ANÁLISIS PRELIMINAR DE LAS TENDENCIAS CLIMÁTICAS EN TRES LOCALIDADES DEL ESTADO DE VERACRUZ, Y SUS POSIBLES CAUSAS *

Mario M. Ojeda**
Adalberto Tejeda***
Moisés Mahe**
Salvador Ruiz**

Resumen

Se presenta un análisis de las series de temperatura media anual y lluvia total anual en el periodo 1923-1988, para las localidades de Veracruz (19°12' N, 96°8'W, 16 msnm), Xalapa (19°32' N, 96° 55' W, 1 420 msnm) y Las Vigas (19° 38' N, 97°5' W, 2 421 msnm). Se pretende ponderar, de manera preliminar, el impacto del incremento de concentraciones de CO_2 atmosférico, la ocurrencia de El Niño u Oscilación del Sur (ENSO), las perturbaciones tropicales del Pacífico y del Atlántico, y la urbanización, sobre la lluvia y la temperatura. Para ello se hace uso de técnicas estadísticas tales como suavización de series, elaboración de gráficos de cajas, análisis de correlación y de correlación canónica. Las conclusiones plantean conjeturas para investigaciones venideras.

Palabras clave: Tendencias climáticas, técnicas de análisis exploratorio de series de tiempo.

Summary

This paper presents an analysis of the time series of yearly mean temperatures and yearly precipitation during 1923-1988 for Veracruz (19°12' N, 96°8'W, 16 masl), Xalapa (19°32' N, 96° 55' W, 1 420 masl) and Las Vigas (19° 38' N, 97°5' W, 2 421 masl). In order to weigh in preliminary form the impact of the increase of atmospheric CO_2 concentrations, the presence of El Niño or Southern Oscilation (ENSO), the tropical atmospheric disturbances in the Pacific and the Atlantic Oceans, and the urbanization on both the rainfal and the temperature, we use statistical techniques as smoothing series, box plots, simple correlation and canonical correlation analysis. The conclusions carry out conjetures for future research.

Keywords: Climatic trends, exploratory statistical techniques for time series analysis.

Introducción

Las variaciones y los cambios climáticos cada vez adquieren mayor interés entre los estudiosos de distintas disciplinas. Desde los climatólogos propiamente dichos, hasta economistas y sociólogos que pretenden prevenir los impactos que traerá a la sociedad un

* Recibido: 19 de marzo de 1992.

** Laboratorio de Investigación y Asesoría Estadística (LINAE), Facultad de Estadística, Universidad Veracruzana, Xalapa, Ver.

*** Especialidad en Climatología, Universidad Veracruzana, Apdo. Postal 136, Xalapa, Ver.

cambio drástico en las condiciones atmosféricas prevalecientes, participan en diferentes estudios relacionados con los cambios climáticos.

Desde el punto de vista de la estadística son de interés, principalmente, la detección de tendencias de determinadas variables climáticas y la ponderación de distintas causas en esas tendencias.

Afortunadamente, en la actualidad se cuenta con series de datos climáticos, de varias décadas, que permiten realizar los estudios antes señalados, y cada vez se conoce más sobre las causas de la evolución climática.

Harrington (1987) hace una amplia revisión de esas causas desde edades geológicas hasta considerar los fenómenos más preocupantes en nuestros días, como el constante incremento de bióxido de carbono (CO_2) atmosférico, que por ser un gas no transparente a la radiación calórica terrestre, puede conducir a un incremento global de la temperatura del planeta (efecto invernadero). De acuerdo con el mismo Harrington, desde 1861 a la fecha, se ha detectado una clara tendencia al incremento de la temperatura atmosférica a escala planetaria. Igualmente, las concentraciones de CO_2 medidas en Hawai (lejos de zonas contaminadas) muestran que desde 1958 han aumentado a razón de 0.3% anual, llegando en la actualidad a 330 ppm. Esto puede ser el origen de calentamientos oceánicos que bien pueden inducir un incremento en la ocurrencia de tormentas tropicales.

Johnes y Wigley (1990) al estudiar los datos de temperaturas del último siglo en 1584 estaciones climatológicas del hemisferio norte y 293 del hemisferio sur, encontraron que, en promedio mundial, la temperatura se ha incrementado en 0.5°C, lo que es congruente con la teoría del efecto invernadero producido por el CO_2. Puesto que la temperatura de los centros citadinos es mayor en uno o dos pares de grados centígrados respecto a los suburbios (Landsberg, 1981), Johnes y Wigley ponderaron el efecto de la urbanización en el calentamiento global, encontrando que es de alrededor de 0.1°C. Ese calentamiento global también puede ocasionar un aumento en la frecuencia de ocurrencia del fenómeno llamado El Niño u Oscilación del Sur (ENSO). El Niño consiste en una anomalía en la temperatura de la corriente marina fría de Humboldt (frente a la costa del pacífico de América del Sur), cuando la presión atmosférica al nivel del mar es mayor en Darwin (12°28′ S, 130°51′ E) que en Tahití (17°32′ S, 149°34′ W), lo que se asocia con anomalías en el comportamiento atmosférico mundial (Schneider y Schönwiese, 1989).

Mosiño y Morales (1988) analizaron las relaciones entre las lluvias en Tacubaya, D.F. (19°24' N, 99°12' W, 2 309 msnm) y ENSO, junto con la presencia de perturbaciones tropicales en el Atlántico y en el Pacífico. Encontraron que las lluvias en esa localidad prácticamente no dependen de la presencia de tormentas tropicales en el Atlántico, y que la relación con las tormentas del Pacífico se acentúa ante la presencia de ENSO.

Aquí se pretende ponderar, de manera preliminar, el impacto del CO_2, ENSO, las perturbaciones tropicales del Pacífico y del Atlántico, y la urbanización, sobre la lluvia y la temperatura, mensuales de Xalapa, Veracruz y Las Vigas. Se usaron técnicas estadísticas tales como suavización de series, elaboración de gráficos de cajas, análisis de correlación y de correlación canónica. Los resultados corroboran, en gran parte, lo reportado en los trabajos antes citados, pero se resalta la necesidad de incursionar en el modelaje multivariado de series de tiempo.

