



MARN

Ministerio de Medio Ambiente
y Recursos Naturales

¿Cómo son las interacciones océano – atmosfera con valores extremos de precipitación?

Contenido

1. Resumen	3
2. Introducción.....	4
3. Metodología.....	5
3. Resultados	9
4. Discusión.....	10
5. Referencias	12
6. Figuras	13
7. Tablas	18

¿Cómo son las interacciones océano – atmosfera con valores extremos de precipitación?

1. Resumen

A raíz de los valores extremos de precipitación que se observaron sobre El Salvador en el 2010 y 2011 (mayor que 2,500 mm/año), siendo la precipitación climatológica (1981 – 2010) de 1,850 mm/año, surgió la pregunta: ¿cómo son las interacciones océano – atmosfera con valores extremos de precipitación?

Se estudiaron las interacciones entre 6 variables climáticas en la Piscina de Agua Cálida del Hemisferio Occidental: temperatura del aire; temperatura del agua; componente zonal del viento; componente meridional del viento; presión atmosférica; cobertura nubosa y sus relaciones con la ocurrencia de valores extremos de precipitación.

Para identificar las áreas con precipitación característica, se aplicó el análisis de grupos a las series de tiempo de precipitación. Para obtener predictores que representan relaciones lineales entre variables del sistema océano – atmósfera, se aplicó el análisis de componentes principales a las mediciones de las 6 variables climáticas.

Con base a los resultados de la aplicación del análisis de grupos a las mediciones de precipitación, se concluye que existen 4 regímenes de lluvia: Pacífico Ecuatorial Oriental; Pacífico de Centroamérica y Mar Caribe; Pacífico de México y Golfo de California; Golfo de Mexico.

Con base a los resultados de la aplicación del análisis de componentes principales a las mediciones de las 6 variables climáticas, se concluye que el primer predictor, 74% de la varianza total, representa la precipitación con 94% de correlación.

Los valores extremos de precipitación son función del régimen de lluvia por lo que se recomienda aplicar el Análisis de Componentes Principales a las anomalías de las variables climáticas en cada uno de ellos y el análisis de la correlación canónica a los predictores e índices climáticos (ONI, Niño 3.4, ATL3, AMM).

2. Introducción

A raíz de los valores extremos de precipitación que se observó sobre El Salvador en el 2010 y 2011 (mayor que 2,500 mm/año), siendo la precipitación climatológica (1981 – 2010) de 1,850 mm/año, surgió la pregunta: ¿cómo son las interacciones océano – atmosfera con valores extremos de precipitación?

El océano juega un importante papel en el sistema climático debido en parte a su gran capacidad de almacenamiento de calor: los primeros 3.5 m de la columna de agua del océano contienen el calor almacenado en los 35,000 m de la columna de aire de la atmosfera.

El océano y la atmosfera intercambian energía por medio de flujos turbulentos a través de la superficie del mar. Estos flujos turbulentos dependen de la temperatura del agua y del aire, componente zonal y meridional del viento, nubosidad y presión atmosférica.

De estas variables climáticas, la temperatura del agua y la presión atmosférica en la superficie del mar son probablemente la más relevante en el control y regulación de su variabilidad. En particular variaciones no estacionales (inter-anual, inter-decadal, decadal) en la temperatura del agua y la presión atmosférica, caracterizan variaciones estacionales (inter-mensual) en otras variables climáticas como la precipitación.

Los principales modos de la variabilidad no estacional de la temperatura del agua y de la presión atmosférica que explican la variabilidad climática estacional son: El Niño / Oscilación del Sur en el Pacífico Tropical; Inter-decadal en el Atlántico Tropical; Inter-decadal en el Índico Tropical; Oscilación Decadal en el Pacífico Norte.

La temperatura del agua en la superficie del mar está gobernada por procesos en la interfase océano – atmosfera. En la atmosfera la rapidez del viento, temperatura del aire, humedad y nubosidad son factores claves en la regulación del intercambio de energía a través de la superficie del mar. En el océano el calor transportado por las corrientes, la mezcla vertical y la profundidad de la capa de mezcla controlan en gran medida la distribución de energía en su interior (Deser et al. 2010).

