

La aridez en el noroeste de México. Un análisis de su variabilidad espacial y temporal

**SALINAS-ZAVALA C. A.* , D. LLUCH-BELDA, S. HERNÁNDEZ-VÁZQUEZ
and D.B. LLUCH-COTA**

**Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S. C., Unidad Guaymas, A. P. 349, Carretera a "Las Tinajas" Predio "El Tular",
Guaymas, Sonora, México.*

*Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S. C., A. P. 128, Km. 1. Carretera Instituto Politécnico Nacional, "El Conchalito",
La Paz, B. C. S.*

(Manuscrito recibido el 21 de enero de 1997; aceptado en forma final el 10 de junio de 1997)

RESUMEN

En el presente trabajo se estudian las condiciones de aridez de la región del noroeste mexicano formada por los cuatro estados que rodean el Golfo de California y se define el **Índice de Cobertura Árida Anual (ICAA)** como la fracción del área con valores del índice de Martonne menores o iguales a 5. El ICAA es utilizado para describir las variaciones de la extensión y localización de las zonas de aridez extrema, durante el periodo de estudio (1950-1990). Los resultados muestran una tendencia a la reducción de la cubierta árida del 30 % en los 41 años analizados. Se logró encontrar una correlación estadísticamente significativa entre el ICAA y la temperatura superficial del mar (TSM) en el área de la Corriente de California, que explica el 32 % de su variabilidad. Las correlaciones del ICAA con el Índice de Oscilación del Sur y con el Índice del Pacífico de Norteamérica, contribuyeron en menor grado en la explicación del fenómeno: 17 y 3 %, respectivamente. Agrupando estos factores en un modelo de regresión múltiple, hay una explicación total del 42 % de la variabilidad explicada. En el análisis espacial de las zonas áridas extremas se encontró que en la zona que abarca el Desierto de Altar y la porción meridional de la Península de Baja California, las condiciones de aridez son más persistentes que en el resto de la región estudiada.

ABSTRACT

The Aridity conditions in the northwest Mexican region formed by the states located around the Gulf of California are studied. The Annual Arid Cover Index (AACI) is defined as the fraction of the studied area with Martonne aridity index values less or equal to 5. The AACI is used to describe variations in the extension and localization of the extremely arid zones during the 1950-1990 period. The results show a tendency of the extension of the arid zone to reduce: 30 % in 41 years. A statistically significant explained variance of 32 % between the AACI and the sea surface temperature (SST) of the California Current zone was obtained. Correlation between the Southern Oscillation and the Pacific North America indexes show a smaller variance: 17 and 3 %, respectively. The multiple regression model gives a total coefficient of determination of 42 %. The variations in the geographical localization of the extremely arid zones show that the Altar Desert and the meridional zone of the Baja California Peninsula have the more persistent arid conditions in the studied region.

Key words: Drought, Long-Term, Variability, Sonoran-Desert

1. Introducción

Desde sus albores las civilizaciones humanas siempre han estado sujetas a la influencia de fenómenos meteorológicos y climáticos. De hecho, las condiciones climatológicas en determinado momento de la historia, definieron en gran medida los asentamientos, movimientos masivos y la colonización de nuevas tierras por los seres humanos (Gribbin, 1986). Pero no son tan sólo las condiciones promedio del clima de un lugar las que determinan la adaptación de los seres vivos en la naturaleza; sino también las variaciones que presenta. Dentro de las variaciones del clima, los intemperismos severos, como las inundaciones y sequías, han determinado en gran medida las costumbres y cultura de muchas razas humanas. En particular, las sequías tienen gran importancia en el bienestar poblacional y sobretodo tienen gran repercusión en la sobrevivencia humana.

Debido a que la porción septentrional de nuestro país se encuentra al norte del Trópico de Cáncer y por lo tanto bajo la influencia del cinturón de altas presiones del Hemisferio Norte, una buena parte del territorio nacional, el 52% (Schmidt, 1989), se encuentra ubicado dentro de lo que se conoce como zonas áridas y semiáridas del planeta. La región del noroeste mexicano donde se ubica el Desierto Sonorense se encuentra bajo influencias oceánicas y atmosféricas que determinan su clima árido; particularmente, de la celda semipermanente de alta presión del Pacífico nororiental y de la corriente oceánica fría de California (García y Mosiño, 1968).

Las connotaciones socioeconómicas que los problemas de escasez de agua tienen, se han traducido en gran número de definiciones del término aridez. Se ha definido la sequía en términos de períodos durante los cuales la humedad del suelo es insuficiente para soportar cosechas (aridez agrícola), o como los períodos de bajo escurrimiento superficial que conllevan insuficiencia en el almacenamiento en reservorios naturales o artificiales (aridez hidrológica); períodos de baja oferta de agua que disminuye los procesos productivos de las sociedades y las actividades que dependen de ella (aridez económica). Finalmente, los períodos de bajas precipitaciones pluviales por lapsos prolongados que puede denominarse aridez meteorológica (Dracup *et al.*, 1980). En este trabajo se considera la última de ellas ya que el propósito del mismo se orienta a la búsqueda de las causas que propician este fenómeno en el noroeste mexicano.

En muchos otros lugares en el mundo con condiciones áridas se han llevado a cabo estudios con enfoques parecidos al utilizado en el presente trabajo. Relaciones entre la temperatura superficial del mar (TSM) y las condiciones de aridez han sido descritas para el desierto del Sahel (Folland, *et al.*, 1986); en Brasil (Namias, 1972); Chile (Romero, 1989), para Australia (Simmonds y Rocha, 1991), India y Sri-Lanka (Rasmusson y Carpenter, 1983) incluso para Europa (Namias, 1978) y, sobre todo para las Grandes Planicies de los EUA, (Orville, 1990; Mo *et al.*, 1991).

Adicionalmente, eventos extremos de condición térmica oceánica se han relacionado con las condiciones de sequías prevalecientes en diferentes lugares del mundo (Namias, 1989b). Un ejemplo de estos eventos es el sucedido durante 1988 y catalogado como uno de los fenómenos oceanográficos fríos más intensos en el Océano Pacífico ecuatorial y oriental. Este fenómeno es conocido como "La Niña" (Phillander, 1985).

Durante las últimas tres décadas, expertos en el pronóstico del clima han enfocado su atención hacia la estimación anticipada de las condiciones climáticas que se presentan en regiones particulares, sobre todo en escalas de tiempo que van más allá del patrón estacional. Recientemente se ha reconocido que este tipo de estudios son relevantes para el adecuado uso y manejo de los recursos naturales, entre ellos el agua (Lluch-Belda *et al.*, 1991). En la actualidad el estudio de las teleconexiones, junto con la reconocida importancia que los modelos estadísticos tienen en estas escalas de tiempo y espacio (Namias, 1972), son consideradas como uno de

los campos de la Ciencia que prometen resultados alentadores en el pronóstico del clima de largo plazo (Namias, 1985).

