

NUEVA METODOLOGÍA PARA EL PRONÓSTICO DE LA DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES

AUTORES: ALFREDO ROQUE RODRÍGUEZ
LOURDES ALVAREZ ESCUDERO
ROSENDO ALVAREZ MORALES

Centro de Física de la Atmósfera. Instituto de Meteorología. 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.

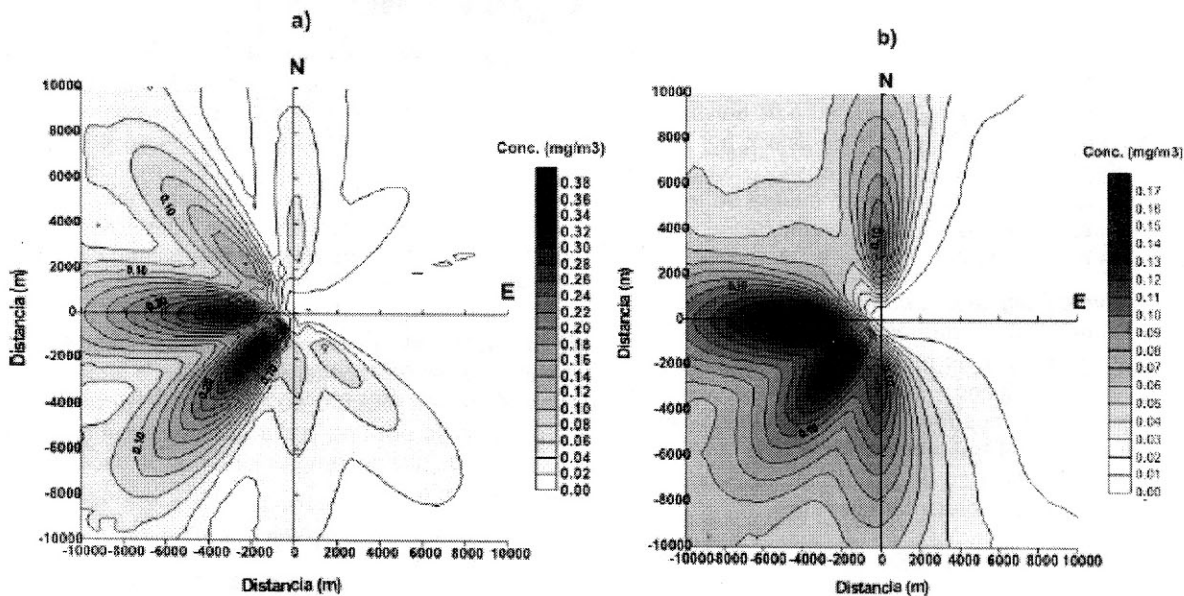


Fig. 1. Patrón de Dispersión de contaminantes para el período a) 1906-1910 y b) 1991-1995 en Casablanca. Fuente en (0,0).

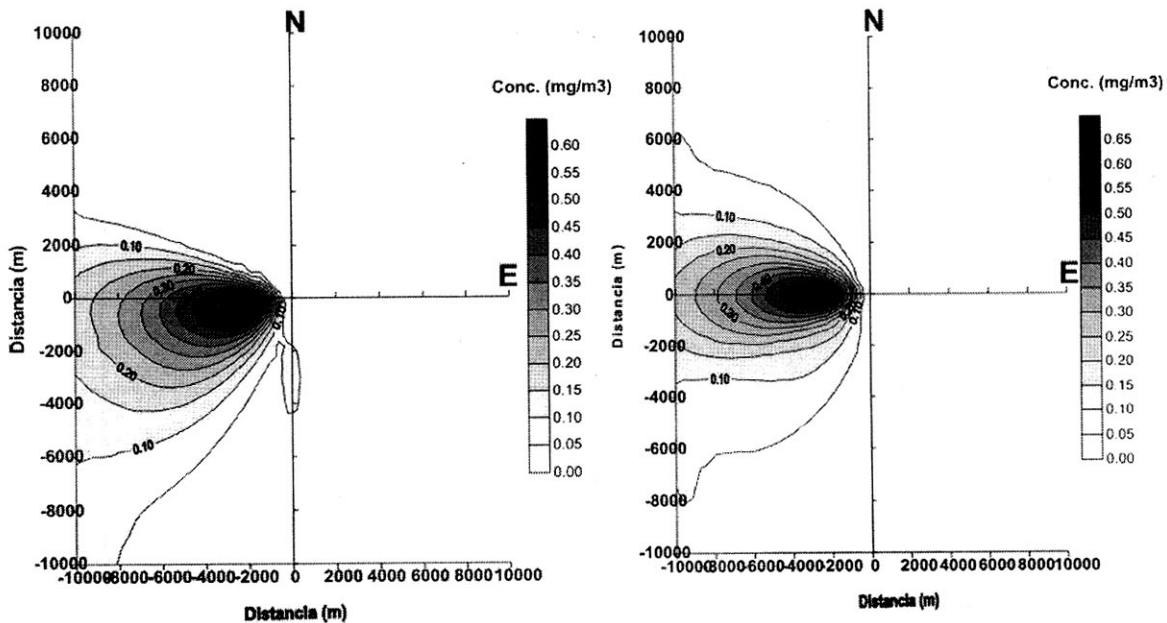


Fig. 2. Patrón de Dispersión de contaminantes para el período a) 1970-1974 y b) 1990-1994 en Maisí. Fuente en (0,0).