Datos

Luna Bauza (1987) reportó los datos de temperaturas medias y lluvias totales para cada mes y cada año del periodo 1917-1986 para la ciudad de Veracruz; de la representación estatal del Servicio Meteorológico Nacional se obtuvieron los mismos datos para el periodo 1923-1988 para Xalapa y Las Vigas. Así, fue posible formar una base de datos que contiene las temperaturas medias mensuales y anuales, y las lluvias totales mensuales y anuales para esas localidades en el periodo 1923-1988. Del trabajo de Mosiño y Morales (1988) se obtuvieron los datos de años con ENSO débil, moderado o fuerte, dándoseles un valor de 2, 3 o 4, en ese orden. Para los años inmediatamente anteriores o posteriores al ENSO, se asignó un valor de 1, y el valor 0 se reservó para los años carentes de ENSO, no precedidos o seguidos de un año con ENSO. Del Atlas de Huracanes (SPP, 1979) se obtuvo la serie del número de perturbaciones tropicales (depresiones, tormentas o ciclones) del Océano Pacífico y del Atlántico, que hayan cruzado por las regiones marítimas comprendidas en la **figura 1**. Se completó la información con datos proporcionados directamente por el Departamento de Climatología del Servicio Meteorológico Nacional. Los datos de concentraciones de CO_2 se obtuvieron de Harrington (1987).

Puesto que la homogeneidad en la toma de los datos a través del tiempo es fundamental, se corroboró que la estación climatológica de Las Vigas, si bien ha cambiado de ubicación, siempre ha estado bajo condiciones ambientales (topográficas, de vegetación, exposición al viento, etc.) muy similares. Otro tanto se puede decir del observatorio del puerto de

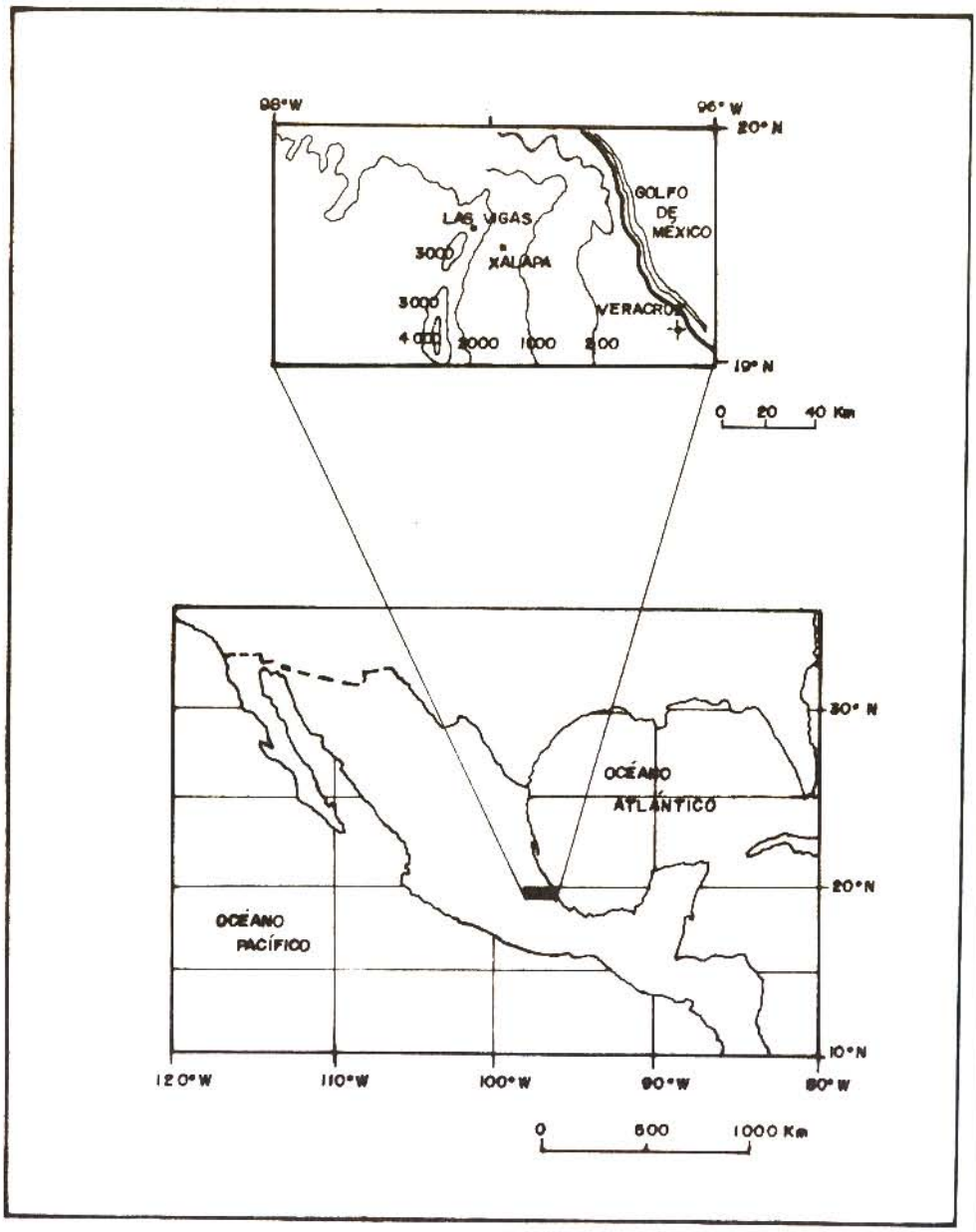

Figura 1. Arriba: Ubicación de las estaciones estudiadas. **Abajo**: Áreas de los océanos Pacífico y Atlántico consideradas para cuantificar el número anual de perturbaciones tropicales.

Veracruz, que siempre ha estado en lo alto de edificios de cuatro o cinco pisos, en las proximidades del malecón, con los instrumentos en garita meteorológica a dos metros sobre el piso de cemento.

Sin embargo, para Xalapa se tuvieron que corregir los datos de temperatura media anual a partir de 1977, pues a mediados de 1976 se cambió el observatorio del centro de la ciudad a la periferia. Según Tejeda y Acevedo (1989) por efectos de la urbanización se ha destacado que entre la antigua y la nueva ubicación del observatorio hay de 2 a 4°C de diferencia. Aquí se optó por aumentar en 2°C las temperaturas medias anuales desde 1977, lo que simplemente ocasiona un efecto de reescalamiento de la serie en este último periodo, sin efecto sobre las conclusiones.