Por otro lado, muchos fenómenos biológicos se presentan en forma periódica, asociados con ciclos planetarios de corta duración como el ritmo circadiano, o de mayor alcance como el de las manchas solares, o incluso el de las glaciaciones (Gribbin, 1986). Estos ciclos planetarios influyen en la dinámica oceánica y atmosférica que a su vez determina el clima de una región en particular. En las zonas áridas, las variaciones interanuales de su condición de estiaje pueden asociarse no sólo con el ciclo planetario que determina las estaciones del año, sino también a otros de mayor amplitud. Algunos de los ciclos en la escala interanual, que han sido relacionados con los cambios en las variables que determinan el clima, son por ejemplo el ciclo de las manchas solares, que ocurre aproximadamente cada 11 años (Eddy *et al.*, 1982); otro, el doble del anterior - aproximadamente 22 años - se caracteriza por el cambio en la polaridad magnética del sol (Ciclo de Hale) y se ha asociado particularmente con las sequías que se presentan en las Grandes Planicies de los Estados Unidos. Muchos otros ciclos se han mencionado, tales como el ciclo de las mareas lunares, de 19 años aproximadamente (Currie, 1987); el ciclo cuasi-bianual durante el cual los vientos cambian de dirección en la atmósfera superior con una regularidad aproximada de 2 años (Gray y Schaeffer, 1991), e incluso el fenómeno de "El Niño" cuya periodicidad es todavía tema de estudio de muchos investigadores en el mundo (Trenberth, 1991).

El considerar los índices de aridez en el dominio del tiempo y del espacio le confiere un carácter más dinámico a los análisis que se efectúan, permitiendo identificar características de severidad, persistencia y posibles fluctuaciones cíclicas en los eventos climatológicos que determinan condiciones de aridez extrema. No se identifican antecedentes para la región noroeste de México sobre trabajos que analicen la variabilidad interanual de la aridez desde el punto de vista espacio-temporal.

Las carencias de agua en la región noroeste de la República Mexicana, hacen necesario el desarrollo de modelos económicos de producción acordes a esta condición ambiental. Para ello, en una primera etapa es necesario el entendimiento de las características climatológicas, su variabilidad y comportamiento, imperantes en esta región tan importante para la economía del país, que permitan proponer la utilización de modelos productivos diferentes a los planteados para las zonas húmedas. Durante muchos años se pensó que las condiciones climatológicas de un año a otro permanecían más o menos constantes, sobre todo en términos de rendimientos agrícolas. Particularmente es cierto en las décadas de los 40's y 50's, período que coincide con la "Revolución Verde" (Lluch-Belda *et al.*, 1991). Hoy en día se ha reconocido que el clima es dinámico y cambiante. Por ello, es importante identificar los cambios que se presentan más allá del ciclo estacional. El sector productivo de la sociedad más ligado al uso del agua requiere de información previa, en la escala de tiempo adecuada, que le dé una indicación de cuáles serán las condiciones ambientales que pueden determinar el éxito o el fracaso de su siguiente ciclo productivo. La región noroeste del país incluye una de las áreas más productivas de la República Mexicana, sólo en el sector agrícola el último censo económico (INEGI, 1990), indica que el 32% de la producción nacional de los principales granos como el frijol, maíz, trigo, soya y sorgo provino de los cuatro estados que bordean el Mar de Cortés.

De esta manera el presente trabajo pretende, como una primera aproximación, identificar las relaciones entre las fluctuaciones interanuales del clima árido de la región noroeste de México, la condición térmica del océano adyacente el Pacífico nororiental y algunos indicadores de la circulación atmosférica en latitudes medias y ecuatoriales con el propósito de plantear nuevos enfoques y consideraciones en el uso y manejo del recurso agua en la región noroeste de México.

2. Metodología

Los datos climatológicos de precipitación pluvial y temperatura se registraron sobre una base mensual para un total de 181 estaciones climatológicas, de los cuatro estados que bordean el Golfo de California: Sonora, Sinaloa, Baja California y Baja California Sur. La base de datos disponible incluye las estaciones climatológicas que hasta 1990 tenían 20 o más años en operación.

Para el caso de las mediciones de temperatura oceánica, se utilizó la Base de Datos NODC-01 (1950-1988) y NODC-03 (1989-1990) (Topoly *et al.*, 1989) preparada por la National Oceanic and Atmospheric Administration de los EEUU. Sobre la base de la ubicación y anchura promedio de la Corriente de California (Lynn y Simpson, 1987) se definieron 15 áreas oceánicas, las cuales se muestran en la Figura 1. De ellas se obtuvieron las series anuales de temperatura superficial del mar (TSM, observaciones entre 0 - 10 m de profundidad) sumando un total de 375,899 observaciones desde 1900 hasta 1990.

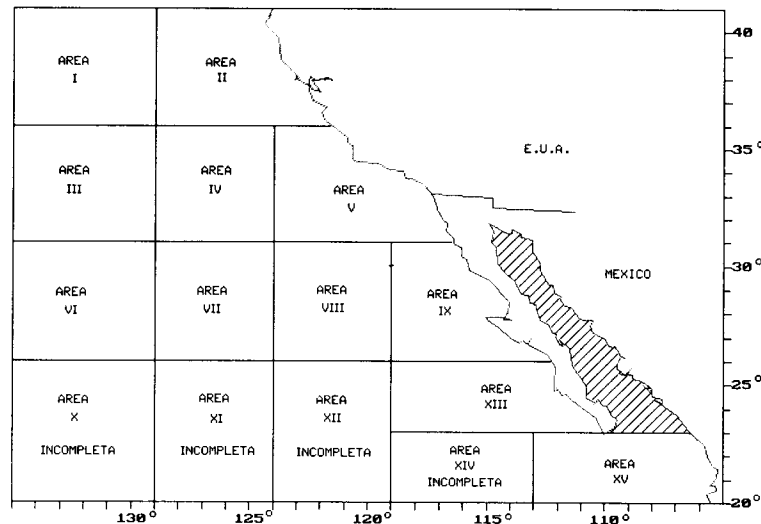


Fig. 1. Áreas oceánicas analizadas. El sombreado señala al Golfo de California no incluido en el análisis.

Dada la carencia de observaciones directas de información de los campos de vientos; se optó por utilizar un indicador que ha sido propuesto por varios autores como importante en la explicación de las posibles causas de la aridez meteorológica que se presentan en EUA, el Pacific North/American Index (PNA) a 700 mb (Wallace y Gutzler, 1981; Namias, 1989a). El otro índice atmosférico utilizado fue el Índice de Oscilación del Sur (IOS) el cual ha sido ampliamente utilizado en los últimos años, principalmente como indicador del fenómeno climático conocido como El Niño/Oscilación del Sur (ENOS) (Rasmusson y Wallace, 1983). De todos los índices de aridez propuestos en la literatura, se escogió el publicado por Martonne (1926), ya que relaciona en forma sencilla las variables de precipitación y temperatura del aire en superficie. El índice se define de la siguiente manera:

$$Ar = P / (T + 10)$$

donde: Ar = Índice de aridez; P = Precipitación anual (en mm);
T = Temperatura media anual (en grados centígrados)

La escala de clasificación que utiliza el Índice de Martonne (1926) es la siguiente: $I_a \leq 5$: árido; $5 < I_a \leq 10$: semiárido; $10 < I_a \leq 20$: estepas secas; $20 < I_a \leq 30$: praderas; $I_a > 30$: vegetación de bosque.

Para el cálculo de las áreas se desarrolló un programa de cómputo que se basa en el conteo del número de píxeles (puntos en la pantalla de la computadora) contenidos en un área particular - área delimitada por la isolínea de valor 5 de aridez-, inclusive. Con objeto de darle valores de superficie al número de píxeles, se definió una "ventana en pantalla" de 480 x 440 píxeles, correspondientes a 12 x 11 grados de latitud-longitud (el área que abarcan los mapas de la Figura 1), dando un total de 211,200 píxeles, equivalentes a 1'629,890.3 km², por lo tanto el valor relativo de cada píxel fue de 7.717 km². A la cuantificación final del número de píxeles, convertidos a km² para cada año analizado se le denomina en este trabajo **Índice de Cobertura Árida Anual (ICAA)**. El índice tiene por objeto cuantificar la expansión y contracción de los verdaderos desiertos. Para mayores detalles consultar, Salinas-Zavala (1995).

