven las ecuaciones del movimiento, las cuales matemáticamente calculan los procesos en la atmósfera. Hay entonces tres tipos de modelos:

- Modelos dinámicos:

Los modelos dinámicos resuelven las ecuaciones del movimiento de manera exacta. Para obtener un resultado para las ecuaciones de manera numérica, calculan de manera iterativa, por lo cual necesitan muchos recursos de computación.

- Modelos empíricos:

Los modelos empíricos trabajan sobre todo con métodos estadísticos.

- Modelos estacionarios:

Estos modelos tratan las ecuaciones del movimiento con condiciones restrictivas y simplificaciones, dándoles una resolución analítica a las ecuaciones. Entre los modelos estacionarios más conocidos está la familia de los "modelos de Gauss" (1,2,3).

### 3.2.1 El Modelo de Gauss

El planteamiento de Gauss para describir los procesos atmosféricos se basa en la simplificación de que la difusión turbulenta (parte de la transmisión) de los gases en la atmósfera se comparta de manera similar a la difusión molecular, tal como está descrita en las leyes de Fick del siglo diecinueve.

Entonces, la dispersión de un contaminante en la atmósfera se comporta en forma inversamente proporcional a su gradiente de concentración (2,3,6).

### 3.2.2 El Modelo de Pluma Gaussiano

#### Ventajas y Desventajas

El modelo de la pluma de Gauss, se puede demostrar por la difusión de una pluma en el sotavento de una fuente puntual como resultado del teorema de Gauss. Después de la emisión puntual, los contaminantes forman una pluma con una dispersión en las tres direcciones del espacio. La dispersión se da biaxialmente y en forma ideal con una distribución normal en la dirección del viento.

Para obtener una resolución analítica, los modelos de Gauss asumen que las siguientes condiciones se cumplen:

- En el suelo no hay deposición de contaminantes, se da una reflexión completa, esto asume que el 100% es aéreo.
- La superficie es plana y con una topografía constante.
- Durante el proceso de transmisión, los contaminantes no sufren de transformaciones.

Estas restricciones tienen como consecuencias que los modelos de Gauss no son apropiados para terrenos accidentados y que se puede trabajar solamente con contaminantes inertes, no con contaminantes secundarios. A pesar de estas desventajas, los modelos de Gauss son muy usados en la práctica (1,3).

Las principales ventajas de los modelos de Gauss son:

- Toman en cuenta la meteorología.
- Calculan la concentración de un contaminante en un receptor puntual definido (Estación de muestreo). Eso significa que se pueden hacer comparaciones con mediciones puntuales.
- Pueden estar adaptados a una familia entera de contaminantes inertes.

- Los resultados están disponibles rápidamente.
- Una computadora o PC tiene suficientes recursos para los cálculos.
- Proporcionan resultados relativamente buenos en forma de promedios.

### 3.3 Los datos

El modelo de dispersión describe la parte de la transmisión, la cual es el eslabón entre la emisión y la inmisión. La calidad de los datos de entrada (input) determina la calidad de los datos de salida (output), es decir los resultados de los cálculos. El output jamás tiene una desviación estándar más pequeña que el input.

Normalmente se necesitan tres categorías de datos para el modelo de dispersión:

- Datos meteorológicos:
  - Dirección y velocidad del viento.
  - Radiación solar.
  - Grado de nubosidad.
  - Temperatura.
- Datos sobre la emisión:
  - Temperatura de los contaminantes emitidos.
  - Altura de la fuente de las emisiones (por ejemplo altura de una chimenea)
  - Cantidad de las emisiones.
  - Variabilidad "temporal" de la cantidad de emisiones.
- Datos topográficos:
  - El lugar geográfico del emisor de los contaminantes, de los receptores y del área determinada de la investigación.

Después de haber obtenido los datos de entrada (input), los parámetros están listos para correr el modelo. Pero se debe verificar si los resultados de los cálculos del modelo de dispersión son correctos.

Para eso, se necesitan datos de mediciones que reflejan la realidad de las inmisiones o calidad del aire en el área investigada.

Los métodos continuos con analizadores automáticos son la "última tecnología" utilizada en la determinación de la contaminación atmosférica. Dichos analizadores hacen mediciones en cortos periodos de tiempo y pueden estar conectados con otros equipos automáticos y computadoras para formar una red automática, como la tienen en ciudades como México D. F., Guadalajara y Los Ángeles. Sin embargo, los analizadores son caros y requieren de un mantenimiento igualmente costoso.

Actualmente, las redes existentes de monitoreo del aire en las capitales centroamericanas utilizan sobre todo métodos pasivos y gravimétricos. Un posible avance tecnológico hacia analizadores automáticos requiere un compromiso financiero por parte de los gobiernos, el cual se puede basar únicamente en la conciencia de la población y de los políticos, de que el aire que se respira en la región Centroamericana no es tan limpio como debería ser (1).

### 3.4 La calibración

Si tenemos datos reales de parte del monitoreo del aire y nuestros resultados de los cálculos con el modelo de dispersión,

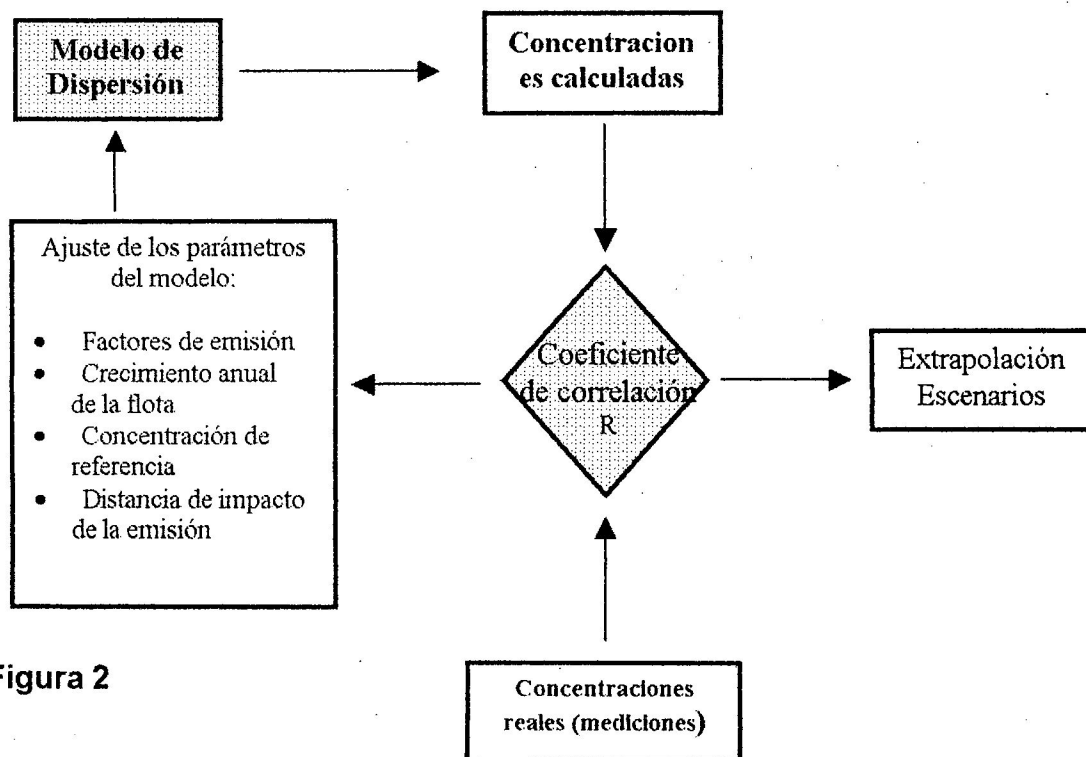


Figura 2



El proceso de calibración se hace hasta que el análisis de regresión, genere un resultado satisfactorio (1,2,3).

### 3.4.1 Análisis de regresión

Cuando una variable depende de otra, esta relación se puede describir matemáticamente con una función. Los valores obtenidos de las mediciones dependen de la ubicación, lo cual es una función del lugar. Para verificar el grado de relación entre las dos funciones que dependen del mismo parámetro (la ubicación del sitio), se hace un análisis de regresión. Para ver si hay una relación entre los dos grupos de datos: concentraciones medidas y concentraciones calculadas, se realiza dicho análisis.

Si la dependencia de una variable con la otra es lineal, la tendencia general se puede describir con una ecuación de la línea recta.

Ecuación 1 
$$y = mx + b$$

Si del análisis de regresión sale un coeficiente de correlación satisfactorio, debe asegurarse de que el modelo describe el proceso de transmisión de manera adecuada. Es posible hacer extrapolaciones de los receptores bien definidos a toda el área investigada, y para hacer pronósticos de la situación futura.

Si el coeficiente de correlación está todavía demasiado bajo, hay que continuar el proceso de calibración. Si no es posible obtener una correlación adecuada entre los dos tipos de datos, entonces significa que el tipo de modelo no es el apropiado (1,6).

### 3.5 El programa "IMMPROG", de la Familia de Gauss

El IMMPROG calcula las inmisiones por cada hora meteorológica que tiene, suma las concentraciones obtenidas y divide por la cantidad de las horas consideradas en el proyecto.

El resultado es la inmisión promedio a base de todas las horas meteorológicas consideradas para un receptor.

Una consecuencia importante es que las horas consideradas (por ejemplo cada segunda hora del año) son representativas para el año entero en dos aspectos.

- La situación meteorológica de las horas consideradas tiene que representar la situación meteorológica del año de la mejor manera posible.
- El cociente de la cantidad de las emisiones (un porcentaje que esta relacionado con la hora) y de la cantidad de las horas consideradas del año entero y del tiempo elegido tienen que ser similar (1).

Ecuación 2

$$\frac{\text{Emisiones totales}}{\# \text{ de horas total}} = \frac{\text{Emisiones de las horas consideradas}}{\# \text{ de horas consideradas}}$$

### 3.6 Patrón de comparación de las inmisiones.

En un modelo de dispersión como IMMPROG, la inmisión calculada es parte de dos factores: el patrón de comparación y las inmisiones dependientes de las emisiones de fuentes consideradas en el proyecto.

El patrón de comparación de la calidad del aire (concentración de los contaminantes) es causado por las fuentes que no conocemos y/o no consideramos en la modelación, pero que afectan también a los receptores. Además de las fuentes antropogénicas desconocidas por falta de informaciones, se incluyen también los

procesos biológicos, geológicos (volcánicos) y la importancia de contaminantes de nuestra área de estudio desde afuera.

El grado de influencia del patrón de comparación depende de los conocimientos que se tengan sobre las fuentes en el área de estudio.

El patrón de comparación es muchas veces un valor al mejor criterio de la persona que utilice el modelo y los resultados de la modelación dependen de este componente importante de la inmisión (1,2).

### **3.7 El factor error en el Uso del Modelo**

La calidad de los datos no depende solamente de la calidad del input del modelo de dispersión, también depende del error humano. Muchas veces se tienen que hacer suposiciones, y éstas no deben ser arbitrarias ni injustificadas, es necesario que sean realistas y razonables.

El modelo produce datos con el input o datos de entrada, sin razonar si los resultados serán posibles o no. El trabajo tiene que estar hecho por la persona encargada, ya que este es el que interpreta los resultados (1).

### **3.8 Un modelo Europeo**

El hecho de que el IMMPPROG es un modelo creado para las condiciones de Europa tiene consecuencias, especialmente en el aspecto de la meteorología. En general, no existen muchas experiencias con las condiciones tropicales. Las condiciones climáticas en la región tropical son diferentes de Europa, especialmente en dos aspectos; la posición geográfica y las estaciones en el aspecto de lluvia.

Un factor importante es la radiación solar, la cual en Centro América es más alta que en Europa por la posición geográfica. Eso afecta la estabilidad de la atmósfera. La versión IMMPROG 4.0 contrario a la versión más actual, no puede tomar en cuenta la posición geográfica distinta de Centro América, Sin embargo, cálculos con ambas versiones han demostrado que la diferencia en los resultados obtenidos es pequeña.

IMMPROG no considera la lluvia como factor que afecta a la inmisión, porque en Europa, el año no se divide en estación seca y lluviosa como en Centro América, sino que existe una distribución uniforme de las precipitaciones durante el año. Para la estación seca, se puede esperar una contaminación más alta que la calculada, para los meses de la estación lluviosa una contaminación más baja. Sin embargo, el promedio del año debería ser correcto.

En general, se puede usar un modelo de dispersión europeo en la región centroamericana. Para la interpretación de los resultados, hay que tomar en cuenta que se trata de un modelo adaptado a las condiciones meteorológicas y químicas de Europa (1).

### **3.9 Recolección de datos**

#### **3.9.1 Datos meteorológicos**

Los parámetros meteorológicos se registran en Ciudad Guatemala cada hora a mano, lo que hace necesario la digitalización de los parámetros nubosidad, dirección y velocidad del viento, para luego ingresarlos al programa Microsoft Excel y luego transportarlos al programa IMMPROG. Importar un año meteorológico, es decir los datos meteorológicos por hora de un año entero (luego llamado "horas meteorológicas"), al programa IMMPROG significa la digitalización de más de 20,000 datos por cada año considerado en la investigación (1,5).

### **3.9.2 Datos meteorológicos para la Ciudad de Guatemala**

El Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (INSIVUMEH) dispone de una estación meteorológica dentro del área investigada (cerca del aeropuerto internacional Aurora), cuenta con datos meteorológicos de la ciudad de Guatemala (14). De igual manera existen datos de las condiciones meteorológicas en la Ciudad de Guatemala en las tesis e Investigaciones realizadas por Científicos Suizos (15,16). En base a lo anterior se cuenta con la digitalización de los datos meteorológicos de seis horas características por día de los años 1996, 1997, 1998 y 1999: 2am, 6am, 10am, 1pm, 5pm, y 9pm. La investigación en Ciudad de Guatemala se basa entonces en la información meteorológica de cuatro años, para los cuales existen también valores reales de la contaminación atmosférica (1,5).

### **3.10 Conteos de tráfico**

Los conteos del tráfico forman la base para los cálculos de las emisiones provenientes del tráfico motorizado y por ende es de suma importancia que sean de buena calidad, ya que determinan, junto con los factores de emisión, la confiabilidad de los resultados.

#### **3.10.1 Emisiones**

En el programa IMMPROG se define en el archivo de mapa para cada tramo de carretera una cantidad de emisión, la cual depende de los siguientes factores:

- Cantidad de vehículos
- Composición de la flota vehicular
- Factores de emisión

Los factores de emisión por su lado dependen de los parámetros:

- Categoría del vehículo
- Mantenimiento del motor
- Velocidad
- Tecnología del vehículo
- Manera de conducir

Cada tramo de carretera demuestra otras características en cuanto al volumen del tráfico y a la composición de la flota; el volumen del tráfico además varía mucho durante las 24 horas del día. Esa es la razón por la que por ejemplo en la ciudad de Guatemala, en un conteo de doce horas de las 6 AM a las 6 PM no se registra la mitad del volumen diario del tráfico, sino que un 65%. Conteos adicionales para la presente investigación, hechos por estudiantes de la USAC cerca de los sitios de monitoreo del aire entre las 6 AM y las 8 PM, comprueban que 78% del volumen diario del tráfico se observa en este período. Para poder extrapolar el resultado de cualquier conteo a la cantidad de vehículos que pasa por el mismo sitio durante 24 horas, se necesitaba entonces hacer una estandarización en cuanto al tráfico por hora (1).

### **3.10.2 Factores de emisión**

Los factores de emisión son un parámetro importante para el cálculo de las emisiones y por ende tienen una gran influencia en la calidad de los resultados.

Una base de datos extensa y digitalizada de factores de emisión se encuentra en el Manual de Factores de Emisión para el Tráfico Motorizado (Handbuch für Emissionsfaktoren des Strassenverkehrs) para la flota vehicular de Suiza(8,10). Estos factores suizos de emisión se tomaron como base para un proceso de acercamiento de los factores reales de emisión para Centro América, debido a la falta de factores de emisión para dicha región (1,2,3).

### **3.11 Teoría de las clases en el modelo IMMPROG.**

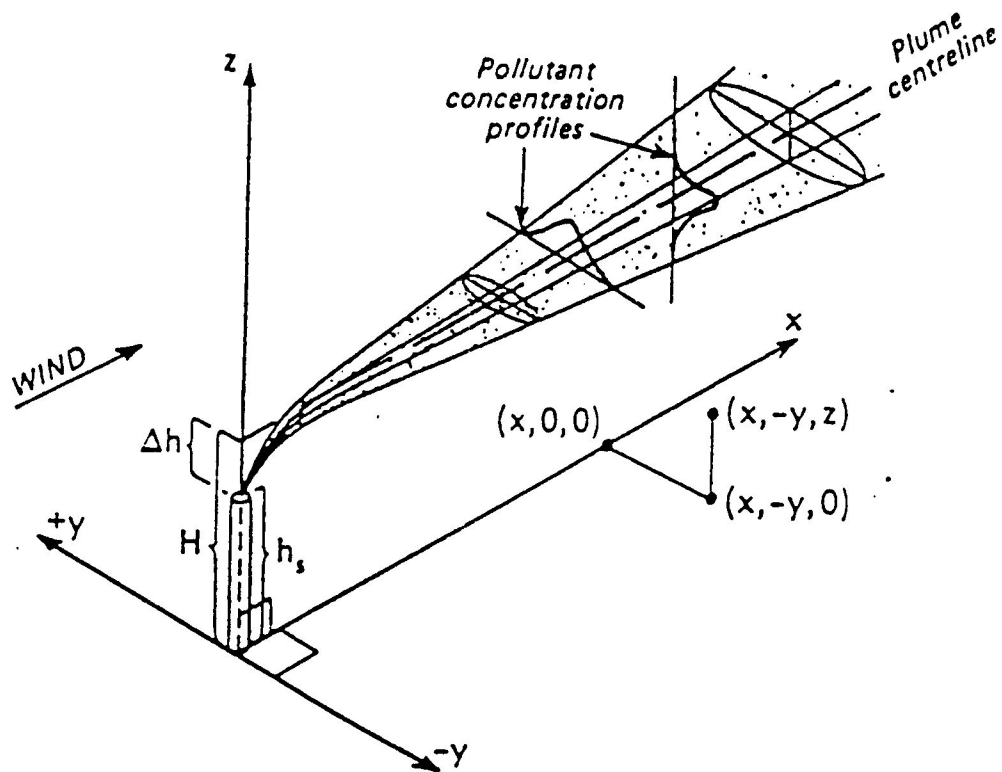
#### **3.11.1 El modelo puntual original IMMPROG-P**

##### **3.11.1.1 Posibles aplicaciones.**

El modelo puntual original IMMPROG-P trabaja de manera similar al modelo Gaussiano descrito en la ecuación de TALUFT (4). El modelo es capaz de calcular concentraciones de inmisión arriba de 15,000 fuentes de inmisión total, la fuente coordinada y los parámetros meteorológicos deben conocerse. En adición a esto, IMMPROG-P deduce las concentraciones de un contaminante a partir de los cálculos de un contaminante primario. Un refinamiento del modelo en la ecuación de TALUFT resulta en IMMPROG-P considerando la inversión de datos y realiza correcciones topográficas en terrenos complejos. Además IMMPROG-P puede trabajar con fuentes completamente verticales como emisoras de contaminación. Se acomoda para calcular las concentraciones de inmisión resultantes de fuentes asociadas con calor doméstico, chimeneas industriales y pozos de ventilación de túneles de vehículos (Véase Figura 3, siguiente página). Otra aplicación es en el modelo de concentraciones de inmisión resultantes de las emisiones de salidas y entradas de túneles. Área de una fuente de contaminación puede ser también calculada.