El objetivo de la investigación es estudiar las interacciones océano – atmosfera (flujos de materia y energía) cuando ocurren inundaciones y sequías (valores extremos de precipitación).

¿Cómo son las interacciones océano – atmosfera con valores extremos de precipitación?

3. Metodología

Se estudiaron las interacciones entre 6 variables climáticas: temperatura del aire; temperatura del agua; componente zonal del viento; componente meridional del viento; presión atmosférica; cobertura nubosa y sus relaciones con la ocurrencia de Valores Extremos de Precipitación.

Trabajaremos en la Piscina de Agua Cálida del Hemisferio Occidental (60° - 120° W, 0° - 30° N), por ser uno de los principales reservorios de calor del sistema océano – atmosfera (Wang et al. 2008).

Las mediciones de las 6 variables climáticas son del Conjunto Internacional de Datos del sistema Océano – Atmosfera (ICOADS por sus siglas en inglés) (Woodruff et al. 2011).

Las mediciones de precipitación son del Proyecto Climatológico Global de Precipitación (GPCP por sus siglas en inglés) las cuales fueron comparadas con las mediciones de otras fuentes (Gurber y Levizzani 2008).

Para obtener las áreas con regímenes de precipitación característicos de la Piscina de Agua Cálida del Hemisferio Occidental, se aplicó el análisis de grupos a las series de tiempo de PR (mm/día). En la Piscina de Agua Cálida del Hemisferio Occidental hay 325 series de tiempo de 420 valores (enero de 1979 - diciembre de 2013).

El análisis de grupos (Everitt et al. 2011), es un método estadístico que tiene por objetivo formar grupos de elementos (series de tiempo), considerando una medida de similitud (matriz de correlación), empleando un algoritmo de jerarquización (promedio pesado).

La matriz de datos de la variable a ser agrupada puede representarse como:

$$X = \begin{pmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1p} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{n1} & \cdots & x_{np} \end{pmatrix}$$

Dónde:

x_{ij} : Valor i de la variable en el elemento j .

n : Número de valores de la variable.

p : Número de elementos a ser agrupados.

En nuestro caso la matriz de datos son 325 elementos (series de tiempo), cada una conformada por 420 valores (promedio mensual de precipitación).

¿Cómo son las interacciones océano – atmosfera con valores extremos de precipitación?

La matriz de correlación es:

$$R = \begin{pmatrix} r_{11} & \cdots & r_{p1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{1p} & \cdots & r_{pp} \end{pmatrix}$$

Dónde:

r_{ij} : Coeficiente de correlación del elemento i con el elemento j .

El algoritmo de jerarquización consta de los siguientes módulos:

- a) Encontrar la similitud entre cada par de elementos:

$$S = 1 - R$$

Dónde:

S : Matriz de similitud.

- b) Agrupar los elementos en un árbol de grupos jerarquizados (dendrograma):

$$S(a, b) = 1 - \frac{1}{n_a n_b} \sum_{i=1}^{n_a} \sum_{j=1}^{n_b} s_{ai} s_{bj}$$

Dónde:

$S(a, b)$: Promedio pesado de la similitud entre el grupo a y el grupo b .

- c) Determinar la cantidad de grupos a considerar.

Para obtener predictores que representan relaciones lineales entre variables del sistema océano – atmósfera, se aplicó el análisis de componentes principales a las mediciones de las 6 variables climáticas: temperatura del aire; temperatura del agua; componente zonal del viento; componente meridional del viento; presión atmosférica; cobertura nubosa. En la Piscina de Agua Cálida del Hemisferio Occidental hay 496 series de tiempo de 420 valores (enero de 1979 - diciembre de 2013).

El análisis de componentes principales (Jackson 1991), es un método estadístico no paramétrico que utilizando algebra lineal, construye un sistema de referencia (componentes principales) donde observaciones de variables originales son proyectadas para definir variables nuevas (predictores), utilizando el algoritmo de Descomposición en Valores Singulares (SVD por sus siglas en ingles).

¿Cómo son las interacciones océano – atmosfera con valores extremos de precipitación?

La matriz de componentes principales Y ($n \times m$) se obtiene del producto punto del operador lineal P ($m \times m$) por la matriz de datos X ($n \times m$):

$$P \cdot X = Y$$

Dónde:

P_i : Matriz de los m coeficientes $\times m$ componentes principales.