3. Resultados

Los valores del ICAA en el noroeste mexicano, muestran tasas de variación de un año a otro de hasta 35.6%, estos valores se muestran también en la Figura 2; en ella se observa la dinámica temporal que presenta el área desértica del noroeste de un año a otro. Otra característica de la serie es su tendencia decreciente, es decir, desde 1950 y hasta 1990 el ICAA señala que la cobertura árida del noroeste mexicano ha disminuido en un 36.7%. Es notorio que durante el primer lustro de la década de los 1970 la variación en la cobertura árida fue mínima. La distribución geográfica de las isolíneas del ICAA son muy similares durante el período 1970 a 1975 (Figs. 3-6); se trata de un período de poca variabilidad. Para acentuar las características de la serie en su conjunto, se eliminó la variabilidad de alta frecuencia. La Figura 2 muestra también la serie suavizada mediante la técnica de promedios móviles. En ella se observa de manera más clara la tendencia decreciente anteriormente descrita.

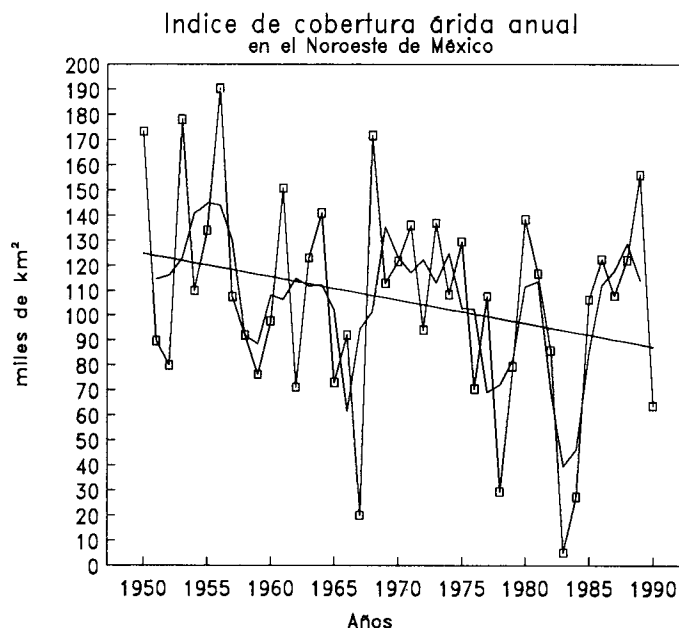


Fig. 2. Valores del Índice de Cobertura Árida Anual (símbolos), promedios móviles de 3 años (línea continua) y recta de tendencia lineal.

Derivado del análisis de autocorrelación aplicado a los valores del ICAA, se reveló una posible señal centrada en los 18 años con significancia al 95% de confianza.

Los resultados muestran que la mayor parte de la porción meridional de la Península de Baja California es

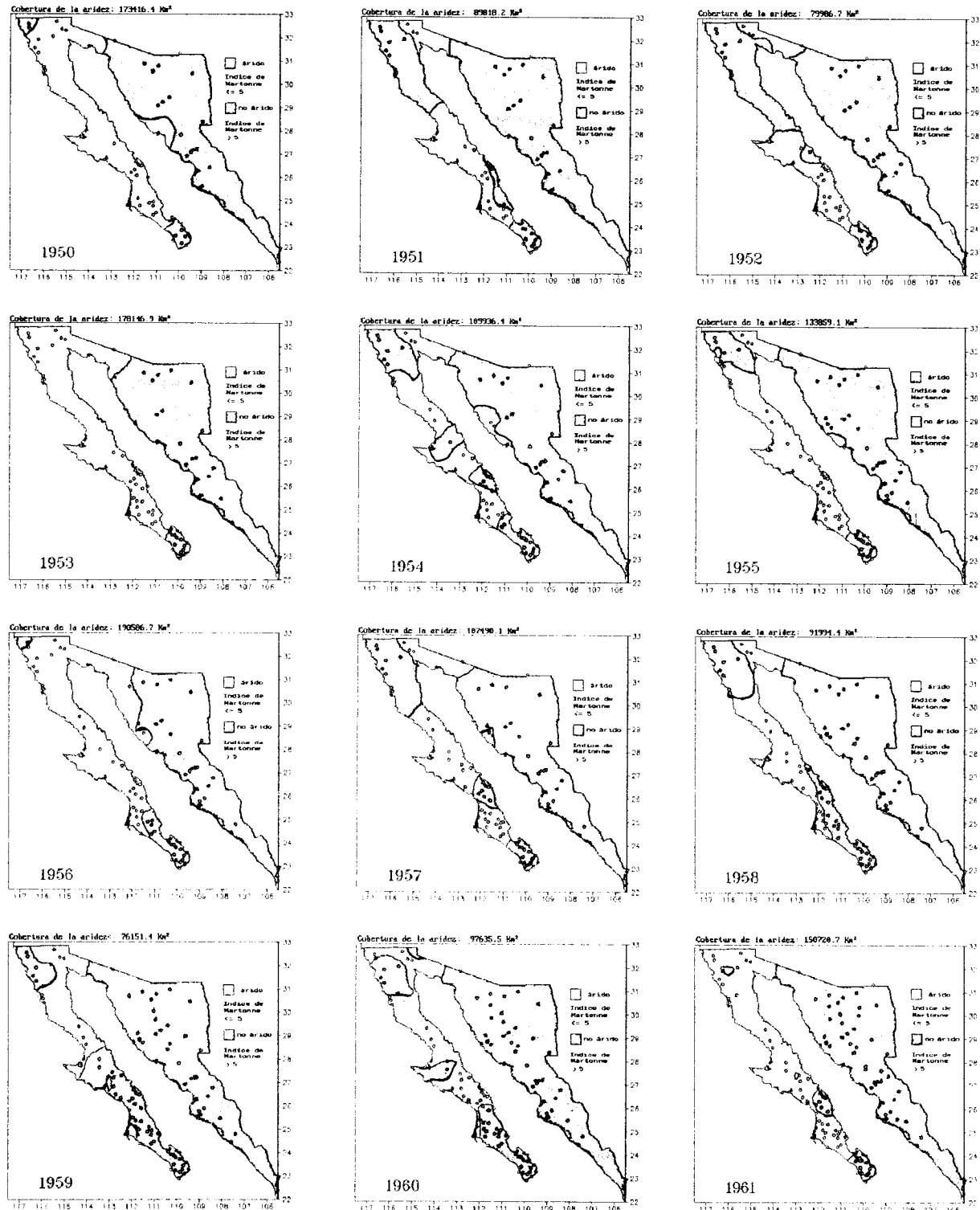


Fig. 3. Mapas de cobertura árida anual (1950-1990).

persistente en su condición árida, siendo las zonas más conspicuas la de Bahía Magdalena y la del Desierto de El Vizcaíno. En algunos años en los que esta porción árida se contrae, es evidente la forma en que se modifica la orientación de su límite sur pasando de latitudinal a longitudinal, coincidiendo con la posición que guarda la cadena montañosa conocida como Sierra de La Giganta. Durante esos años la ubicación de este límite, desde el