No se usa para calcular la concentración de inmisión resultante de fuentes lineales. Para calles de topografía plana la compañía de los modelos (AirlInfo) ofrece IMMPROG-H, para calles cañón IMMPROG-C (2,3).

Figura 3



### 3.11.1.2 Teoría del Modelo

La siguiente descripción se basa en la ecuación de TA-LUFT (ver ecuación 1.1):

(Ecuación 1.1)

$$c_{(x,y,z)} = \frac{10^3}{3600 * 2\pi} * \frac{Q}{u_n \sigma_y \sigma_z} * \exp\left[-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right] * \left[ \exp\left[-\frac{(z-h)^2}{2\sigma_z^2}\right] + \exp\left[-\frac{(z+h)^2}{2\sigma_z^2}\right] \right]$$

$x, y, z$  [m]: coordenadas cartesianas de los receptores (puntos) en dirección y dispersión ( $x$ ), ortogonal a la dirección y dispersión, horizontal ( $y$ ) y vertical ( $z$ ) (ver figura 1.1),

$C(x, y, z)$  [ $\text{mg}/\text{m}^3$ ]: concentración molar de los contaminantes del aire a los receptores con coordenadas ( $x, y, z$ ) para cada situación de dispersión individual.

$Z$  [m]: elevación del receptor por encima del suelo.

$Q$  [g/h]: emisión del flujo de masa del contaminante del aire emitido de la fuente de emisión.



H [m]: altura de la fuente efectiva.

$\sigma_y$ ,  $\sigma_z$  [m]: parámetros de dispersión horizontal y vertical. Se puede definir un valor sigma inicial en IMMPROG-P para diámetros grandes de chimeneas, o para tomar en consideración la turbulencia producida por vehículos en la salida y entrada de túneles (2).

### 3.11.1.2.1 Cálculo de una fuente efectiva por escape de calor.

La superelevación del escape y pluma ( $\ddot{u}$ ), resulta de la suma de la altura de la fuente efectiva (h) [m] y de la altura de la chimenea (H), es calculado de la corriente de calor emitida (M), la distancia de la fuente (x) y la velocidad del viento ( $U_H$ ) en la entrada de la chimenea de acuerdo a la siguiente fórmula:

Ley de temperatura inestable (dispersión clase 1 (V en el esquema de TA-LUFT) y 2 (IV)) (ver sección 2.11.3.3.1):

$$\text{(Ecuación 1.2)} \quad \ddot{u}_{la}(x) = 3.34 * M^{1/3} * x^{2/3} * u_H^{-1} \text{ (con } \ddot{u}_{la}(x) + H \leq 1100 \text{ m)}$$

Para  $M > 6\text{MW}$  la siguiente es válida:

$$\text{(Ecuación 1.2.1)} \quad x_{\max(la)} = 288 * M^{2/5} \text{ y } \ddot{u}_{\max(la)} = 146 * M^{3/5} * u_H^{-1}$$

Para  $M \leq 6\text{MW}$  la siguiente es válida:

$$\text{(Ecuación 1.2.2)} \quad x_{\max(la)} = 195 * M^{5/8} \text{ y } \ddot{u}_{\max(la)} = 112 * M^{3/4} * u_H^{-1}$$

Ley de temperatura neutral (dispersión clase 3 (III/2) y 4 (III/1) ver sección 2.11.3.3.1):

$$\text{(Ecuación 1.3)} \quad \ddot{u}_n(x) = 2.84 * M^{1/3} * x^{2/3} * u_H^{-1} \text{ (con } \ddot{u}_n(x) + H \leq 800 \text{ m)}$$

Para  $M > 6\text{MW}$  la siguiente es válida:

$$\text{(Ecuación 1.3.1)} \quad x_{\max(n1)} = 210 * M^{2/5} \text{ y } \ddot{u}_{\max(n1)} = 102 * M^{3/5} * u_H^{-1}$$

Para  $M \leq 6\text{MW}$  la siguiente es válida:

$$\text{(Ecuación 1.3.2)} \quad x_{\max(n2)} = 142 * M^{5/8} \text{ y } \ddot{u}_{\max(n2)} = 78.4 * M^{3/4} * u_H^{-1}$$

Ley de temperatura estable (dispersión clase 5 (II) y 6 (I) ver sección 2.11.3.3.1):

(Ecuación 1.4)  $\dot{u}_{st}(x) = 3.34 * M^{1/3} * x^{2/3} * u_H^{-1}$

Para dispersión clase 6 la siguiente es válida:

(Ecuación 1.4.1)  $x_{max(st1)} = 104 * u_H$  y  $\dot{u}_{max(st1)} = 74.4 * M^{1/3} * u_H^{-1/3}$

Para dispersión clase 5 la siguiente es válida:

(Ecuación 1.4.2)  $x_{max(st2)} = 127 * u_H$  y  $\dot{u}_{max(st2)} = 85.2 * M^{1/3} * u_H^{-1/3}$

La corriente de calor emitida (M) en [MW] se calcula de acuerdo a la ecuación:

(Ecuación 1.5)  $M = 1.36 * 10^{-3} * R * (T-283)$

Con R [m<sup>3</sup>/s] el % del flujo de escape en estado normal

T [K]: temperatura del escape en Kelvin.

Si las condiciones de dispersión que acompañan la emisión no se conocen en detalle, la altura de la chimenea(H) de la fuente de emisión es igual que la altura de la fuente efectiva (h).

### 3.11.1.2.2 Cálculo de la altura de la fuente efectiva por frío, salida de escape (eje vertical) (4,6,7).

La superelevación del escape ( $\dot{u}$ ) la cual es echa sobre la altura de la fuente efectiva (h) [m] junto con la altura de la chimenea (H), es calculada a partir del diámetro de la chimenea, la velocidad con la cual es emitida del escape y la velocidad del viento a esa altura (H) de acuerdo a lo siguiente:

$$(Ecuación 1.6) \dot{u} = 3 * D * ((vA/u) - 1)$$

En donde:

D: diámetro de la chimenea [m]

VA: velocidad del escape de emisión [m/s]

U: velocidad del viento según la altura de la emisión H [m/s]

Esta fórmula es válida para condiciones de dispersión neutral. Para casos inestables  $\dot{u}$  es superelevada al 25%, para casos estables es reducida al 25%. El escape efectivo (H +  $\dot{u}$ ) no debe ser mayor que 200 m (2,3,7).

### 3.11.1.2.3 Parámetros de dispersión

De acuerdo a la clase de dispersión, los parámetros de dispersión  $\sigma_y$  y  $\sigma_x$  en la fórmula 1.1, deben ser acordados dependiendo de la distancia (x) como sigue:

$$(Ecuación 1.7) \sigma_y = Fx^f \text{ y } \sigma_z = Gx^g$$

Los valores para los coeficientes F, G y para los exponentes f y g se pueden obtener del cuadro 1.1 de dispersión de clases:

**Dispersión de clases**

	6	5	4	3	2	1	
F:	1.294	0.801	0.640	0.659	0.876	1.503	h < 50m
	0.253	0.411	0.504	0.466	0.324	0.170	h = 100m
	0.310	0.310	0.320	0.360	0.400	0.400	h > 150m
f:	0.718	0.754	0.784	0.807	0.823	0.833	h < 50m
	1.057	0.882	0.818	0.866	1.025	1.296	h = 100m
	0.710	0.710	0.780	0.860	0.910	0.910	h > 150m
G:	0.241	0.264	0.215	0.165	0.127	0.151	h < 50m
	0.717	0.487	0.265	0.137	0.070	0.051	h = 100m
	0.060	0.060	0.220	0.330	0.410	0.410	h > 150m
g:	0.662	0.774	0.885	0.996	1.108	1.219	h < 50m
	0.486	0.652	0.818	0.985	1.151	1.317	h = 100m
	0.710	0.710	0.780	0.860	0.910	0.910	h > 150m

Cuadro 1.1: Valores para los coeficientes F, f, G y g como una función de la clase de dispersión y la altura h. 100 m se obtienen de la interpolación lineal entre 50 y 150 m (F, G: logarítmico; f, g: lineales) (2,3).

**3.11.1.2.4 Velocidad del viento**

La velocidad del viento  $u_a$  es más baja que el nivel del anemómetro  $Z_a$  (10 m sobre tierra en los modelos IMMPROG) sobre un periodo de tiempo de 10 a 60 minutos. El cálculo de los valores  $U_R$  es asignado según la velocidad del viento  $U_a$  como sigue:

<u><math>U_a</math> [m/s]</u>	<u>valor calculado <math>U_R</math> [m/s]</u>
< 0.8	0.8
> 10.0	2.0

En casos estables el valor verdadero es usado como en la ecuación de TA-LUFT.

La velocidad del viento  $U_h$  en la ecuación 1.1 es calculada del  $U_R$  como sigue:  
 (Ecuación 1.8)  $U_h = U_R (h/Z_a)^m$  ( $Z_a$  nivel del anemómetro en [m] sobre tierra).

La velocidad del viento  $U_H$ , el cual es requerido en orden para determinar la efectiva fuente-altura  $h$ , es calculada de  $U_r$  de acuerdo a la ecuación 1.8.1:

(Ecuación 1.8.1)  $U_H = U_R (h/Z_a)^m$

Para la altura de chimeneas  $H$  y para la altura de fuente efectiva  $h < 200$  m, la velocidad del viento  $U_H$  o  $U_h$  es igual a 200 m. Donde  $m$  debe ser para cada clase de dispersión como sigue:

Dispersión clase 1:  $m = 0.09$

Dispersión clase 2:  $m = 0.20$

Dispersión clase 3:  $m = 0.22$

Dispersión clase 4:  $m = 0.28$

Dispersión clase 5:  $m = 0.37$

Dispersión clase 6:  $m = 0.42$

Si el viento en los datos meteorológicos (horas o clases) se ha medido a diferentes niveles que 10 m se deben extrapolar de acuerdo a la ecuación 1.9 para niveles de 10 m:

(Ecuación 1.9)  $U_h = U_{10} (z/10)^p$

Cuadro 1.2 muestra los valores para el exponente  $p$  como una función de la clase de dispersión y topografía.

Dispersión de clases	1	2	3	4	5	6
P (urbano)	0.15	0.15	0.20	0.25	0.40	0.60
P (rural)	0.07	0.07	0.10	0.14	0.35	0.55

Cuadro 1.2: Valores para el exponente  $p$  del perfil logarítmico el viento (ecuación 1.9) (2,3)

### 3.11.1.2.5 Determinación de la dispersión de clase

La determinación de la dispersión de clases se puede hacer de acuerdo al esquema TA-LUFT (ver 2.11.3.3.1) (2,3).

### 3.11.1.2.6 Altura de la inversión térmica

Si la altura de la inversión térmica existe bajo 1000 m sobre el suelo los datos meteorológicos (horas o clases), pueden ser tomados en el modelo de cálculo por reflejo de la pluma Gausiana en la ley de inversión (8).

(Ecuación 1.10)

$$C_{(x,y,z)} = \frac{10^3}{3600 * 2\pi} * \frac{Q}{u_h \sigma_y \sigma_z} * \exp\left[-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right] * \sum_{n=-\infty}^{n=+\infty} \left[ \exp\left[-\frac{(z-h+2nz_i)^2}{2\sigma_z^2}\right] + \exp\left[-\frac{(z+h+2nz_i)^2}{2\sigma_z^2}\right] \right]$$

IMMPROG-P calculado con n de -2 a +2 en la función.

Con Zi [m]: altura de la inversión.

### 3.11.1.2.7 Corrección de la topografía

La corrección topográfica de la altura de la fuente efectiva es necesaria para terrenos complejos (véase figura 4 en pagina siguiente). En IMMPROG-P la siguiente corrección topográfica se basa en el esquema para clases estables 1 a 4 es aplicada (no para casos estables) (7,8):

(Ecuación 1.11)  $h_{Korr} = h + (h_Q - h_R)/2$  ( $h_{Korr}$  no debe ser menor que  $h/2$ )

en donde:

$h_Q$ : altura de la fuente en [m] o como (pie de chimenea)

$h_R$ : altura del receptor en [m]

$h$ : altura de la fuente efectiva [m]

$h_{Korr}$ : corrección topográfica de la altura de la fuente efectiva [m]

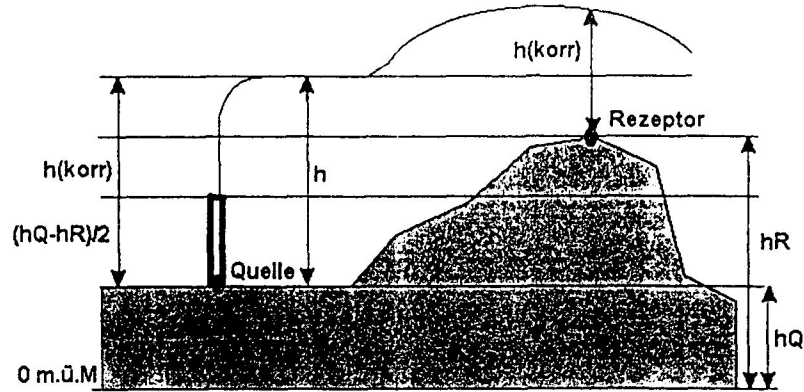


Figura 4: Modificación de contaminantes pluma en topografía compleja.  
(Rezeptor = receptor, Quelle = fuente)

### 3.11.1.2.8 Polvo

La concentración de la inmisión para polvo es calculada de acuerdo a la ecuación (1.1) y multiplicada por el factor S, donde S se toma del siguiente valor:

(Ecuación 1.12)

$$S = \exp \left[ - \sqrt{\frac{2 * v_{di}}{\pi * u_h}} * \int_0^x \frac{1}{\sigma_z(\xi)} * \exp \left[ - \frac{h^2}{2\sigma_z^2(\xi)} \right] d\xi \right]$$

Las deposiciones de polvo son calculadas de acuerdo a la siguiente ecuación:

(Ecuación 1.13)  $d(x,y) = 86400 * \sum_{i=1}^4 V_{di} * C_i(x,y,z)$

Un valor típico para la velocidad de deposición V<sub>di</sub> es 70 mm/sec (4,7). Si se quiere tomar en consideración el impacto de intercepción y la deposición de humedad, se debe incrementar la velocidad de deposición por un factor de 10 o más (7).

### 3.11.1.2.9 Área de una fuente

Las áreas de una fuente emisora son modeladas en IMMPROG como puntos fuente, 25 puntos fuente son calculados y situados sobre el área de un valle:

- a. Si la suma de la emisión es  $> 5\text{g/h}$ , está situado en un área  $> 300\text{ m}$  o el receptor es  $< 2.5\text{ Km}$ , asumiendo que está situado en el centro con un simple punto fuente.
- b. Si la suma de la emisión es  $< 5\text{ g/h}$ , un área de  $> 300\text{ m}$  o el receptor es  $1.25\text{ Km}$ , otro con un simple punto fuente, situado en el centro.

Los puntos fuente son creados como fuentes de escapes calientes con los siguientes valores:

$\alpha_y$  es construido con 4,  $\alpha_z$  con 2;

El volumen de la corriente = emisión cantidad  $\times 0.28\text{ [m}^3/\text{s]}$ ; para un simple punto fuente (modo optimizado), el volumen de la corriente es incrementado por un factor de 2.5.

Temperatura recomendada:  $10.5^\circ\text{C}$  (2,7,8).

### 3.11.1.2.10 Obstáculos en el modelo P

Los obstáculos pueden ser tomados en grupos solamente por el modelo P y no por el modelo combinado K. Estos tienen una influencia en los resultados calculados, si la distancia entre el receptor y la fuente es  $< 1.7\text{m}$  y el tiempo de la altura de los obstáculos. La pluma puede tocar el suelo y la concentración de inmisión puede ser igual a 4 tiempos de concentración en una situación tranquila.

En un máximo de 50 obstáculos pueden ser tomados por IMMPROG-P.

IMMPROG distingue los siguientes casos: (HH: altura del obstáculo, HK: altura de la chimenea)

- a.  $\text{HH} > \text{HK}$ :  $\sigma_y$  es incrementado por  $h/\sqrt{2\pi}$
- b.  $\text{HH} < \text{HK}$ : ver c
- c.  $(\text{HH}+1.5\cdot h) \geq \text{HK}$ :  $\sigma_y$  es incrementado por  $h/\sqrt{2\pi} \cdot (\text{HH}+1.5\cdot h - \text{HK})/1.5\cdot h$   
 $\sigma_z = \sigma_y$

Donde:

h:  $\min(\text{HH}, \text{LB})$

L: largo

b: ancho del obstáculo

$LB = 1 \times \text{seno}(\text{Alpha}) + b \times \text{seno}(\text{Alpha})$ .

Donde alpha es el ángulo entre la dirección del viento y lo ancho del obstáculo (9).

### **3.11.2 Las carreteras en el modelo IMMPROG-H (-K)**

#### **3.11.2.1 Posibles aplicaciones**

El modelo de fuente lineal o modelos de carretera calcula la dispersión de los contaminantes del aire en el sotavento de la carretera con tránsito pesado frecuente (con una carretera considerada como una fuente continua de emisión). La mayoría de los modelos de difusión de las carreteras, incluyendo el IMMPROG-H puede ser usado para calles en terrenos planos (incluyendo calles con escaso tránsito). El modelo no ha sido desarrollado para terreno complejo.

Cuando se simula el proceso de dispersión, el tránsito induce turbulencia y las condiciones e luz-viento son tomadas en total dentro de la rutina. Este IMMPROG-H es muy similar al modelo HIWAY-2 de la agencia de Estados Unidos de protección del medioambiente. Pero en adición a esto, IMMPROG-H ofrece una mejora a la corrección de luz y viento, calibrado con una medición extensa de la inmisión (10). Además IMMPROG-H es hábil en calcular la concentración de inmisión de  $PM_{10}$  a partir de PTS. IMMPROG-H ha sido optimizado para predecir  $PM_{10}$ /PTS, pero también se ha utilizado para predecir otros contaminantes del aire inertes. IMMPROG-H puede aplicarse para sitios con receptores arriba de 100 m de la calle. Si los receptores simulan dentro de la calle, el IMMPROG-H puede modelar las concentraciones de inmisión de los receptores a 1 cm de distancia de la calle. Para calles que tienen un corte, la concentración de inmisión puede calcularse únicamente fuera del corte.