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 (Fig. 2).

La aplicación de la matriz de tendencia de rapidez vs rumbo del viento al último quinquenio permitió pronosticar cual sería el patrón de dispersión de contaminantes a obtener en el quinquenio siguiente teniendo en cuenta el efecto de la variabilidad natural del viento, encontrándose que en muchas estaciones el patrón tendría pocos cambios y otros ningún cambio.

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.

Aunque la analiticidad del método permite hablar de comparación de patrones a partir de esta forma de calcular la tendencia, ya que el tiempo aparece como la variable fundamental ya sea explícita o implícitamente al ordenar los datos temporalmente, los autores realizaron un análisis de la diferencia entre cada uno de los quinquenios y el sucesivo de manera que pueda seguirse una secuencia del cambio, si este está presente.

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.

Con esta matriz producto pueden calcularse nuevas concentraciones de contaminantes que al ser sumadas a las concentraciones calculadas a partir de la matriz normal de frecuencia de ocurrencia de rumbos contra rapidez, darán una representación de la distribución de concentraciones teniendo en cuenta el efecto acumulación.

Además como las salidas de la calma son más frecuentes en unas horas del día que en otras, podemos determinar cuál es la hora de mayor número de salidas

de la calma y calcular la matriz producto de frecuencia de ocurrencia de rumbos contra rapidez de salida de la calma para esa hora, calcular las concentraciones correspondientes y obtener la distribución concentraciones de contaminantes con el efecto máximo de acumulación.

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 (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 $< 3m/s$, $F=1$).

m,n - Coeficientes adimensionales, que dependen de la velocidad de salida de la mezcla (m/s), diámetro de la chimenea (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 (m^3/s).

H - Altura efectiva de la fuente emisora (m).

V- Volumen de emisión (m^3/s).

ΔT - Diferencia entre la temperatura de emisión y la ambiente ($^{\circ}C$).

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.

La concentración máxima y la distancia a la cual ocurre esta para una rapidez del viento u diferente de **Vm** se obtiene como:

$$C_{mu} = r(C_m) \quad (3)$$

$$X_{mu} = p(X_m) \quad (4)$$

El cálculo de la concentración a cualquier distancia de la fuente en la dirección del penacho será entonces

$$C_m = S(C_{mu}) \quad (5)$$

$$C_{mu} = S_1(C_{mu}) \quad (6)$$

donde **S₁(X/X_m, F)** considerando la rapidez peligrosa del viento, o bien

$$S_1 = S_1(X/X_{mu}, F).$$

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 **SO₂** son los siguientes:

$$H = 180 \text{ m}$$

$$W_0 = 14.36 \text{ m/s}$$

$$A = 200$$

$$F = 3$$

$$\Delta T = 133^{\circ} C$$

$$D = 6 \text{ m}$$

$$M = 1254.34 \text{ g/s}$$

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. 3 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.

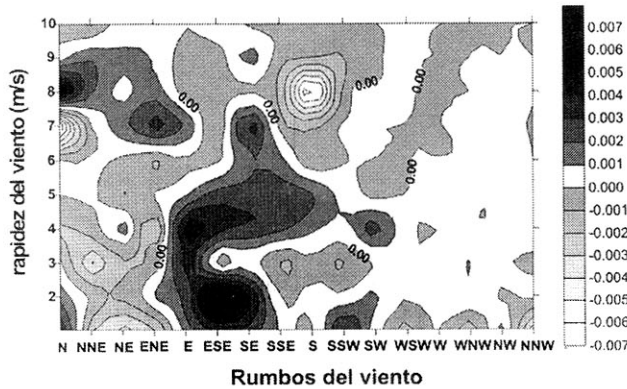


Fig. 4. Matriz de tendencia de la frecuencia de ocurrencia de rapidez vs rumbo del viento para la estación de Cabo de San Antonio.

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.

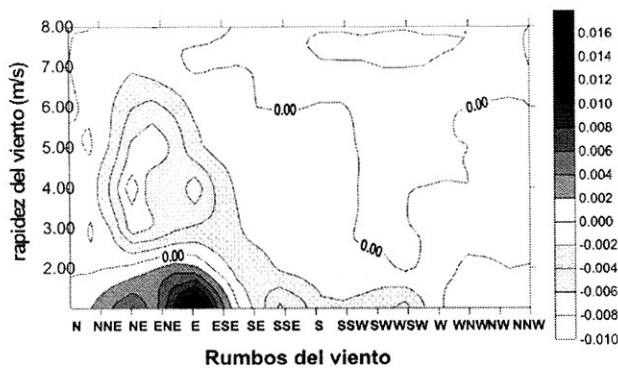


Fig. 5. Matriz de tendencia de la frecuencia de ocurrencia de rapidez vs rumbo del viento para la estación de Caibarién.

Los rumbos entre SE-SSW presentan una tendencia a la disminución para valores < 6 m/s. Por otra parte entre los rumbos W-NW 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. 5 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.