X_i : Matriz de n observaciones $\times m$ variables.

Y_i : Matriz de n proyecciones $\times m$ componentes principales.

La representación matricial del conjunto de n variables nuevas es:

$$Y = \begin{pmatrix} P_1 \cdot X_1 & \cdots & P_1 \cdot X_n \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ P_m \cdot X_1 & \cdots & P_m \cdot X_n \end{pmatrix}$$

Los supuestos del análisis de componentes principales son:

- I. Linealidad. Las proyecciones (predictores) en los ejes del sistema de referencia (componentes principales) son ecuaciones lineales de las variables originales multiplicadas por los coeficientes.
- II. Normalidad. La distribución de probabilidad de las variables originales quedan suficientemente descritas con su media y varianza.
- III. Varianza máxima. La varianza de las proyecciones (predictores) es la máxima en cada uno de los ejes del sistema de referencia (componentes principales).
- IV. Ortogonalidad. Los ejes del sistema de referencia (componentes principales) son orto-normales.

Para encontrar los componentes principales de X , se debe encontrar una matriz ortogonal P tal que la matriz de covarianza ($S_Y \equiv \frac{1}{n-1} Y Y^T$) se puede reducir a una matriz diagonal.

Rescribamos S_Y en términos de P :

$$S_Y = \frac{1}{n-1} P A P^T$$

Dónde:

$$A \equiv X X^T$$

Es una matriz simétrica, por lo que se puede describir como:

$$A = E D E^T$$

¿Cómo son las interacciones océano – atmosfera con valores extremos de precipitación?

Dónde:

D : Matriz diagonal.

E : Matriz cuyas columnas son los vectores propios de A .

Seleccionamos una matriz ortogonal P cuyas filas son los vectores propios de la matriz XX^T ($P \equiv E^T$), rescribiendo S_Y como:

$$S_Y = \frac{1}{n-1} D$$

3. Resultados

La aplicación del algoritmo de jerarquización (análisis de grupos) se corrió para la matriz de datos, encontrándose que las 325 series temporales en la Piscina de Agua Cálida del Hemisferio Occidental, se pueden agrupar en cuatro áreas donde la precipitación en tierra está relacionada a la precipitación en mar (Figura 1 y Figura 2):

1. Pacífico Ecuatorial Oriental.
2. Pacífico de Centroamérica y Mar Caribe.
3. Pacífico de México y Golfo de California.
4. Golfo de México.

Para identificar los valores extremos de las series de tiempo de precipitación en las diferentes áreas, se utilizó el criterio del percentil:

$$\begin{cases} \text{máximo} > \text{percentil } 99 \\ \text{mínimo} < \text{percentil } 1 \end{cases}$$

Los meses y años de los valores extremos en el intervalo de tiempo analizado (enero de 1979 – diciembre de 2013), corresponden a valores de inflexión (máximos y mínimos) del promedio mensual y anual de la precipitación (Tabla 1).

En particular los años con mayor y menor precipitación son:

1. Norte de Suramérica: 1997 y 1985;
2. Caribe y Centroamérica: 2010 y 1991;
3. Península de California/costa Oeste de México: 1992 y 2011;
4. Península de Florida/costa Este de México: 1992 y 2011.

La aplicación del algoritmo de descomposición en valores singulares (análisis de componentes principales) se corrió para la matriz de datos, encontrándose que el primer predictor representa el 74% y el segundo predictor el 14% de la varianza total de las series temporales de las 6 variables climáticas promediadas en la Piscina de Agua Cálida del Hemisferio Occidental.

Los coeficientes del primer predictor son positivos para las variables temperatura del aire, temperatura del agua, componente zonal del viento, componente meridional del viento, cobertura nubosa y negativo para presión atmosférica, mientras que los del segundo predictor son positivos para las variables temperatura del aire, temperatura del agua, componente meridional del viento, cobertura nubosa, presión atmosférica y negativo para la componente zonal del viento, (Figura 3). Las correlaciones entre variables y componentes principales se presentan en la Tabla 2.

4. Discusión

Con base a los resultados de la aplicación del análisis de grupos a las mediciones de precipitación en la Piscina de Agua Cálida del Hemisferio Occidental, se concluye que existen al menos 4 regímenes de lluvia.