El número de receptores no debe exceder de 15,000 en cada corrida. El modelo puede calcular más de 15,000 calles o secciones de calles (con un máximo de 6 rutas cada una).

IMMPROG-K calcula la concentración de inmisión para emisores de fuente lineal, como se describe arriba para IMMPROG-H y para emisiones de fuente punto, como se describe en IMMPROG-P.



### 3.11.2.2 La teoría del modelo

#### 3.11.2.2.1 Cálculo de la concentración de los contaminantes del aire

Como la emisión de cada vehículo no puede tomarse en consideración, el modelo de fuente lineal lo calcula usando un total de emisión Q, para cada sección. Una sección es creada por una división de la ruta larga en partes simples las cuales pueden ser consideradas como fuente punto y tratadas de acuerdo a la siguiente fórmula:

(Ecuación 2.1)

$$C_{(x,y,z,H)} = \frac{10^6}{3600 * 100} * \frac{Q}{2\pi u_h \sigma_y \sigma_z} * \exp\left[-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right] * \left[ \exp\left[-\frac{(z-h)^2}{2\sigma_z^2}\right] + \exp\left[-\frac{(z+h)^2}{2\sigma_z^2}\right] \right]$$

X,y,z = coordenadas [m]

C = concentración de inmisión [mg/m<sup>3</sup>]

Q = fuerza de emisión en el punto (x,y,z) [g/h/100m]

Z = altura sobre la tierra [m]

H = altura de la fuente efectiva (altura de escape a 0.3 m en IMMPROG-H)

U<sub>h</sub> = velocidad del viento [m/s]

σ<sub>y</sub> = desviación estándar de la concentración y distribución en el plano horizontal [m]

σ<sub>z</sub> = desviación estándar de la concentración y distribución en el plano vertical [m]

IMMPROG-H empieza con líneas separadas para el nivel de la calle. Cada uno de ellos es modelado como individual, constantemente como emisión de fuente lineal. Para calles con un corte, el modelo trata los cortes como 10 fuentes lineales de igual fuerza de emisión.

El estimado total de la concentración para cada línea es obtenido por la adición de los totales de las secciones individuales. Por lo tanto el método usado es una integración numérica (fórmula de Trapez). La ecuación básica usada por IMMPROG-H es la siguiente:

$$(Ecuación 2.2) C = q L * \int_0^D f dL$$

f = es el punto fuente de dispersión en la ecuación (fórmula 2.1)

D = es la longitud de la calle entre los finales de la calle

dL = es la longitud de la sección

gL = es el porcentaje de emisión (este es calculado internamente con el modelo que indica el total de emisión).

En contraste con el modelo de una fuente lineal infinita, la ecuación no presenta disfunción de la integrada  $-\infty$  a  $+\infty$ . La calle es dividida en simples puntos fuentes. El gran esfuerzo de cálculo es reflejado en muchos resultados y aplicaciones (2,3,10).

### 3.11.2.2.2 Cálculo de la emisión total Q

IMMPROG-H e IMMPROG-C requieren de la entrada de la emisión para cada línea en [g/h/100m]. La cuantificación de la emisión Q, debe calcularse basándose en la ruta de conducir y en las diferentes categorías de vehículos a partir de factores de emisión que son definidos para diferentes tipos de vehículos y velocidades de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$(Ecuación 2.3) \quad Q = \sum_{i=1}^n \frac{EF_i * VA_i}{10}$$

Q: emisión total para cada línea en [g/h/100m]

EF: factor de emisión en [g/Km/vehículo] para cierta velocidad de vehículos tipo i.

VA: total de tráfico (número de vehículos para cada hora o línea)

i: tipo de vehículo.

La numeración de la línea es de izquierda a derecha, viendo desde el comienzo hasta el final de la calle. Cualquier orientación de la calle puede elegirse.

El programa causaría un error, si el punto de inicio y final de la calle son idénticos. Si una altura de un receptor es menor que cero, entonces automáticamente repone el cero. Si el receptor miente en la calle, la concentración es calculada para un receptor asumiendo una distancia a 1 cm de la calle. (2,3).

### 3.11.2.2.3 Extrapolación del viento a 2 metros sobre la tierra

Los datos meteorológicos de IMMPROG-H contienen datos del viento medidos a 10 m/nivel. Sin embargo, el modelo para calcular las concentraciones se basa en medidas del viento a 2 m/nivel ( $U_{2m}$ ) con la deducción empírica de la aproximación de los datos del viento ( $U_{2m}$  corresponden a  $U_h$  en la ecuación 2.1):

(Ecuación 2.4)  $U_{2m} = U_{10m} * (2/10)^p$

Debe usarse los siguientes valores para el exponente  $p = 0.15$  (inestable),  $0.20$  (neutral) y  $0.37$  (estable).

Una corrección análoga para la dirección del viento no es llevada a cabo con su variación de altura porque puede ser errónea (3,10).

#### 3.11.2.2.4 Corrección del viento liviano

La siguiente corrección del viento para vientos livianos es usada en IMMPROG-H:

(Ecuación 2.5)  $U_{\text{corregido}} = C * u^{0.164} * \cos 2\alpha$

C. una constante dependiente de la velocidad del tráfico. Para promedio de velocidad de tráfico rápido (con aplicaciones de IMMPROG-H) se pone 1.85

$\alpha$ : ángulo entre la calle y la dirección del viento.

La corrección mencionada anteriormente representa el cambio del campo del viento causado por el paso de vehículos, este efecto crece paralelo al viento, pero no afectará a vientos encontrados perpendicular a la calle. Una corrección lejana puede venir necesariamente como resultado de comparación de los resultados del modelo con medidas extensivas de inmisión en una población d Suiza (10), la corrección de la velocidad del viento  $U$  se pone en valor mínimo.  $U_{\text{min}}$  en IMMPROG-H, dependiendo de la extrapolación de la velocidad del viento  $U$  a 2 m sobre la tierra como sigue (2,3):

(Ecuación 2.6) Si  $u \leq 0.4$  y  $u_{\text{corregido}} < 0.8$ :  $u_{\text{min}} = 0.8$  [m/s]

Si  $u > 0.4$  y  $u_{\text{corregido}} < 1.2$ :  $u_{\text{min}} = 1.2$  [m/s]

#### 3.11.2.2.5 El tráfico induce turbulencia

En adición al transporte, la difusión cercana a la calle es muy importante, por lo tanto la elección correcta de los parámetros de dispersión  $\sigma_z$  y  $\sigma_y$  es vital. IMMPROG-H usa valores iniciales para los parámetros de dispersión  $\sigma_z$  y  $\sigma_y$ , tomando en cuenta la turbulencia causada por el tráfico. Los parámetros de dispersión totales  $\sigma_t$  son calculados de acuerdo a 2.7 (11):

(Ecuación 2.7)  $\sigma_t = \sqrt{(\sigma_a^2 + \sigma_0^2)}$

$\sigma_a$ : dispersión causada por la turbulencia atmosférica

$\sigma_o$ : dispersión causada por el tráfico.

La porción del parámetro de dispersión vertical  $\sigma_o$  inducida por el tráfico es determinada por la velocidad del viento y la dirección debe ser menor a 1.5 m. Esto es aproximadamente la altura de vehículos pequeños. Estos  $\sigma_o$  pueden tener grandes valores para bajas velocidades del viento encontrado paralelo a las calles.

$\sigma_a$  puede calcularse en forma análoga a lo descrito en las ecuaciones de la sección 3.11.1.2.1 usando una fuente relación. Los coeficientes, sin embargo, difieren de los datos en la tabla 1.1, son tomados en cuenta con las condiciones específicas de dispersión a lo largo de una calle (11).

#### 3.11.2.2.6. Clases de estabilidad.

La clase de estabilidad (clase de dispersión) debería determinarse de acuerdo al método Pasquill u otro relacionado (ver sección 2.11.3.4.). IMMPROG-H solo diferencia entre 3 clases: inestable, neutral y estable, esta clasificación puede ser reducida a 3 clases (inestable: 1, 2 y 3; neutral: clase 4; estable: clases 5 y 6). Si su clase de estabilidad de entrada es menor que 1 y mayor que 6 automáticamente será 3 ó 5 respectivamente, en el programa (2,3,10,11).

#### 3.11.2.2.7. Mezclando alturas

La mezcla de alturas es la cuantificación intensiva de todo el dato meteorológico de entrada en IMMPROG-H. Si su entrada es incorrecta o si la entrada se pierde, el programa podrá mezclar alturas automáticamente a 1000m.

#### 3.11.2.2.8. $PM_{10}$ es una proporción de PTS

IMMPROG-H es capaz de determinar la razón de concentración inmisión de PM10/PTS. Este calculo determina la razón de PM10/PTS en % por volumen para casos individuales (12). La razón de PM10 es determinado dependiendo de la concentración de PTS cercana a la calle, el impacto de ozono (como contaminante secundario), la distancia de la calle, la dirección del viento y el ancho de la calle:

$$\text{(Ecuación 2.8)} 100 * [PM_{10}]/[PTS] (x) = a - b * \exp^{-x/c}$$

Donde:

$$a = 73.0 + (PM_{10s} * 0.34)$$

$$b = a - PM_{10s}$$

$$c = 2270 / PM_{10s}$$

x = distancia desde el lado de la carretera.

$PM_{10s} = a_0 + d \times \exp(-([PTS_0]^f)/g)$  (= razón de PM<sub>10</sub>/PTS al lado de la carretera en porcentajes por volumen).

PTS<sub>0</sub>: PTS es la concentración al lado de la carretera en partes por billón [ppb].

a<sub>0</sub> = 2% (el radio de PM<sub>10</sub>, en el caso de una chimenea)

$$d = 0.051037 + (0.71052 \times [O_3]) - (0.0020699 \times [O_3]^2)$$

$$f = 0.86599 + (0.0012216 \times [O_3]) + (0.0000012007 \times [O_3]^2)$$

$$g = 154.87 + (1.3654 \times [O_3]) + (0.017905 \times [O_3]^2)$$

[O<sub>3</sub>]: ozono-fondo concentración en ppb (en [mg/m<sup>3</sup>] en IMMPROG-modelo). La conversión de [mg/m<sup>3</sup>] en [ppb] es automáticamente formada por cálculos del IMMPROG-H).

La razón de el PM<sub>10</sub> cercano a la calle (PM<sub>10s</sub>) es válida para calles con 4 líneas y la dirección del viento cruzado a la calle (i.e. un ángulo de 45 grados entre la calle y el viento). Para calles estrechas con menos de 4 líneas esta razón se multiplica por un factor de 0.9. La corrección correspondiente es deformada por

calles muy anchas. Si el viento encontrado es paralelo a la calle el radio es linealmente interpolado entre 0.85 y 1.15 (2,3,6,11,17,20).

### 3.11.3 Clases de dispersión en IMMPROG-H

#### 3.11.3.1. Las clases de dispersión.

El sitio específico de un receptor como en un valle, una cuesta o un cerro pueden ser asociados con cierta conducta de parámetros meteorológicos. Cuando se planean nuevos proyectos deben detallarse las condiciones de dispersión de los contaminantes en el aire.

Las condiciones de dispersión son normalmente determinadas a partir de las distribuciones combinadas de suma y frecuencia de la dirección del viento, velocidad del viento y dispersión de clases, usualmente generan de 6 a 7 clases de dispersiones. Estos rangos pueden ser a partir de extremadamente inestables (clase A o 1), a neutro (clase D o 4) y extremadamente estable (clase F o 6). Las clases de dispersión dan esa información de la turbulencia relativa de la atmósfera, con los parámetros meteorológicos necesarios para el límite de clase variando entre los diferentes esquemas. Esta dispersión de clases es una aproximación útil cuando una medición directa de la turbulencia no se lleva a cabo debido a un alto costo (2,3).

#### 3.11.3.2. Clasificación de los esquemas de la clase de dispersión.

Las condiciones de dispersión para sitios específicos pueden determinarse por el estado general de turbulencia dentro del límite atmosférico durante el proceso de emisión. La turbulencia en el límite atmosférico se divide en turbulencia inducida dinámicamente y la inducida termalmente.

La turbulencia dinámica es determinada a partir de la velocidad del viento y la superficie áspera. Luego se delimitan los parámetros usando la longitud  $z_0$ . La turbulencia termal y así la actividad convectiva del límite atmosférico es determinada

a partir de la estabilidad atmosférica y depende de la radiación solar o el balance de la radiación.

La superficie áspera contribuye directamente a la generación de turbulencia en un sitio específico y a una dirección constante. La estabilidad atmosférica y la velocidad del viento, sin embargo, son influenciadas por variables climáticas como la latitud geográfica, altura del sol, topografía, exposición, altura sobre el nivel del mar y cubierta de nubes y todas esas variables en el tiempo y espacio.

Como se mencionó anteriormente las condiciones de dispersión son usualmente descritas por 6 diferentes clases de dispersión. En orden para determinar el número de esquemas de clases existentes se usan varios parámetros meteorológicos. En teoría no es posible convertir un esquema en otro.

Una teoría limitante define específicas mediciones como el número de Richardson ( $Ri$ ) y la longitud Monin-Obuknov ( $L$ ), las cuales permiten una categorización de la turbulencia atmosférica. Los datos necesarios para determinar esas mediciones no están disponibles en muchos de los casos, muchos esquemas para determinar la clase de dispersión se basan en otros datos los cuales pueden medirse fácilmente y rutinariamente. Dependiendo de la composición de los parámetros, los esquemas pueden dividirse en 3 grupos:

- A) Determinación de clases de dispersión a partir de fluctuaciones horizontales (y/o verticales) de la dirección del viento.
- B) Determinación de las clases de dispersión a partir del gradiente de temperatura vertical (a menudo junto con la dirección del viento).
- C) Determinación de clases de dispersión a partir de la velocidad del viento cubierta de nubes y altitud del sol (2,3,12,20).

### 3.11.3.3. Determinación de la clase de dispersión usando el esquema de TA-LUFT.

#### 3.11.3.3.1. El esquema de TA-LUFT

Es un esquema capaz de determinar la clase de dispersión basado en la velocidad de viento, la cubierta de nubes y la elevación del sol (ver arriba C) el tiempo del día y año.

Las clases de dispersiones determinadas son modificadas por las horas cerca del amanecer y anochecer como también debe tomarse en cuenta el carácter transicional en relación al balance de la radiación.

Es necesario renombrar las clases de dispersión I a la V definidas en TA-LUFT por las simulaciones del IMMPROG dentro de las clases 6 a la 1 (la cual se presenta en el cuadro 3.1):

	TA-LUFT	IMMPROG	TURNER	Esquema
Muy inestable	V	1	1 o A	Muy inestable
Inestable	IV	2	2 o B	Inestable
Neutral-inestable	III2	3	3 o C	Ligeramente inestable
Neutral-estable	III1	4	4 o D	Neutral
Estable	II	5	5 o E	Ligeramente estable
Muy estable	I	6	6 o F 7 o G	Muy estable

Cuadro 3.1: El esquema depende del fallo de la clase de dispersión. La clase de dispersión de acuerdo al esquema TURNER es comúnmente agrupada con la clase 6.

Para cada tipo (o fuente de emisión) la clase de dispersión debería calcularse a partir de los parámetros meteorológicos en orden razonable para crear una



dispersión estadística. Para el esquema de TA-LUFT estos parámetros son velocidad de viento, cubierta de nubes, tiempo del día y tiempo del año. El dato de cubierta de nube es usualmente de tiempo de resolución insuficiente. Como primer paso en la determinación de la clase de dispersión se sugiere que el dato de cubierta de sitios vecinos representativos en la resolución deben interpolarse para uso del sitio en cuestión (2,3,4,11).

#### 3.11.3.3.2. Simplificación del esquema de TA-LUFT.

Para la determinación de dispersión de clases, TA-LUFT(4) estipula que en casos con cubierta de nubes completa consistente exclusivamente de cirros altos, el valor para la cubierta de nubes debe reducirse a  $3/8$ .

La proporción de la cubierta de nubes baja y media,  $N_h$ , del total de la cubierta de nubes  $N$ , se debe conocer en orden para juzgar si las nubes altas están presentes. En principio el valor  $N_h$  esta disponible para todos los sitios, pero a menudo no están disponibles en el mismo tiempo de resolución como el dato total de la cubierta de nubes.

Usando una determinación de la clase de dispersión sin valores  $N_h$  disponibles en un estudio de la dispersión climática se investigó el efecto mencionado anteriormente (13), reducción del total de la cubierta de nubes por  $3/8$  para cirros altos. Según un estudio la distribución de clases con y sin esta prescripción fueron analizadas por 3 sitios en Suiza (sitios con un buen tiempo de resolución para datos de cubierta de nubes). Las clases de frecuencias son mostradas para variar. El cálculo de la clase de dispersión modificada (sin  $N_h$ ) resulta en proporciones ligeramente altas de las clases neutrales (3 y 4) a expensas de las inestables (1 y 2) y de las clases estables (6). Para sitios con vientos fuertes, las diferencias disminuyen casi completamente (4,13).

### 3.11.3.4. Determinación de la clase de dispersión usando el esquema PASQUILL-TURNER.

Es un esquema básico desarrollado por PASQUILL reemplazando la división subjetiva del consumo solar dentro de tres categorías fuerte-medio-débil, en el esquema PASQUILL con un objetivo de determinar el índice de Balance y Radiación (radiation-balance-index (NRI)). La determinación de las clases usando el esquema de TURNER puede formarse en 2 pasos como sigue:

#### 3.11.3.4.1. Determinación del índice de Balance y Radiación (radiation-balance-index NRI) (N = total de la cubierta de nubes).

- a. Para  $N = 8$  y base de nubes  $H < 7000$  ft      NRI = 0
- b. Durante la noche con  $N \leq 2/8$       NRI = -2  
Durante la noche con  $N \geq 3/8$       NRI = -1
- c. NRI es determinado a partir de la altitud  $a$  del sol de acuerdo al siguiente

esquema:

$60^\circ < a$	NRI = 4
$35^\circ < a \leq 60^\circ$	NRI = 3
$15^\circ < a \leq 35^\circ$	NRI = 2
$a \leq 15^\circ$	NRI = 1

Con (a) cubierta de nube  $N > 5/8$  este índice es modificado como sigue:

- (1)  $H < 7000$  pies y  $N_h > 5/8$       NRI = NRI - 2
- (2)  $H \geq 7000$  pies y  $N_h < 5/8$       NRI = NRI - 1
- (3)  $H > 7000$  pies y  $N = 8$       NRI = NRI - 1
- (4) si  $NRI < 1$

#### 3.11.3.4.2. Determinación de la clase de dispersión:

La estabilidad de clases es determinada a partir del índice de balance de radiación (NRI) (radiation-balance-index NRI) y la velocidad del viento de acuerdo al cuadro 3.2. La rotación para la clase 7 se da en la tabla 3.1 (2,3,4,12,13)

Velocidad del viento [nudos]	Índice de balance de Radiación (NRI)						
	4	3	2	1	0	-1	-2
0 y1	1	1	2	3	4	6	7
2 y3	1	2	2	3	4	6	7
4 y5	1	2	3	4	4	5	6
6	2	2	3	4	4	5	6
7	2	2	3	4	4	4	5
8 y9	2	3	3	4	4	4	5
10	3	3	4	4	4	4	5
11	3	3	4	4	4	4	4
12 y mas	3	4	4	4	4	4	4

Cuadro 3.2: determinación de la clase dispersión de clases a partir de índice de balance de radiación (NRI) (radiation-balance-index NRI) y la velocidad del viento usando el esquema PASQUILL-TURNER.

