

REGIONALIZACIÓN DE LA TEMPERATURA MEDIA EN MÉXICO UTILIZANDO COMPONENTES PRINCIPALES

Salas-Flores, Marco A.⁽¹⁾ 02, Salas-Cruz, A.⁽²⁾; Gay, C.⁽²⁾, Patiño, R.⁽²⁾.

RESUMEN

A pesar de ciertas incertidumbres pendientes por resolver, es ahora posible atribuir parcialmente la tendencia creciente de la temperatura media global durante el siglo XX -y el inicio del presente siglo- al factor antropogénico. Sin embargo, en comparación con la densidad espacial y longitud de los registros instrumentales en países desarrollados, aún faltan estudios análogos en latitudes diferentes a las templadas. El presente trabajo logra una clara regionalización climática utilizando el análisis de Componentes Principales, usando una red de 49 estaciones con datos de precipitación media anual; el período considerado abarca desde 1941 a 2001. Las regiones climáticas resultantes concuerdan con la climatología mexicana, y muestran la importante influencia de los moduladores atmosféricos de gran escala.

(1) Programa de Investigación en Cambio Climático (PINCC)

(2) Centro de Ciencias de la Atmósfera (CCA)

(1) Universidad Nacional Autónoma de México. Programa de Investigación en Cambio Climático (PINCC-UNAM). Edificio de Programas Universitarios, Planta Alta. Circuito de la Investigación Científica S/N. Ciudad Universitaria. Delegación Coyoacán. C.P. 04510. México, D.F. Tel. (55) 5622-5219.

msalas@pincc.unam.mx

INTRODUCCIÓN

A pesar de ciertas incertidumbres aún pendientes por resolver, ahora es posible atribuir en forma parcial la tendencia creciente de la temperatura media global durante el siglo XX al factor antropogénico. Ciertamente, uno de los argumentos más importantes de los escépticos al llamado calentamiento global, es la falta de homogeneidad espacial en los cambios de los parámetros que miden el cambio climático alrededor del mundo, como por ejemplo la temperatura (Soon et al., 2003). El mayor porcentaje de los datos meteorológicos viene de los países desarrollados de latitudes templadas (Vose et al., 2005).

Existe actualmente una necesidad real de recopilar información (climatológica) de países en vías de desarrollo con el fin de completar el cuadro global de cambios climáticos (IPCC, 2007). México es uno de esos países que, además incluye dentro su territorio una extensa variedad de regiones climáticas. La República Mexicana es un puente entre latitudes tropicales y templadas, lo cual refleja dentro de su territorio, una amplia distribución de regímenes climáticos. El advenimiento de nuevas tecnologías de cómputo abrió un mayor número de oportunidades en casi todas las áreas de investigación, permitiendo digitalizar el inmenso caudal de datos instrumentales (variables meteorológicas) en México.

Existen pocos estudios en los que se aplique el método de Componentes Principales (CP) al clima de México. Entre todas las variables meteorológicas posibles, el método de CP se ha utilizado más consistentemente en la precipitación (Comrie and Glenn, 1998; Englehart and Douglas, 2002; Salas-Flores, 2008) que en la temperatura (Englehart and Douglas, 2004). Esta condición indeseable para ambos parámetros ha cambiado lentamente desde la entrega de las bases de datos digitales a comienzos de la década de 1990. Englehart and Douglas (2004) han evaluado una red de estaciones con datos mensuales (1941-2001) de Temperatura Superficial del Aire (TSA), usando CP

(con la versión oblicua de la rotación), cuyos resultados muestran cuatro regiones climáticamente coherentes a través de la República Mexicana. Ellos mismos evaluaron la persistencia mensual observando que ésta ocurre durante las épocas cálidas del año; por último exploraron la relación de la TSA con el FENOS (Fenómeno del Niño Oscilación del Sur), pero no encontraron vínculos claros excepto en la región Sur del país.

Pocos estudios se han realizado aplicando el método de Componentes Principales (CP) a las temperaturas en México; esto únicamente ha mejorado a partir de que las bases digitales preparadas basándose en datos instrumentales fueron puestas a disposición de todo el público. Aún así, el número y distribución espacial de los registros de temperatura, es más pobre cuando se le compara con la red de precipitación. Una de las razones más probables que explicaría esta diferencia es que el período económico post-revolucionario antes de la década de los 1980s estuvo parcial pero fuertemente ligado a la agricultura (Liverman and O'Brien, 1991), y por ende los patrones de cambio de la lluvia eran más importantes que los de temperatura. La red de estaciones meteorológicas se desarrolló durante el período instrumental temprano, por lo tanto, más hacia los registros de precipitación que en forma simultánea a la par de otras variables climatológicas como la temperatura.