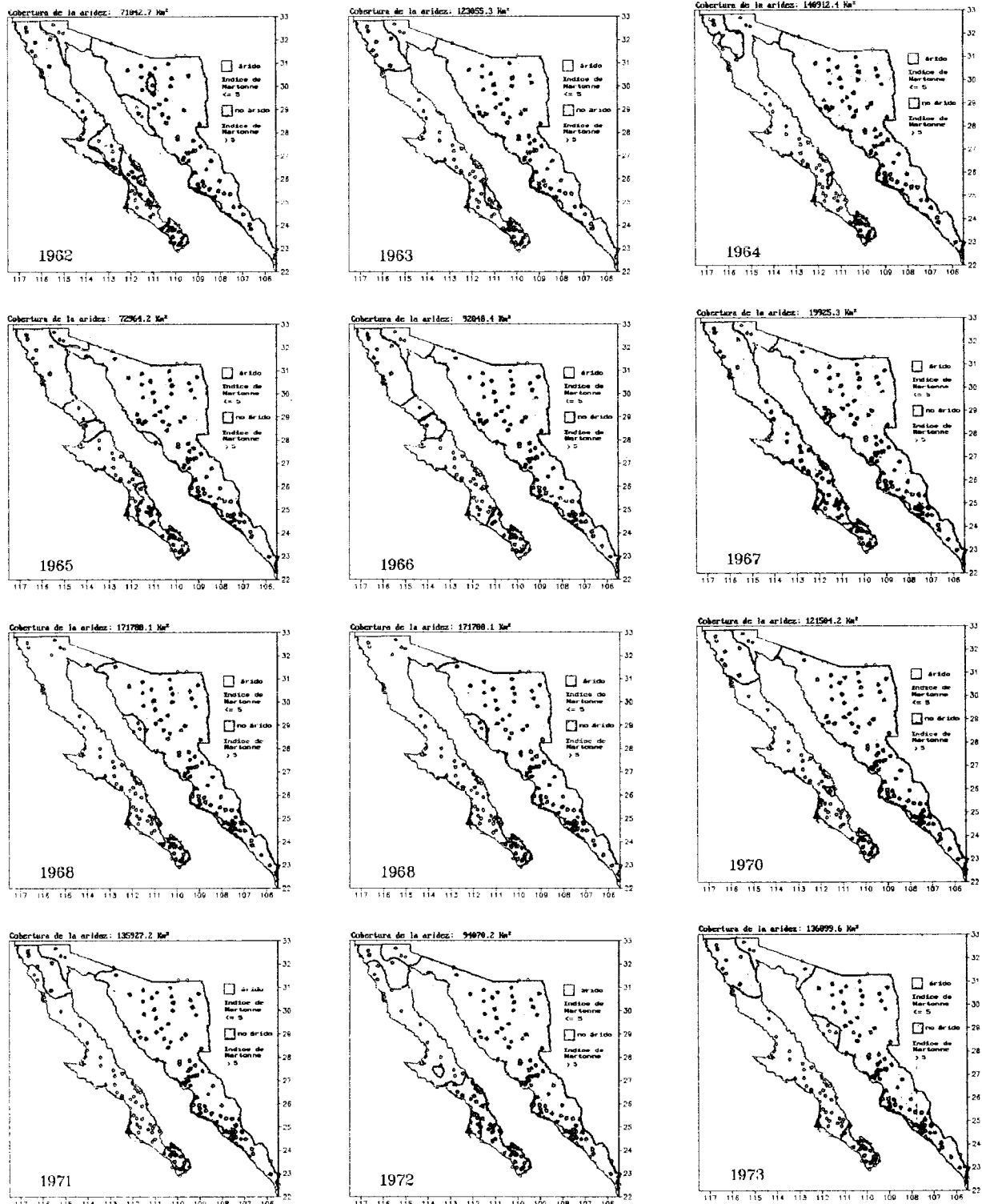


Fig. 4. Mapas de cobertura árida anual (1950-1990).

sur de Bahía Magdalena y hasta la región de Bahía Concepción, separa a las porciones más áridas del lado occidental de esta sierra de las menos áridas del lado oriental de la misma (ver mapas de los años de 1951, 1958, 1960, 1962, 1965, 1976, 1981, 1982 y 1989). La región de Los Cabos en Baja California Sur, por ser la porción más sureña de la península, recibe mayor influencia pluvial de los fenómenos meteorológicos que se originan en

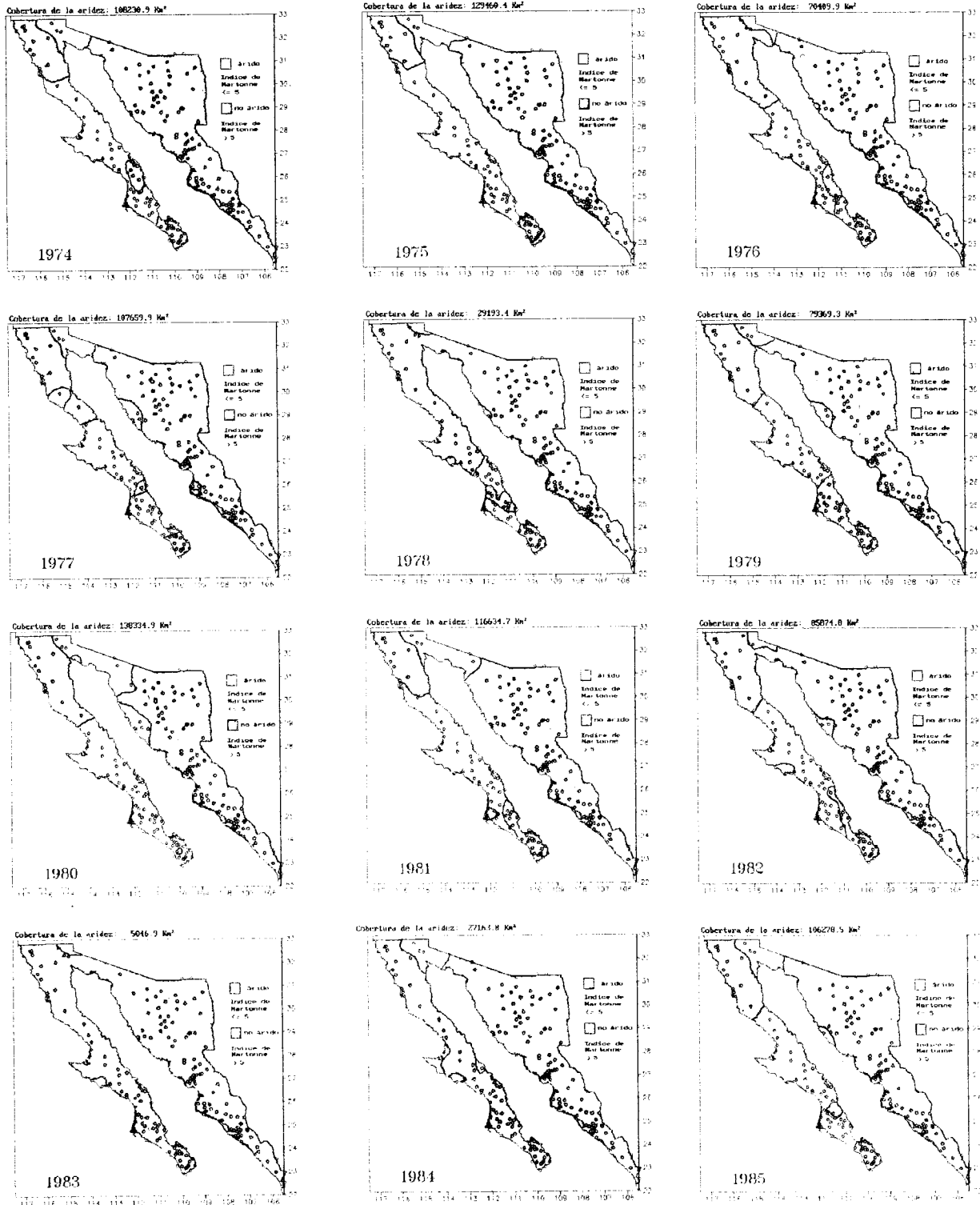


Fig. 5. Mapas de cobertura árida anual (1950-1990).