La determinación de la altitud del sol a partir de la latitud geográfica, mes, día y hora definida. Creando series de datos del total de cubierta de nube N, el nivel de cubierta de nubes resultante a partir de nubes bajas y medias  $N_h$  y la nube base H necesaria para el esquema PASQUILL-TURNER a menudo requiere conversiones de tiempo consumido y de interpolaciones de datos. En un estudio de la dispersión climática en Suiza [13] la clase de dispersión para un año se ha determinado usando los esquemas de TA-LUFT y TURNER. El resultado de estos esquemas difiere considerablemente, TA-LUFT clasifica condiciones meteorológicas como estables comparado con TURNER (2,3,4,11,12,13,17,20).

### 3.12 Trabajos de investigación relacionados con el modelo de dispersión IMMPROG.

En 1995 y 1996 se realizaron pruebas con el modelo de dispersión IMMPROG versión 4.02 en la ciudad de Bern (Suiza), para un contaminante en especial el dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>), esto esta recapitulado en el User Manual IMMPROG 4.02 for Windows y la presentación del escenario en el anexo 1 (2).

Otros trabajos de investigación relacionados con el uso del modelo de dispersión son; Modelling of Air Pollution in Central American Cities, presentado por Nabholz y Hangartner del Institute of Higiene and Applied Ergonomics, ETH Suiza (15). En dicha investigación se trabajó con dióxido de nitrógeno, presentando tres escenarios, el primero de la situación en el año de 1995 en el que se efectuaron las primeras mediciones del contaminante y con un recuento de los tres años siguientes (1996, 1997 y 1998) efectuaron el pronóstico de cómo se vería la Ciudad de Guatemala en el año 2000 si no se tomaran las medidas y técnicas adecuadas para el control de dicho contaminante y el tercer escenario presenta a la Ciudad de Guatemala con medidas de control adecuadas sobre este contaminante (anexo 2) (15).

También se encuentra el trabajo Simulación por Computadora de la Dispersión de Contaminantes Atmosféricos, efectuado por el Blazer, el cual presentó escenarios de la situación actual de las ciudades de Guatemala y San Salvador para el año 2000 y los pronósticos de año 2005 en ambas ciudades (anexo 3).

### **3.13 Resultados de la contaminación ambiental para la Ciudad de Guatemala.**

Como resultado del trabajo efectuado ya por mas de 5 años consecutivos se puede citar el Compendio de resultados de 1995 al 2000 del Proyecto Monitoreo de la Calidad del Aire, de la Universidad de San Carlos de Guatemala, en el cual se presentan los contaminantes estudiados durante estos años, resultados por mes, el promedio anual de cada sitio estudiado y el promedio en toda la ciudad de todos los contaminantes que determina el laboratorio (anexo 4) (21).

## **4 OBJETIVOS**

### **4.1 General**

Pronosticar por medio de una simulación en computadora usando el modelo de dispersión IMMPROG la situación actual y futura de la contaminación ambiental en la ciudad de Guatemala, debido al material particulado en suspensión en su fracción respirable (PM<sub>10</sub> partículas menores a 10 micras).

### **4.2 Específicos**

Determinar por medio de la simulación en computadora el porcentaje anual (enero de 1995 a diciembre del 2000) de aumento del material particulado en suspensión en su fracción respirable (PM<sub>10</sub> partículas menores a 10 micras), actualmente y como pronóstico para la Ciudad de Guatemala.

Implementar el uso del modelo de dispersión (IMMPROG) en el Laboratorio de Monitoreo del Aire de la Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia de la Universidad de San Carlos de Guatemala en la Ciudad de Guatemala.

## 5. HIPOTESIS

Existe correlación entre el modelo de dispersión (IMMPROG) y la contaminación real por el material particulado en suspensión en su fracción respirable ( $PM_{10}$ ) en la Ciudad de Guatemala.

## 6. JUSTIFICACION

Actualmente no existen reportes de un pronóstico de la contaminación por material particulado en suspensión en su fracción respirable ( $PM_{10}$ ) para la Ciudad de Guatemala, solamente existen reportes de pronósticos de la contaminación por dióxido de nitrógeno ( $NO_2$ ), los cuales fueron tomados como base y ejemplos bibliográficos para la presente investigación.

En el presente trabajo se efectuó una simulación y pronóstico de la contaminación por material particulado en suspensión en su fracción respirable ( $PM_{10}$ ) de un área determinada de la Ciudad de Guatemala. Basándose en un sistema de programa de computadora (IMMPROG) ya implementado en el Laboratorio de Monitoreo del Aire, Escuela de Química, Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia, Universidad de San Carlos de Guatemala, el cual esta dotado de un sistema operacional matemático y estadístico, del que se espera obtener un mayor campo de trabajo e investigación relacionado con la Química Ambiental.

La importancia de obtener resultados con este modelo es la presentación de escenarios de la situación actual y las situaciones futuras, para que las entidades interesadas en la calidad del aire puedan planificar y tomar decisiones de las medidas adecuadas para controlar y prevenir niveles de dicho contaminante.

La aplicación de este modelo de dispersión es para conocer la contaminación por material particulado en suspensión en su fracción respirable ( $PM_{10}$ ), ya que tiene efectos directos en la salud del ser humano, dichas partículas agravan enfermedades de tipo respiratorio (asma, bronquitis crónica, enfisema pulmonar, etc), cardiovascular (vasoconstricción) y de tipo ocular (daños en retina, párpados, etc). De las afecciones mencionadas anteriormente las de tipo respiratorio son las más frecuentes en Guatemala (1,18,20).

## **7. MATERIALES Y METODOS**

### **7.1 Universo:**

Resultados del contaminante atmosférico PM<sub>10</sub> obtenidos en el Laboratorio de Monitoreo del Aire en la Ciudad de Guatemala.

#### **7.1.1. Muestra:**

Resultados por día y hora del material particulado en su fracción respirable (PM<sub>10</sub>) obtenidos en el Laboratorio de Monitoreo del Aire en la Ciudad de Guatemala (julio de 1996 a diciembre del 2000).

### **7.2 Recursos**

#### **7.2.1 Recursos Humanos:**

- a. Investigador: Br. Jhoni Frank Alvarez Castañeda
- b. Asesor: Lic. Pablo Ernesto Oliva Soto

#### **7.2.2 Recursos Institucionales:**

- a. Laboratorio de Monitoreo del Aire, Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia, Universidad de San Carlos de Guatemala.
- b. Swisscontact.
- c. Biblioteca de la Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia –USAC-
- d. Biblioteca de la Universidad del Valle de Guatemala.
- e. Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología –INSIVUMEH-.
- f. Instituto Nacional de estadística INE.
- g. Municipalidad de Guatemala (EMETRA)



### 7.2.3 Recursos Materiales:

#### 7.2.3.1 Equipo para los Cálculos en el programa IMMPROG.

Para todos los cálculos se utilizará la computadora del Laboratorio de Monitoreo del Aire con un procesador de una velocidad de 133 Mhz, marca Intelaf,.

Materiales adicionales necesarios son los 3 discos de arranque para el programa IMMPROG versión 4.03 para Windows modelo 1996, el manual de funcionamiento y teórico del programa, mas la tarjeta de doble terminal para la obtención de resultados bajo protección y codificación.

#### 7.2.3.2 Metodología para medición con el programa IMMPROG

Para todos los cálculos se utilizaron los siguientes valores para los parámetros internos:

- No se consideraron la altura de la inversión térmica.
- Se utilizaron una altura de medición de viento de diez metros sobre terreno y un perfil logarítmico de viento, con un factor  $u_{2m} = u_{10m} \times (2/10)^p$ .
- Se utilizaron la manera directa de cálculo.
- No se consideraron elementos topográficos.
- Las concentraciones de referencia se fijaron en el archivo de datos meteorológicos.
- La distancia de impacto de la emisión se fijó en 3,000 metros.
- En un primer paso se calcularon las inmisiones de PTS. Para la siguiente transformación automática de los valores de PTS a  $PM_{10}$  se aplicó el tipo C de transformación.

#### 7.2.3.3 Equipo para la medición de material particulado

- Bomba Thomas 607LA32D
- Torre de impacción: Air Diagn.
- Filtros: MSI Z99WPO3750 de teflón
- Prefiltros: Millipore AP10037X

- Orificio Critico: +/- = 4 L/min
- Portafiltros.

#### 7.2.3.4 Metodología para medición de material Particulado.

- El muestreo se efectúa durante 24 horas con un impactor de bajo volumen en el sitio de medición. (Ver dibujo en anexo 5).
- Se coloca el filtro con su casco plástico dentro del impactor.
- Ajustando el prefiltro por debajo del filtro.
- Verificar el flujo por el orificio critico.
- Anotar la tara del filtro limpio y la tara del filtro una vez expuesto.
- Gravimetricamente determinar la concentración de material particulado.

### 7.3 Procedimiento y programa para calcular las emisiones:

Todos los argumentos antes mencionados hicieron necesaria la creación de un programa sencillo para poder calcular las emisiones vehiculares, considerando todos los factores que influyen dichas emisiones. El programa de formato Microsoft Excel tiene una estructura que consiste en seis tablas conectadas.

- Cuadro 1: Para las tres categorías de vehículos, coches particulares, autobuses y camiones, se tomarán en cuenta los factores de emisión [g/km] para material particulado (PTS) del Manual de Factores de Emisión para el Tráfico Motorizado. Para tener una base de datos suficientemente grande, incluso para los cálculos de los escenarios, se considerarán los factores para los años 1985, 1987, 1989, 1991, 1993, 1995, 1997, 1999, 2005 y 2010. Para cada año y cada categoría de vehículo, se multiplicaron cuatro diferentes factores de emisión [g/km] con la velocidad respectiva, para tener la correlación lineal entre los factores de emisión [g/h] y la velocidad, descrita en forma de ecuación lineal.

- Cuadro 2: Para las tres categorías de vehículos se definió la velocidad en dependencia de la hora del día, dado que el tráfico en las horas pico fluye más lentamente que durante el día y que un autobús tiene una velocidad promedio más baja que un coche particular.
- Cuadro 3: El flujo vehicular cambia durante el día. No existe una relación lineal entre las horas durante las cuales se llevó a cabo un conteo del tráfico y la cantidad total de vehículos que pasa durante las 24 horas del día. Para poder extrapolar de las horas del conteo al día entero, se fijará la siguiente convención: el promedio por hora del total de los volúmenes del tráfico por hora entre las 6am a las 6pm es igual a 100%. Esta referencia de 100% representa entonces el volumen promedio del tráfico por hora entre las 6am y las 6pm, ya que al inicio de la investigación se tenían solamente datos para este período del día. Se tuvo que hacer una aproximación para el resto del día, un procedimiento que fue confirmado por el estudio de el gobierno de Japón (estudio que se encuentra en la división para planificación urbana Metrópolis 2010 de la Municipalidad de Guatemala). La tabla 3 permite extrapolar cualquier conteo, aunque solamente cubra una horas del día, para obtener el volumen total de vehículos que pasa por un tramo de carretera durante las 24 horas del día.
- Cuadro 4: Para cada hora del día y para cada categoría de vehículos, se multiplicará la velocidad (de cuadro 2) con la pendiente de la ecuación lineal (de cuadro 1) y se agrega la intersección. Para cada categoría se saca luego el promedio de los 24 factores de emisión [g/h], se divide este promedio entre la velocidad promedio [km/h] y además entre 10 [100m/km], de lo que se obtienen los factores de emisión en [g/h/100m], la unidad requerida por IMMPROG. En la tabla está previsto también el espacio para poder aplicar un factor de corrección que considere el mal mantenimiento de los vehículos.
- Cuadro 5: Con la tasa del crecimiento anual se podrá calcular el volumen del tráfico en cualquier año en el futuro. La información sobre el volumen actual del tráfico para cada tramo de carretera proviene de conteos, de los cuales se obtiene el volumen diario del tráfico basándose en el porcentaje del tráfico por hora (de cuadro 3). El volumen total del tráfico luego se distribuye entre las tres

categorías según datos disponibles en estudios o a través de conteos hechos específicamente para la presente investigación, y luego se transforma en partes porcentuales por hora según cuadro 3.

- Cuadro 6: El cálculo de la emisión para cada tramo de carretera consiste en la multiplicación del volumen promedio del tráfico por hora de cada categoría (de tabla 5) con los factores de emisión [g/h/100m] (de tabla 4). El resultado por tramo de carretera se divide entre los dos carriles que fueron definidos en el archivo de mapa.

### **7.3.1 Interacción de los cuadros**

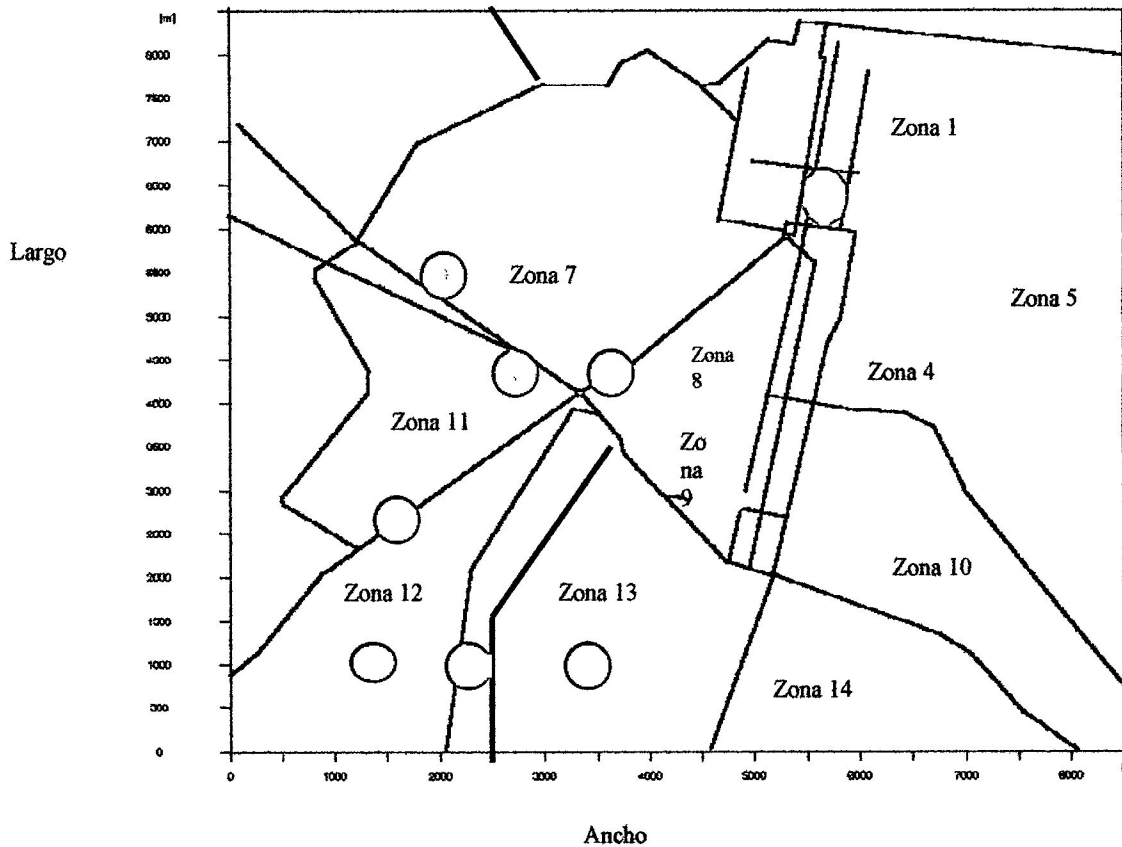
Por el hecho de que todos los parámetros considerados en este esquema influyen en las emisiones, los cuadros se conectaron de tal manera que la manipulación de un parámetro causa automáticamente un cambio en la emisión como resultado final del programa. Eso permite estimar fácilmente la sensibilidad de los diferentes parámetros. El esquema propuesto tiene la ventaja que se aplicara también para otros contaminantes como era previsto al inicio de la investigación ajustando nada más las bases para los factores de emisión en [g/km], mientras la demás información queda en vigencia.

### **7.3.2 Cálculo de las inmisiones con el modelo IMMPROG**

Para cada hora meteorológica, IMMPROG calcula una inmisión para un receptor, y la suma de todas estas inmisiones por hora se divide entre el total de horas meteorológicas. En el caso de que el programa no encuentre una emisión porcentual para dicha hora meteorológica o si hace falta la respectiva cantidad de emisiones en el archivo de mapa, IMMPROG dará el valor cero. El resultado de IMMPROG será el promedio de las concentraciones del contaminante durante las horas meteorológicas consideradas.

Los resultados se obtienen en escenarios los cuales indican las concentraciones de contaminante según el área.

A continuación se presenta el mapa del plano de la Ciudad de Guatemala construido en IMMPROG.



**Figura 5**

Estaciones o sitios de muestreo:

Abreviatura Sitio	Significado de Abreviatura Sitio
USAC	Universidad de San Carlos de Guatemala, Ciudad Universitaria Zona 12
EFPEM	Escuela de Formación Profesional de Enseñanza Media, Avenida Petapa, Zona 12
CAB	Central Motores, Calzada Aguilar Batres Zona 11
INSIVUMEH	Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología, Zona 13
PNT	Cuerpo Policia Nacional Civil Trebol, Avenida Bolivar Zona 7
INCAP	Instituto de Nutrición de Centroamérica y Panamá, Zona 11
CSJ	Motores Internacional HINO, Calzada San Juan Zona 7
MUSAC	Museo de la Universidad de San Carlos de Guatemala, Zona 1

Véase; se incertaron dos nuevas carreteras en azul que identifican al tránsito actual de Ruta en el naranjo y Avenida Atanasio Tzul.

#### **7.4. Diseño de investigación:**

##### **7.4.1. Tipo de estudio:**

Es un estudio descriptivo de la correlación lineal de valores obtenidos del material particulado en su fracción respirable ( $PM_{10}$ ) durante los últimos 5 años dentro del Laboratorio de Monitoreo del Aire contra los valores obtenidos del mismo contaminante por medio del cálculo de inmisiones del Modelo IMMPROG.