DATOS Y METODOLOGÍA

Una red de 49 estaciones (de México y la franja fronteriza de los EUA) con datos mensuales de temperatura media que van de 1941 a 2001 ha sido construida para los análisis utilizados en este estudio (Tabla 1). Para el análisis de calidad los datos se cotejaron con las normales calculadas por García (1988), también se calcularon los más básicos de sus parámetros estadísticos, y se hizo una curva doble-masa de cada una de ellas para detectar probables datos espurios en los registros climáticos. Después de ello, se calcularon los gradientes temporales de

las series de tiempo, esto es, al valor de 1942 de la temperatura media anual se le restó el correspondiente a 1941, al de 1943 el de 1942, y así hasta llegar al último dato. La hipótesis que sustenta estos cálculos es que, con ello se conservan los diferentes cambios inerciales de energía, en comparación con simplemente utilizar los registros de la temperatura media anual.

	NOMBRE DE LA ESTACIÓN	ESTADO	ID SMN	LONGITUD	LATITUD	ALTITUD*
1	PRESA CALLES	AGS	01018	-102.43	22.13	2025
2	PRESA RODRIGUEZ	BCN	02038	-116.90	32.45	100
3	ENSENADA	BCN	02072	-116.60	31.88	24
4	COMONDÚ	BCS	03008	-111.85	26.08	260
5	EL PASO DE IRITU	BCS	03012	-111.12	24.77	140
6	LA PURÍSIMA	BCS	03029	-112.08	26.18	95
7	SAN BARTOLO	BCS	03050	-109.85	23.73	395
8	SANTA GERTRUDIS	BCS	03060	-110.10	23.48	350
9	SANTA ROSALÍA	BCS	03061	-112.28	27.30	17
10	SANTIAGO	BCS	03062	-109.73	23.47	125
11	MANZANILLO	COL	06018	-104.32	19.05	3
12	MOTOZINTLA	CHIAP	07119	-92.25	15.37	1455
13	EL PALMITO	DUR	10021	-104.78	25.52	1540
14	EL SALTO	DUR	10025	-105.37	23.78	2538
15	GUANACEVI	DUR	10029	-105.97	25.93	2200
16	RODEO	DUR	10060	-104.53	25.18	1340
17	SANTIAGO PAPASQUIARO	DUR	10100	-105.42	25.05	1740
18	IRAPUATO	GTO	11028	-101.35	20.68	1725
19	OCAMPO	GTO	11050	-101.48	21.65	2250
20	PERICOS	GTO	11052	-101.10	20.52	1720
21	SALVATIERRA	GTO	11060	-100.87	20.22	1760
22	SALAMANCA	GTO	11096	-101.18	20.57	1723
23	CUITZEO DEL PORVENIR	MICH	16027	-101.15	19.97	1831
24	HUINGO	MICH	16052	-100.83	19.92	1832
25	ZACAPU	MICH	16171	-101.78	19.82	1986
26	AHUACATLAN	NAY	18002	-104.48	21.05	990
27	EL CUCHILLO	NL	19016	-99.25	25.73	145
28	LAMPAZOS	NL	19028	-100.52	27.03	320
29	MATIAS ROMERO	OAX	20068	-95.03	16.88	201
30	SANTO DOMINGO TEHUANTEPEC	OAX	20149	-95.23	16.33	95
31	TEZIUTLAN	PUE	21091	-97.35	19.82	2050
32	MATEHUALA	SLP	24040	-100.63	23.65	1575
33	BADIRAGUATO	SIN	25110	-107.55	25.37	230
34	TRES HERMANOS	SON	26102	-109.20	27.20	100
35	SAN FERNANDO	TAM	28086	-98.15	24.85	43
36	ATZALAN	VER	30012	-97.25	19.80	1842
37	RINCONADA	VER	30141	-96.55	19.35	313
38	LAS VIGAS	VER	30211	-97.10	19.65	37
39	EL SAUZ	ZAC	32018	-103.23	23.18	2100
40	BROWNSVILLE	TX	BWVTX	-97.40	25.80	
41	SAN ANTONIO	TX	SATTX	-98.50	29.50	
42	MIDLAND	TX	MAFTX	-102.20	32.00	
43	EL PASO	TX	ELPTX	-106.40	31.80	
44	TUMBSTONE	US	TSTUS	-110.10	31.70	
45	TUCSON	AZ	TUSAZ	-110.90	32.10	
46	PHOENIX	AZ	PHXAZ	-112.00	33.40	
47	SAN DIEGO	CA	SANCA	-117.20	32.70	
48	CUYAMACA	CA	CYCCA	-116.60	33.00	
49	LOS ANGELES	CA	LAXCA	-118.20	34.10	

Tabla 1. Estaciones climatológicas con datos de temperatura media anual utilizadas en este estudio. * metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m.)