Los de mayor precipitación (2), Norte de América del Sur y Centroamérica – Caribe, incluyen las aguas cálidas del Pacífico Ecuatorial Oriental, Mar Caribe, Pacífico de Centroamérica y los de menor precipitación (2), Península de California –costa Oeste de México y Península de Florida – costa Oeste de México, incluyen las aguas frías del Golfo de California, Pacífico de México, Golfo de México.

En los regímenes de lluvia que incluyen aguas del Pacífico (2), Norte de Suramérica y Península de California – costa Oeste de México, los máximos se observaron en la fase cálida del fenómeno ENOS (62%) o neutra (38%), mientras que los mínimos en la fase fría (75%) o neutra (25%). En los regímenes de lluvia que incluyen aguas del Atlántico (2), Centroamérica – Caribe y Península de Florida – costa Este de México, los máximos se observaron en la fase fría del fenómeno ENOS (50%), neutra (25%) y fase cálida (25%), mientras que los mínimos se observaron en la fase fría (50%) o neutra (50%) (Tabla 1).

Con base a los resultados de la aplicación del análisis de componentes principales a las mediciones de 6 variables climáticas en la Piscina de Agua Cálida del Hemisferio Occidental, se concluye que el primer predictor representa la precipitación y el segundo representa la relación lineal entre la presión atmosférica y componente zonal del viento (Figura 4).

Entre el primer predictor (74%) y segundo predictor (14%) queda representada el 88% de la varianza total del sistema de variables climáticas. El primer predictor tiene correlación positiva con la temperatura del agua (45%), temperatura del aire (44%), componente meridional del viento (44%), cobertura nubosa (41%), componente zonal del viento (37%) y negativa con la presión atmosférica (-32%). El segundo predictor tiene correlación positiva con la presión atmosférica (74%), componente meridional del viento (27%), cobertura nubosa (24%), temperatura del aire (23%), temperatura del agua (21%) y negativa con la componente zonal del viento (-48%).

Las proyecciones de las 6 variables climáticas en el plano formado por el primer y segundo predictor (PC1-PC2) tienden a alinearse alrededor de rectas con pendiente negativa. Este patrón de dispersión refleja que la precipitación es mayor con menor presión atmosférica y componente zonal del viento (mayor rapidez del viento del Este). Los meses de la estación seca (diciembre – abril) caen alrededor de la recta de

¿Cómo son las interacciones océano – atmosfera con valores extremos de precipitación?

precipitación mínima; los meses de inicio de estación (noviembre y mayo) alrededor de la recta de precipitación media; los meses de la estación lluviosa (junio – octubre) alrededor de la recta de precipitación máxima (Figura 5).

Los valores extremos de precipitación (Tabla 1) son función del régimen de lluvia que a su vez es función de la cuenca (Pacífico y Atlántico), por lo que se recomienda, además de la comparación con índice del Pacífico (ONI por sus siglas en ingles), su comparación con índice del Atlántico (ATL3 o AMM) los cuales también son anomalías, valor mensual actual menos valor mensual climatológico, de la temperatura del agua en la superficie del mar.

Los valores extremos de precipitación (Tabla 1) son función del régimen de lluvia, mes y año, por lo que se recomienda aplicar el análisis de componentes principales, en cada una de las áreas con régimen de lluvia característico (4), a las series temporales mensuales (12) y anuales (35) de las anomalías de las variables climáticas.

5. Referencias

Everitt B. S., Landau S. Leese M. Stahl D. 2011. Cluster analysis. 5th Edition. Wiley Series in Probability and Statistics. John Wiley and Sons, Ltd. Publication. 348 pp.

Deser C, Alexander M. A., Xie S., Phillips A. 2010. S. Sea Surface Temperature Variability: Patterns and Mechanisms. Annual Review Marine Science 2010 2:115-43.

Gurber A., Levizzani V. 2008. Assessment of Global Precipitation Products. A project of the Global Energy and Water Cycle Experiment (GEWEX), Radiation Panel. World Climate Research Programme Report.

Jackson J. E. 1991. A user's guide to principal components. Wiley-Interscience Publication. John Wiley and sons, INC. 587 pp.