##### **7.4.2. Análisis de los resultados:**

Para la obtención de resultados matemáticos y estadísticos, el programa IMMPROG, recibirá los datos por medio de hojas electrónicas, luego por un sistema automático como el de Microsoft Excel, se realizará la correlación lineal.

Para ello se tienen dos ecuaciones que dependen de la misma variable (lugar).

$$Y1 = cx1 + b ; y2 = cx2 + b ; x1 = x2 = \text{lugar}$$

Donde  $y1$  = [inmisión de contaminante] calculado

$Y2$  = [concentración de contaminante] medido

$$\text{Intervalo de confianza (IC)} = 95\%$$

#### **7.5. Crecimiento del tráfico**

A pesar del crecimiento anual de las flotas vehiculares en ciudad de Guatemala de aproximadamente 10%, el flujo vehicular en las carreteras consideradas aumentó solamente en un 4 %, prueba que las redes viales existentes casi han llegado a un nivel de saturación. Nuevas obras viales realizadas han

absorbido una buena parte del tráfico adicional. Otro factor puede ser de origen social: gente de nivel socioeconómico alto tiene la posibilidad económica de adquirir un segundo o tercer auto, sin poder mover todos a la vez.

#### **7.6. Variabilidad de las emisiones durante el día**

El volumen del tráfico cambia en el transcurso del día. Considerando que las emisiones están directamente relacionadas con el volumen del tráfico, se definió en el archivo de datos meteorológicos la variabilidad diaria del tráfico como base para el porcentaje de la cantidad de emisiones, valor definido en el archivo del mapa (anexo 6).

Ya que el modelo de dispersión IMMPROG diferencia entre los días de la semana y el fin de semana, se tuvo que definir también la variabilidad de las emisiones para sábados y domingos. Las comparaciones entre conteos de tráfico de diferentes años en la ciudad de Guatemala demuestran que el tráfico en fines de semana ha aumentado: en 1990 circuló en días de fin de semana el 70% del tráfico de un día laboral, en 1998 ya fue un 80% (1).

#### **7.7. Archivo de clases P y H**

El modelo de dispersión IMMPROG dispone de una función automática que convierte un archivo con los datos meteorológicos de cada hora en un archivo de clases, lo que ayuda a reducir el tiempo del cálculo de manera significativa. Las comparaciones entre cálculos a base de los dos tipos de archivos meteorológicos comprobaron que la diferencia de los resultados es mínima, lo que es la razón por la que todos los cálculos del presente estudio se hicieron con archivos meteorológicos de clases P y H (anexo 7).

### **7.8. Presentación de una simulación de los resultados obtenidos por el modelo de dispersión IMMPROG, para los años de 1996 al 1999.**

Para poder visualizar los resultados, se aplicó una escala gruesa de los tres colores básicos, verde, amarillo y rojo. No se trató de fingir una exactitud matemática a través de una multitud de colores y una resolución pequeña, sino que de comunicar la situación general acerca de la contaminación por la dispersión de partículas totales en suspensión en su fracción respirable ( $PM_{10}$ ), en las áreas investigadas. Como valor guía se tomó en consideración el promedio anual recomendado por la Organización Mundial de la Salud (OMS) de  $50 \mu g/m^3$  para partículas totales en suspensión en su fracción respirable ( $PM_{10}$ ) (1,21).

El significado de la escala de colores:

- Verde Claro: Margen de inmisiones de ( $PM_{10}$ ) de  $0 - 20 \mu g/m^3$ .
- Verde Oscuro: Inmisiones entre  $20$  y  $30 \mu g/m^3$ .
- Amarillo: Inmisiones entre  $30$  y  $50 \mu g/m^3$ .
- Rojo: Partes del área investigada donde se sobrepasa el valor guía de  $50 \mu g/m^3$ .

Los dos tipos de verde representan entonces las áreas con baja contaminación de ( $PM_{10}$ ), mientras que se tendría que prestar atención a la contaminación por partículas totales en suspensión en su fracción respirable ( $PM_{10}$ ) en las zonas marcadas en amarillo, por estar ya cerca del valor guía para ( $PM_{10}$ ) y por la alta probabilidad de que en el futuro dicho valor guía sea superado. Las áreas problemáticas están marcadas con color rojo, independientemente del porcentaje por el cual están sobrepasando los  $50 \mu g/m^3$ , lo que puede justificarse por el hecho de que en el modelo de dispersión IMMPROG a veces calcula valores demasiado altos si un receptor fue definido accidentalmente en medio de una carretera.

### **7.9. Resultados para la Ciudad de Guatemala a partir de una Red de receptores.**

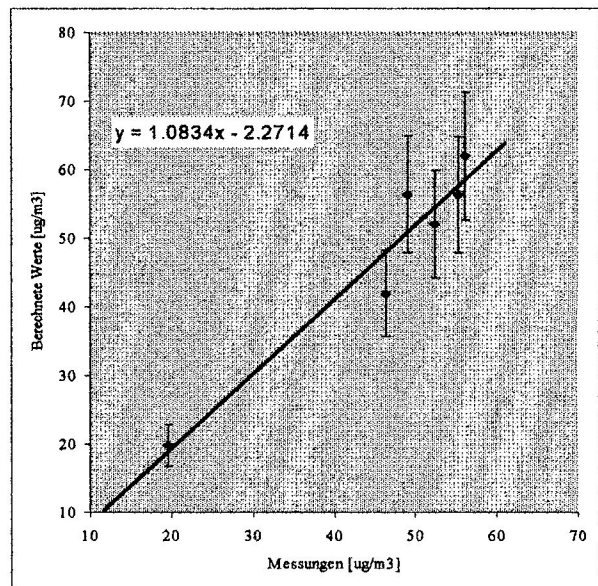
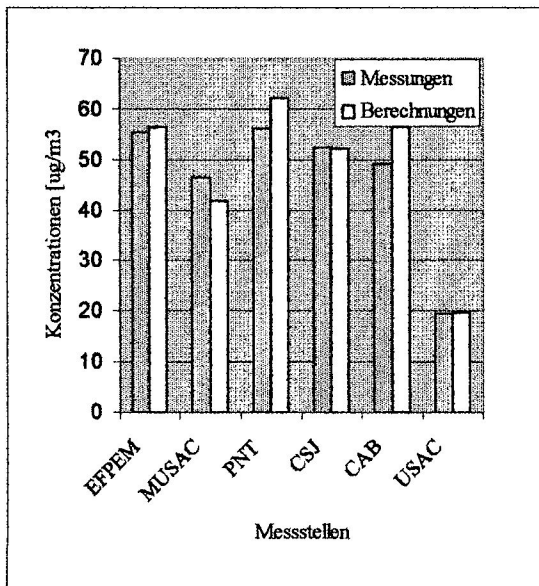


Toda el área de investigación (más de 70 km<sup>2</sup>) en la ciudad se cubrió con una red de receptores a dos metros sobre el suelo, ya que la mayoría de los reglamentos se refieren a esta altura de inmisión. Cada cien metros se definió un receptor, y para cada uno de los más de 7000 puntos en el área investigada, el modelo de dispersión IMMPROG calcula luego la concentración de la inmisión de (PM<sub>10</sub>).

Para la presentación en forma de gráfico, cada punto de la red de receptores aparece con el color que representa el respectivo rango de concentración. Al final del cálculo efectuado por el modelo, los receptores no aparecen en forma de puntos sino que de pequeños cuadrados, cuya suma cubre toda el área de investigación para dar un área completamente coloreada. Sin embargo cabe destacar que solamente en el centro de dicho cuadrado coincide con la concentración de (PM<sub>10</sub>) representada por el color, es decir, en el centro se encuentra el receptor.

## 8. RESULTADOS OBTENIDOS

### 8.1. Graficas de cálculos y mediciones en general



\*\*

Gráfico 1:

Resultados de cálculos y mediciones para Guatemala Ciudad 1996

Gráfico 2:

Recta de regresión para el año 1996

Konzentrationen [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ] = Concentración [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ]
Messstellen = Medidas Establecidas
Messungen = Medidas
Berechnungen = Sumatoria
Berechnete Werte [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ] = Valores Sumados

\*\* Nota: las abreviaturas del gráfico No. 1 se detallan en la página 51

## 8.2. Resumen de los análisis de regresión de 1996 – 1999

Año	1996	1997	1998	1999
Coefficiente de Correlación R	0.965	0.963	0.975	0.968
Recta	$Y = 1.08X - 2.3$	$Y = 1.02X - 2.1$	$Y = 1.05X - 2.2$	$Y = 1.01X - 2.8$
Concentración referencia (PM <sub>10</sub> ) $\mu\text{g}/\text{m}^3$	18.0	16.5	19.5	16.9

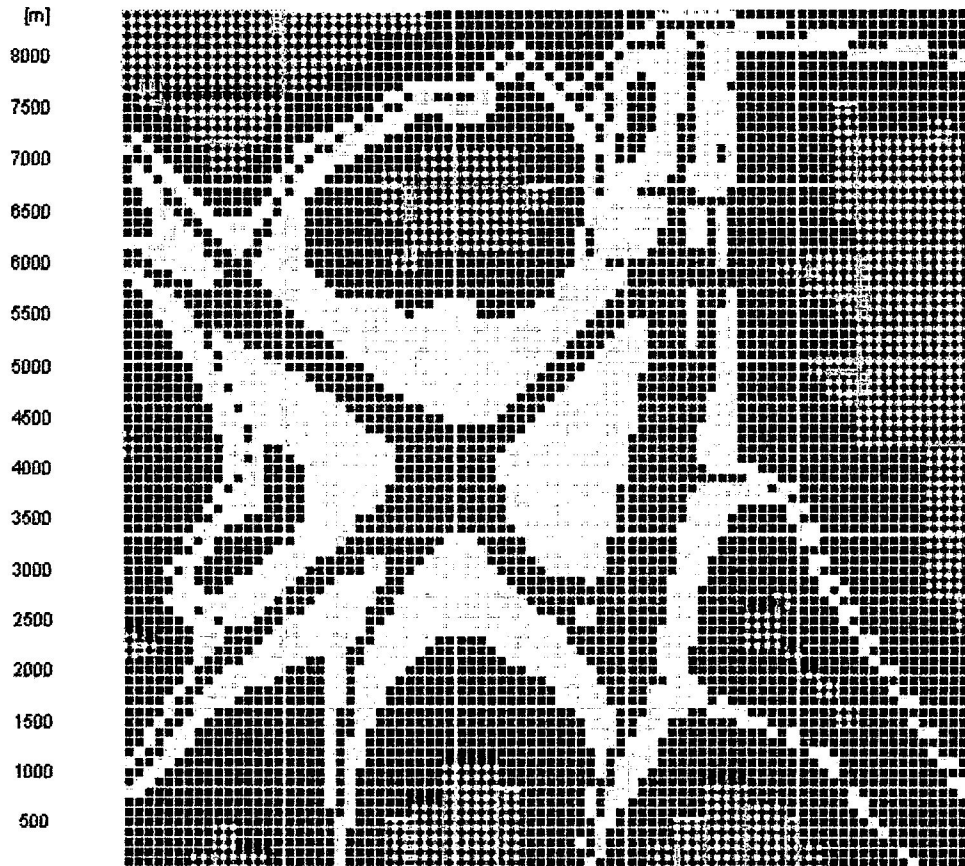
Cuadro 8.2.1. Resumen de los análisis de regresión lineal para 1996 hasta 1999.

### 8.3 Extrapolaciones

Grafico No 3. Situación de la contaminación por PM<sub>10</sub> en Ciudad de Guatemala en 1996

**El significado de la escala de colores:**

- Verde Claro: Margen de inmisiones de (PM<sub>10</sub>) de 0 – 20 µg/m<sup>3</sup>.
- Verde Oscuro: Inmisiones entre 20 y 30 µg/m<sup>3</sup>.
- Amarillo: Inmisiones entre 30 y 50 µg/m<sup>3</sup>.
- Rojo: Partes del área investigada donde se sobrepasa el valor guía de 50 µg/m<sup>3</sup>.

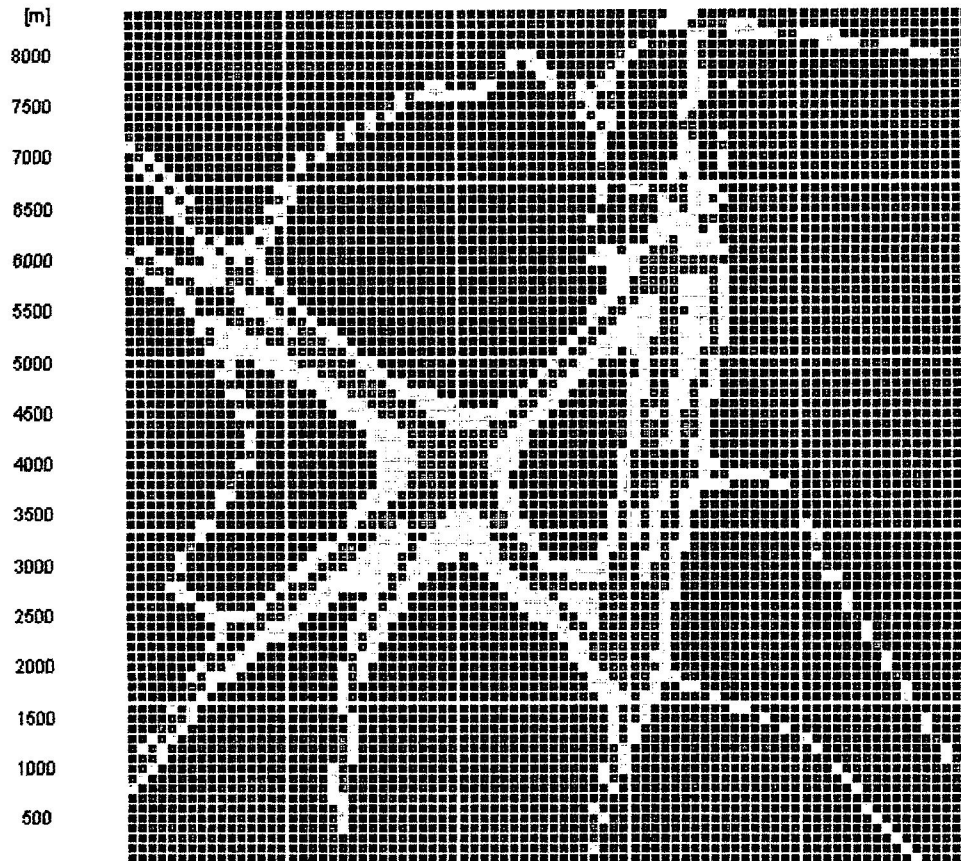


Largo v ancho al cuadrado

Grafico No 4. Situación de la contaminación por  $PM_{10}$  en Ciudad de Guatemala en 1997

**El significado de la escala de colores:**

- Verde Claro: Margen de inmisiones de ( $PM_{10}$ ) de 0 – 20  $\mu g/m^3$ .
- Verde Oscuro: Inmisiones entre 20 y 30  $\mu g/m^3$ .
- Amarillo: Inmisiones entre 30 y 50  $\mu g/m^3$ .
- Rojo: Partes del área investigada donde se sobrepasa el valor guía de 50  $\mu g/m^3$ .



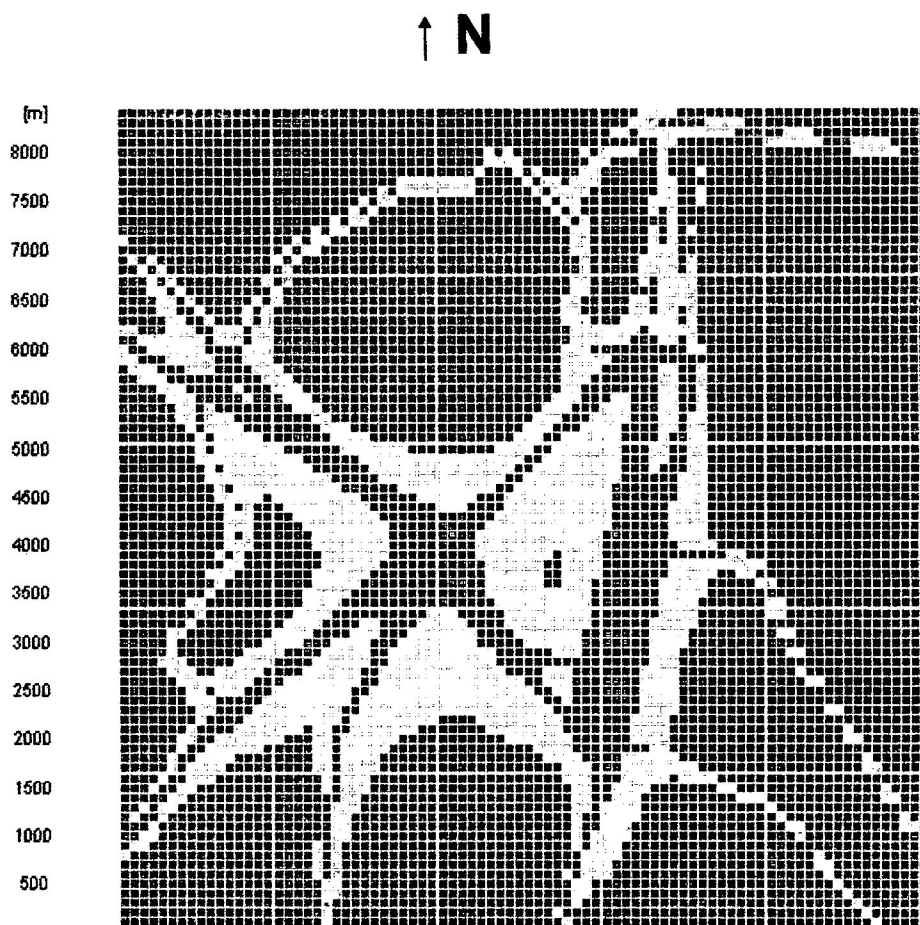
Largo v ancho al cuadrado

Grafico No 5. Situación de la contaminación por  $PM_{10}$  en Ciudad de Guatemala en 1998

**El significado de la escala de colores:**

- Verde Claro: Margen de inmisiones de ( $PM_{10}$ ) de 0 – 20  $\mu g/m^3$ .
- Verde Oscuro: Inmisiones entre 20 y 30  $\mu g/m^3$ .
- Amarillo: Inmisiones entre 30 y 50  $\mu g/m^3$ .
- Rojo: Partes del área investigada donde se sobrepasa el valor guía de 50  $\mu g/m^3$ .

El año meteorológico 1998 fue caracterizado por el fenómeno "El Niño", cuyas consecuencias para la contaminación atmosférica son visibles en el gráfico.