Al aplicar el método de CP a la red de estaciones se persiguió el objetivo de encontrar diferentes grupos de estaciones que variaran coherentemente a través del tiempo. Por ello, se estructuraron los gradientes anuales de la temperatura media en una configuración S (Richman, 1986), que persigue una regionalización del parámetro en cuestión. La amplitud de cada CP (asociada a una y solo una región) incorpora a un solo grupo de estaciones. Por su mayor eficacia se han preferido las soluciones con rotación oblicua (Englehart and Douglas, 2002), i.e., no ortogonales, para lograr la regionalización. Con ese mismo propósito, se ha seleccionado la solución oblicua PROMAX ($\kappa=2$), como una opción conveniente para explorar las bastante variables condiciones climáticas de México, porque permite más claridad en las soluciones -en el campo de la meteorología-, cuando se trabaja con un número considerable de estaciones de gran complejidad.

No existe un consenso sobre el mejor método para determinar el número más significativo de componentes principales (Peres-Neto et al., 2005; Al-Kandari et al., 2005). Debido al tamaño y la complejidad de la base de datos de la presente investigación, se utilizó una herramienta gráfica del método de CP, en inglés llamada el Scree Test. La gráfica es metafóricamente concebida como una montaña en la cual la pendiente está formada por "el número real" de factores que contienen la mayoría de la varianza, y el pie de la colina lo constituyen los componentes aleatorios. El objetivo entonces es encontrar el quiebre más evidente antes de que la varianza entre los componentes restantes sea despreciable (Cattell, 1966). La gráfica de Scree Test se usa para definir el número de componentes por encima del nivel de ruido de las propias bases de datos.

La determinación del número de CP y por lo tanto regiones climáticas -basadas en la temperatura media- en México, requirió también una cuidadosa clasificación, i.e., asignar cada una de las estaciones a solo una de las regiones resultantes.

Con el objetivo de cumplir este requerimiento se definió una estricta regla, que consiste en aceptar solo valores absolutos de los coeficientes (loadings) mayores a 0.4 (White et al., 1991). Así, de acuerdo con la condición anteriormente descrita, el valor más grande en la matriz de coeficientes se asigna a su componente principal correspondiente y, consecuentemente, la región a la cual la estación pertenece. Con el mismo propósito de clasificación en mente, el criterio de "eigenvalor uno" fue aplicado (Mather, 1976), i.e., únicamente eigenvalores más grandes que 1.0 fueron considerados para la extracción. La razón subyacente es que, una vez normalizada cada variable tiene una varianza intrínseca igual a la unidad; por lo que cada eigenvalor menor que uno debería ser descartado, y no considerarse en el análisis sucesivo. Finalmente, como se restringieron los datos faltantes al mínimo posible para cada estación, éstos fueron reemplazados por la media de largo plazo y, teóricamente, no tienen una influencia definitiva en los resultados obtenidos.

RESULTADOS

Los grupos de estaciones resultantes mediante el análisis de CP muestran tanto una consistencia geográfica en general, como climática en particular. Los "clusters" (grupos de estaciones) obtenidos (Figura 1) son consistentes con la climatología definida por Mosiño y García (1974), y por lo tanto, por ser análogos, adoptamos las descripciones propuestas por Salas-Flores (2008) para las regiones de la precipitación anual (Tabla 2) extraídas utilizando el mismo método de regionalización climática.