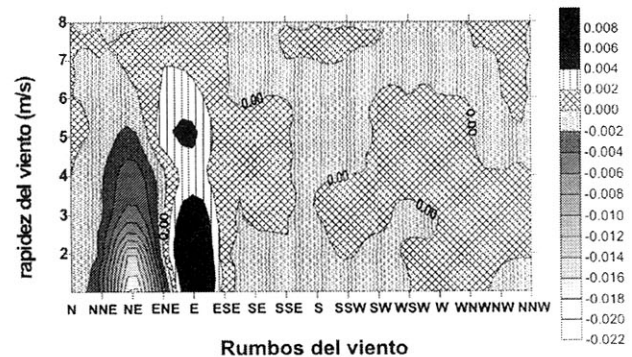


Fig. 6. Matriz de tendencia de la frecuencia de ocurrencia de rapidez vs rumbo del viento para la estación de Las Tunas.

Las variaciones experimentadas en estas matrices al ser aplicadas sobre la matriz de rapidez vs rumbo del viento de un quinquenio permite pronosticar cuales serían los posibles cambios que podría experimentar el patrón de dispersión de contaminantes en el quinquenio posterior. Pero debido a que en nuestro caso los valores de la tendencia tanto positiva como negativa son muy bajos, estos prácticamente no deben influir grandemente sobre el pronóstico a realizar, lo que no fue así para otras estaciones estudiadas en resultados anteriores (Alvarez, 2000). Debe tenerse en cuenta que aquí, como se expreso en el epígrafe de materiales y métodos solo se tiene en cuenta la variabilidad natural del viento y no otros fenómenos periódicos que fuerzan la variabilidad.

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

En la fig. 7 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).

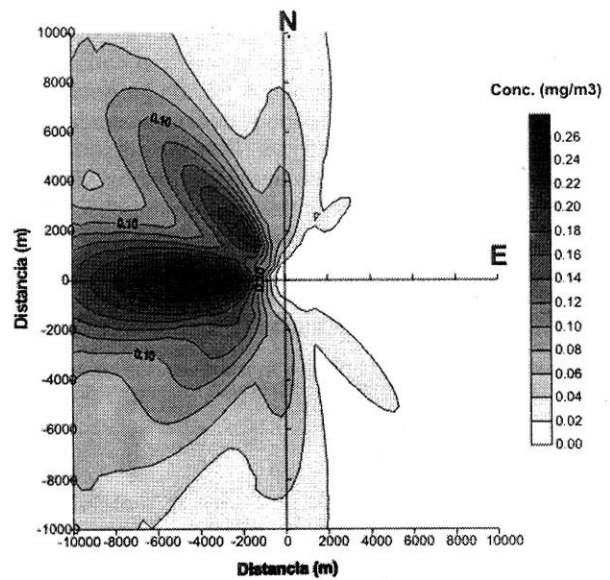
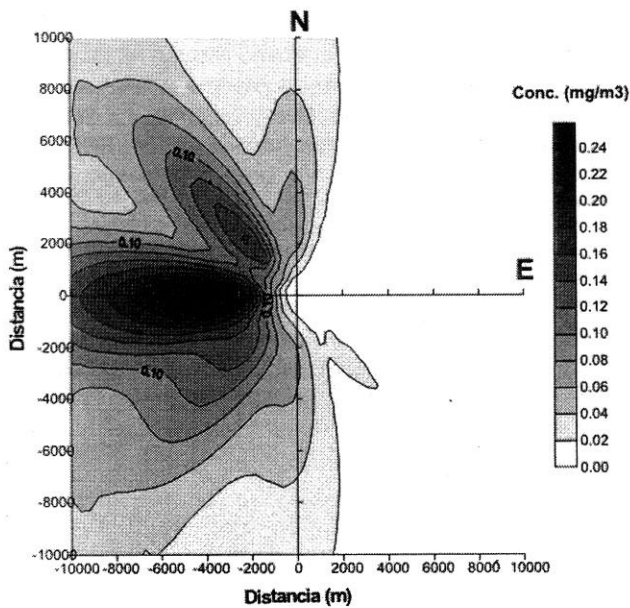
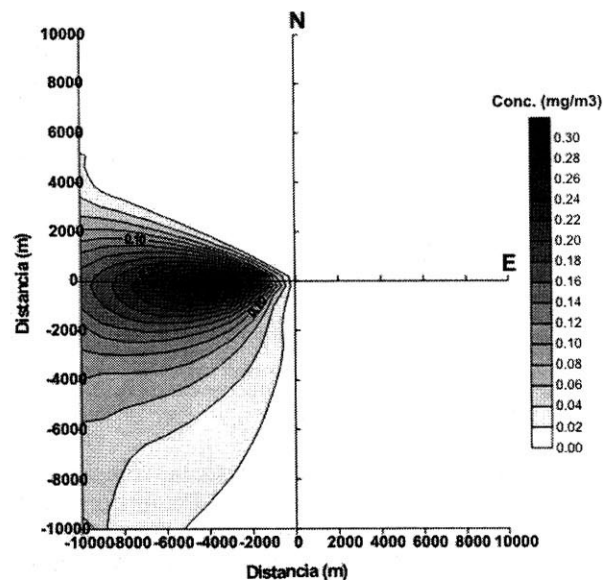
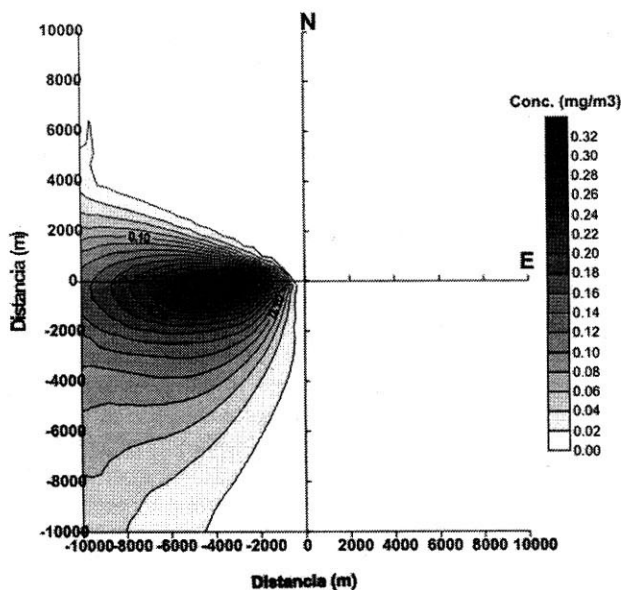