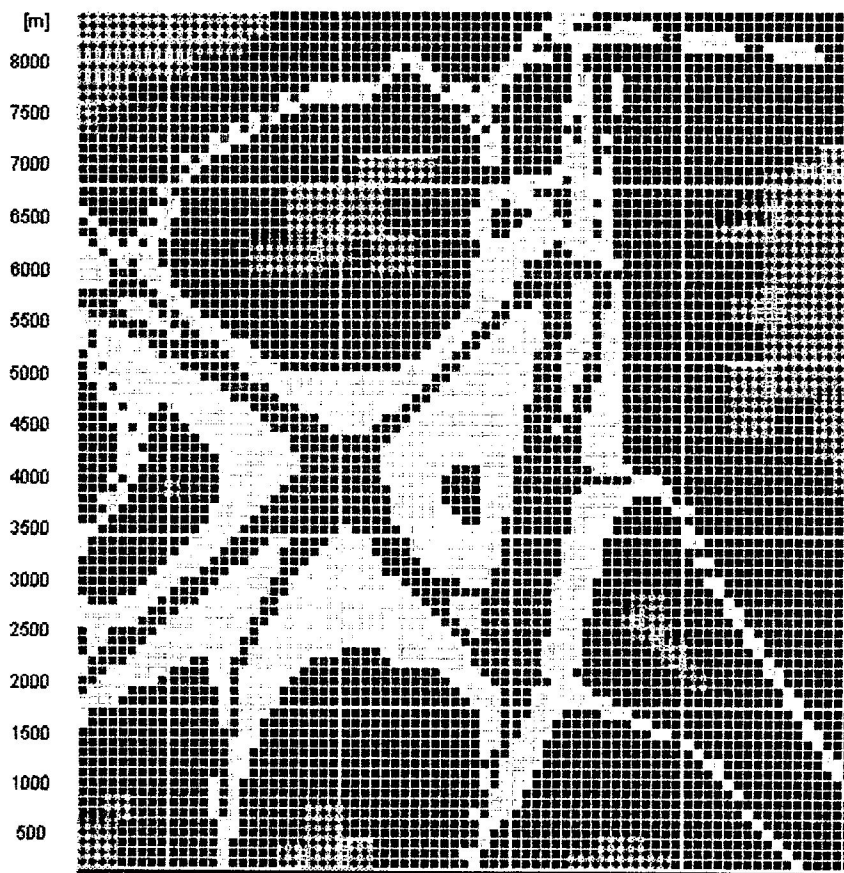


Largo v ancho al cuadrado

Grafico No 6. Situación de la contaminación por  $PM_{10}$  en Ciudad de Guatemala en 1999

**El significado de la escala de colores:**

- Verde Claro: Margen de inmisiones de ( $PM_{10}$ ) de 0 – 20  $\mu g/m^3$ .
- Verde Oscuro: Inmisiones entre 20 y 30  $\mu g/m^3$ .
- Amarillo: Inmisiones entre 30 y 50  $\mu g/m^3$ .
- Rojo: Partes del área investigada donde se sobrepasa el valor guía de 50  $\mu g/m^3$ .



Largo v ancho al cuadrado

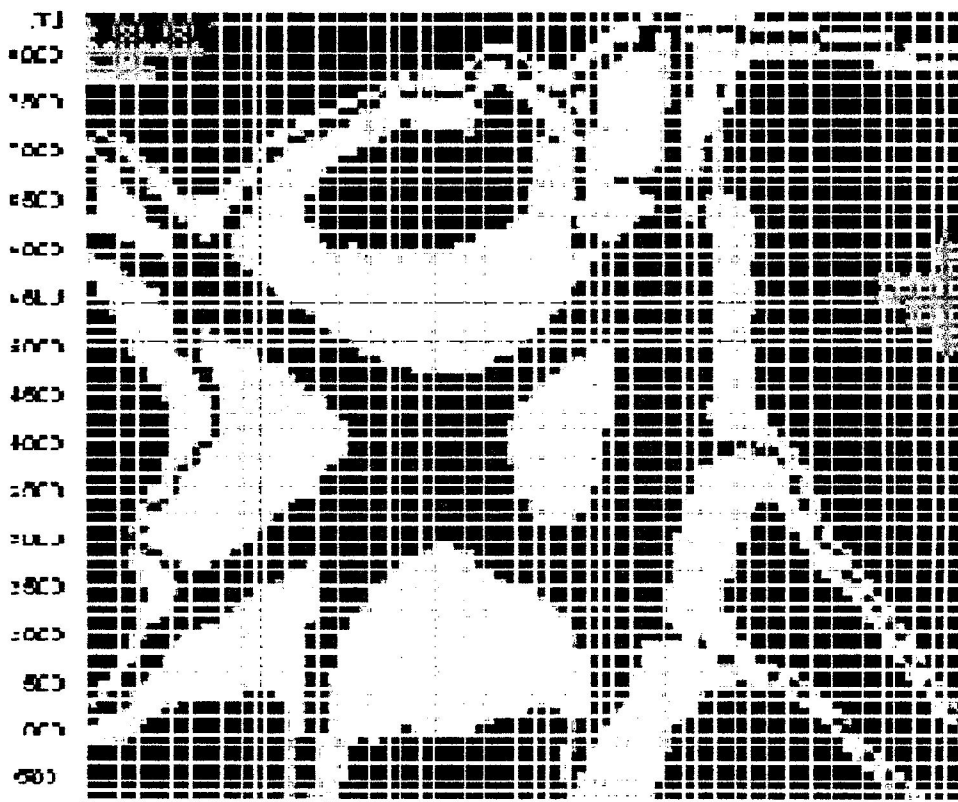
#### 8.4. Pronósticos en dos escenarios

Gráfico No 7. Situación en el futuro del Escenario 1(año 2005)

##### El significado de la escala de colores:

- Verde Claro: Margen de inmisiones de ( $PM_{10}$ ) de 0 – 20  $\mu g/m^3$ .
- Verde Oscuro: Inmisiones entre 20 y 30  $\mu g/m^3$ .
- Amarillo: Inmisiones entre 30 y 50  $\mu g/m^3$ .
- Rojo: Partes del área investigada donde se sobrepasa el valor guía de 50  $\mu g/m^3$ .

↑ N



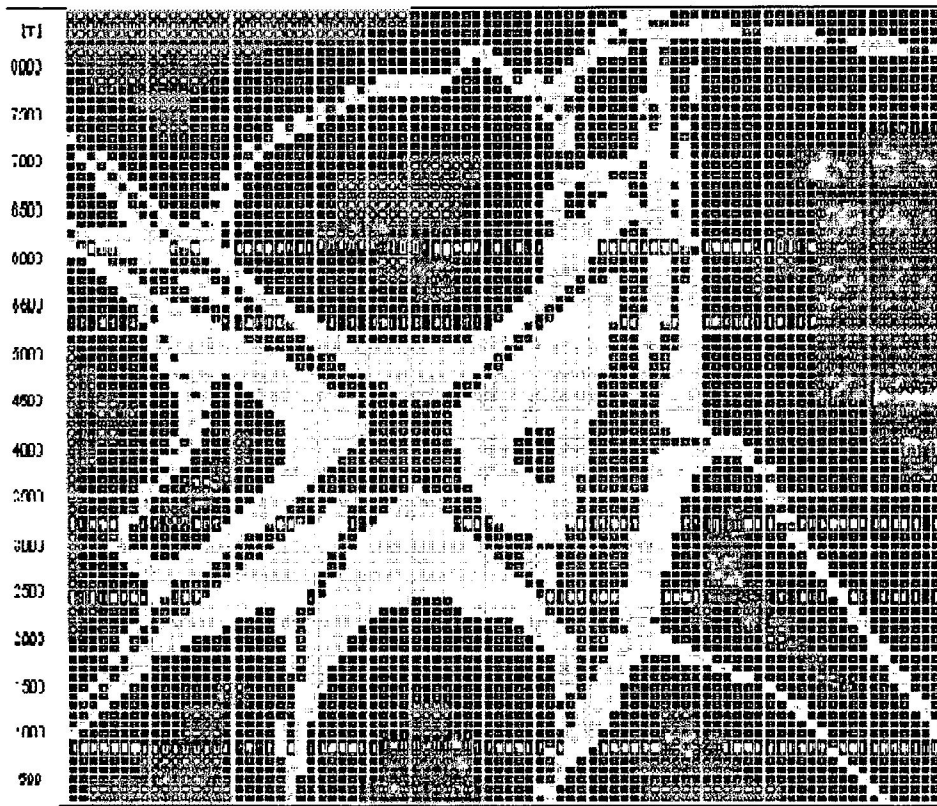
Largo v ancho al cuadrado



Gráfico No. 8. . Situación en el futuro del Escenario 2(año 2005)

**El significado de la escala de colores:**

- Verde Claro: Margen de inmisiones de ( $PM_{10}$ ) de 0 – 20  $\mu g/m^3$ .
- Verde Oscuro: Inmisiones entre 20 y 30  $\mu g/m^3$ .
- Amarillo: Inmisiones entre 30 y 50  $\mu g/m^3$ .
- Rojo: Partes del área investigada donde se sobrepasa el valor guía de 50  $\mu g/m^3$ .



Largo y ancho al cuadrado

## 9. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En el gráfico 1 se relacionan para el año 1996 los valores medidos con aquellos calculados por el modelo IMMPROG en forma de gráfico de barras. Los resultados de los cálculos son un poco más altos, pero se trata de una buena concordancia. El gráfico 2 demuestra el análisis de regresión para los pares de datos del año 1996, comprobando que todos los valores están dentro del margen de divergencia del 15% que proviene del margen de error del método de medición. La buena correlación está reflejada por el coeficiente de correlación  $R = 0.965$  y por la ecuación lineal. Siendo 0.96 un coeficiente aceptable para el programa.

Es importante subrayar que la buena correlación depende en gran parte del sitio USAC, el cual en su calidad de punto de referencia es el único lugar cuya contaminación se distingue por las bajas concentraciones de contaminación. La variabilidad sobre el margen de las concentraciones no es muy amplia, lo que se mejoró a partir del año 1997 con la incorporación de un nuevo sitio adicional, INSIVUMEH como otro sitio de baja contaminación (al menos en cuanto al  $(PM_{10})$ ).

En el Grafico No. 3 la situación se presenta grave ya que no hay zonas de margen de emisión menores a  $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , y grandes partes del área de investigación lucen en los colores amarillo y rojo. Esto está reflejado en la alta concentración promedio de  $46.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . El aumento de las inmisiones sin cambio de las emisiones se atribuye solamente en pequeñas partes al aumento de la concentración de referencia  $18 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , mientras  $4 \mu\text{g}/\text{m}^3$  pueden ser explicados por las condiciones desfavorables del clima durante el año 1996. Eso no quiere decir que el clima causó o transportó dicha contaminación adicional a la ciudad, sino que es una prueba de que las condiciones atmosféricas (precipitación pluvial, erosión y vientos) no permitían que las emisiones escaparan en la misma magnitud que en años posteriores hacia los alrededores de la ciudad capital.

Para el año de 1997 se puede ver en el Gráfico No. 4 grandes partes del área investigada aparecen en color verde claro, quiere decir, con una concentración de (PM<sub>10</sub>) menor a 20 µg/m<sup>3</sup> como promedio anual, y otras partes extensas del área aparecen en verde oscuro. Sin embargo se pueden observar sin mayores conocimientos de la ciudad las arterias principales de la red vial, considerando que los colores amarillo y rojo coinciden con las grandes carreteras, en cuyo alrededor sí existe un problema grande de contaminación atmosférica por (PM<sub>10</sub>). La concentración promedio de PM<sub>10</sub> en todo el área investigada es de 30.9 µg/m<sup>3</sup>, de los cuales 16.5 µg/m<sup>3</sup> provienen de la concentración de referencia. Evidentemente el panorama en este mapa es mejor al del año 1996.

Para el año 1998 se nota en el Gráfico No. 5 un aumento de la concentración de (PM<sub>10</sub>) promedio anual a 29.9 µg/m<sup>3</sup>. En vista de la concentración de referencia promedio de 19.5 µg/m<sup>3</sup>, 10 µg/m<sup>3</sup> se atribuyen a la contaminación complementaria a raíz de las fuentes móviles, lo que es similar a la situación en 1996. En comparación con el año 1997, se notan zonas amarillas y rojas de tamaño aumentado, el valor guía de la OMS se sobrepasa en grandes zonas. El fenómeno "El Niño" tuvo mucho impacto en la contaminación por (PM<sub>10</sub>) en la ciudad, además que la meteorología que también fue significativa en 1996

En el Gráfico No. 6 no se nota mayor cambio con respecto al contaminante (PM<sub>10</sub>) en la ciudad, ya que se encuentra por arriba de 20 µg/m<sup>3</sup>, a pesar de tener un promedio de referencia del 16.9 µg/m<sup>3</sup> se vio afectado en 2 µg/m<sup>3</sup>, respecto al valor guía. Debe mencionarse que el clima o las condiciones meteorológicas de dicho año no hayan afectado, sino que fue debido a que las emisiones fueron mayores.

Para la Ciudad de Guatemala fue posible aprovechar el potencial del modelo de dispersión IMMPROG por completo, calculando también los pronósticos en dos escenarios para el año 2005. Para los escenarios se tomaron en cuenta los datos meteorológicos del año 1999, combinándolos con las expectativas y variables como el aumento de la flota vehicular por año y de la creación de nuevas redes viales

dentro de la ciudad. Los dos escenarios se distinguen en cuanto a la situación de las emisiones.

El primer escenario (Gráfico No. 7) consiste en la suposición de que no se tomará ninguna medida para disminuir las emisiones ya sea por parte de los usuarios de vehículos o del gobierno durante los próximos cinco años. Este escenario deja subir la concentración de referencia de ( $PM_{10}$ ) hasta  $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

En el escenario dos (Gráfico No. 8) Si la revisión técnica de vehículos y el control de emisiones entra nuevamente en vigencia, lo que significa que cada vehículo debe de pasar anualmente la prueba de emisiones. Además de renovar la flota del transporte urbano y se regule la importación de vehículos usados, para que no entre ningún vehículo mayor a tres años al país, aunque el porcentaje de esta acción es bajo. Eso reducirá la edad promedio de los automóviles por cuatro y de los camiones por dos años, lo que lleva a factores de emisión más bajos. En total se reducirá el crecimiento de la concentración de referencia en un 10% a  $23 \mu\text{g}/\text{m}^3$  ( $PM_{10}$ ).

Los dos escenarios, brindan información sobre la futura contaminación por ( $PM_{10}$ ) y con las aproximaciones debidas si se llevase el control adecuado de la emisiones, una solución para la contaminación en la ciudad de Guatemala.

Una consecuencia de los resultados obtenidos en la presente investigación es el entendimiento y la necesidad de mantener una planificación de la red de monitoreo ya que tiene que llenar ciertos requisitos para que luego se pueda aplicar un modelo de dispersión. La concentración de referencia es un parámetro de mucho peso dentro del modelo, para obtener buena información al respecto, la base de datos proveniente de la red de monitoreo tiene que ser más amplia. Se debe evitar un numeroso grupo de sitios en lugares de alta contaminación, es decir en la orilla de carreteras principales, ya que en la ubicación de los sitios es la mejor garantía

para que la red cubra todos los niveles de contaminación existentes en el área de estudio.

Del área de investigación se tuvo un mapa en el cual se asumieron algunos parámetros para los cuales fue necesario estimar valores, ya que la ciudad de Guatemala no es del todo plana, sin embargo, para este modelo se asumió el sitio completamente plano. Se aproximó solamente con el efecto de obtener un mapa más completo de la Ruta el Naranjo y Avenida Atanasio Tzul. Es importante mencionar que para el modelo se asumió que todas las calles eran de dos carriles. Estas estimaciones se debieron a falta de información para no alterar en gran parte los cálculos que efectúa el modelo IMMPROG.

El crecimiento del tráfico en un 4 % anual para la ciudad es una razón más por la cual el espacio físico estará limitado en los próximos 5 años como lo muestran los dos escenarios con visión futura para el año 2005. Además, la variabilidad de las emisiones durante cada día presentará un incremento debido a los cambios y ajustes en horarios de actividades diarias (trabajo, estudio, transporte, seguridad, etc) y al aumento de la flota vehicular.

En las presentaciones de los cuatro últimos años antes del 2000 se pueden visualizar y comparar entre ellos mismos las situaciones que se han desarrollado dentro de nuestra ciudad. Estas extrapolaciones se pueden discutir una por una, véase para 1996 se observó una situación grave en alta concentración promedio de  $46.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , donde el aumento de concentración de referencia fue de  $18 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , y de una estimación de  $4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , por causas naturales.

## 10. CONCLUSIONES

10.1 El uso del modelo IMMPROG permite obtener la situación pasada y actual de la contaminación por material particulado en suspensión en su fracción respirable  $PM_{10}$ , basándose en valores meteorológicos y de contaminación determinados y medidos experimentalmente.

10.2 El uso del modelo IMMPROG permite obtener el pronóstico de la situación de la contaminación por material particulado en suspensión en su fracción respirable  $PM_{10}$ , con variaciones de un 10 % de crecimiento en la concentración de referencia para una situación adecuada para la ciudad en un futuro y de un 20 % de crecimiento en la concentración de referencia para una situación grave para la ciudad en un futuro.

10.3 Existe una correlación aceptable entre los valores de la concentración de inmisión obtenidos por IMMPROG y los valores de la concentración de inmisión medidos a través del Laboratorio de Monitoreo del Aire.

10.4 La correlación es buena ya que depende del sitio USAC de medición, que en su calidad de punto de referencia es el único lugar cuya contaminación se distingue completamente de los demás sitios en la red, por los valores bajos de dicho contaminante.

10.5 Los escenarios de los años 1996, 1997 y 1998 permiten ver el comportamiento real de la contaminación a través de un aumento constante de la concentración de inmisión por año, con una variación en la concentración de referencia de 16.5 a 19.5  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

10.6 El escenario base como actual fue el de 1999, en el cual se dio una variación de la concentración de referencia de 16.9  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , esto en conjunto con las condiciones meteorológicas, expectativas y variables de flota vehicular por año y creación de nuevas redes viales, permitió la obtención de escenarios futuros.

10.7 El escenario para el año 2005 indica que si no se toma ninguna medida para contrarrestar la contaminación por material particulado en suspensión en su fracción respirable  $\text{PM}_{10}$ , la concentración de referencia aumentará hasta 25  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

10.8 El escenario para el año 2005 indica que si se toman medidas de control y aseguramiento de la calidad del aire en la ciudad la contaminación por material particulado en suspensión en su fracción respirable  $\text{PM}_{10}$ , la concentración de referencia disminuiría en un 10% a 23  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , ya que no se puede evitar tomar el factor de aumento de flota vehicular.

10.9 Por medio de la simulación se observó la situación en los últimos cuatro años (1996, 1997, 1998 y 1999), observándose como afectan las condiciones meteorológicas y emisiones de fuentes durante cada año.