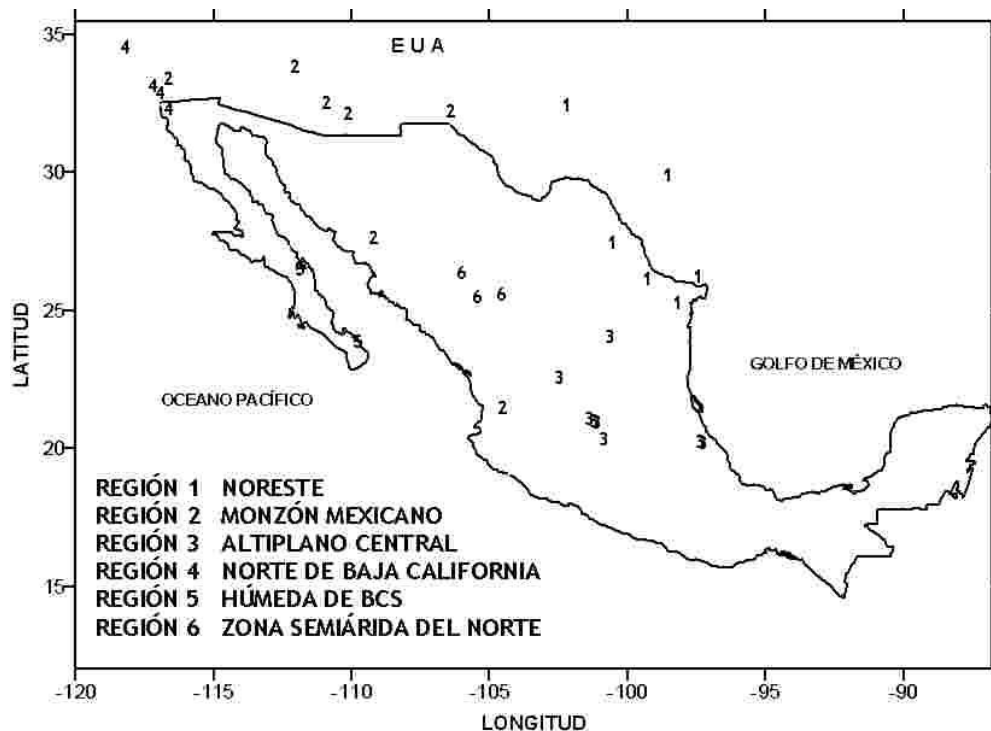


Figura 1. Regionalización climática de la temperatura media anual utilizando el análisis de componentes principales (Promax, $\kappa=2$), la longitud de los registros mensuales de las 49 estaciones utilizadas comprende desde 1941 a 2001.

Muy probablemente debido a la influencia que ejercen los datos faltantes, no es posible asignar un CP a cada una de las estaciones; sin embargo, en aquellas que sí pudieron ser extraídas exitosamente mediante el método de CP, se puede notar que su pertenencia es un fiel reflejo de la climatología mexicana. Desafortunadamente, la limitada densidad espacial de los registros de temperatura también ha concentrado geográficamente los resultados en la parte centro y norte de México. Las estaciones en la franja fronteriza estadounidense han ayudado a clarificar tres importantes regiones climáticas (similares a las obtenidas para la precipitación anual; Salas-Flores, 2008) como son: la región Noreste, la del Monzón Mexicano y la norte de Baja California. El grupo de estaciones resultantes en el Altiplano Central (Región 3) nos indica que, a pesar de haber intentado evitarlo, el factor orográfico (todas las estaciones están localizadas en puntos de

altitud considerable) sigue siendo importante en amplias zonas de la República Mexicana.

Componente	Región Asociada	Características Climáticas
Región 1 (RA1)	Altiplano Central	Alisios en Verano, monzón del Pacífico, lluvias en verano, dos máximos de temperatura
Región 2 (RA2)	Costa del Golfo de México	Alisios en Verano, ondas del este y ciclones tropicales en verano y otoño, nortes en invierno, régimen intermedio, dos máximos de temperatura
Región 3 (RA3)	Noreste	Nortes en invierno, alisios y ciclones en verano, altas subtropicales, régimen intermedio, un máximo de temperatura
Región 4 (RA4)	Zona Semiárida del Norte	Altas subtropicales, aislada de vientos húmedos, zonas áridas, régimen variable, un máximo de temperatura
Región 5 (RA5)	Región Húmeda de Baja California Sur	Monzón de verano, ciclones tropicales en verano y otoño
Región 6 (RA6)	Norte de la Península de Baja California	Circulación del oeste, régimen invernal, un máximo de temperatura
Región 7 (RA7)	La Huasteca	Lluvias en verano, huracanes en verano y otoño, frentes fríos en invierno
Región 8 (RA8)	Zona desértica de Baja California Sur	Circulación del oeste, un máximo de temperatura
Región 9 (RA9)	Sureste	Zona InterTropical de Convergencia (ZITC), alisios del SE, ciclones en verano y otoño, régimen de verano, dos máximos de temperatura
Región 10 (RA10)	Costa del Pacífico Sur	Zona InterTropical de Convergencia (ZITC), alisios del SE, ciclones en verano y otoño, escasas precipitaciones de invierno, dos máximos de temperatura
Región 11 (RA11)	Monzón Mexicano	Precipitación de verano, circulación del oeste, ciclones en verano y otoño, un máximo de temperatura

