

# Nueva metodología para el pronóstico de la dispersión de contaminantes a corta distancia.

*Alfredo Roque Rodríguez, Rosendo Alvarez Morales y Lourdes Alvarez Escudero*

Instituto de Meteorología. Cuba  
Teléfonos: 8670721 al 24, exts. 248,249,250, 288  
e-mail: aroque@met.inf.cu

## Resumen

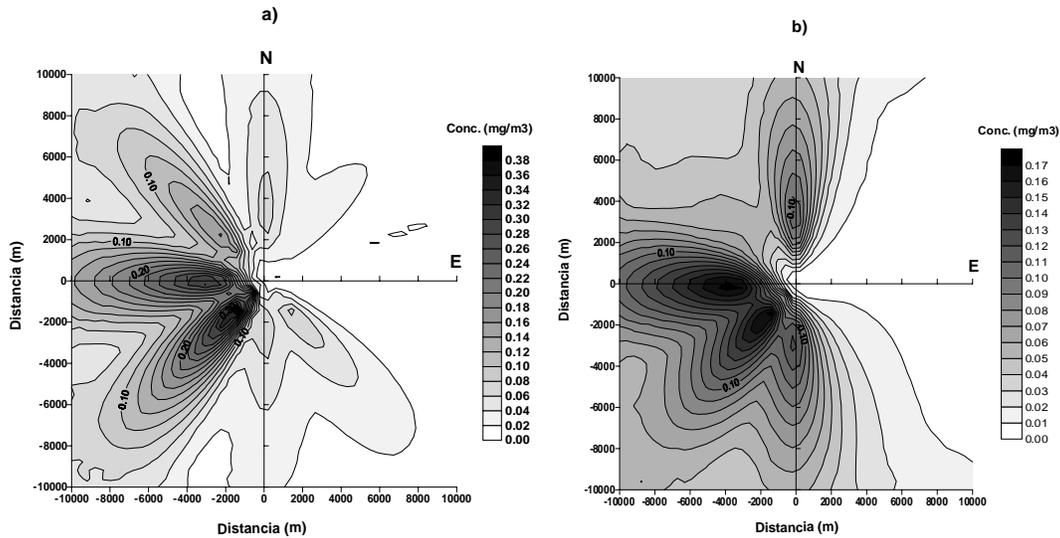
En este trabajo se muestra una nueva metodología para el pronóstico de dispersión de contaminantes teniendo en cuenta la influencia de la variabilidad natural del viento y el efecto de acumulación, haciendo uso del modelo registrado en la norma cubana de calidad del aire y las mejoras realizadas al mismo para pronósticos de 24 horas. Los resultados muestran que la inclusión de ambos efectos en el modelo de pronóstico mejora los cálculos del mismo, resultando muy útil en los estudios de impacto ambiental.

## INTRODUCCION

En un trabajo reciente (**Alvarez, 2000**), se diseñó una nueva metodología para determinar la tendencia de la variabilidad natural de dos variables cualesquiera simultáneamente, empleando la carta característica (también llamada matriz de doble entrada). Dos de estas variables fueron la rapidez y la dirección del viento. Esto a su vez permitió utilizar la carta característica de tendencia de rapidez vs rumbo del viento como dato de entrada en el modelo de dispersión regulado por la norma cubana (**NC, 1999**) a los fines de poder pronosticar la dispersión de contaminantes teniendo en cuenta la variabilidad natural del viento

Como resultado de este trabajo (**Roque, 2001**), mostró el cambio a que ha estado sujeto el patrón de dispersión de contaminantes a través de los años producto de la misma influencia de la variabilidad del viento. En la fig. 1, se muestran dos quinquenios (1906 y

1995) para la estación de Casablanca en los cuales puede observarse la diferencia entre ambos patrones.



**Fig. 1. Patrón de Dispersión de contaminantes para el período a) 1906-1910 y b) 1991-1995 en Casablanca. Fuente en (0,0).**

También pudo hallarse que este comportamiento no era igual para todas las regiones del país, es decir la región occidental de Cuba era más propensa a experimentar estas variaciones que la región central u oriental donde para muchas estaciones el patrón de dispersión de contaminantes permaneció casi invariable.

Por otra parte (Alvarez, 2000), realizó un estudio de las calmas, que incluye su representatividad y tendencia, permanencia, rumbo, rapidez y hora de salida, para varias regiones de Cuba, el cual fue aplicado por Roque (Amaro, 2001) en el modelo de pronóstico con buenos resultados, para describir y tener en cuenta en los pronósticos el denominando efecto de acumulación, el cual se explicará más adelante.