Fig. 7. Patrón de Dispersión de contaminantes para el período a) 1995-1999 y b) pronóstico para 2000-2004 en la estación de Cabo de San Antonio. Fuente en (0,0).

Para la estación de Caibarién (Fig. 8), 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.

Para la estación de Las Tunas (Fig. 9), el patrón pronosticado para el año 2000-2004 es muy similar al del quinquenio anterior, aunque con un ligero incremento en los valores de concentración. Esta estación confirma los resultados encontrados para otras estaciones de la región oriental como Puerto Padre, Maisí (Alvarez 2000), Manzanillo y Cabo Cruz, en los que el patrón pronosticado para un quinquenio posterior al último de la serie no presenta cambios sustanciales con respecto a su antecesor debido en gran parte a la alta frecuencia de vientos con rumbo E en esta región del país, lo cual es reflejo de la matriz de tendencia de la frecuencia de ocurrencia de rapidez vs rumbo del viento para esta estación.

Fig. 8. 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).



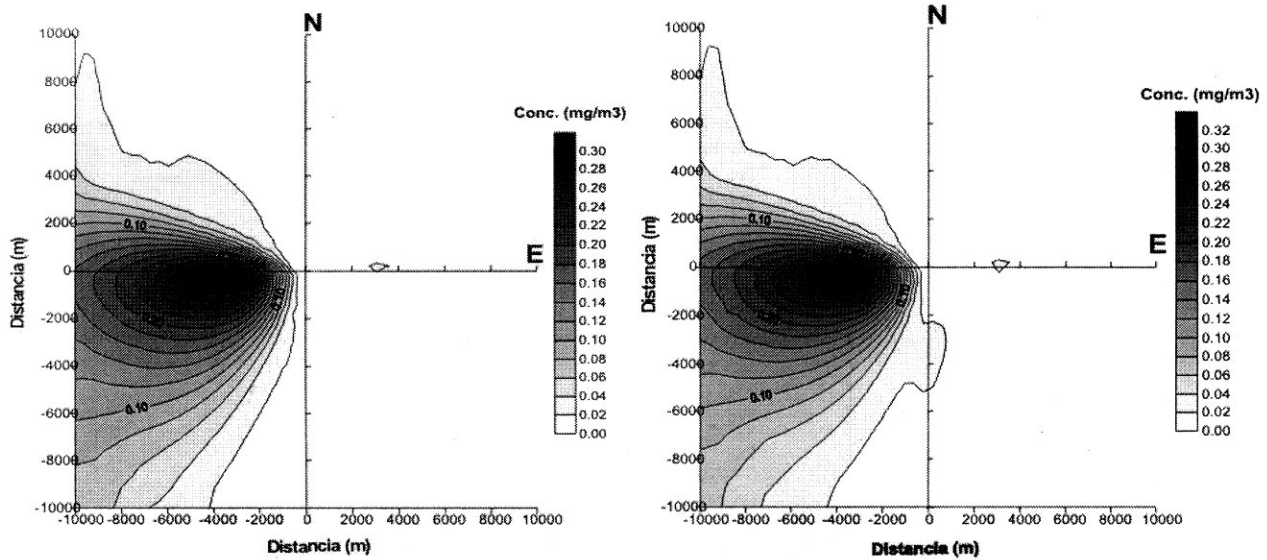


Fig. 9. Patrón de Dispersión de contaminantes para el período a) 1995-1999 y b) pronóstico para 2000-2004 en la estación de Las Tunas. Fuente en (0,0).

En resumen, los resultados encontrados para las estaciones seleccionadas confirman los anteriormente encontrados para otras regiones del país, lo que nos sugiere la importancia de considerar este efecto en los pronósticos de dispersión en cualquier lugar del país donde se deseen hacer inversiones con la finalidad de construir objetivos industriales que presenten importantes fuentes de contaminantes, pero principalmente en aquellas zonas donde el patrón mostró cambios importantes con relación a su anterior.

Obtención de la matriz de rapidez vs rumbo del viento teniendo implícita la permanencia de horas de calmas.

Como se dijo en el epígrafe de Materiales y Métodos esto se logra siguiendo los pasos siguientes: Se calcula la matriz de frecuencia de ocurrencia de horas de permanencia en calma contra rumbos de salida de la calma, a continuación se calcula la matriz de frecuencia de ocurrencia de horas de permanencia en calma contra rapidez de salida de la calma. Por último 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.

