

**CAMBIOS EN LOS PATRONES DE DISPERSION DE
CONTAMINANTES DEBIDO A LA VARIABILIDAD NATURAL.
ANÁLISIS Y PRONÓSTICO TENIENDO EN CUENTA ESTE EFECTO A
PARTIR DE LA APLICACIÓN SOBRE LA VARIABLE VIENTO DE UN
ANÁLISIS MULTIVARIADO**

Autores: Lic. Alfredo Roque Rodríguez

Dr. Rosendo Álvarez Morales

Tec. Laura Aenlle Ferro

Tec. Lissette Bouza Martínez

Institución: Instituto de Meteorología

Min. Ciencia, Tec. y Medio Ambiente (CITMA)

E-mail: aroque@met.inf.cu

greatroque@yahoo.com

RESUMEN

En este trabajo se muestra la influencia de la variabilidad natural del viento sobre el Patrón de Dispersión de Contaminantes para distintas regiones del país hasta el período 1990-1994 o 1991-1995 y la importancia de considerar dicho efecto en los pronósticos de dispersión de sustancias nocivas al medio ambiente. Se realiza un estudio a partir del análisis de la tendencia de la matriz de frecuencia de rapidez vs rumbo del viento mediante una variante del análisis multivariado. Como modelo de pronóstico se utilizó el modelo de Berlyand-Álvarez Modificado utilizado para el cálculo de las concentraciones de contaminantes emitidos por una fuente puntual. Se pronostica el patrón de dispersión de contaminantes para los quinquenios 1995-1999 o 1996-2000. Los resultados obtenidos demuestran la validez de la metodología empleada y muestran las ventajas de realizar los pronósticos de

dispersión de contaminantes teniendo en cuenta la variabilidad natural en los estudios de planificación física.

INTRODUCCION.

La dispersión en la Capa Fronteriza Planetaria (**CFP**), está controlada por la turbulencia en esta capa. Al igual que la turbulencia, la dispersión es un fenómeno aleatorio o estocástico, esto significa que la concentración observada para un tiempo particular localizada en la dirección del viento, no puede ser predicha en general con precisión, por tanto debe ser descrita a través de una distribución de probabilidad (**Venkatram et. al., 1993**).

El parámetro de entrada más importante a los modelos de dispersión es el viento, por lo que un adecuado análisis de este parámetro conlleva a mejores estimaciones de los modelos.

La variable viento es considerada como un vector, el único de las variables meteorológicas base y por tanto su comparación con las demás resulta un tanto difícil. Sin embargo, si tomamos una matriz de frecuencia proveniente de una tabla de doble entrada podemos trazar una carta (carta característica) que representa la variación de la rapidez y el rumbo simultáneamente (**Álvarez, 1983**) provocando una transformación del espacio E^2 en otro E^1 , donde este último representa la probabilidad de ocurrencia de ambas magnitudes simultáneamente.

Si además determinamos la tendencia de cada a_{ij} mediante el análisis del comportamiento de cada uno de los elementos en una serie cronológica, nos permitirá pronosticar el patrón de dispersión de contaminantes para un período dado.

La realización de este análisis mediante una metodología novedosa a partir de la teoría del análisis multivariado, resulta la esencia de este trabajo.

MATERIALES Y METODOS.

Según estudios anteriores (**Álvarez, 1983**), 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})(**Álvarez, 1997**).

Agrupando cada uno de los a_{ij} , conformamos la matriz múltiple. Sobre la matriz múltiple se calculó 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.

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.

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 $0.969 > R_o = 0.93$.

Considerando la serie de datos de dirección y rapidez del viento de la estación Casablanca desde el año 1906 hasta 1995 y agrupándola por quinquenios, se obtienen como resultado 18 grupos en forma continuada de observaciones bihorarias con excepción del año 1916 en que no pudo resolverse la información por su estado de decrepitud. Para el caso de la estación de Camagüey se consideró la serie de datos existentes desde 1962 hasta 1995 separados por quinquenios que abarcaron 7 grupos de forma continuada de observaciones trihorarias.