El objetivo del siguiente trabajo es formular una nueva metodología para el pronóstico de la dispersión de contaminantes de fuentes puntuales continuas utilizando el modelo de Berlyand – Alvarez Modificado y teniendo en cuenta los últimos resultados encontrados por Alvarez (2000) para el tratamiento del viento y Alvarez (2000) para el tratamiento de las calmas haciendo uso, en ambos casos, de la carta característica.

## **MATERIALES Y METODOS.**

**Determinación de la matriz de tendencia de la frecuencia de ocurrencia de rapidez vs rumbo.**

Según estudios anteriores (**Alvarez, 1984**), 5 años de datos de viento resulta suficiente para realizar un estudio juicioso de esta variable, dado su carácter repetitivo.

Bajo este criterio una serie de datos de viento con  $x$  cantidad de años puede ser dividida en series de 5 años constituyéndose de esta manera varias matrices. En cada matriz obtenida los  $a_{ij}$  son las frecuencias de dos variables tomadas simultáneamente de una tabla de doble entrada, representando la probabilidad de ocurrencia de ese elemento en la serie de 5 años ( ej: 1 m/s de rumbo N es  $a_{11}$ , 1 m/s de rumbo NNE es  $a_{12}$ , 2m/s de rumbo N es  $a_{21}$ , etc)(**Alvarez, 1997**)

Agrupando cada uno de los  $a_{ij}$ , conformamos la matriz múltiple. Sobre esta se calcula la curva de mejor aproximación para cada  $a_i$ , teniendo en cuenta que una serie cronológica puede descomponerse en un movimiento a largo plazo o tendencia, movimientos sistemáticos a corto plazo y componentes aleatorias (**Yule et al, 1958**) y una serie meteorológica puede ser descompuesta en oscilaciones de pequeña escala, de mesoescala, sinópticas, globales, estacionales, interanuales (cuasi-bienales particularmente en la atmósfera ecuatorial), ENSO, autooscilaciones anuales de las ramas Norte de la corriente del Golfo, intercentenales, de largo período, además de los efectos de feedback (**Kagan, 1995**). Aproximándola por una curva que contenga un término lineal y varios que contengan términos de oscilación, se llega a la curva :

$$y = c_1 \text{sen } x + c_2 \text{cos } x + \dots + c_{13} \text{sen } 7x + c_{14} \text{cos } 7x + c_{15} x + c_{16} \quad (1)$$

Desechando los términos oscilatorios en las series de cada uno de los  $a_{ij}$ , ya que una oscilación tiene el mismo valor al principio y al final se tomó el coeficiente del término lineal en la aproximación como la tendencia (pendiente de la recta) de cada  $a_{ij}$  y el conjunto de todas las tendencias de las  $a_{ij}$  conformó la matriz de probabilidad de tendencia para series de 5 años de datos.

A partir de las matrices obtenidas para las variables en estudio: rapidez del viento vs rumbo del viento, se obtienen las cartas bidimensionales de cambios de estas variables simultáneamente.

Para obtener el mejor ajuste de los  $a_i$  en la matriz múltiple mediante la ecuación dada **(1)**, se fijó el ajuste superior al 70 % de correlación encontrándose que para el viento el coeficiente de correlación ( $R_o$ ) entre la curva real y la ajustada estuvo de acuerdo con la

hora del día en el 54 % de los casos,  $R_o = 0.99$ ; el 21 % con  $0.989 > R_o = 0.98$ ; 17 % con  $0.979 > R_o = 0.97$  y el 8 % con  $0.969 > R_o = 0.93$ .

Al realizar un análisis escalar sobre la matriz de tendencia obtenida se determina los aumentos (disminuciones) de la tendencia del par de variables.

Esto permite su aplicación al pronóstico de concentración de contaminantes y estudiar las diferentes variaciones a que ha estado sujeto dicho patrón y a su vez pronosticar con la tendencia cual sería el patrón de contaminantes aproximado que deberá obtenerse para un quinquenio posterior al último de la serie.

Debe señalarse que los resultados obtenidos aquí no contemplan fenómenos de forzamiento de la variabilidad climática mayores que 5 años por estar el espacio ortonormalizado en ese período de tiempo, pudiendo considerarse esta variabilidad calculada como de fondo. Tampoco contemplan fenómenos aperiódicos que violen la ortonormalización, como es el caso del ENOS (el Niño - Oscilación del Sur) por citar un ejemplo.