Metodología

Para visualizar la tendencia de las series se utilizaron promedios móviles de cinco términos (Tukey, 1977), ya que mantienen un balance entre la pérdida de información y la descripción de las tendencias. El proceso de suavizamiento se realizó para todas las series de temperaturas y precipitación total anual, mediante un análisis computacional iterativo.

Las gráficas de "cajas y alambres" (Tukey, 1977) permiten explorar la distribución de los datos. Estas gráficas se construyen obteniendo el valor mínimo, el máximo, la mediana y los cuartiles primero y tercero, así como un intervalo no paramétrico para la mediana. Asimismo, se identificaron puntos externos.

Para estudiar la asociación entre las variables analizadas se obtuvieron las matrices de correlaciones de Pearson, considerando todos los años, por un lado y, por el otro, considerando los años con ENSO igual a cero.

Se corrió un análisis de Correlación Canónica (Cooley y Lohnes, 1971)[1] usando las variables de precipitación y temperatura como el primer grupo y el resto como el segundo grupo. La técnica de Correlación Canónica permite, entre dos grupos de variables explorar la intensidad y forma de la correlación ponderando la importancia de las variables. El procedimiento consiste en formar combinaciones lineales de variables en cada grupo maximizando la correlación lineal entre ellas. Se realizan tantas combinaciones de correlaciones lineales como el mínimo de variables por grupo.

---

[1] Cooley W., W. y P. R. Lohnes, *Multivariate Data Analysis*, págs. 169-193.

La aplicación del procedimiento está sujeta a que las combinaciones lineales sean ortogonales entre grupos, y dentro de grupos, siempre que tengan índices distintos; es decir, las combinaciones lineales, también llamadas variables canónicas, sólo están correlacionadas por parejas. Para decidir la significancia de una correlación se usó la prueba de la Lambda de Wilk y también se refirió el estadístico aproximado chi-cuadrada (Cooley y Lohnes, 1971).[2] Se interpretaron las correlaciones que resultaron significativas. Se realizaron cuatro análisis de este tipo. Dos con las series completas, uno quitando el CO_2 y otro con el CO_2; y dos análogos para la serie considerando únicamente los años con ENSO igual a cero.

Resultados

I. Al analizar los resultados de la suavización de series se observa que:

1. En términos generales las series de lluvia de Xalapa y Las Vigas no muestran una tendencia clara (**figuras 3*b*** y **3*c***). Sí presentan una ligera tendencia al aumento en la lluvia de Veracruz (**figura 3*a***).

2. La década de 1950-1960 muestra una época de máxima lluvia para el periodo 1923-1988 (**figura 4*b***).

3. Las temperaturas medias anuales muestran una clara tendencia al incremento (**figuras 2*a*** a **2*c*** y **4*a***) sobre todo en Xalapa, debido, seguramente, a la urbanización, pues Veracruz no lo muestra tan claramente por tener la ubicación del observatorio como se especificó antes. Las Vigas no ha sufrido tan intensamente la urbanización, de manera que la serie de la diferencia de temperaturas entre Xalapa y Las Vigas (Txal - Tvigas; **figura 5*b***), muestra una tendencia similar a la de Xalapa. Es decir, al graficar (Txal - Tvigas) ya no se reflejan las tendencias de cambio térmico de escala regional o global, sino sólo las locales de Xalapa.

4. El número de perturbaciones tropicales en la región del Océano Atlántico considerada en la **figura 1**, casi ha permanecido estacionaria. No así en el Pacífico, donde se corresponden muy bien la tendencia al aumento de la presencia de estos fenómenos con el aumento de CO_2 (**figuras 6*a*** a **6*c***).

---

[2] *Ibid.*, pág. 175.