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 a periódicos que violen la ortonormalización, como es el caso del ENOS (el Niño - Oscilación del Sur) por citar un ejemplo.

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 aunque por simplicidad estos análisis aparecen parcialmente en el artículo.

El método de cálculo de dispersión utilizado aquí es el de Berlyand-Álvarez 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 $< 3\text{m/s}$, $F=1$).

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 ($^{\circ}\text{C}$).

La distancia a la cual ocurre la concentración máxima (X_m) 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 (V_m), 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 V_m 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

$$C_m = S (C_m) \quad (5)$$

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

donde $S_1(X/X_m, F)$ 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 son los siguientes:

$H = 180 \text{ m}$

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

$$A = 200$$

$$F = 3$$

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

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

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

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

Para este trabajo se calculó con la matriz rapidez - rumbo del viento correspondiente a tres situaciones diferentes: el quinquenio 1906 - 1910, el quinquenio 1990 - 1995 y lo que ocurrirá en el 1996-2000 tomando en cuenta sólo la variabilidad dada por el cambio de las tendencias de la matriz rapidez - rumbo del viento.

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.

DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

Carta característica del viento.

Rapidez - Rumbo.

En la **Fig. 1** podemos ver la carta característica de tendencias de rapidez vs rumbo del viento para la estación meteorológica de Casablanca, obtenida a partir de 90 años de datos procesados según la metodología explicada. En ella podemos ver que, en general, la tendencia es a que aumente el número de casos de valores bajos de la rapidez del viento (**entre 1 y 3 m/s**) para rumbos entre el **N** y el **ESE** con énfasis especial en los rumbos **ENE - 3 m/s** y **E - 1 m/s**; por otra parte, a que disminuya rápido encuentra mínimos en el **NE - 4 m/s**, **NE - 6 m/s**, **E - 4m/s** y un lugar alejado en el **NNW - 4 m/s**. En general, podemos decir que hay una tendencia clara a la disminución de los **W** para casi todos los valores de rapidez del viento detectados.

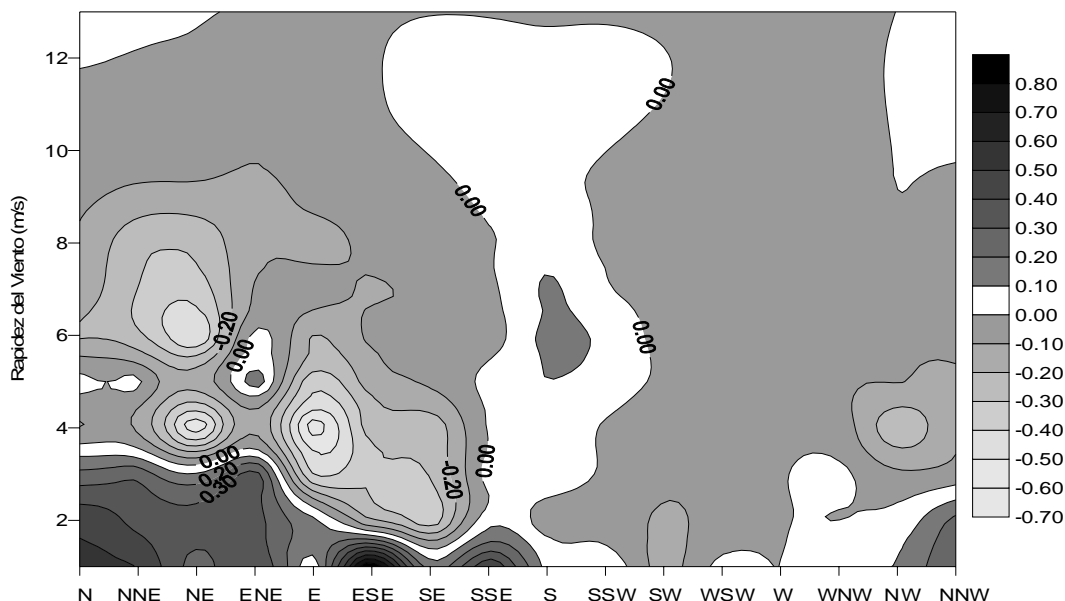


Fig. 1. Carta característica de la matriz de tendencia de rapidez vs rumbos del viento. Estación Casablanca.