Cabo de San Antonio

La Fig. 10 nos muestra la matriz de frecuencia de ocurrencia de viento (que lleva implícita la permanencia en calmas) por rumbos contra rapidez de salida de la calma. Esta matriz se conoce con el nombre de matriz de

acumulación y permite tener en cuenta el efecto del mismo nombre en los pronósticos de dispersión de contaminantes.

En ella pueda apreciarse que los rumbos más frecuentes de salida de la calma se producen entre el NNE-ESE para valores del viento por debajo de 6 m/s, pero principalmente por debajo de 2 m/s.

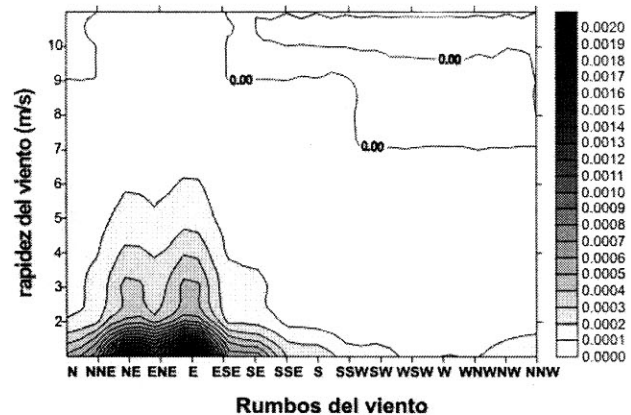


Fig. 10. Matriz de frecuencia de ocurrencia de viento (que lleva implícita la permanencia en calmas) por rumbos contra rapidez de salida de la calma para la estación de Cabo de San Antonio.

El pronóstico de dispersión de contaminantes debido a la acumulación se muestra en la Fig.11 y puede apreciarse que los valores son muy bajos en comparación con el patrón normal que se halla cuando no se tiene en cuenta este efecto. La suma de las concentraciones de ambos patrones constituye el patrón real de dispersión de contaminantes..

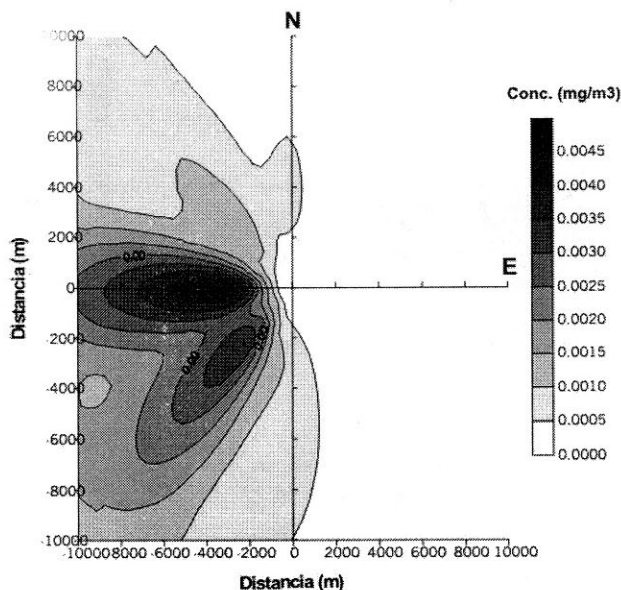


Fig. 11. Pronóstico de Dispersión de contaminantes por efecto de acumulación. Cabo de San Antonio

Caibarién

Para esta estación pueda preciarse (Fig. 12) que los rumbos más frecuentes de salida de la calma se producen entre el SE-S para valores del viento por debajo de 2 m/s, presentando un máximo secundario ENE-ESE para valores por debajo de 4 m/s. Este comportamiento de las calmas es diferente a lo encontrado para las otras 2 estaciones estudiadas.

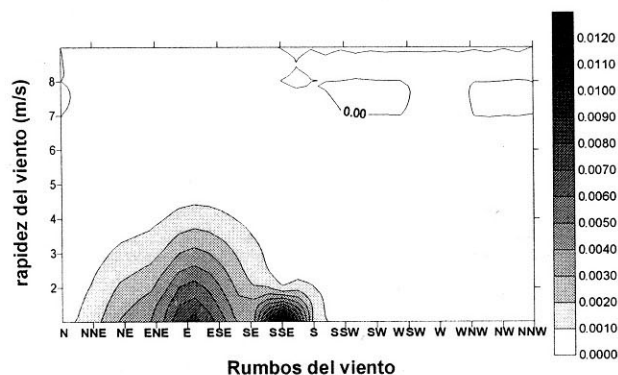


Fig. 12 Matriz de frecuencia de ocurrencia de viento (que lleva implícita la permanencia en calmas) por rumbos contra rapidez de salida de la calma para la estación de Caibarién

Igual que para la anterior estación, el pronóstico de dispersión de contaminantes por efecto de acumulación se muestra en la figura 13 para la estación de Caibarién.