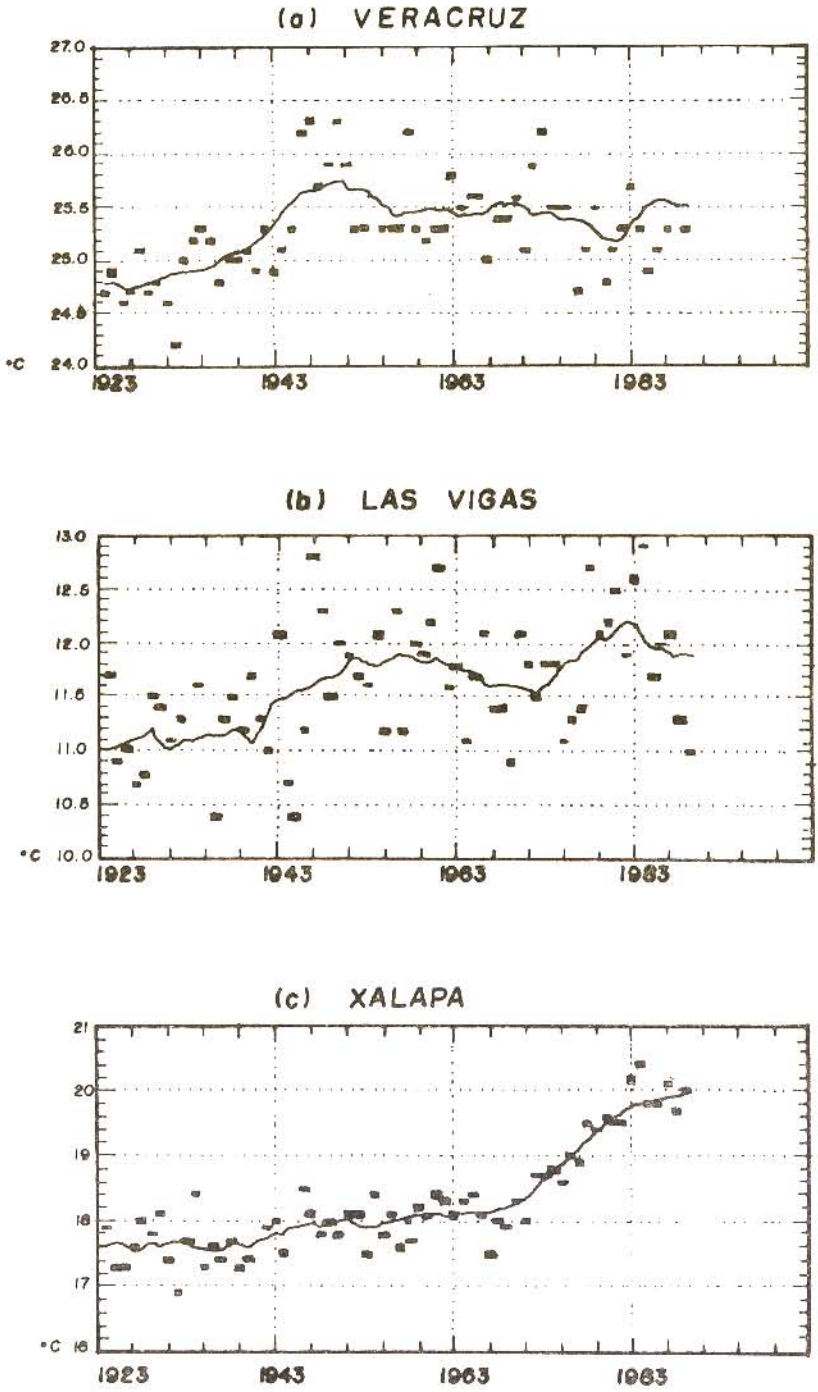

Figura 2. Series suavizadas de las temperaturas medias anuales de Veracruz (*a*), Las Vigas (*b*) y Xalapa (*c*).

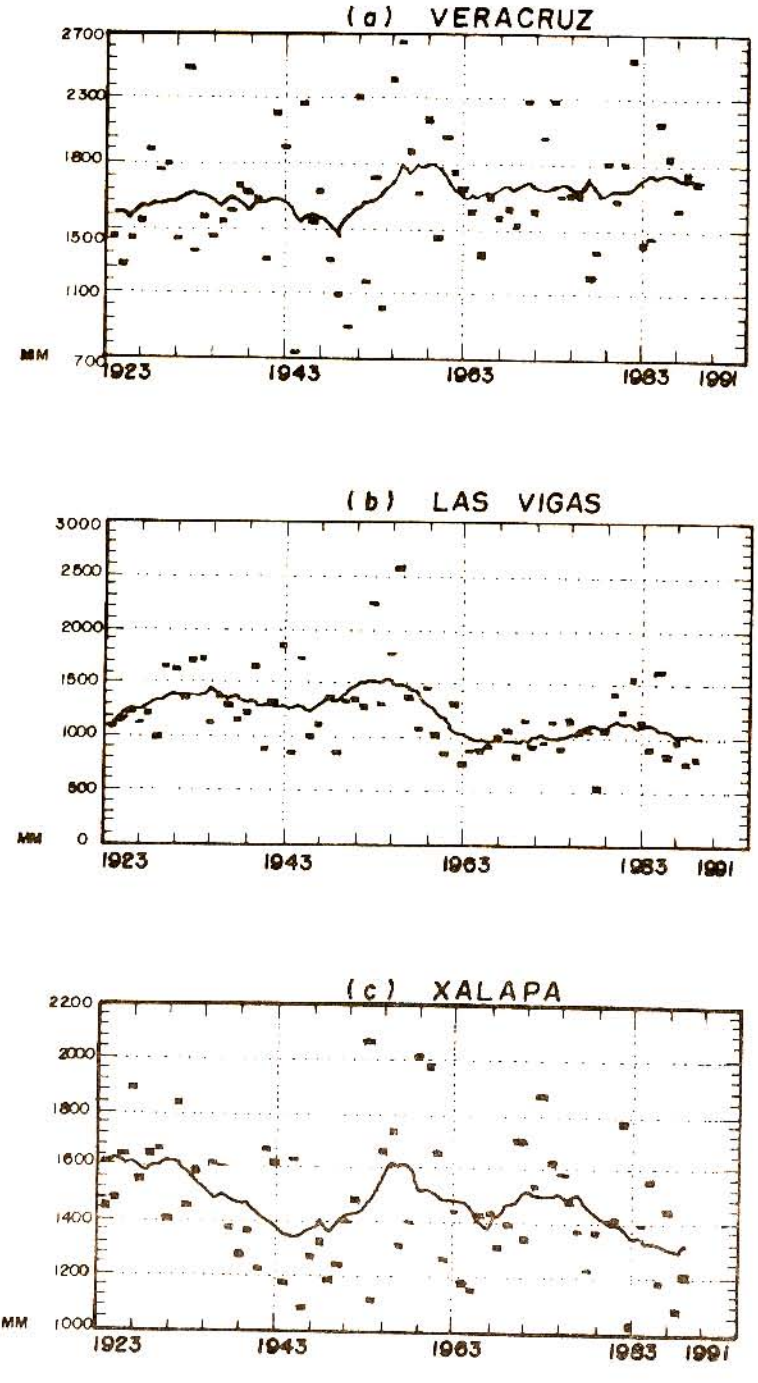

Figura 3. Series suavizadas de las precipitaciones totales anuales de Veracruz (*a*), Las Vigas (*b*) y Xalapa (*c*).