Toda vez que el pronóstico de dispersión realizado con la metodología descrita y una matriz rapidez - rumbo quinquenal se toma como patrón de dispersión para los estudios de planificación física realizado en Cuba, la variabilidad de fondo provocará los cambios en el patrón que se describen en el trabajo.

### **Efecto de Acumulación.**

Durante experimentos realizados con anterioridad (**Alvarez, et al., 1990**) fue encontrada una contradicción entre los valores medidos y pronosticados de concentración debidos a la dispersión de contaminantes en uno de los puntos de verificación. Esto llevó a los autores a concluir, que dadas las características de la zona, ocurría a ciertas horas del día una concentración de contaminantes encima de la fuente de emisión debido a la ocurrencia reiterada de calmas, que al empezar a soplar el viento se movía en una dirección dada provocando concentraciones mucho mayores que las esperadas.

De aquí se extrae, que horas consecutivas de calmas pueden constituir una condición meteorológica peligrosa para el desplazamiento de grandes concentraciones de contaminantes hacia un lugar dado. A este fenómeno se le conoce como "efecto de acumulación" (**Alvarez, et al., 1999**).

Como es conocido para el pronóstico de concentración de contaminantes un factor fundamental es la matriz de frecuencia de ocurrencia de rumbos contra rapidez del viento (**Alvarez, 1980**), (**López, 1988**), pero esta no incluye las calmas. Esta se tratará en un procedimiento independiente de manera que se logre una matriz rumbo - rapidez del viento que involucre al efecto de acumulación y que pueda a partir del cálculo de concentraciones, ser sumada al efecto normal y dar la representación climática de este fenómeno.

Para caracterizar este efecto se trabaja con 4 variables: el rumbo de salida de la calma, la rapidez de salida de la calma, la permanencia de la calma (cantidad de horas consecutivas) (**Alvarez, et al., 1992**), y la hora de salida de la calma.

Esto se logra siguiendo los siguientes pasos:

- a) Se calcula la matriz de frecuencia de ocurrencia de horas de permanencia en calma contra rumbos de salida de la calma.
- b) Se calcula la matriz de frecuencia de ocurrencia de horas de permanencia en calma contra rapidez de salida de la calma.
- c) Multiplicaremos según el álgebra matricial estándar estas dos matrices, donde cada elemento de estas matrices lleva implícito el número de horas de permanencia que representa.

La matriz producto que será de frecuencia de ocurrencia de rumbos de salida contra rapidez de salida de la calma, nos dará en cada uno de sus elementos la frecuencia de ocurrencia o probabilidad (para grandes volúmenes de datos) condicionada de que exista un rumbo y una rapidez de salida de la calma para un número de horas de permanencia en calma dadas.

### **Modelo de pronóstico de dispersión de contaminantes empleado**

El método de cálculo de dispersión utilizado aquí es el de Berlyand-Alvarez Modificado y es el único validado en Cuba: primero en el estudio de dispersión del complejo de níquel programado para Nicaro con datos obtenidos en Mayarí sobre muestras tratadas con microscopía electrónica, y segundo en el estudio realizado en Moa para el cálculo de la contaminación en la zona.

La fórmula de cálculo para la concentración máxima, ajustada experimentalmente, viene dada por la relación:

$$C_m = \frac{AMFmn}{H^2 (V\Delta T)^{1/3}} \quad (2)$$

donde:

**A** - Coeficiente calculado para condiciones normales de intercambio vertical y horizontal.

**M** - Cantidad de materia expulsada ( $\text{g/s}^{-1}$ ).

**F** - Coeficiente adimensional, calculado para las condiciones de salida de la mezcla gas-aire en el punto de emisión. Para expulsiones gaseosas y aerosoles (partículas con velocidad de precipitación  $< 3\text{m/s}$ ,  $F=1$ ).

**m,n** - Coeficientes adimensionales, que dependen de la velocidad de salida de la mezcla ( $\text{m/s}$ ), diámetro de la chimenea ( $\text{m}$ ); de la diferencia de la temperatura entre la mezcla y el aire, altura de la fuente y el volumen de emisión de la mezcla gas-aire ( $\text{m}^3/\text{s}$ ).