Con este análisis del viento se procedió entonces a la introducción de los resultados en el modelo de dispersión de contaminantes a aplicar con el fin de estudiar las variaciones que ha sufrido el patrón de dispersión de contaminantes durante los años y determinar cual sería el Patrón a obtener en el quinquenio 1996-2000.

Variabilidad en los patrones de dispersión de contaminantes en la estación Casablanca.

El patrón de dispersión para el quinquenio 1906-1910 (**fig. 2a**), muestra que los valores más frecuente se concentran entre el 3 y 4 cuadrante, o sea, las isolíneas de igual concentración se ubican a uno y otro lado del rumbo oeste (**W**), indicando la alta frecuencia de los vientos del 1 y 2 cuadrante.

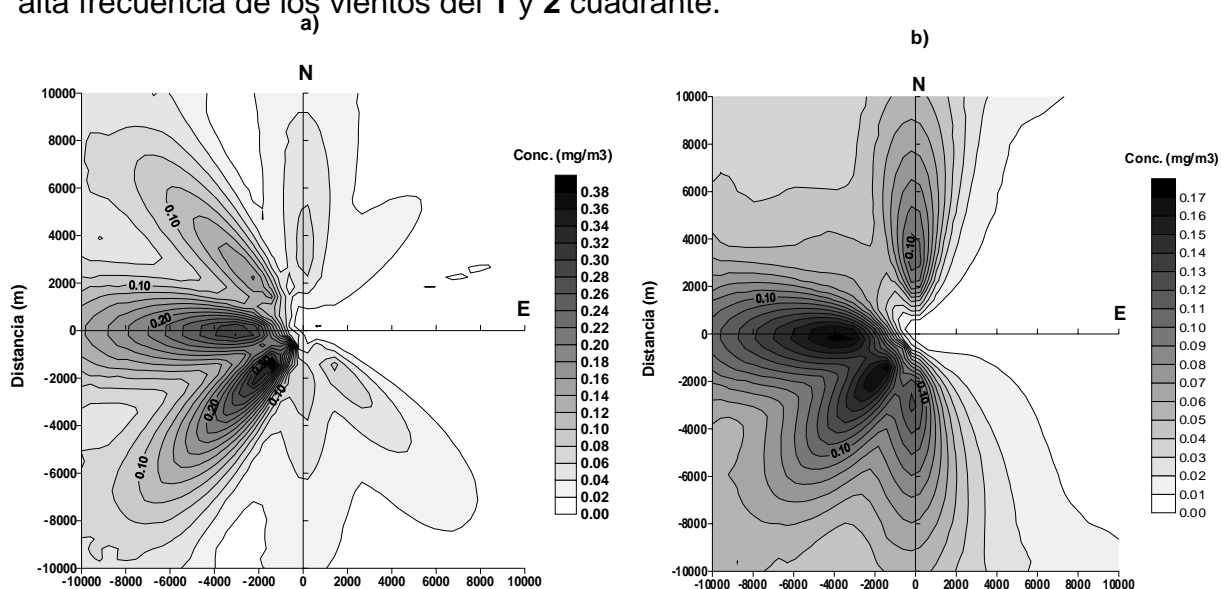


Fig. 2. Patrón de Dispersión de contaminantes para el período a) 1906-1910 y b) 1991-1995 en Casablanca. Fuente en (0,0).

En el quinquenio 1991-1995 (**Fig. 2b**) con relación al quinquenio 1906-1910, el patrón de dispersión se muestra dirigido hacia el Oeste, pero de una manera más regular, mostrándose una mejor definición de los máximos secundarios ubicados en la frontera entre el I y IV cuadrante y entre el II y III cuadrante. El aumento de los vientos con valores bajos como se vio en la figura 1, se pone de manifiesto con la disminución a la mitad de los valores de concentración. En el último quinquenio.