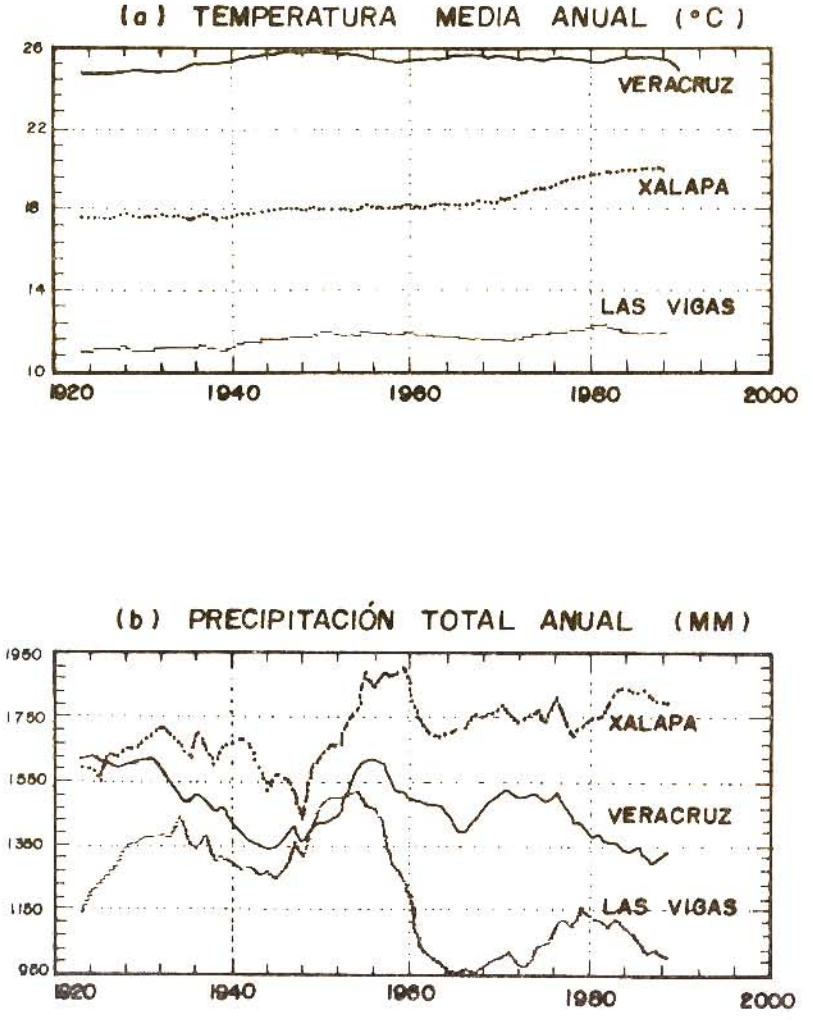

Figura 4. Gráficas comparativas de las tendencias de temperaturas medias anuales (*a*) y de precipitaciones totales anuales (*b*) de las tres localidades.

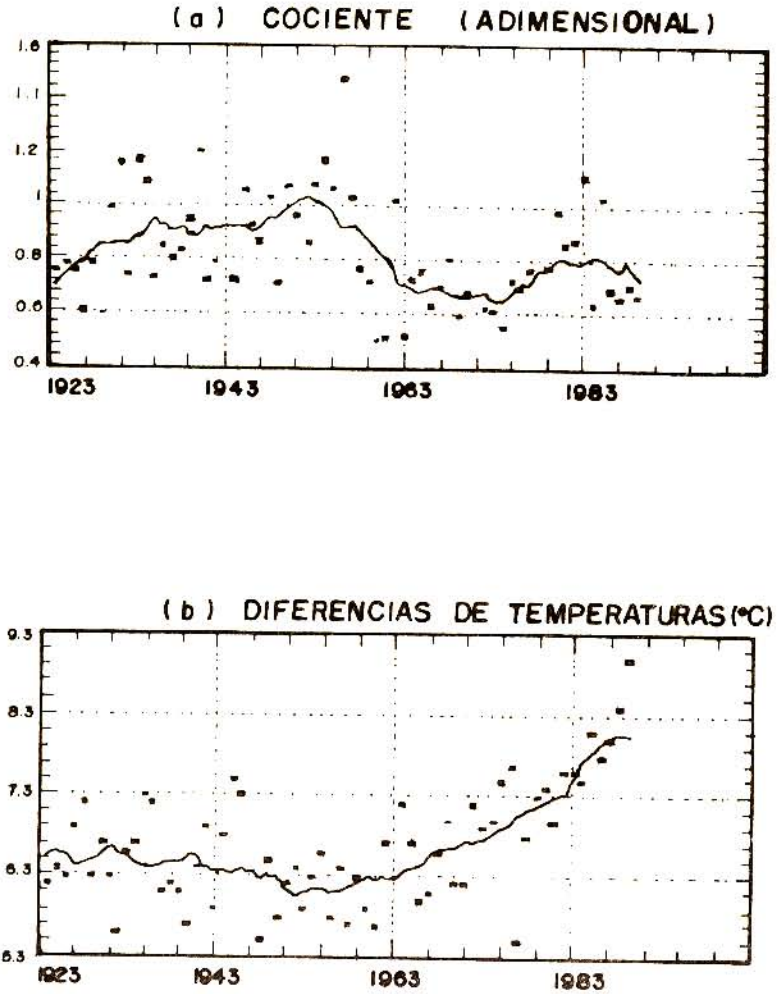

Figura 5. Gráficas comparativas de precipitación total y temperatura media anuales entre Xalapa y Las Vigas: (*a*) el cociente precipitación de Las Vigas entre precipitación de Xalapa, y (*b*) las diferencias de temperatura de Xalapa menos temperatura de Las Vigas.