10.10 El pronóstico con el modelo IMMPROG no es solo un instrumento técnico para el cálculo y estudio del comportamiento de los contaminantes atmosféricos, sino que es un instrumento para la conciencia social que puede crear en una comunidad que vive con un problema de contaminación ambiental.



## **11. RECOMENDACIONES**

11.1 Planificar una red de monitoreo del aire, en la que se conozcan y se tomen en cuenta los requerimientos del tipo de modelo de dispersión que luego se utilizará, unificando las entidades gubernamentales y académicas para su creación.

11.2 Comunicar los resultados del presente estudio a las autoridades relacionadas para ejecutar los pasos necesarios para mejorar la calidad del aire, ya que los capitalinos estarán obligados en el futuro a vivir con un aire mucho más contaminado y con consecuencias graves para la salud.

11.3 Controla por medio de medidas adecuadas, como el mantenimiento de la flota vehicular y renovación de los mismos, ampliaciones y pasos a desnivel en calles, nuevos accesos a puntos congestionados, transporte publico actualizado y creación de avenidas peatonales

11.4 Aplicar el modelo de dispersión IMMPROG de la contaminación atmosférica que se encuentra en el Laboratorio de Monitoreo del Aire, Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia, USAC, a través de investigaciones con otros contaminantes medidos, ya que es un instrumento que podrá en un futuro servir para poder tomar decisiones adecuadas por parte de las autoridades correspondientes.

11.5 En cuanto a las medidas de control para obtener un futuro mas adecuado, son el mantenimiento de la flota vehicular y renovación de los mismos, ampliaciones y pasos a desnivel en calles, nuevos accesos a puntos congestionados, transporte publico actualizado y creación de avenidas peatonales.

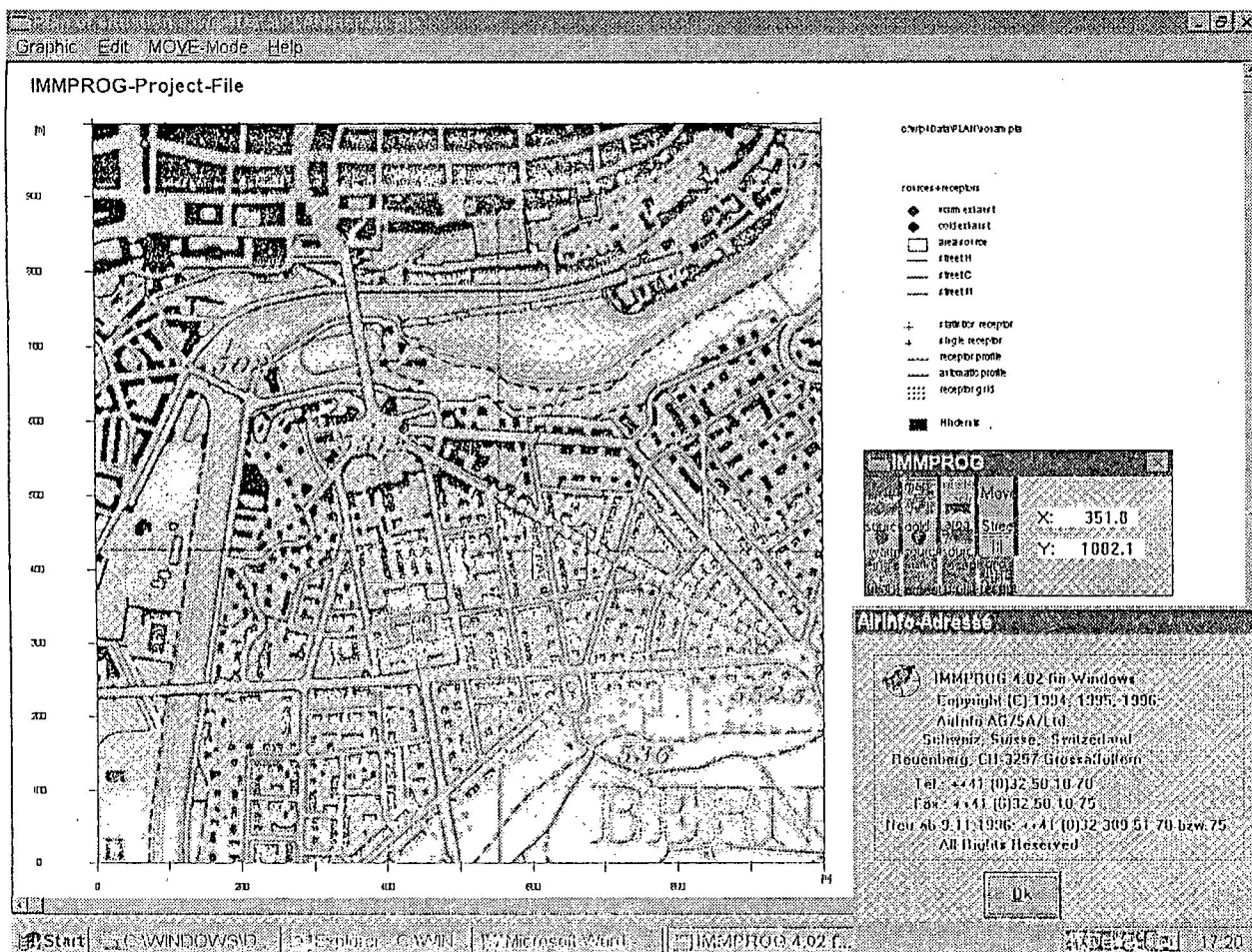
## 12. BIBLIOGRAFÍA

- 12.1 SWISSCONTACT, Seminario "Simulación por Computadora de la Dispersión de Contaminantes Atmosféricos", 2000; 1-11.
- 12.2 IMMPROG, versión 4.02 for Windows, Immission-Forecasting of Air Pollutants from point-, line- and Area-sources. User Manual, 1996; 3-5:38.
- 12.3 IMMPROG, versión 4.02 for Windows, Immission-Forecasting of Air Pollutants from point-, line- and Area-sources.Theory, 1996; 2-5:10-32.
- 12.4 TA-LUFT, Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft, Technical Instructions on Air Quality Control, 1986; 122-133.
- 12.5 INSIVUMEH, Climatología y Meterología, 1980; 70-75: 194-205.
- 12.6 NAVARRA, J.G. Atmosphere, Weather and Climate: An Introduction to Meteorology, 1979; 217-240: 411-444.
- 12.7 HANNA, S. R., Briggs, G. A., Hosker, R. P. Jr., 1982: Handbook on Atmospheric Diffusion. Technical Information Center. U. S. Department of Energy.
- 12.8 FILLIGER, P., 1986: Die Ausbreitung von Luftschadstoffen. Modelle und ihre Anwendung in der Region Biel. Diss. Geogr. Institut, Univ. Bern. Geographica Bernensia G14.
- 12.9 AXENFELD, F., Janicke, L, Meeini, H., Luhring, P. G; Stern, R: Prufung der im Entwurf 1981 zur Aenderung der TA-Luft festgelegten Begrenzung der Zusatzbelastung und weitere Untersuchungen zur Formulierung des Ausbreitungsmodells der TA-luft, Dornier-System GMBH, im Auftrag des Umweltbundesamtes, Bericht-Nr 10402566/02, 1983, Deutschland.
- 12.10 ESTERMANN, A., 1990: Optimierung eines Ausbreitungsmodells fur Linienquellen durch Vergleich mit Immissionsmessungen an der N1 bei Kirchberg Lizentiat Geogr. Institut, Univ. Bern.
- 12.11 RAO, S. T. And Keenan, 1980: Suggestions for Improvement of the EPA-HIWAY Model. In: Journal of the Air Pollution Control Association, Vol 30, No. 3: 247-256.
- 12.12 FILLIGER, P., Troxler, F. Ausbreitung und Luftschadstoffen Modelles, Institut, Univ. Bern. 1986, Geographica Bernensia G14.

- 12.13 RICKLI, B., Filliger, P., Troxler, F. X., Pfeiter, R., Brunner, T., Salvisberg E., 1989: Das Ausbreitungsklima der Inneerschweiz. Geogr. Institut. Univ. Bern. 2 Bande.
- 12.14 GARAVITO, F., Ingeniero-Jefe del Area de Climatología, Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (INSIVUMEH) Guatemala, Entrevista, 1999.
- 12.15 NABHOLZ M., HANGARTNER M., Modelling of Air Pollution in Central American Cities, Institute of Higiene and Applied Erfonomics, ETH Zurcí, ProECO/Swisscontact San Salvador, 1995.
- 12.16 BLASER M., Seminario "Simulación por Computadora de la Dispersión de Contaminantes Atmosféricos, Swisscontact, San Salvador, 1998.
- 12.17 ALVARADO, T. et. al. Informe Final deL Monitoreo del Aire en la Ciudad de Guatemala, 1999.
- 12.18 MARTINEZ, A. P. Romieu Isabelle, Introducción al Monitoreo Atmosférico, Centro Panamericano de Ecología Humana y Salud, México, 1997 pp 39-126.
- 12.19 FALCON B. Métodos de Laboratorio para la Determinación de Contaminantes Atmosféricos. México: Depto. De energia, División de Ciencias Básicas e ingeniería. Universidad Autónoma Metropolitana; 1995.
- 12.20 GLYNN H. J. y Heinke G. W. Ingeniesría Ambiental, 2da. Edición. Prentice May Hispanoamericana, S. A. México, 1996.
- 12.21 OLIVA, P. E., Informe Anual 200 Proyecto Monitoreo de la Calidad del Aire en la Ciudad de Guatemala, Guatemala C. A., febrero 2001.

(Anexo 1)

“Modelo IMMPROG de la Ciudad de Berna (Suiza),  
Basado en la concentración de NO<sub>2</sub>”



(Anexo 2)

**Modelo de la Contaminación del Aire por NO<sub>2</sub>  
en una Ciudad de América Central**

**Modelling of Air Pollution in Central American Cities**  
 Mathias Nebholz, Markus Hengstler, Institute of Hygiene and Applied Ergonomics, ETH Zurich  
 Prof. Dr. Swisscontact San Salvador


Modelling is an important tool in the hierarchy of air pollution assessment

1. Emission inventory
2. Modelling
3. Simple monitoring
4. Automatic monitoring

The aims of the study were:

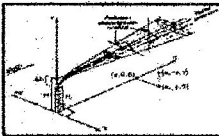
- Extrapolation of monitoring data to whole city area
- Prognosis of future traffic scenarios

Traffic factors



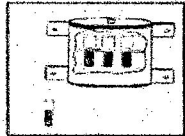
number of vehicles  
velocity of traffic  
emission factors

Meteorological factors

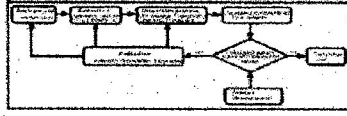



wind speed/direction  
cloudiness  
solar radiation

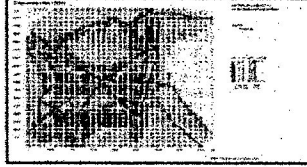
Air pollution monitoring




diffusive sampling  
NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>  
Benzene








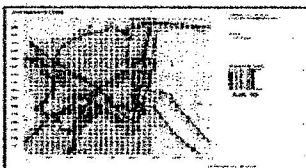
Situation in the year 1995



Map of Guatemala City with NO<sub>2</sub> Measurements



Situation in the year 2020  
without technical improvement



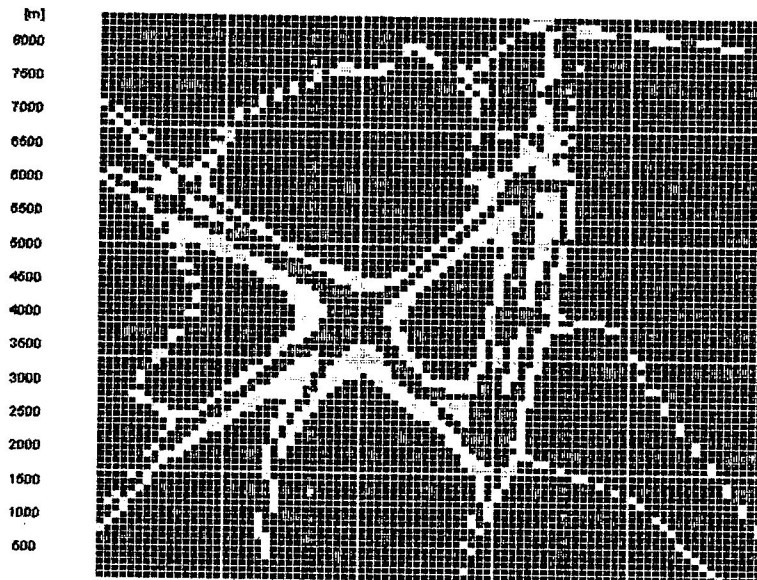
Situation in the year 2020  
with technical improvement

Technical parameters, such as emission factors, fleet size, vehicle type to be applied to Central American conditions. Improvement of car technology alone is not sufficient to solve air quality. Traffic planning has also to be taken into account.

**(Anexo 3)**

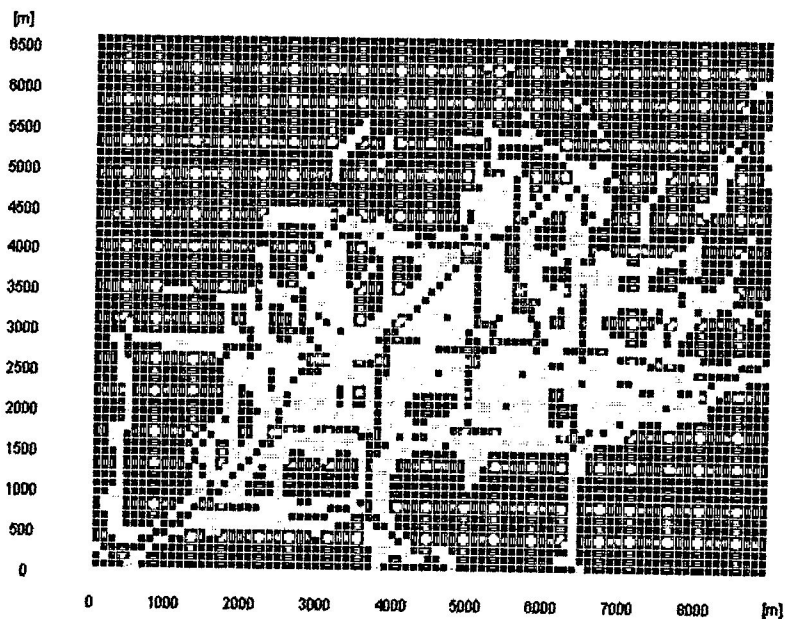
**Ciudad de Guatemala**

**“Modelo por computadora de la contaminación por NO<sub>2</sub>  
en la Ciudad de Guatemala” (Referencia 16)**



**Ciudad de San Salvador**

**“Modelo por computadora de la contaminación por NO<sub>2</sub>  
en la Ciudad de San Salvador” (Referencia 16)**



(ANEXO 4)

PARTICULAS TOTALES EN SUSPENSION EN SU FRACCION RESPIRABLE PM10 DURANTE  
LOS AÑOS 1996 A 2000

µg/m3

1996

Sitio	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	PA
Avenida Petapa	nm	nm	nm	nm	Nm	nm	131	179	172	169	147	116	152
Centro Histórico	nm	nm	nm	nm	Nm	nm	74	63	41	38	47	78	57
Trébol	nm	nm	nm	nm	Nm	nm	102	246	180	119	137	115	143
Calzada San Juan	nm	nm	nm	nm	Nm	nm	62	121	157	84	67	75	94
Calzada Aguilar Batres	nm	nm	nm	nm	Nm	nm	57	106	86	94	95	120	93
USAC	nm	nm	nm	nm	Nm	nm	33	79	60	23	54	50	50
Promedio Ciudad	nm	nm	nm	nm	Nm	nm	76	132	116	88	91	92	

1997

Sitio	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	PA
Avenida Petapa	130	113	66	115	153	115	88	117	126	134	127	49	111
Centro Histórico	14	45	36	69	26	18	45	15	90	3	76	nm	40
Trébol	123	132	131	120	221	189	85	nm	nm	nm	nm	nm	143
Calzada San Juan	23	84	182	133	48	48	17	164	87	77	97	109	89
Calzada Aguilar Batres	46	86	99	117	197	33	30	57	101	80	32	153	86
USAC	59	101	52	85	70	15	60	58	26	11	10	nm	50
INSIVUMEH	nm	66	19	54	128	31	27	34	41	nm	nm	nm	50
Promedio Ciudad	66	90	84	99	120	64	50	74	79	61	68	104	

1998

Sitio	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	PA
Avenida Petapa	131	106	67	149	116	111	74	75	42	165	32	30	92
Centro Histórico	111	48	29	42	89	58	32	26	nm	158	87	68	68
Calzada San Juan	100	82	28	91	191	82	45	66	13	54	181	59	83
Calzada Aguilar Batres	71	53	135	70	95	63	103	72	26	129	86	11	76
USAC	66	nm	28	82	Nm	53	45	8	36	142	3	53	52
Promedio Ciudad	96	72	57	87	123	73	60	49	29	130	78	44	

1999

Sitio	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	PA
Avenida Petapa	19	103	125	49	45	73	81	19	nm	40	101	nm	66
Centro Histórico	11	27	77	92	36	52	51	86	135	5	27	nm	55
Calzada San Juan	129	111	54	59	92	61	63	97	125	83	nm	67	86
Calzada Aguilar Batres	72	76	32	4	14	79	61	63	166	15	25	nm	55
USAC	57	81	102	nm	21	2	53	59	61	13	37	nm	49
Promedio Ciudad	58	80	78	51	42	53	62	65	122	31	48	67	