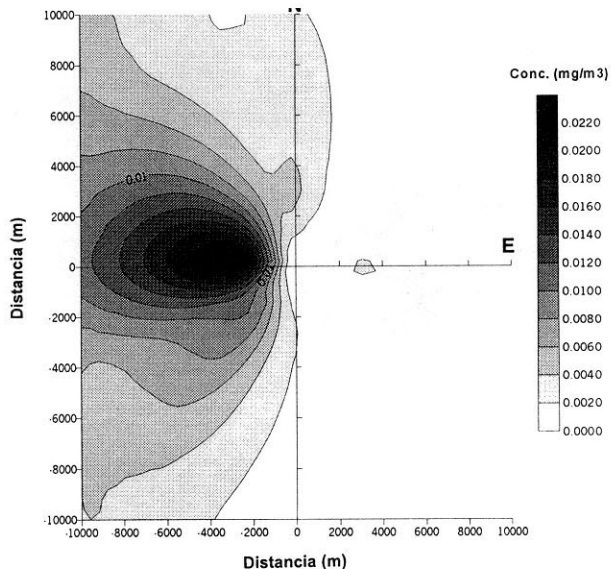


Fig. 13. Pronóstico de Dispersión de contaminantes por efecto de acumulación Caibarién.

En la misma puede apreciarse que los valores de concentración siguen siendo muy bajos y que los mismos deben sumarse al patrón cuando no se toma en cuenta este efecto provocando un incremento de las concentraciones hacia las regiones entre los cuadrantes III y IV.

Las Tunas

Para la estación de Las Tunas (Fig. 14) los rumbos más frecuentes de salida de la calma se producen entre NNE-ESE, para valores de rapidez del viento por debajo de 4 m/s, pero principalmente menores que 2 m/s, de igual manera a lo ocurrido en la estación de Cabo San Antonio

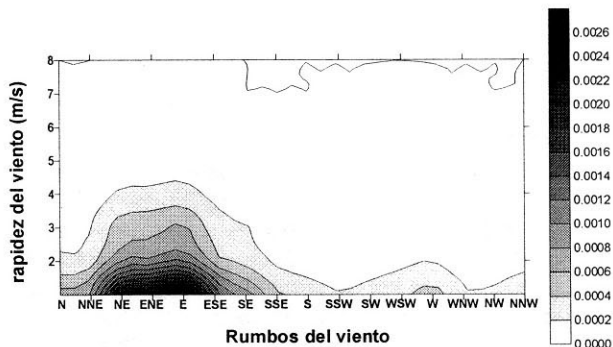


Fig. 14 Matriz de frecuencia de ocurrencia de viento (que lleva implícita la permanencia en calmas) por rumbos contra rapidez de salida de la calma para la estación de Las Tunas.

Su correspondiente patrón de dispersión de contaminantes se muestra en la figura 15, donde se alcanzan los valores más altos de concentración de las tres estaciones en correspondencia con la mayor ocurrencia de calmas en esta estación. Es significativo a diferencia de las otras 2 estaciones analizadas, la presencia de una zona de concentración entre el I y II cuadrante, aunque con valores bajos de concentración.

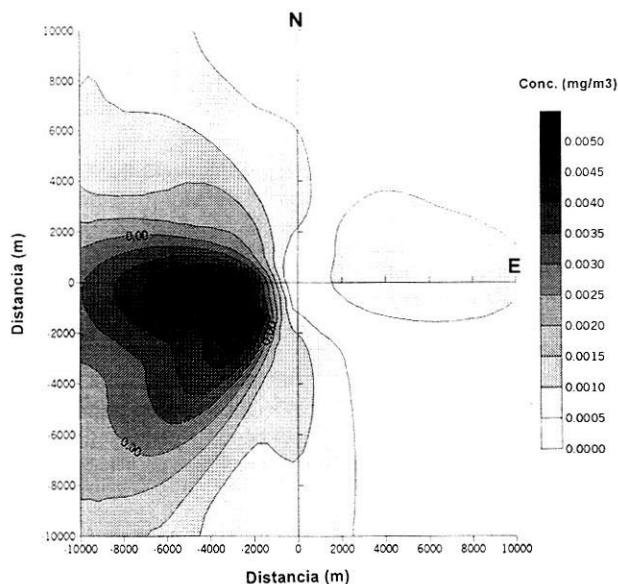


Fig. 15. Pronóstico de Dispersión de contaminantes por efecto de acumulación. Las Tunas.

Resultados finales de la nueva metodología.

En este epígrafe se procederá a mostrar los resultados finales de la dispersión de contaminantes teniendo en cuenta la variabilidad natural del viento y el efecto de acumulación. Este procedimiento consiste en sumar las concentraciones de ambos patrones para obtener el patrón real de contaminantes para cada estación.

Sin embargo debe destacarse que en las tres estaciones los valores de concentración hallados teniendo en cuenta el efecto de acumulación son de 2 y hasta 3 ordenes de magnitud menor que los valores de concentración cuando no se toma en cuenta este efecto, lo cual no ocurrió así para la estación de Casablanca (Alvarez, 2000). Esto es debido a que en las estaciones analizadas las calmas no son representativas en la cantidad de observaciones, por lo que es de esperarse que las concentraciones reales o totales sean muy similares a cuando se tiene en cuenta el efecto de acumulación.

Cabo de San Antonio

La fig. 16 muestra el patrón real de contaminantes para esta estación. En ella puede apreciarse que no apa-

recen diferencias con el patrón hallado para esta estación y que se representó en la figura 9. Lo mismo ocurre para las otras estaciones, como se muestra en las figuras 17 y 18, las que no se diferencian de sus correspondientes figuras 10 y 11.