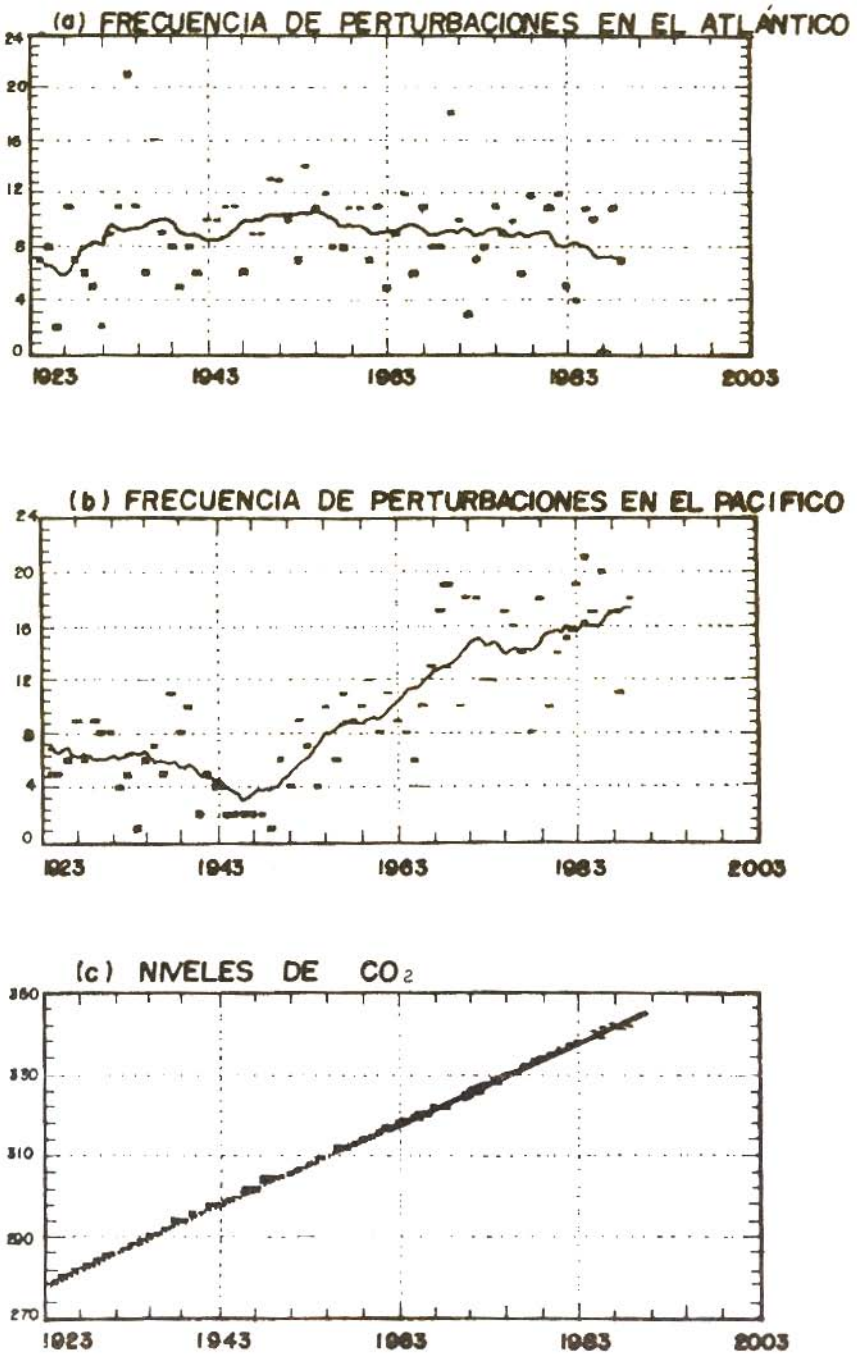

Figura 6. Tendencias suavizadas de (*a*) frecuencia anual de perturbaciones tropicales en el Atlántico, (*b*) *idem* en el Pacífico y (*c*) concentraciones de CO_2 medidas en Mauna-Loa (la línea punteada son datos inferidos, mientras que la continua corresponde a mediciones).

II. Al analizar los resultados de las matrices de correlación (**tablas 1** y **2**), se observa l siguiente:

1. El CO_2 aparece altamente correlacionado con el número de perturbaciones en el Pacífic (r=0.7), resultado que corrobora la afirmación se Schneider y Schönwiese (1989).

2. El CO_2 se correlaciona con las temperaturas de Las Vigas (0.6) y Xalapa (0.8), pero con Veracruz no se conserva esta correlación, lo que sustenta la hipótesis de que está presente algún factor de confusión; por ejemplo, para el caso de Xalapa podría ser la urbanización y para Las Vigas el nivel de deforestación (**tabla 1**).

3. Las perturbaciones tropicales en el Atlántico no aparecen correlacionadas significativamente con ninguna de las variables restantes (**tabla 1**).

4. La estructura de correlación entre lluvias de las diferentes localidades es significativa; en cuanto a las temperaturas sólo se correlacionan significativamente las de Xalapa y Las Vigas (**tabla 1**).

5. De las correlaciones entre lluvias y temperaturas en las diferentes localidades se sigue que la lluvia y la temperatura no aparecen correlacionadas significativamente en general (**tabla 1**).

6. Al observar globalmente las dos matrices de correlación se puede concluir que la presencia del ENSO decrementa los niveles de asociación lineal, por tanto es difícil establecer relaciones climáticas con otros factores. Esto está en concordancia con lo que mencionan Schneider y Schönwiese (1989), pero se opone a lo encontrado por Mosiño y Morales (1989) sobre la relación de las tormentas del Pacífico y las lluvias de Tacubaya.

Al observar las gráficas de cajas (**figuras** 7*a* a 7*c* y 8*a* a 8*c)* se corrobora la hipótesis de que en general la presencia del ENSO incrementa la dispersión o mayor variabilidad, del clima observándose que el lugar menos afectado es Las Vigas.

III. Al analizar los resultados del análisis de correlación canónica (**tablas 3, 4** y **5**), se tienen como aspectos que sobresalen, los siguientes:

Tabla 1. Matriz de correlación de todos los años

	LLVER	LLVIG	LLXAL	TEMVE	TEMVI	TEMXA	NINIO	PATL	PPAC	CO2
LVER	1.0									
LVIG	0.4	1.0								
LXAL	0.5	0.5	1.0							
EMVE	0.0	-0.2	-0.3	1.0						
EMVI	0.1	-0.1	-0.1	0.2	1.0					
EMXA	0.1	-0.3	-0.3	0.3	0.5	1.0				
INIO	0.1	0.0	0.1	0.1	0.1	0.0	1.0			
ATL	0.1	0.2	0.1	0.1	0.0	-0.1	-0.3	1.0		
PAC	0.2	-0.3	0.0	0.0	0.2	0.6	-0.1	0.2	1.0	
O2	0.2	-0.3	-0.2	0.4	0.5	0.8	-0.1	0.0	0.7	1.0

Tabla 2. Matriz de correlación con ENSO=0

	LLVER	LLVIG	LLXAL	TEMVE	TEMVI	TEMXA	PATL	PPAC	CO2
LLVER	1.0								
LLVIG	0.6	1.0							
LLXAL	0.6	0.6	1.0						
TEMVE	0.2	-0.1	0.0	1.0					
TEMVI	0.4	0.1	0.0	0.1	1.0				
TEMXA	0.4	0.0	-0.1	0.0	0.6	1.0			
PATL	0.3	0.3	0.2	0.0	0.1	0.1	1.0		
PPAC	0.1	-0.3	-0.2	0.0	0.3	0.5	-0.1	1.0	
CO2	0.2	-0.2	-0.2	0.2	0.6	0.8	0.1	0.7	1.0

1. Cuando no se considera la tendencia del CO_2, la asociación con las fluctuaciones climáticas se presenta fundamentalmente entre las perturbaciones en el Pacífico y la temperatura de Xalapa.

2. Al considerar el CO_2 se observa que éste impacta la temperatura de Xalapa, y que esta asociación es la más importante encontrada en los datos.