Tabla 2. Regiones climáticas extraídas para la precipitación total anual (tabla tomada de Salas-Flores, 2008) mediante el análisis de Componentes Principales análogas a las de la temperatura media anual resultantes en este estudio.

CONCLUSIONES

La regionalización climática obtenida utilizando el método de Componentes Principales aplicado a los gradientes anuales de la temperatura media, muestra gran consistencia con la climatología de la República Mexicana. En las seis regiones extraídas exitosamente mediante CP se observa una clara correspondencia geográfica, acorde con la compleja variabilidad climática del país.

Los grupos con modos de variabilidad homogéneos delinean una fuerte correspondencia con sus moduladores atmosféricos de gran escala, por ejemplo la zona del Monzón Mexicana y la parte norte de la Península de Baja California. Otra característica importante de anotar es la importante influencia de la orografía en el clima de México, siendo caso importante de señalar el Altiplano Central. Es importante considerar que, en un futuro próximo, es deseable mejorar la densidad espacial de la red de registros instrumentales utilizados, y explorar otras posibilidades estacionales. El estudio obtiene un importante avance para un parámetro meteorológico en el que había sido, hasta ahora, difícil extraer una clara regionalización climática.

REFERENCIAS

AL-Kandari N.M., Jolliffe I.T. 2005. Variable selection and interpretation in correlation principal components. *Environmetrics* 16: 659-672.

Cattell R.B. 1966. The Scree Test for the Number of Factors. *Multivariate Behavioral Research* 1(2): 245-276.

Comrie A.C., Glenn E.C. 1998. Principal components-based regionalization of precipitation regimes across the southwest United States and northern Mexico, with an application to monsoon precipitation variability. *Climate Research* 10: 201-215.

Englehart P.J., Douglas AV. 2004. Characterizing regional-scale variations in monthly and seasonal air temperature over Mexico. *International Journal of Climatology* 24:1897-1909.

Englehart P.J., Douglas A.V. 2002. Mexico's summer rainfall patterns: an analysis of regional modes and changes in their teleconnectivity. *Atmósfera* 15:147-164.

GARCIA E. 1988. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. Instituto de Geografía, UNAM. 220 pp.

IPCC. 2007. *Climate Change: The Physical Science Basis. Summary for Policymakers.* IPCC Secretariat, SWITZERLAND pp 18. <http://www.ipcc.ch>

Liverman, D.M., O'brien K.L. 1991. Global Warming and Climate Change in Mexico. *Global Environmental Change* 1(5): 351-364.

Mather, P.M. 1976. Computational Methods of Multivariate Analysis in Physical Geography. John Wiley and sons, London.

Mosiño P., García E. 1974. The climate of Mexico. World Survey of climatology. Climates of North America. R.A. Bryson and F.K. Hare, Eds. 11: 345-404.

Peres-Neto P.R., Jackson D.A., Somers K.M. 2005. How many principal components? stopping rules for determining the number of non-trivial axes revisited. Computational Statistics and Data Analysis 49: 974-997.

Richman, M.B. 1986. Review article: rotation of principal components. Journal of Climatology 6: 293-335.

Salas-Flores, M.A. ASSESSING THE VARIABILITY OF LONG-TERM MEXICAN INSTRUMENTAL RECORDS AND THE ENSO MODULATING FORCE. Tesis Doctoral. Universidad de East Anglia, Norwich, GB. <http://www.cru.uea.ac.uk/cru/pubs/thesis/2008-salas/>

Soon, W., Baliunas, S., Idso, C., Idso, S., Legates, D.R. 2003. Reconstructing Climatic and Environmental Changes of the Past 1000 Years: A Reappraisal. Energy and Environment 2-3 (14): 233-296.

Vose, R.S., Easterling, D.R., Gleason, B. 2005. Maximum and minimum temperatures trends for the globe: An update through 2004. Geographical Research Letters 32: L23822.

White D., Richman M., Yarnal B. 1991. Climate regionalization and rotation of principal components. International Journal of Climatology 11(1): 1-25.