la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT). A pesar de ello, el carácter árido se manifiesta incluso en esta región, exceptuando las porciones más elevadas de la Sierra de la Laguna. Es decir, la interacción que se da en esta zona entre la cadena montañosa de la Sierra de la Laguna y los ciclones tropicales definen una zona meteorológicamente menos árida, la cual en años extremos - 1969, 1980 y 1988 - llega a contraerse al mínimo. Esta interacción no es suficiente para darle el mismo carácter climático a toda la porción sur de la península; así, en los años de 1953, 1957, 1963, 1966, 1969, 1975, 1980 y 1988, se separa una pequeña franja árida cuyos límites espaciales son la propia Sierra de la Laguna y la línea de costa. Esta pequeña franja corresponde a la zona turística más desarrollada en el estado conocida como corredor turístico de Los Cabos. Dentro de esta región de Los Cabos, la porción que limita con el Golfo de California, lugar conocido localmente como: Boca del Salado-La Ribera, presenta mayor persistencia en su condición árida. Es decir, además de los años anteriormente enlistados su condición árida extrema se manifestó durante los años de 1950, 1970, 1973 y 1987. Esta particularidad meteorológica, coincide con otras de carácter fitogeográfico, que la separan del resto de la región de Los Cabos, dándole identidad propia (Wiggins, 1980; Turner y Brown, 1982). Otra zona cuya característica climatológica es persistente a lo largo del período analizado, es la que comprende el Desierto de Altar o Gran Desierto, zona de unión entre los estados de Sonora y Baja California. Las Figuras 3-6, muestran que este lugar contrae su condición árida al mínimo durante los años en los cuales se han registrado eventos de calentamiento oceánico extremos tales como los años de 1983 (Rasmusson y Wallace, 1983). Los resultados derivados de la interpolación del Índice de Aridez de Martonne para las estaciones climatológicas ubicadas en la porción más septentrional del área analizada, muestran los movimientos espaciales que de un año a otro experimenta lo que se conoce como la Región Mediterránea de México (Aschmann, 1984). Esta se extiende en sentido noroeste-sureste desde el límite con los Estados Unidos bordeando las zonas elevadas de la Sierra de Juárez en el Estado de Baja California. Esta región divide a la zona árida peninsular en dos: lo que podría llamarse el Desierto Sudcaliforniano al sur y el Desierto de Altar al norte. Los presentes resultados muestran que en algunos años 1950, 1953, 1956, 1961, 1964, 1968 y 1989 esta barrera climatológica parecería desaparecer dándole continuidad al Desierto Sudcaliforniano hasta unirlo con el Desierto de Altar y formar uno solo. Incluso podría

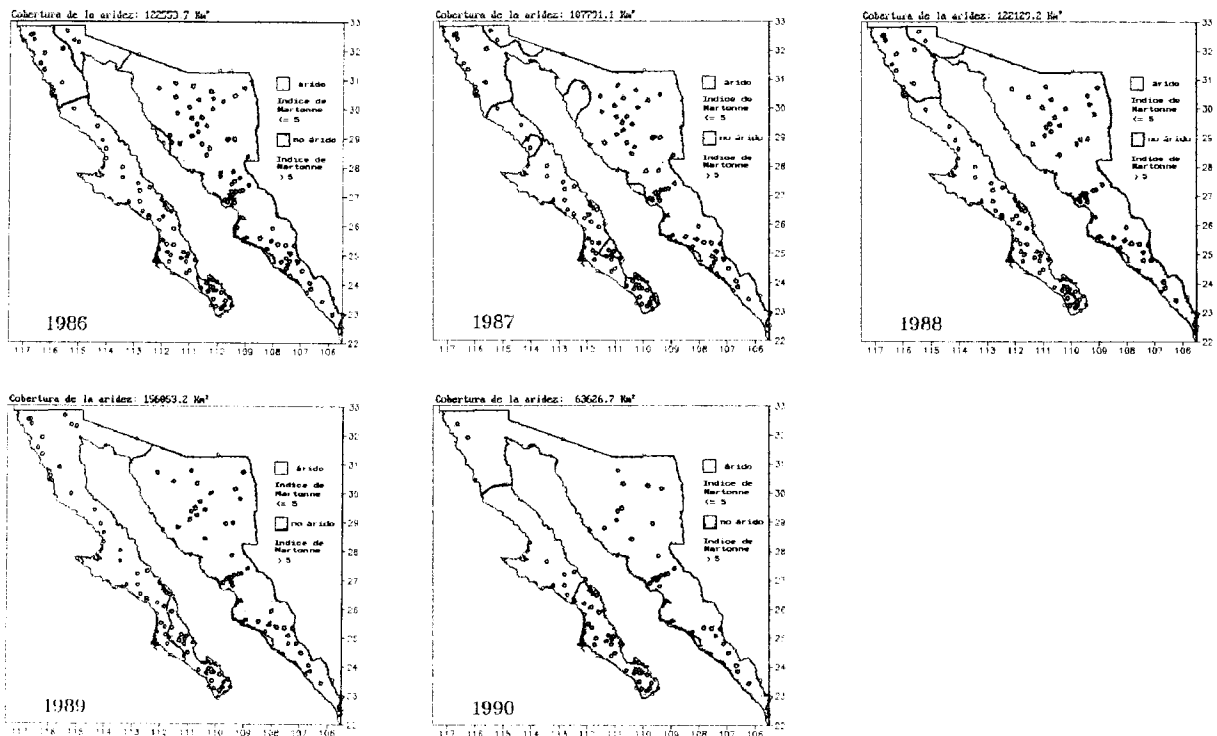


Fig. 6. Mapas de cobertura árida anual (1950-1990).

ampliarse el número de años en los que esta unión se presenta por la costa del Golfo de California a la altura de San Felipe, B. C. Sin embargo, lo anterior debe tomarse con reserva ya que la red de estaciones utilizada no cuenta con observaciones climatológicas para las porciones elevadas de la Sierra de Juárez, las cuales desde luego se excluyen de la región árida peninsular. Por el lado continental existe un área meteorológicamente menos árida que interrumpe la cobertura del Desierto de Altar y lo separa de la porción más árida del Desierto Sonorense, la región de la Cuenca de Guaymas. Particularizando en el análisis de la distribución espacial del ICAA, los resultados muestran que para la región más tropical analizada, el estado de Sinaloa, solamente en un año se presentó una zona pequeña que cae dentro de la categoría de verdadero desierto. Esta se localizó en la porción más norteña del estado y ocurrió en el año de 1977. La Tabla 1 muestra que las áreas con TSM que mejor se correlacionaron con el ICAA se ubican junto a la línea de costa: las áreas II, V, IX y XIII presentaron 0.51, 0.48, 0.56 y 0.44 de coeficiente de correlación respectivamente, todos significativos al 99% de confianza. De igual manera, la Tabla 1 muestra los resultados obtenidos de los análisis de regresión y correlación lineal simple entre las dos variables.