3. También de manera sobresaliente aparecen asociadas las lluvias de Las Vigas, la temperatura de Xalapa y de Veracruz de manera inversa con el número de perturbaciones en el Pacífico. Sin embargo, aparece un hallazgo relevante: cuando el CO_2 observa bajos niveles (en los primeros años de la serie) y el número de perturbaciones en el Pacífico fue alto, se observa generalmente que había un incremento en la temperatura de Xalapa, y un decremento en la lluvia de Las Vigas, la temperatura de Veracruz y la de Las Vigas. En los

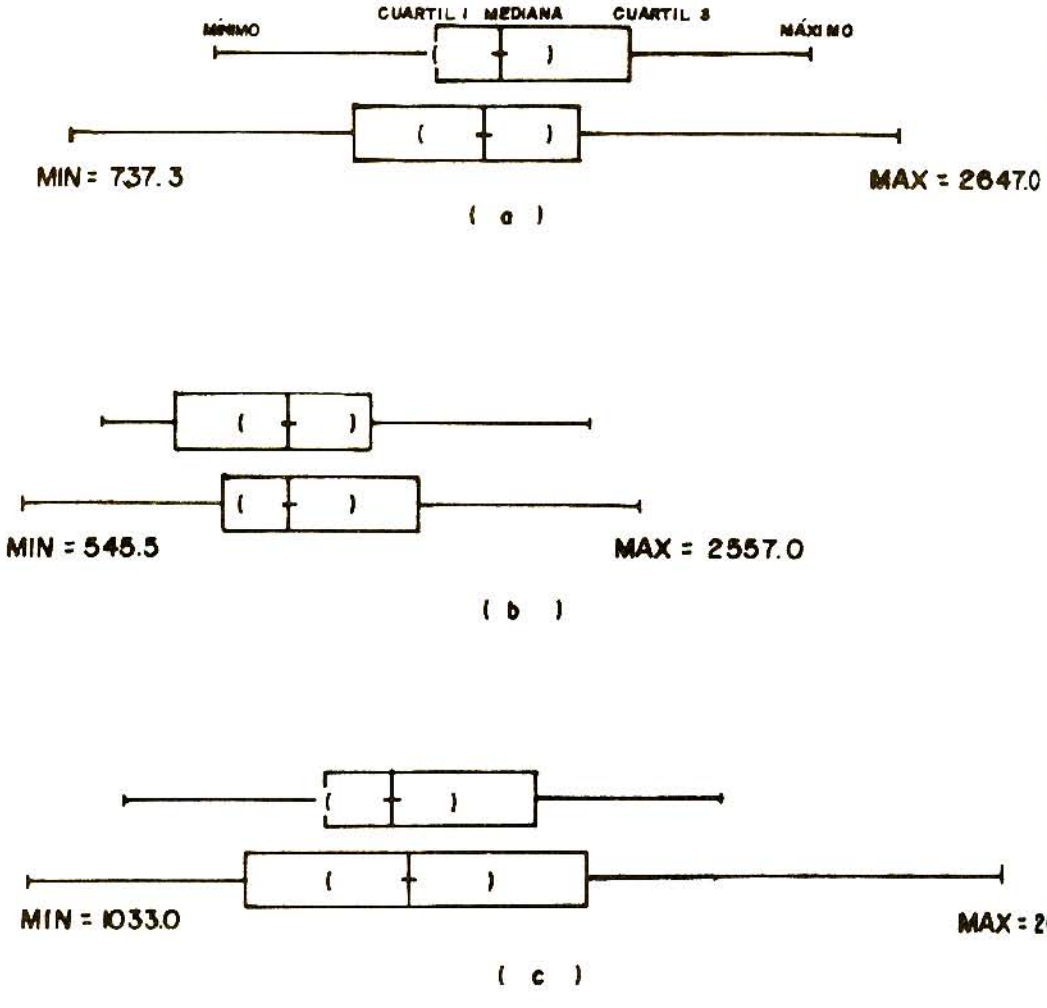

Figura 7. Gráficas de distribución de precipitaciones totales anuales en las tres localidades: (*a*) Veracruz, (*b*) Las Vigas y (*c*) Xalapa. **Arriba**: años con ENSO igual a cero. **Abajo**: el resto de años. Los paréntesis indican el intervalo de la mediana al 95% de confianza.

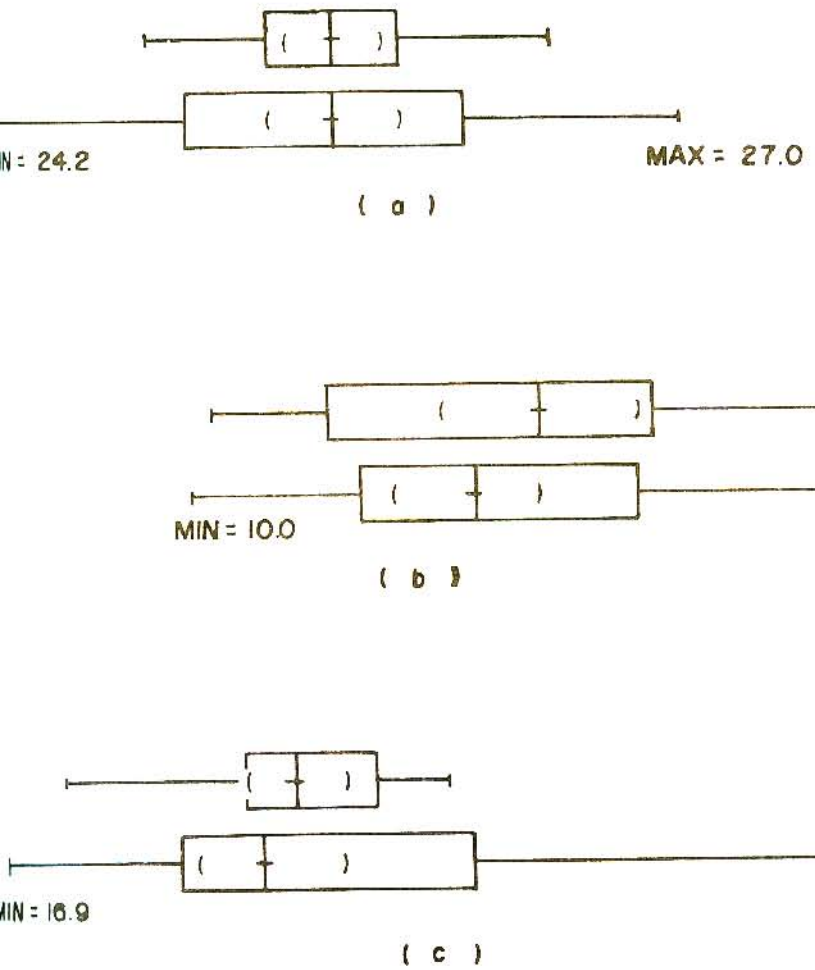

Figura 8. Gráficas de distribución de temperaturas medias anuales en las tres localidades: (*a*) Veracruz, (*b*) Las Vigas y (*c*) Xalapa. **Arriba**: años con ENSO igual a cero. **Abajo**: el resto de años. Los paréntesis indican el intervalo de la mediana al 95% de confianza.