**H** - Altura efectiva de la fuente emisora ( $\text{m}$ ).

**V** - Volumen de emisión ( $\text{m}^3 / \text{s}$ ).

**$\Delta T$**  - Diferencia entre la temperatura de emisión y la ambiente ( $^{\circ}\text{C}$ ).

La distancia a la cual ocurre la concentración máxima (**Xm**) se calcula considerando la altura de la fuente (**H**), el coeficiente adimensional de filtrado (**F**) y un parámetro (**d**), que depende de la llamada velocidad peligrosa del viento (**Vm**), la cual es función del volumen de la mezcla gas-aire y de la diferencia de temperatura entre el gas y el aire. En lo referente a la matriz de viento utilizada, esta presenta en las columnas las 16 direcciones fundamentales con que se codifica el mismo en superficie, mientras las filas son los 34 rangos de rapidez del viento, incluyendo posibles valores superiores a **75 km/h**. El pronóstico para los diferentes quinquenios se hace atendiendo a una fuente puntual situada en el lugar de estudio, cuyos datos reales de emisión para el **SO<sub>2</sub>** son los siguientes:

H = 180 m  
 $W_0 = 14.36$  m/s  
A = 200  
F = 3  
 $\Delta T = 133^\circ$  C  
D = 6 m  
M = 1254.34 g/s

La distancia para la cual se hace el pronóstico es de hasta 10 kms, a partir de la fuente.

### **Información a utilizar y procesamiento de la misma**

Para la realización de este trabajo se escogieron tres estaciones correspondientes a varias regiones del país: Cabo de San Antonio por occidente, Caibarién por el centro y Las Tunas por el oriente. Considerando la serie de datos de dirección y rapidez del viento de las distintas estaciones (1970-1999), estas se agruparon por quinquenios, para estudiar su comportamiento quinquenio a quinquenio y pronosticar la tendencia de la frecuencia de ocurrencia de la matriz de rapidez vs rumbo del viento. El uso de estas estaciones facilitó su comparación con otras estaciones de la misma región donde se encuentran enclavadas ellas y que ya fueron analizadas en varios trabajos anteriores (**Alvarez, 1998, Alvarez, 1999 y Alvarez, 2000**).

### **Discusión de los resultados**

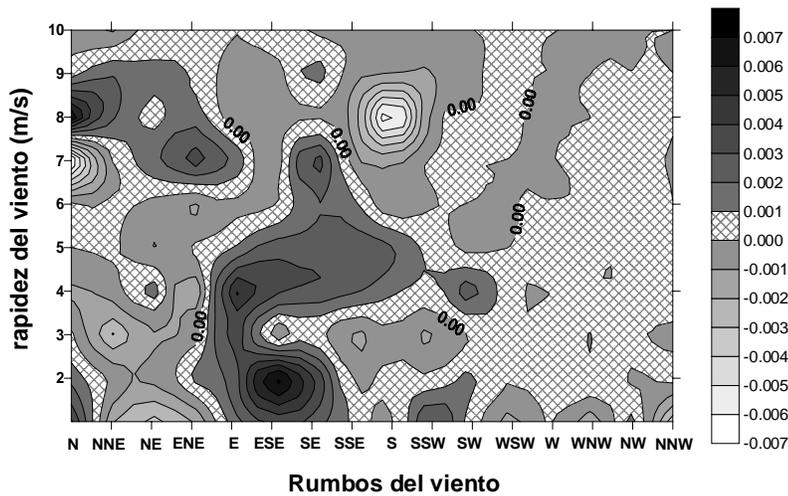
*Análisis de la matriz de tendencia de rapidez vs rumbo del viento para las estaciones de Cabo de San Antonio, Caibarién y Las Tunas y su inclusión en el pronóstico de dispersión de contaminantes.*

Aplicando el procedimiento descrito en materiales y métodos para la determinación de la matriz de tendencia se obtienen las matrices de rapidez vs rumbo del viento para las estaciones seleccionadas y que se presentan a continuación.