El patrón de dispersión de contaminantes pronosticado según la tendencia para el quinquenio 1996-2000 (**Fig. 3**), muestra poca variación lo que indica que en general el patrón de dispersión mantendrá las mismas características principales antes mencionadas del quinquenio 1991-1995.

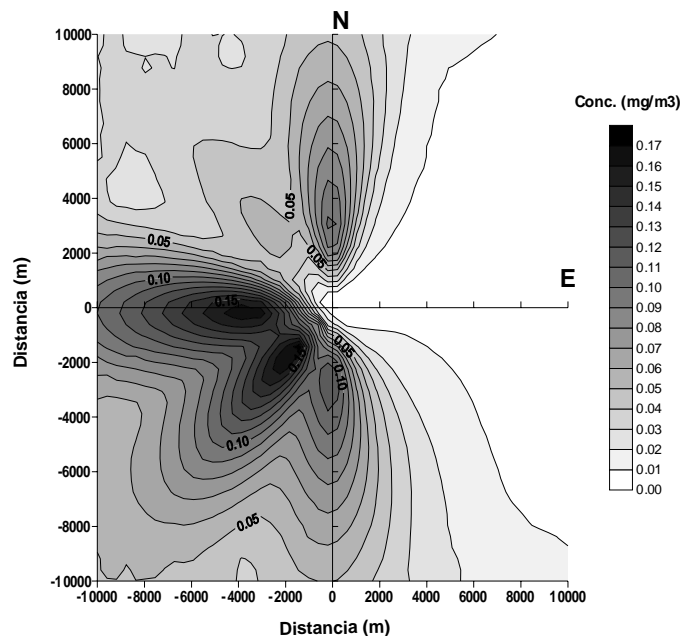


Fig. 3. Patrón de Dispersión de contaminantes pronosticado para el período 1996-2000 en Casablanca. Fuente en (0,0).

Como prueba del método empleado se decidió pronosticar cual sería el patrón de dispersión de contaminantes para el quinquenio 1991-1995, a partir del quinquenio 1986-1990 (**Fig. 4**), pudiendo observarse como resultado la efectividad del método empleado.