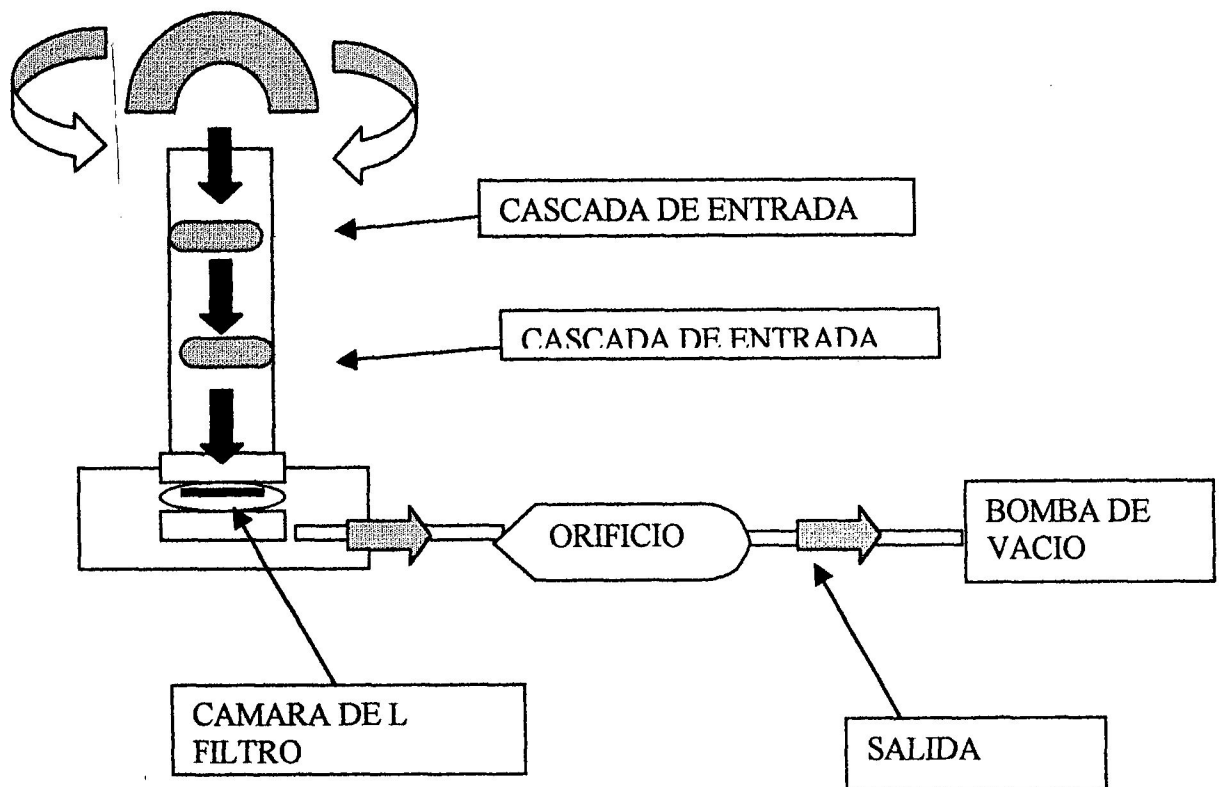
2000

Sitio	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	PA
Avenida Petapa	38	57	97	115	86	82	62	67	47	26	62	42	65.1
Centro Histórico	19	34	76	70	111	57	36	30	36	23	27	nm	47.2
Trébol	nm	nm	nm	nm	Nm	nm	nm	nm	nm	nm	nm	nm	nm
Calzada San Juan	54	74	150	156	192	103	77	63	102	87	92	nm	105
Calzada Aguilar Batres	69	55	113	77	123	109	45	nm	95	45	77	nm	80.8
USAC	27	35	66	50	37	36	13	21	38	27	33	16	33.3
INSIVUMEH	nm	nm	42	85	72	26	29	7	56	30	38	9	39.4
INCAP	nm	nm	50	89	99	101	81	41	58	74	76	39	70.8
Promedio Ciudad	41.4	51	84.9	91.7	103	73.4	49	38.2	61.7	44.6	57.9	26.5	

nm: no muestreado

(Anexo 5)

EQUIPO DE MUESTREO PARA PM<sub>10</sub>  
(IMPACTOR DE PM<sub>10</sub>)





(Anexo 6) Archivo de datos para la construcción del mapa de la Ciudad de Guatemala

Street	NR	Xa	Ya	Xe	Ye	Topography	Width	Street/Cut	Width of reservation	Number of Lanes	Spur6-	Mateo-	6-domestic	8 =	12=Size	12=Size	16=no
											Emission	Nr.	heating	7= traffic	in Graphic cutting	in Graphic cutting	17=street in cutting
Highway-Strasse	1	2303	2046	2063	0	1500	21	21	6	2	0	0	1	7	8	12	12
Highway-Strasse	2	2292	2062	3284	3928	1500	21	21	6	2	0	0	1	7	8	12	12
Highway-Strasse	3	3290	3928	3537	3966	1500	21	21	6	2	0	0	1	7	8	12	12
Highway-Strasse	4	805	2043	3338	4120	1500	29	29	6	2	0	0	1	7	8	12	12
Highway-Strasse	5	821	5615	2893	4497	1500	20	20	2	2	0	0	1	7	8	12	12
Highway-Strasse	6	1223	5878	2838	4524	1500	20	20	2	2	0	0	1	7	8	12	12
Highway-Strasse	7	2872	4510	3338	4120	1500	30	30	6	2	0	0	1	7	8	12	12
Highway-Strasse	8	3961	4458	3338	4120	1500	21	21	6	2	0	0	1	7	8	12	12
Highway-Strasse	9	5289	5995	3986	4463	1500	21	21	6	2	0	0	1	7	8	12	12
Highway-Strasse	10	3340	4140	3724	3603	1500	30	30	3	2	0	0	1	7	8	12	12
Highway-Strasse	11	3718	3614	3756	3416	1500	30	30	3	2	0	0	1	7	8	12	12
Highway-Strasse	12	3767	3416	4129	2934	1500	30	30	3	2	0	0	1	7	8	12	12
Highway-Strasse	13	4129	2950	4755	2161	1500	19	19	2	2	0	0	1	7	8	12	12
Highway-Strasse	14	5314	2987	4129	2939	1500	21	21	2	2	0	0	1	7	8	12	12
Highway-Strasse	15	5583	5621	4946	2084	1500	21	21	2	2	0	0	1	7	8	12	12
Highway-Strasse	16	5303	5917	5577	5621	1500	21	21	2	2	0	0	1	7	8	12	12
Highway-Strasse	17	4755	2172	5188	2007	1500	21	21	2	2	0	0	1	7	8	12	12
Highway-Strasse	18	4755	2172	5188	2007	1500	21	21	2	2	0	0	1	7	8	12	12
Highway-Strasse	19	5182	2013	5709	4683	1500	38	38	20	2	0	0	1	7	8	12	12
Highway-Strasse	20	5967	5939	5635	4978	1500	38	38	20	2	0	0	1	7	8	12	12
Highway-Strasse	21	5709	4983	5824	4985	1500	38	38	20	2	0	0	1	7	8	12	12
Highway-Strasse	22	5325	6090	5967	5950	1500	21	21	2	2	0	0	1	7	8	12	12
Highway-Strasse	23	5325	6078	5297	5912	1500	11	11	0	2	0	0	1	7	8	12	12
Highway-Strasse	24	5818	6127	5462	5758	1500	11	11	0	2	0	0	1	7	8	12	12
Highway-Strasse	25	5692	7957	5391	5906	1500	11	11	0	2	0	0	1	7	8	12	12
Highway-Strasse	26	5303	5917	5385	5912	1500	8	8	0	2	0	0	1	7	8	12	12
Highway-Strasse	27	6103	7793	5635	5998	1500	11	11	0	2	0	0	1	7	8	12	12
Highway-Strasse	28	8500	7986	5451	8368	1500	22	22	4	2	0	0	1	7	8	12	12
Highway-Strasse	29	5998	8346	5648	7963	1500	11	11	0	2	0	0	1	7	8	12	12
Highway-Strasse	30	5648	7968	5692	7957	1500	11	11	0	2	0	0	1	7	8	12	12
Highway-Strasse	31	5451	8378	5385	8111	1500	22	22	4	2	0	0	1	7	8	12	12
Highway-Strasse	32	5374	8116	5155	8149	1500	22	22	4	2	0	0	1	7	8	12	12
Highway-Strasse	33	5149	8190	4672	7650	1500	22	22	4	2	0	0	1	7	8	12	12
Highway-Strasse	34	4946	7820	4672	6076	1500	14	14	0	2	0	0	1	7	8	12	12
Highway-Strasse	35	4946	7820	4672	6076	1500	14	14	0	2	0	0	1	7	8	12	12
Highway-Strasse	36	4496	7850	4842	7244	1500	14	14	0	2	0	0	1	7	8	12	12
Highway-Strasse	37	4014	8023	4480	7661	1500	28	28	4	2	0	0	1	7	8	12	12
Highway-Strasse	38	4661	7872	4513	7628	1500	26	26	4	2	0	0	1	7	8	12	12
Highway-Strasse	39	3751	7891	3803	7634	1500	26	26	4	2	0	0	1	7	8	12	12
Highway-Strasse	40	3597	7845	3016	7961	1500	26	26	4	2	0	0	1	7	8	12	12
Highway-Strasse	41	2984	7961	1810	6981	1500	26	26	4	2	0	0	1	7	8	12	12
Highway-Strasse	42	1810	6962	1190	5813	1500	26	26	4	2	0	0	1	7	8	12	12
Highway-Strasse	43	3746	7902	4003	8034	1500	26	26	4	2	0	0	1	7	8	12	12
Highway-Strasse	44	1184	5818	823	5633	1500	26	26	4	2	0	0	1	7	8	12	12
Highway-Strasse	45	0	6153	827	5621	1500	22	22	2	2	0	0	1	7	8	12	12
Highway-Strasse	46	96	7198	1217	5879	1500	22	22	4	2	0	0	1	7	8	12	12
Highway-Strasse	47	828	5644	828	5418	1500	22	22	4	2	0	0	1	7	8	12	12
Highway-Strasse	48	823	5418	1333	4354	1500	22	22	4	2	0	0	1	7	8	12	12
Highway-Strasse	49	1327	4365	1327	4096	1500	22	22	4	2	0	0	1	7	8	12	12
Highway-Strasse	50	1316	4102	504	2907	1500	22	22	4	2	0	0	1	7	8	12	12
Highway-Strasse	51	499	2923	510	2824	1500	22	22	4	2	0	0	1	7	8	12	12
Highway-Strasse	52	510	2835	1228	2331	1500	22	22	4	2	0	0	1	7	8	12	12
Highway-Strasse	53	6762	1344	7058	1113	1500	22	22	4	2	0	0	1	7	8	12	12
Highway-Strasse	54	7058	1119	7557	439	1500	22	22	2	2	0	0	1	7	8	12	12
Highway-Strasse	55	5127	4096	5894	3905	1500	22	22	2	2	0	0	1	7	8	12	12
Highway-Strasse	56	5963	3915	6433	3877	1500	22	22	2	2	0	0	1	7	8	12	12
Highway-Strasse	57	6422	3983	8707	3724	1500	22	22	2	2	0	0	1	7	8	12	12
Highway-Strasse	58	8707	3729	7003	3005	1500	22	22	2	2	0	0	1	7	8	12	12
Highway-Strasse	59	8500	740	6982	3011	1500	22	22	2	2	0	0	1	7	8	12	12
Highway-Strasse	60	7961	446	8061	7	1500	30	30	6	2	0	0	1	7	8	12	12
Highway-Strasse	61	861	2043	290	1117	1500	30	30	6	2	0	0	1	7	8	12	12
Highway-Strasse	62	290	1124	0	877	1500	22	22	2	2	0	0	1	7	8	12	12
Highway-Strasse	63	6762	1344	5179	2036	1500	22	22	2	2	0	0	1	7	8	12	12
Highway-Strasse	64	5179	1987	4586	20	1500	56	56	40	2	0	0	1	7	8	12	12
Highway-Strasse	65	5998	8622	5000	6767	1500	2	2	0	2	0	0	1	7	8	12	12

(Anexo 6) Nombre de las Calles que se utilizaron para los escenarios

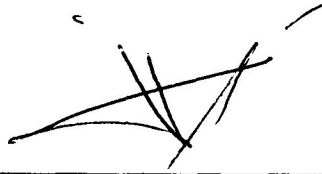
NOMBRES DE LAS CALLES

Street-I	NR	Xa	Ya	Xe	Ye	Code	Nombre
Hiway-Strasse	1	2303	2046	2063	0	R35	Calle Real de Petapa
Hiway-Strasse	2	2292	2062	3284	3928	R35	Calle Real de Petapa
Hiway-Strasse	3	3290	3928	3537	3888	R35	Calle Real de Petapa
Hiway-Strasse	4	905	2043	3338	4120	R54	Calzada Raul Aguilar Batres, de Anillo Periférico a Trebol
Hiway-Strasse	5	921	5615	2893	4497	R53	Calzada Roosevelt, de bifurcación Calle de San Juan Sacatepeques a Anillo Periférico
Hiway-Strasse	6	1223	5879	2838	4524	R52	Calle de San Juan Sacatepeques, de Anillo Periférico a Calzada Roosevelt
Hiway-Strasse	7	2872	4510	3338	4120	R21	Calzada Roosevelt, de Trebol a bifurcación Calle de San Juan Sacatepeques
Hiway-Strasse	8	3681	4458	3338	4120	R26	Avenida Bolívar
Hiway-Strasse	9	5289	5895	3888	4483	R26	Avenida Bolívar
Hiway-Strasse	10	3340	4140	3724	3603	R50	Boulevard Liberación
Hiway-Strasse	11	3718	3614	3756	3416	R50	Boulevard Liberación
Hiway-Strasse	12	3787	3418	4129	2934	R50	Boulevard Liberación
Hiway-Strasse	13	4129	2950	4755	2161	R55	Boulevard Liberación
Hiway-Strasse	14	5314	2687	4129	2839	R55	12 Calle
Hiway-Strasse	15	5583	5621	4948	2084	R28	7a Avenida
Hiway-Strasse	16	5303	5917	5877	5821	R28	Calle del Castillo
Hiway-Strasse	17	4755	2186	5457	5753	R29	6a Avenida
Hiway-Strasse	18	4755	2172	5188	2007	R55	Boulevard Liberación
Hiway-Strasse	19	5182	2013	5709	4883	R27	Avenida Reforma / 10a Avenida
Hiway-Strasse	20	5967	5939	5835	4978	R27	Avenida Reforma / 10a Avenida
Hiway-Strasse	21	5709	4883	5824	4885	R27	Avenida Reforma / 10a Avenida
Hiway-Strasse	22	5325	6060	5987	5950	R27	Avenida Reforma / 10a Avenida
Hiway-Strasse	23	5325	6076	5297	5912	R27	4a Avenida
Hiway-Strasse	24	5818	8127	5482	5758	R7	8a Avenida
Hiway-Strasse	25	5892	7957	5391	5906	R8	5a Avenida
Hiway-Strasse	26	5303	5917	5385	5912	R8	"Plaza"
Hiway-Strasse	27	6103	7793	5835	5988	R3	10A Avenida
Hiway-Strasse	28	8500	7986	5451	8368	R22	5a Calle (Calle Martí)
Hiway-Strasse	29	5696	8346	5848	7963	R8	5a Avenida
Hiway-Strasse	30	5848	7988	5892	7957	R8	5a Avenida
Hiway-Strasse	31	5451	8379	5385	8111	R22	Anillo Periférico / 2a Calle
Hiway-Strasse	32	5374	8118	5155	8149	R22	Anillo Periférico / 2a Calle
Hiway-Strasse	33	5149	8180	4872	7850	R22	Anillo Periférico / 2a Calle
Hiway-Strasse	34	4948	7820	4872	6076	R15	Avenida Elena
Hiway-Strasse	35	4881	6093	5297	5967	R15	18 Calle
Hiway-Strasse	36	4486	7850	4842	7244	R18	Anillo Periférico, por el sureste
Hiway-Strasse	37	4014	8023	4480	7881	R88	Anillo Periférico
Hiway-Strasse	38	4881	7872	4513	7828	R18	Anillo Periférico, por el este
Hiway-Strasse	39	3751	7891	3803	7834	R88	Anillo Periférico
Hiway-Strasse	40	3587	7845	3016	7861	R88	Anillo Periférico
Hiway-Strasse	41	2894	7981	1810	8981	R88	Anillo Periférico
Hiway-Strasse	42	1810	8992	1190	5813	R88	Anillo Periférico
Hiway-Strasse	43	3748	7902	4003	8034	R88	Anillo Periférico
Hiway-Strasse	44	1184	5818	823	5533	R34	Anillo Periférico
Hiway-Strasse	45	0	6153	927	5621	R23	Calzada Roosevelt, de Anillo Periférico a Antigua
Hiway-Strasse	46	98	7198	1217	5879	R25	Calle de San Juan Sacatepeques, de Anillo Periférico al Noroeste
Hiway-Strasse	47	828	5544	828	5418	R34	Anillo Periférico/17 Avenida
Hiway-Strasse	48	823	5418	1333	4354	R34	Anillo Periférico/17 Avenida
Hiway-Strasse	49	1327	4385	1327	4086	R34	Anillo Periférico/17 Avenida
Hiway-Strasse	50	1316	4102	504	2807	R34	Anillo Periférico/17 Avenida
Hiway-Strasse	51	499	2923	510	2824	R34	Anillo Periférico/17 Avenida
Hiway-Strasse	52	510	2835	1228	2331	R34	Anillo Periférico/17 Avenida
Hiway-Strasse	53	6762	1344	7058	1113	R32	Carretera Roosevelt
Hiway-Strasse	54	7058	1118	7557	439	R32	Carretera Roosevelt
Hiway-Strasse	55	5127	4086	5994	3905	R31	2a Calle
Hiway-Strasse	56	5983	3915	6433	3877	R31	2a Calle
Hiway-Strasse	57	6422	3883	6707	3724	R31	2a Calle
Hiway-Strasse	58	6707	3728	7003	3005	R31	2a Calle
Hiway-Strasse	59	8500	740	8992	3011	R31	2a Calle
Hiway-Strasse	60	7561	448	8081	7	R32	Carretera Roosevelt
Hiway-Strasse	61	881	2043	280	1117	R33	Calzada Raul Aguilar Batres
Hiway-Strasse	62	260	1124	0	877	R33	Calzada Raul Aguilar Batres
Hiway-Strasse	63	6762	1344	5179	2036	R32	Bulevar los Proceres
Hiway-Strasse	64	5179	1997	4588	20	R89	Avenida las Américas
Hiway-Strasse	65	5998	6622	5000	6787	R77	10A Calle

**(Anexo 7, en las paginas siguientes)**

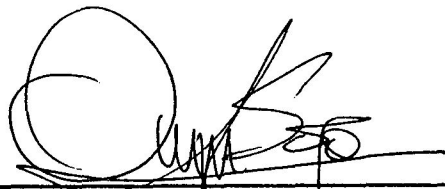
**EJEMPLO DE LA TABULACION DE LOS  
DATOS METEOROLÓGICOS UTILIZADOS PARA  
LOS CALCULOS, TABULADOS DESDE  
ENERO DE 1995 A DICIEMBRE DE 1999**





---

**Jhoni Frank Alvarez Castañeda**  
**Estudiante**



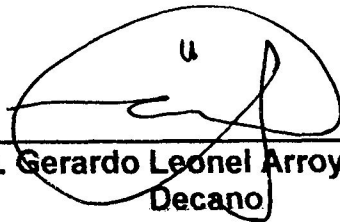
---

**Lic. Pablo Ernesto Oliva Soto**  
**Asesor**



---

**Dr. Alfredo Salvador Gálvez Sinibaldi**  
**Director**



---

**M.Sc. Gerardo Leonel Arroyo Catalán**  
**Decano**