Tabla 3. Resultados del análisis de correlación canónica incluyendo CO_2

CORR. CAN.	1	2	3	4
VALORES	0.8726	0.5060	0.2973	0.1851
LAMBDA DE W.	0.1563	0.6550	0.8804	0.9658
JI-CUADRADA	110.44	25.18	7.58	2.07
GRADOS DE L.	24	15	8	3
NIV. DE SIG.	0.0000	0.0476	0.4757	0.5573
COEF. VAR. Y				
LLVER	0.1044	0.3004	0.6399	-0.7022
LLVIG	-0.1515	-0.5386	-0.4202	-0.6731
LLXAL	0.0456	0.1340	-1.1197	0.6181
TEMVER	0.2447	-0.8156	-0.2998	-3.6046
TEMVIG	0.1142	-0.3694	0.2610	0.4877
TEMXAL	0.7913	0.4254	-0.5832	-0.2572
COEF. VAR. X				
ENSO	0.1480	-0.3217	-0.8775	0.4737
PATL	-0.0551	-0.1748	-0.7825	-0.7749
PPAC	-0.1594	1.3062	-0.8683	-0.2200
CO2	1.1146	-0.8762	0.5951	0.0712

Tabla 4. Resultados del análisis de correlación canónica sin incluir CO_2

CORR. CAN.	1	2	3
VALORES	0.6913	0.3634	0.1862
LAMBDA DE W.	0.4375	0.8379	0.9653
JI-CUADRADA	49.604	10.613	2.118
GRADOS DE L.	18	10	4
NIV.DE SIG.	0.0001	0.3884	0.7142
COEF.VAR. Y			
LLVER	0.1724	-0.6067	-0.7494
LLVIG	-0.3467	0.6199	-0.6507
LLXAL	0.2288	0.7195	0.7390
TEMVER	-0.1637	0.8021	-0.0351
TEMVIG	-0.1200	0.0664	0.4267
TEMXAL	0.9602	0.3735	-0.1994
COEF. VAR. X			
ENSO	0.0996	0.9146	0.5221
PATL	0.0713	0.7994	-0.7243
PPAC	1.0197	0.1606	-0.1287

Tabla 5. Resultados del análisis de correlación canónica sin incluir el ENSO

CORR. CAN.	1	2	3
VALORES	0.8602	0.4651	0.2782
LAMBDA DE W.	0.1880	0.7230	0.9226
JI-CUADRADA	35.092	6.812	1.692
GRADOS DE L.	18	10	4
NIV. DE SIG.	0.0092	0.7431	0.7922
COEF. VAR. Y			
LLVER	-0.1929	0.4819	-1.0365
LLVIG	-0.0541	-1.1610	0.2030
LLXAL	-0.0182	0.0922	-0.0571
TEMVER	0.2276	-0.5400	0.7104
TEMVIG	0.3391	-0.4909	0.1118
TEMXAL	0.7854	0.2169	0.0285
COEF. VAR. X			
PATL	-0.1170	-0.3384	-0.9662
PPAC	-0.3077	1.2520	-0.7569
CO2	1.2111	-0.7327	0.4752

últimos años (altos índices de CO_2), y cuando se presenta bajo número de perturbaciones en el Pacífico, sucede el fenómeno inverso.

4. Al tomar los años con ENSO igual a cero se ve que al considerar el CO_2 (**tabla 5**), éste está íntimamente asociado a la temperatura de Xalapa. Al excluir el CO_2, la asociación lineal deja de ser significativa, por lo que se corrobora la hipótesis general respecto al impacto de este factor sobre el clima.

Conclusiones

En lo referente a los aspectos climáticos se corrobora que la tendencia al incremento de las concentraciones de CO_2 ha impactado la frecuencia de ocurrencia de perturbaciones tropicales en el Pacífico, y que esto, a su vez, en asociaciones complejas, ha impactado el clima de las localidades estudiadas. Por otro lado, los años en que no se presenta el ENSO son más claras las interrelaciones climáticas de las localidades estudiadas. Aunque, tal vez, para esclarecer de mayor forma el fenómeno climático sería necesario considerar factores como niveles de urbanización (en Veracruz y Xalapa) e índices de deforestación en Las Vigas, los cuales pueden subyacer como factores de confusión en las relaciones encontradas.

En cuanto a la metodología estadística usada se debe recalcar que tiene carácter exploratorio. Sería necesario evolucionar al nivel de modelaje, lo que implicaría la consideración de modelos multivariados de series temporales.

Agradecimientos

Agradecemos al meteorólogo Federico Acevedo, de la Gerencia Estatal de la Comisión Nacional del Agua, el apoyo en el acopio de buena parte de la información aquí usada.

Referencias

Cooley W., W. y P.R. Lohnes, *Multivariate Data Analysis*, Wiley, Nueva York, 1971.

Harrington, J.B., "Climatic change: a review of causes", *Can J. For. Res.*, vol. 17, 1987, págs. 1313-1339.

Johnes, P.D. y M.L. Wigley T., Global warming trends, *Scientific Am.*, vol. 263-2, 1990, págs. 66-73.

Landsberg, H.E., "The urban climate", Ac. Press, 1981, págs. 84-126.

Luna-Bauza, C., "70 años de datos climáticos en Veracruz, Ver. 1917-1986", Ed. Ctro. Previsión del Golfo y Ayuntamiento, 1987, 41 págs.

Mosiño, P. y T. Morales, Los ciclones tropicales, El Niño y las lluvias en Tacubaya, D.F., *Geofísica Internacional*, vol. 27, 1988, págs. 71-82.

Schneider, U. y C. Schönwiese, Some statistical characteristic of El Niño/southern oscilation and North Atlantic oscilation indices, *Atmósfera*, vol. 2, 1989, págs. 167-180.

SPP, Atlas de Huracanes, DETENAL, 1979.

Tukey J., W., *Exploratory Data Analysis*, Addison Wesley, Nueva York, 1977.

Tejeda, A. y F. Acevedo, Aspectos termopluviométricos de las alteraciones climáticas por la urbanización, en la ciudad de Xalapa, Ver. (Méx.), *Memoria del IV Congreso Nacional de Meteorología*, 1989, págs. 55-58.