#### **Cabo de San Antonio**

En la fig. 2 se muestra que la matriz o carta correspondiente presenta máximos de tendencia positiva, es decir a que aumente, de rumbo N con valores por debajo de 2 m/s y de alrededor de 8 m/s. También presenta máximo de tendencia al aumento entre los rumbos NE y ENE para valores de 7 m/s. Presenta un máximo absoluto entre los rumbos E-SE para valores iguales o menores a 2 m/s y otro secundario entre los

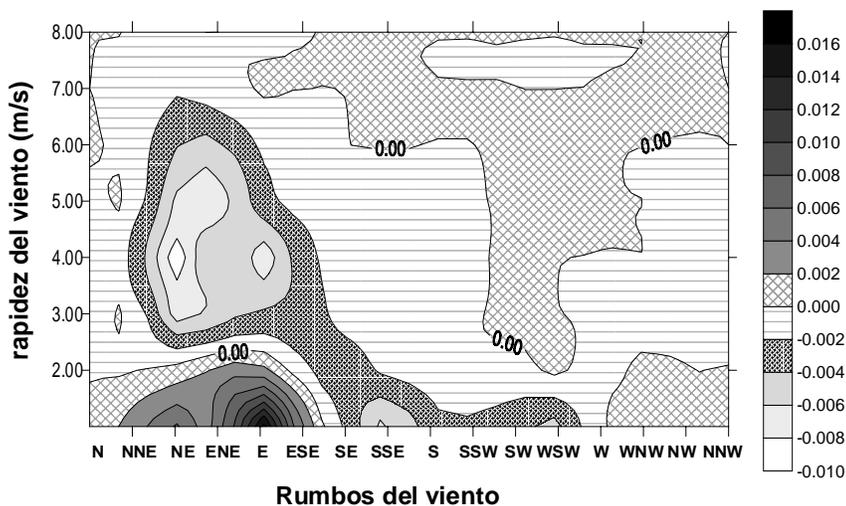
rumbos E-S para valores de rapidez entre 4-7 m/s. También presenta un máximo de tendencia negativa de rumbo S para valores de 8 m/s.



**Fig. 2. Matriz de tendencia de la frecuencia de ocurrencia de rapidez vs rumbo del viento para la estación de Cabo de San Antonio.**

### Caibarién

La matriz de tendencia o carta característica de frecuencia de ocurrencia de rapidez vs rumbo del viento presenta una tendencia al aumento entre los rumbos NNE-ESE para valores < 2 m/s y una disminución para esos mismos rumbos para valores > 2 m/s hasta 7 m/s (fig. 3).



**Fig. 3. Matriz de tendencia de la frecuencia de ocurrencia de rapidez vs rumbo del viento para la estación de Caibarién.**

Los rumbos entre SE-SSW presentan una tendencia a la disminución para valores  $< 6$  m/s. Por otra parte entre los rumbos W-NWW la figura muestra 0 cambios para valores  $< 2$  m/s, disminución hasta 6m/s y o cambios para valores mayores.

## Las Tunas

Para esta estación la fig. 4 muestra dos zonas bien definidas de tendencia positiva y negativa. La zona de tendencia negativa entre los rumbos NNE – ENE para valores por debajo de 5 m/s, pero principalmente por debajo de 3 m/s.

La zona de tendencia positiva se presenta de rumbo E para valores de hasta 7 m/s pero principalmente para valores iguales o menores que 3 m/s.

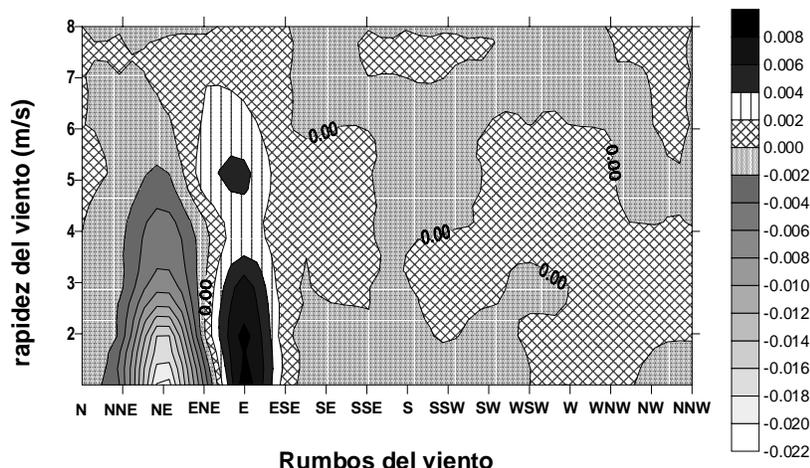
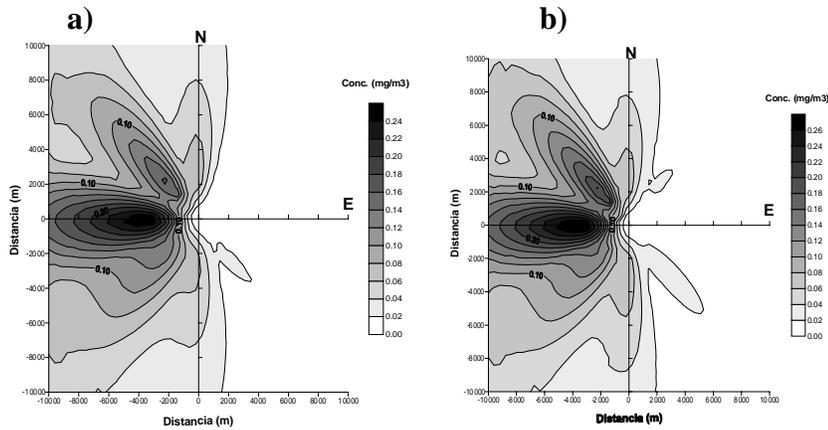