Tabla 1. Coeficientes de determinación y de correlación entre las combinaciones de áreas significativamente relacionadas ($p < 0.01$) con el ICAA. El asterisco indica la combinación utilizada en el Análisis de Regresión Múltiple.

ICAA vs AREAS:	R ²	C.C
II y V	0.28	0.53
II y IX	0.33	0.58
II y XVIII	0.26	0.51
V y IX	0.31	0.56
V y XVIII	0.23	0.48
IX y XIII	0.28	0.53
II, V y IX (*)	0.32	0.57
II, V y XIII	0.27	0.52
II, IX y XIII	0.31	0.55
V, IX y XIII	0.29	0.53
II, V, IX y XIII	0.30	0.55

El valor del coeficiente de correlación múltiple calculado para los datos observados fue de 0.63 con un nivel de significancia del 99.5%; eliminando la alta frecuencia interanual por medio de promedios móviles se obtuvo un $r = 0.68$, con el mismo nivel de significancia. La regresión múltiple calculada entre el ICAA, las áreas oceánicas denominadas II, V y IX y los valores del IOS arrojan resultados muy similares a los obtenidos con la utilización del otro indicador atmosférico, el PNA. Con este último, los valores de los índices de determinación, correlación múltiple y porcentaje de explicación del fenómeno son ligeramente mayores que con el IOS. Sin embargo, al realizar este mismo análisis con los promedios móviles de tres años para las tres variables, el modelo se ajusta ligeramente mejor al IOS que al PNA.

En el dominio de la alta frecuencia, los fenómenos atmosféricos de latitudes medias se relacionan mejor con el Índice de Aridez propuesto, mientras en la baja frecuencia el IOS determina mayores niveles de explicación. Podría señalarse que las condiciones climáticas prevalecientes en la región noroeste de México se modulan con la periodicidad que se presenta la Oscilación del Sur. Finalmente, considerando que la TSM representa por sí sola un porcentaje de explicación del fenómeno del orden del 30% y, que tanto el PNA como el IOS contribuyen a esta explicación, se propone un modelo de regresión lineal múltiple del tipo:

$$Y = \infty + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3$$

Considerando como variables independientes las siguientes:

∞ = Intercepto en la ordenada,

X_1 = TSM de los cuadrantes II, V y IX,

X_2 = PNA a los 700 mb,

X_3 = IOS.

Sustituyendo los valores, el modelo que explica el 41% de la variabilidad observada se expresa de la siguiente manera:

$$ICAA = 1'014,172.43 - 58,039.91(TSM) + 2,024.02(PNA) + 598.64(IOS)$$

Si consideramos las series suavizadas (X_s) con promedios móviles de tres años, el modelo explica el 52% de la variabilidad y se expresa como sigue:

$$ICAA_s = 716,847.81 - 38,949.66(TMS_s) + 1,051.70(PNA_s) + 1,535.69(IOS_s)$$

4. Conclusiones

El Índice de Cobertura Árida Anual para el noroeste de México presentó una tendencia lineal a disminuir durante el período de 1950-1990; en términos porcentuales la cobertura árida ha decrecido en un 36.7%, mostrando una periodicidad de largo plazo que fluctúa entre los 16-20 años con un nivel de significancia del 95%. Se establece que las extensiones que ocupan las tres grandes áreas desérticas más persistentes en tiempo y espacio del noroeste mexicano son variables. Estas tres áreas áridas, dependiendo de las condiciones climatológicas imperantes en un año en particular pueden o no expandirse o contraerse, llegando incluso a formar una sola zona árida en todo el noroeste mexicano, tal y como lo propone (Schmidt, 1989). Del análisis dinámico del ICAA, se sugiere que las zonas con un carácter persistente en su condición árida extrema, sean identificadas como regiones o provincias particulares y no englobarlas en una sola tal y como propone (Schmidt, 1989). Estas zonas áridas son las siguientes: El Desierto de Altar o Gran Desierto, con una persistencia aproximada del 92% respecto al número de años analizados, circunscrito a la porción continental colindante con la cabecera del Golfo de California y que une a los estados de Sonora y Baja California, El Desierto Sonorense con una persistencia del 41%, delimitado por la región que ocupa la Cuenca de Guaymas y extendiéndose por el litoral hacia el norte y El Desierto Sudcaliforniano, con una persistencia de aproximadamente 92% de los años analizados, comprendido mayormente en la extensión que ocupa el estado de Baja California Sur, excluyendo las regiones elevadas de la Sierra de la Laguna y Sierra de la Giganta.

La relación entre el PNA y el ICAA sugiere que durante la fase positiva del primero, correspondientes a un patrón de circulación atmosférica ondulada, la probabilidad de penetración al sur de los fenómenos extratropicales aumenta favoreciendo que el ICAA disminuya y viceversa. La fase negativa del IOS, generalmente asociada al fenómeno ENOS, favorece que el ICAA disminuya, y la fase positiva, condición de "La Niña" induce a que el ICAA aumente. Existe una relación inversa, estadísticamente aceptable ($p < 0.01$), entre la condición térmica de las áreas oceánicas que contienen a la Corriente de California y el ICAA para el noroeste mexicano; a mayor TSM en las áreas oceánicas adyacentes a la costa menores valores del ICAA.

Los valores de correlación entre las áreas oceánicas analizadas y el ICAA, muestran un primer gradiente que disminuye en sentido norte-sur y otro que disminuye en sentido longitudinal desde la costa hacia mar abierto. De

los indicadores atmosféricos utilizados, en forma preliminar se puede concluir que el PNA se ajusta mejor con la variabilidad de alta frecuencia (valores no suavizados); mientras que el IOS se ajusta mejor con la variabilidad de baja frecuencia (valores suavizados). El mayor porcentaje de explicación del fenómeno, tanto en los datos observados como en los calculados con promedios móviles lo tiene la TSM con 30 y 38% de explicación, respectivamente. El análisis de regresión múltiple indica que considerando la TSM, el PNA y el IOS el porcentaje de explicación estadística es del 41% y 52% si se toma la serie sin suavizar o suavizada.

5. Discusión

A pesar de que en el presente trabajo no se considera la condición térmica interanual del Golfo de California, sí se ha reconocido la importancia que tiene éste dentro del fenómeno conocido como el "Monsón Mexicano" (Douglas *et al.*, 1993) donde se señala la importancia del aporte de humedad de este mar interior hacia la porción suroccidental de los Estados Unidos, la cual se podría extender hacia las planicies costeras de los estados de Sonora y Sinaloa, ya que el aporte de vapor de agua proveniente del Golfo de California que circula en superficie hacia el este y el noreste cuando menos en el verano (Douglas *et al.*, 1993), al chocar con la gran cadena montañosa de la Sierra Madre Occidental asciende hasta alcanzar su nivel de condensación y se precipita en toda la serranía.