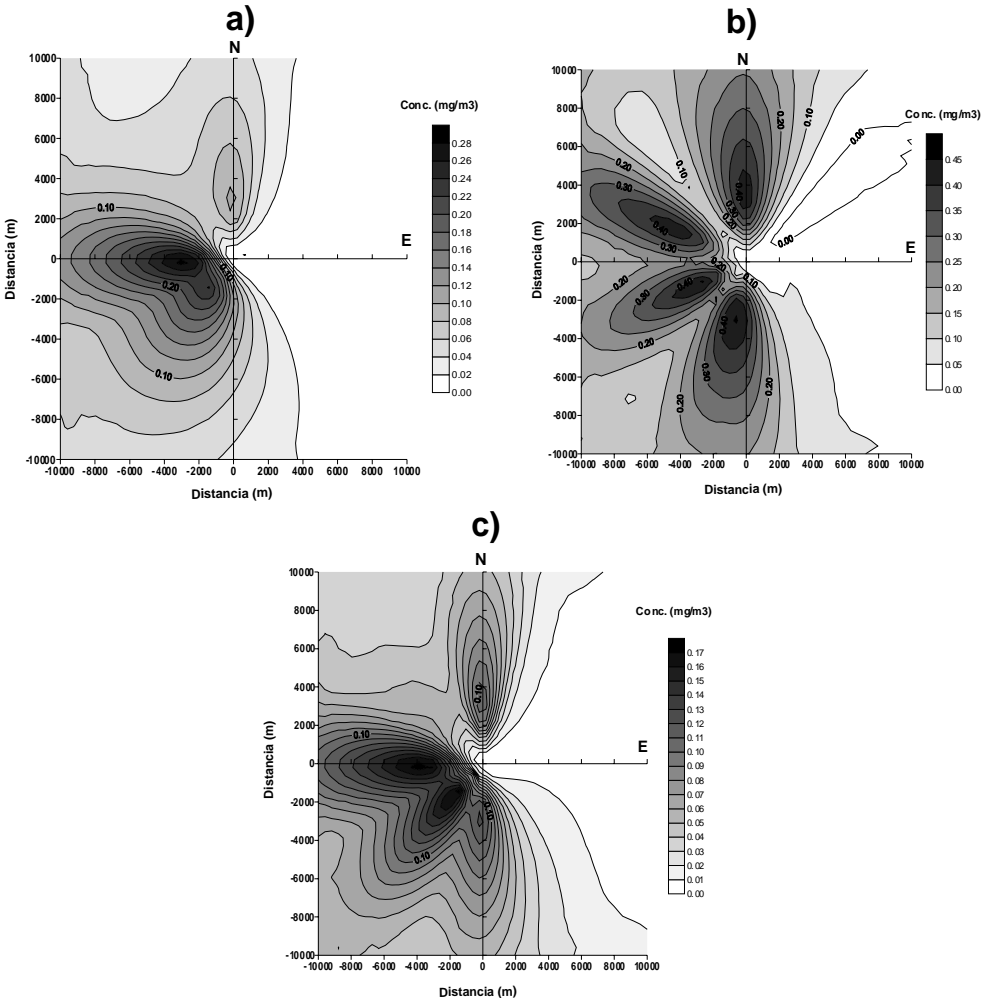


Fig. 4. Pronóstico de Dispersión de Contaminantes para el período 1991-1995 (b), a partir de la tendencia aplicada al período 1986-1990 (a) y su comparación con el encontrado para el período 1991-1995 (c) con la matriz de rapidez vs rumbo de ese período en Casablanca. Fuente en (0,0).

Conclusiones

No cabe dudas que los modelos de Dispersión de Contaminantes constituyen una herramienta eficaz en la búsqueda de soluciones para el control de la calidad del aire, lo cual ha llevado a que numerosos científicos presten gran atención a la mejora de los modelos o la creación de otros nuevos, prueba de ello es el trabajo presentado, en la que se hace uso de una nueva metodología, obteniéndose las siguientes conclusiones.

1. Para la estación Casablanca los rumbos del viento tienden a variar en el primero y segundo cuadrantes (direcciones desde el **N** hasta el **SSE**) en superficie con disminución en el **NE** y el **E** y aumento en el **ENE**. A partir del **S** y hasta el **NNW** el rumbo presenta gran estabilidad.
2. El Patrón de Dispersión de Contaminantes pronosticado para el período 1996-2000 no muestra diferencias significativas con relación al quinquenio anterior, es decir mantendrá las mismas características que el Patrón del quinquenio 1991-1995.
3. La metodología descrita permitió en principio pronosticar el patrón de dispersión de contaminantes teniendo en cuenta solo la variabilidad natural o de fondo, lo cual constituye un paso de avance en los propósitos planteados anteriormente, sin embargo, debe seguirse trabajando en la búsqueda de nuevos métodos de

pronóstico que tengan en cuenta no solo la variabilidad natural, sino también los Cambios Climáticos.

Referencias

Álvarez, 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. et. al, 1996. Aplicación de las matrices de probabilidad a los problemas del medio ambiente y discusión de algunas operaciones matriciales de nueva creación. VII Congreso Argentino y VII Congreso Latinoamericano e Ibérico de Meteorología. Buenos Aires. 293-294 pp.

Álvarez, R. 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.

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

Venkatram, A. et. al, 1992: Evaluating Air - Quality Models: Review and Outlook, Journal of Applied Meteorology, vol. 31, No.10, October 1992.

Yule, M. A. y Kendall, M. A. 1958 An introduction to the Teory of Statistics. Griffin 701 pp.