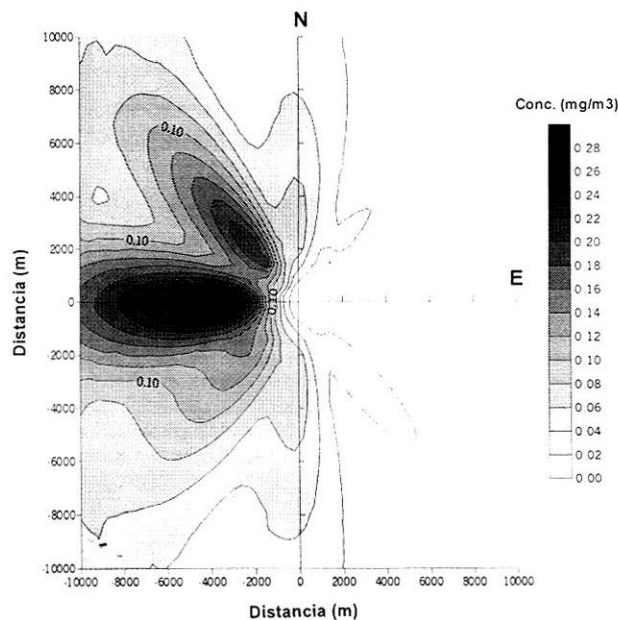


Fig. 16. Pronóstico de Dispersión de contaminantes real o total para la estación de Cabo de San Antonio.

Caibarien

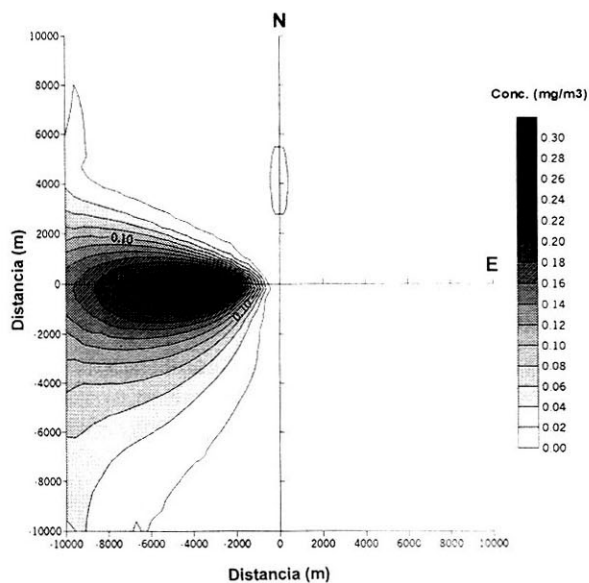


Fig. 17. Pronóstico de Dispersión de contaminantes real o total para la estación de Caibarién.

Las Tunas

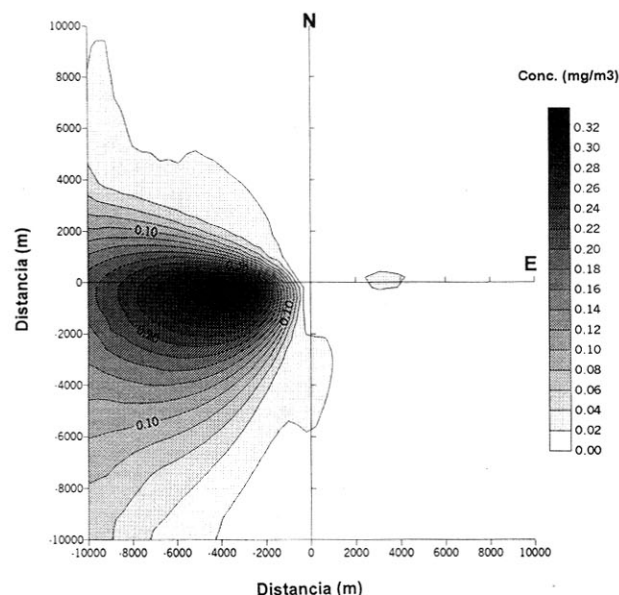


Fig. 18. Pronóstico de Dispersión de contaminantes real o total para la estación de Las Tunas.

Conclusiones

La aplicación de la variabilidad natural del viento y el efecto de acumulación al pronóstico de dispersión de contaminantes permitió mejorar el modelo hasta ahora empleado en la norma cubana de calidad del aire, pues permite tener en cuenta los cambios del viento en el tiempo y el comportamiento de las calmas.

Esta nueva metodología permite por tanto pronosticar cual será el patrón a obtener en un período (en nuestro caso 5 años) posterior al último de la serie y en el caso en que la ocurrencia de calmas sea significativa para alguna estación, tener en cuenta el denominando efecto de acumulación.

El uso de esta nueva metodología permitirá a mejorar los estudios de impacto ambiental que usan el modelo de Berlyand-Alvarez o el modelo de Berlyand-Alvarez Modificado.

Dada la red de estaciones de superficie con que cuenta el servicio meteorológico se recomienda extender estos estudios a todas las estaciones que cuenten con registros largos de datos de manera que permita proveer a los investigadores de los datos necesarios para una mejor evaluación.