Este carácter climatológico local puede ser la explicación de la diferencia entre las áreas áridas de uno y otro lado del Golfo de California, resultando niveles interanuales más persistentes en la porción de tierra árida peninsular que en las ubicadas al lado oriental del Golfo de California. Lo anterior motivó la propuesta de una nueva definición de la provincia biogeográfica conocida como Desierto Sonorense (Alvarez-Castañeda *et al.*, 1995).

El patrón de variación interanual que muestra el ICAA en el noroeste mexicano se caracteriza por ser abrupto, esta característica es propia de las regiones áridas del planeta, en las que se detectan condiciones climatológicas extremas y muy variables (Inouye, 1991). Particularmente para el desierto occidental de México, Lau y Sheu (1991), mencionan que se presentan altos coeficientes de variabilidad de precipitación pluvial. Es posible que esta gran variabilidad esté asociada al hecho de que en la región se dejan sentir dos sistemas climáticos, el templado y el tropical, los cuales determinan su carácter transicional.

Una posible extensión de las condiciones áridas dominantes en la porción noroccidental de nuestro país podría ocurrir precisamente en la región estadounidense ubicada al sur de las Montañas Rocallosas cuando el conjunto de mecanismos que originan la aridez es máximo. Debido a que el presente trabajo se limita al análisis de la información existente en la República Mexicana, no es posible establecer con claridad la relación entre las condiciones de aridez de uno y otro lado de la frontera entre EEUU y México.

Suficientes trabajos corroboran la idea de que una de las causas que mayor participación tiene en la explicación de los fenómenos relacionados con la aridez extrema, es la TSM (Douglas y Englehart, 1982; Phillander, 1985; Namias, 1989a; Hunt, 1991). Sin embargo, se considera que las causas que conllevan a la presencia de intemperismos severos como el de las sequías en el mundo están asociadas a la condición térmica de los mares adyacentes. La relación obtenida en el presente trabajo confirma que existe una relación estadísticamente significativa entre la TSM y las condiciones de aridez en el noroeste mexicano.

De los indicadores atmosféricos teleconectados, el que mejor documentado está para latitudes medias es el descrito por Namias en 1951 y redefinido por Wallace y Gutzler en 1981, el denominado Pacific North/America Index (PNA). La presencia de circulación atmosférica ondulada, ha sido sugerida como una de las causas que

pueden condicionar aridez severa, en las Grandes Planicies de los Estados Unidos (Gribbin, 1986; Namias, 1989a; Leathers *et al.*, 1991). Ha sido descrito que la fase positiva del PNA está asociada con la penetración de las vaguadas polares hacia el sur a ambos lados de los Estados Unidos y la formación de un centro de alta presión centrado sobre la parte continental de ese país (Wallace y Gutzler, 1981).

La parte que antecede a este tipo de circulación ondulada en latitudes medias es la vaguada que se presenta en términos medios al oeste de los Estados Unidos sobre el Océano Pacífico nororiental. Cuando la fase positiva del PNA se presenta y el tipo de circulación meridional domina en latitudes medias, la vaguada polar y los fenómenos atmosféricos asociados con ella pueden penetrar más al sur, produciendo mayores precipitaciones en la región noroeste del país en la época invernal (Pérez, 1991; Salinas-Zavala *et al.*, 1992).

Los resultados obtenidos en este trabajo, conjuntamente con una revisión del comportamiento de las características climatológicas en las porciones suroeste y sureste de los EEUU, sugieren una posible relación entre ellas y la aridez en el noroeste de México y la porción central de EEUU. Esta relación podría conceptualizarse de la siguiente manera:

Cuando la temperatura superficial del mar en la costa occidental de la península de Baja California se encuentra por arriba del promedio, los fenómenos de origen tropical, así como los procesos convectivos propios de la región, harían posible que existiera mayor cantidad de humedad en la atmósfera y por lo tanto que las probabilidades de precipitación aumentaran en la época estival. Por otro lado, esta condición oceánica se relaciona positivamente con los valores del PNA, es decir temperaturas altas en el Océano Pacífico nororiental se asocian con la presencia de la fase positiva del PNA, esta circulación atmosférica propiciaría mayor penetración o influencia de fenómenos extratropicales en la época invernal que harían disminuir la aridez en las porciones suroeste de EEUU, noroeste de México y sureste de los EEUU. Dado que este tipo de circulación atmosférica es del tipo ondulada, existiría una zona de aridez entre las porciones suroeste y sureste de EEUU que coincide con la región de las Grandes Planicies de los EEUU.

En otras palabras, cuando en un año determinado la sequía azota las Grandes Planicies de los EEUU, en el noroeste de México existiría un año con lluvias por arriba del promedio y, por el contrario, cuando en la región central de EEUU se presenta un año lluvioso, en el noreste de México existiría sequía al igual que la región suroeste y posiblemente la sureste de los EEUU.

Sobre este indicador climático-atmosférico se reconoce su importancia en el pronóstico del clima oceánico y atmosférico principalmente de la región ecuatorial del planeta (Bjerknes, 1969; Rasmusson y Wallace, 1983; Trenberth, 1991).

Sin embargo, la propuesta de Namias en 1984, de considerar además de las teleconexiones existentes entre los sistemas tropicales y los extratropicales a los fenómenos climatológicos propios de estas latitudes, resulta importante, sobre todo en regiones de transición climática como la de México (Namias, 1985).

Los resultados obtenidos muestran que la contribución de este indicador atmosférico a la explicación de la variabilidad observada sobre el ICAA es baja. Lo anterior puede explicarse debido a que la resolución utilizada es en la escala anual y este indicador atmosférico antecede en el orden de meses a los calentamientos oceánicos que se suceden en la región del Pacífico nororiental, por lo que puede existir un desfase entre la presencia de este índice y los valores observados del ICAA. A pesar de lo anterior los resultados muestran que existe una

modulación de la alta frecuencia en el comportamiento del ICAA cuando este fenómeno se manifiesta en la región noroeste de México.

Agradecimientos

El primer autor agradece el apoyo recibido del B. M. Edgar Alcántara R. y de la B. M. Susana Camarillo en la elaboración de Tablas y Figuras. También los comentarios recibidos de dos revisores anónimos.

REFERENCIAS

- Alvarez-Castañeda, S. T., C. A. Salinas-Zavala y F. de Lachica, 1995. Análisis biogeográfico del noroeste de México con énfasis en la variación climática y mastozoológica. *Acta Zoológica Mexicana*, nueva serie (66), 59-86 pp.
- Aschmann, H., 1984. A Restrictive Definition of Mediterranean Climates. *Actualites Botaniques, Bulletin Société Botanique de France*, Vol. 131, No. 2-4, 21-31 pp.
- Bjerknes, J., 1969. Atmospheric teleconnections from the equatorial Pacific. *Mon. Wea. Rev.*, Vol. 97, No. 3, 163-172 pp.
- Currie, R. G., 1987. On bistable phasing of 18 multiplied by 6-year induced drought and flood in the Nile records since A.D. 650. *J. Climatol.*, Vol. 7, No. 4, 373-389 pp.
- Dracup, J. A., K. S. Lee, and E. G. Jr. Paulson, 1980. On the definition of Droughts. *Water Resources Research*, Vol. 16, No. 2: 297-302 pp.
- Douglas, A. V. and P. J. Englehart, 1982. On a Statistical Relationship between Autumn Rainfall in the Central Equatorial Pacific and Subsequent Winter Precipitation in Florida. *Mon. Wea. Rev.*, Vol. 109, 2377-2382 pp.
- Douglas, M. W., R. Maddox, K. Howard and S. Reyes, 1993. The Mexican Monsoon. *J. Climate*, Vol. 6, No. 8, 1665-1677 pp.
- Eddy, J. A, R. L. Gilliland and D. V. Hoyt, 1982. Changes in the solar constant and climatic effects. *Nature*, Vol. 300, 689-693 pp.
- Folland, C. K., T. N. Palmer and D. E. Parker, 1986. Sahel rainfall and worldwide sea temperatures, 1901-1985. *Nature*, Vol. 320, No. 6063, 602-607 pp.
- García, E., P. Mosiño, 1968. Los climas de Baja California. En: Comité Nacional Mexicano para el Decenio Hidrológico Internacional, Instituto de Geofísica, UNAM. Memoria 1966-1967. Editor: Ing. R. del Arenal C., México, D. F. 29-56 pp., 1 mapa.
- Gray, W. M. and J. D. Schaeffer, 1991. El Niño and QBO influences on tropical cyclone activity. In:

- Teleconnections Linking Worldwide Climate Anomalies (Eds.) Glantz, M. H., R. W. Katz and N. Nicholls, Cambridge Univ. Press. Chap. 8, 258-284 pp.
- Gribbin, J., 1986. El Clima Futuro. Biblioteca Científica Salvat. Salvat (Eds.), 241 pp.
- Hunt, B. G., 1991. The simulation and prediction of drought. *Vegetatio*, Vol. 91, 89-103 pp.
- INEGI, 1990. Anuario de estadísticas estatales, 1987. Instituto nacional de estadística geografía e informática. 376 pp.
- Inouye, R. S., 1991. Population Biology of Desert Annual Plants, In: PoliAG (Ed), The Ecology Of Desert Communities. The University of Arizona Press, 456 pp.
- Lau, K. M. and P. J. Sheu, 1991. Teleconnections in global rainfall anomalies: Seasonal to interdecadal time scales. In: Teleconnections Linking Worldwide Climate Anomalies (Eds.) Glantz, M. H., R. W. Katz and N. Nicholls, Cambridge Univ. Press. Chap. 7, 227-256 pp.
- Leathers, D. J., B. Yarnal and M. A. Palecki, 1991. The Pacific/North American Teleconnection Pattern and United States Climate. Part I: Regional Temperature and Precipitation Associations. *J. Clim.*, Vol. 4, 517-528 pp.
- Lynn, R. J. and J. J. Simpson, 1987. The California Current System: The Seasonal Variability of its Physical Characteristics. *J. Geophys. Res.*, Vol 92, No. C12, 12, 947-12, 966 pp.
- Lluch-Belda, D., S. Hernández-Vázquez, D. B. Lluch-Cota, C. A. Salinas-Zavala, F. Magallón-Barajas y F. de Lachica-B., 1991. Variación climática y oceanográfica global: sus efectos en el noroeste mexicano. *Ciencia y Desarrollo*, Vol. XVII, No. 98, 79-88 pp.
- Martonne, de E., 1926. Areisme et indice d'aridité, comptes rendus de L'Académie des Sciences de Paris 182: 1393-1398, in English: Regions of Interior-Basin Drainage. *The Geographical Review*, Vol. 17, 397-414 pp.
- Mo, K. C., J. R. Zimmerman, E. Kalnay and M. Kanamitsu, 1991. A GCM Study of the United States Drought. *Mon. Wea. Rev.*, Vol. 119, 1512-1532 pp.
- Namias, J., 1972. Influence of the Northern Hemisphere general circulation on drought in the northeast Brazil. *Tellus*, Vol. XXIV, 336-343 pp.
- Namias, J., 1978. Recent Drought in California and Western Europe. *Rev. Geophys. Spa. Physcs.*, Vol. 16, No. 3, 435-458 pp.
- Namias, J., 1985. Extra-tropical connections. JSC/CCCO Int. Conf. on the TOGA Scientific Programme, Paris, France, 17-21 Sept. 1984; WCRP Publ. Ser. No. 4.
- Namias, J., 1989a. Written in the Winds The Great Drought of 88. *Weatherwise*, Vol. 42, No. 2, 85-87 pp.
- Namias, J., 1989b. Cold waters and hot summers. *Nature*, Vol. 338, 15-16 pp.

- Orville, H. D., 1990. AMS Statement on Meteorological Drought. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, Vol. 71, No. 7, 1021-1023 pp.
- Phillander, S. G. H., 1985. El Niño and La Niña. *Jour. Atmos. Sci.*, Vol. 42, No. 23, 2652-2662 pp.
- Pérez, I. G., 1991. Factores meteorológicos asociados con las intensas lluvias ocurridas a finales de diciembre de 1990 en el noroeste de México. TRAVASON/SWAMP. Cd. Obregón, Abril 22-26 de 1991, Reyes, S. y Barrón, M. (Eds.). Pub. EBA No. 9.
- Rasmusson, E. M. and T. H. Carpenter, 1983. The Relationship Between Eastern Equatorial Pacific Sea Surface Temperatures and Rainfall over India and Sri Lanka. *Mon. Wea. Rev.*, Vol. 111, 517-528 pp.
- Rasmusson, E. M. and J. M. Wallace, 1983. Meteorological aspects of the El Niño/Southern Oscillation. *Science*, 122: 1195-1202 pp.
- Romero, H., 1989. The 1988 drought in Chile. *Top. Ocean-Atmosph. Newslett.*, No. 52, 5-6 pp.
- Salinas-Zavala, C. A., D. B. Lluch-Cota, S. Hernández-Vázquez y D. Lluch-Belda, 1992. Anomalías de precipitación en Baja California Sur durante 1990. Posibles causas. *Atmósfera*, Vol. 5, No. 2, 79-93 pp.
- Salinas-Zavala, C. A., 1995. La aridez en el noroeste de México. Un análisis de su variabilidad en función de la condición térmica oceánica. Tesis Maestría. Facultad de Ciencias, UNAM. 135 pp.
- Schmidt Jr, R. H., 1989. The arid zones of Mexico: climatic extremes and conceptualization of the Sonoran Desert. *J. Arid. Environm.*, Vol. 16, 241-256 pp.
- Simmonds, I. and A. Rocha, 1991. The Association of Australian Winter Climate with Ocean Temperatures to the West. *J. Climate*, Vol. 4, 1147-1161 pp.
- Topoly, P. J., P. R. Hadsell, and R. J. Abram, 1989. Experimental CD-ROM NODC-01; Pacific Ocean Temperature and Salinity Profiles. National Oceanographic Data Center, Informal Report No. 10. National Oceanic and Atmospheric Administration, U.S. Department of Commerce, U.S.A.
- Trenberth, K. E., 1991. General Characteristics of El Niño-Southern Oscillation. In: *Teleconnections Linking Worldwide Climate Anomalies* (Eds.) Glantz, M. H., R. W. Katz and N. Nicholls, Cambridge Univ. Press. Chap. 2, 13-42 pp.
- Turner, R. M. and D. E. Brown, 1982. Sonoran Desertscrub. *Desert-Plants*, Vol. 4, No. (1-4), 181-219 pp.
- Wallace, J. M. and D. S. Gutzler, 1981. Teleconnections in the geopotential height field during the Northern Hemisphere winter. *Mon. Wea. Rev.*, Vol. 109, 784-812 pp.
- Wiggins, I. L., 1980. Flora of Baja California. Stanford University Press, 1071 pp.