Fig. 4. Matriz de tendencia de la frecuencia de ocurrencia de rapidez vs rumbo del viento para la estación de Las Tunas.

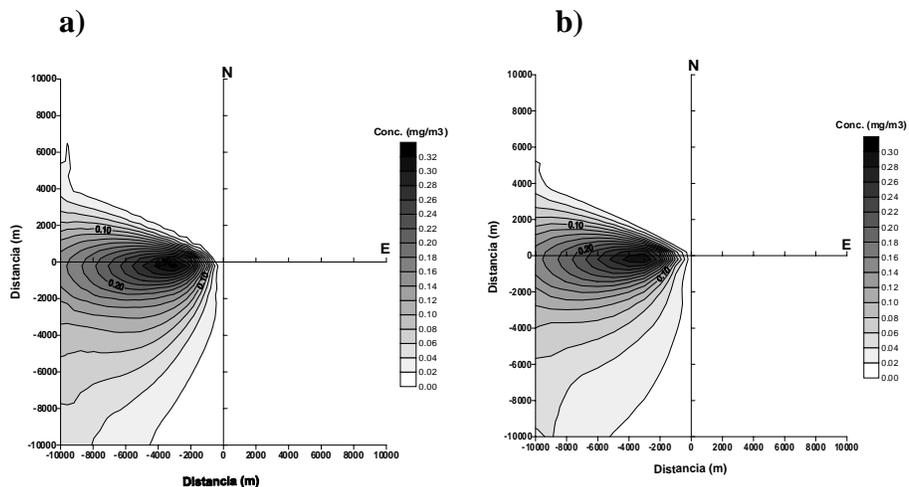
*Pronóstico de dispersión de contaminantes teniendo en cuenta la variabilidad natural del viento.*

En la fig. 5 se muestran los patrones de dispersión de contaminantes para el quinquenio 1995-1999 y el pronóstico para el quinquenio 2000-2004 a partir de la aplicación sobre el quinquenio 1995-1999 de la matriz de tendencia de rapidez vs rumbo del viento mostrada en la fig. 3. En ella puede verse que el patrón pronosticado para el quinquenio 2000-2004 presenta pocas variaciones con respecto al anterior, manteniéndose las mismas zonas afectadas y con un ligero incremento en los valores de concentración. Otra estación de esta región occidental como San Juan y Martínez tampoco reflejó cambios sustanciales entre los quinquenios 1990-1994 y 1995-1999 (Alvarez, 2000).



**Fig. 5. Patrón de Dispersión de contaminantes para el período a) 1995-1999 y b) pronóstico para 2000-2004 en la estación de Cabo de San Antonio. Fuente en (0,0).**

Para la estación de Caibarién (Fig. 6), el pronóstico de dispersión de contaminantes hallado para el quinquenio 2000-2004 no presenta variaciones importantes con respecto al anterior quinquenio, teniendo solo ligeras diferencias en los valores de concentración. La presencia de la zona de contaminación hacia la frontera entre el II y III cuadrante también se puso de manifiesto en el pronóstico para el quinquenio 1995-1999 encontrado en la estación de Santa Clara (**Alvarez, 2000**), sin embargo otra estación de esta región analizada en el mismo trabajo, como Cienfuegos, no experimentó cambios sustanciales de un patrón a otro.



**Fig. 6. Patrón de Dispersión de contaminantes para el período a) 1995-1999 y b) pronóstico para 2000-2004 en la estación de Caibarién. Fuente en (0,0).**