Agradecimientos

Los autores desean expresar su agradecimiento a la Lic. Dulce Pérez Betancourt y a las técnicas Laura Aenlle y Leticia Muñiz por el procesamiento de la información utilizada en este trabajo.

Referencias

Alvarez, R., et. al. (1980): Diagnóstico y pronóstico de la contaminación del aire en la zona industrial de Ni-caro. Informe de resultado. Revista CEMACC. No. 5.

Alvarez, R. (1983): Nuevo método de empleo de los datos del viento para su aplicación a los problemas de la contaminación del aire. Ciencias de la Tierra y el Espacio. Pp. 139-141.

Álvarez, R. (1984): Nueva metodología para el estudio de los cambios en la dirección del viento. Ciencias de la Tierra y el Espacio, 8: 81-92.

Alvarez, R. (1990): Caracterización de la dispersión de contaminantes en la zona minero - metalúrgica de Moa. Informe de Resultado. IDICT, Instituto de Meteorología. CITMA.

Alvarez, L., R. Alvarez (1992): La permanencia como propiedad general de las variables meteorológicas I. Resultados preliminares. Revista Cubana de Física, 12(2): 115-120.

Alvarez, R., Roque, A. Alvarez, L., Amaro, L., et. al. (1997): Análisis de los cambios en los patrones de dispersión de contaminantes, del potencial eólico energético y algunas variables meteorológicas debido a la variabilidad y/o los cambios climáticos. Análisis de la estación Casablanca. Informe de Resultado. Departamento de Aerología. Instituto de Meteorología. CITMA.

Alvarez, R., Roque, A. Alvarez, L., Amaro, L., et. al. (1998): Análisis de los cambios en los patrones de dispersión de contaminantes, del potencial eólico energético y algunas variables meteorológicas debido a la variabilidad y/o los cambios climáticos. Análisis de las estaciones Cienfuegos, Caibarién y Santa Clara. Informe de Resultado. Departamento de Aerología. Instituto de Meteorología. CITMA.

Alvarez, R., Roque, A. Alvarez, L., Amaro, L., et. al. (1999): Análisis de los cambios en los patrones de dispersión de contaminantes, del potencial eólico energético y algunas variables meteorológicas debido a la variabilidad y/o los cambios climáticos. Análisis de la estación Maisí. Informe de Resultado. Departamento de Aerología. Instituto de Meteorología. CITMA.

Alvarez R., L. Alvarez (1999): El efecto de acumulación y su influencia en el patrón de contaminantes. Memorias del la Convención Trópico 99. Ciudad de la Habana, Cuba, 29 de marzo al 2 de abril de 1999, publicación electrónica (MT010).

Alvarez, R., Roque, A., Alvarez, L., et. al. (2000): Nueva metodología para el estudio de la variabilidad climática. Informe Científico Técnico, INSMET, 200 pp.

Alvarez R., L. Alvarez (1999): El efecto de acumulación y su influencia en el patrón de contaminantes. Memorias del la Convención Trópico 99. Ciudad de la Habana, Cuba, 29 de marzo al 2 de abril de 1999, publicación electrónica (MT010).

Amaro, L., Alvarez, R., Roque, A., Alvarez, L., et. al. (2001): Nueva metodología para la caracterización de la contaminación atmosférica producida por fuentes radiactivas y convencionales. Informe Científico Técnico, INSMET, 215 pp.

Berlyand, M. E. (1975): Problemas actuales de la difusión atmosférica y la contaminación de la atmósfera [en ruso]. *Guidrometeoizdat, Leningrado*, 448 pp.

Hesek, F. (1982): Air pollution model based on a non-gaussian puff formula. *Contrib. Geophys. Inst. Slovak Acad. Sci. , Serie Meteorológica*, 4: 109-118.

López C. M., et. al (1988): Diagnóstico y pronóstico de la contaminación del aire en la zona de desarrollo petrolero Cárdenas - Varadero. Informe de Resultado. IDICT, Instituto de Meteorología. CITMA.

NC 93-02-202 (1999): Normas de Gestión Ambiental. MEP – CITMA. Oficina Nacional de Normalización, 148 pp.

Kagan, B.A. (1995): Ocean – Atmospheric Interaction and Climate Modeling, Cambridge University. Press London.

Roque, A. Alvarez, R., Aenlle, L. y Bouza, L. (2001): Cambios en los patrones de dispersión de contaminantes debido a la variabilidad natural , a partir de la aplicación sobre la variable viento de un análisis multivariado. *Revista Cubana de Meteorología Vol. 8 No. 1*

SNIP (1975): Normas para el cálculo de la distribución en la atmósfera de las sustancias dañinas contenidas en los desechos industriales [en ruso]. *Stroiizdat, Moscú*, SN-369-74.

Yule, M. A. y Kendall, M. A. (1958): An introduction to the Theory of Statistics. Griffin 701 pp.

ABSTRACT

In this paper a new methodology to the forecasting of pollutants dispersion is showed. It includes the natural variability of the wind and accumulation effects using the model registered in the Cuban Guide of Air Quality and the improvement done it to forecasting 24 hours. The results showing that the includes both effects in model of forecasting improve the calculation of the same. In this way de model result very useful in the studies of environment impact.

Palabras Clave:

Dispersión de Contaminante, viento, variabilidad, impacto ambiental.