Wang C., S.-K. Lee, and D. B. Enfield (2008), Atlantic Warm Pool acting as a link between Atlantic Multidecadal Oscillation and Atlantic tropical cyclone activity, Special Issue of G3 Focusing on Interactions Between Climate and Tropical Cyclones on All Time Scales. <http://dx.doi.org/10.1029/2007GC001809>.

Woodruff S. D., Worley S. J., Lubker S. J., Zaihua Ji, Freeman J. Eric, Berry D. I., Brohan P., Kent E. C., Reynolds R. W., Smith S. R. and Wilkinson C. ICOADS Release 2.5: extensions and enhancements to the surface marine meteorological archive. International Journal of Climatology. Royal Meteorological Society. IJC. 31: 951–967 (2011). <http://dx.doi.org/10.1002/joc.2103>.

6. Figuras

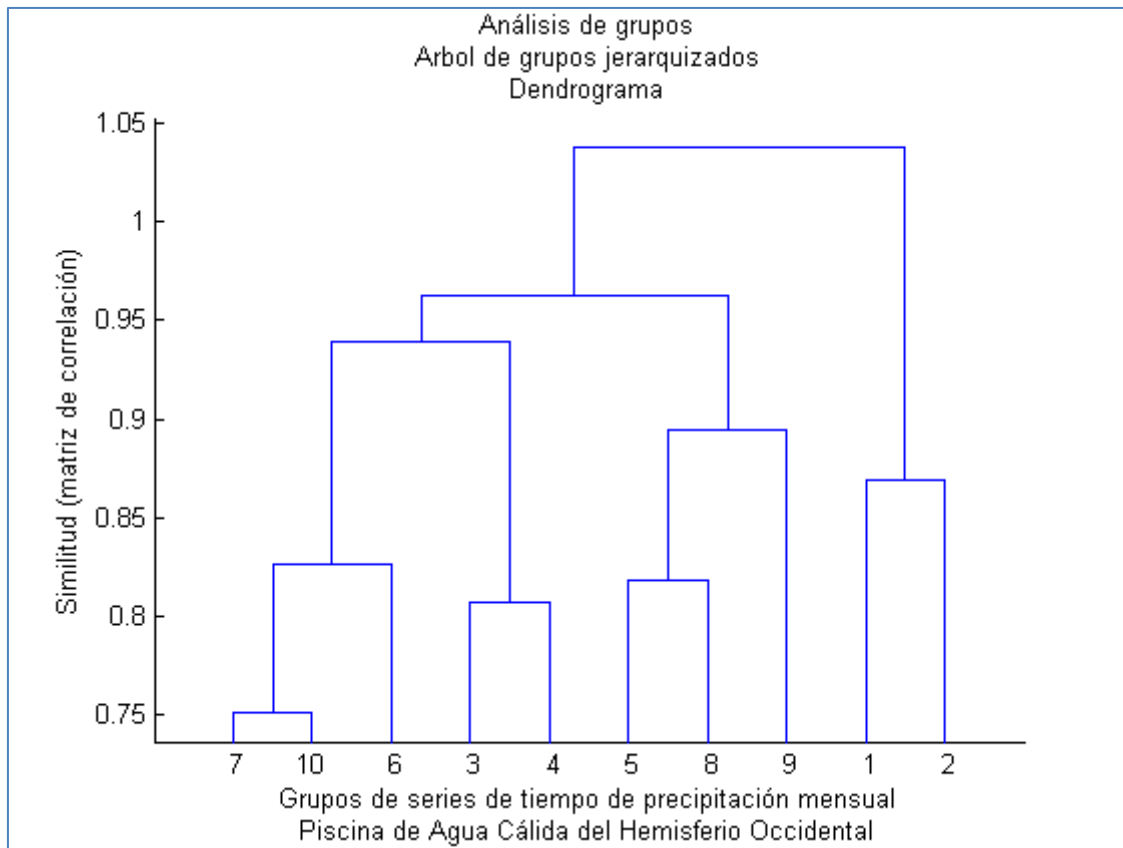


Figura 1. Dendrograma de grupos de series de tiempo de precipitación en la Piscina de Agua Cálida del Hemisferio Occidental.

¿Cómo son las interacciones océano – atmosfera con valores extremos de precipitación?

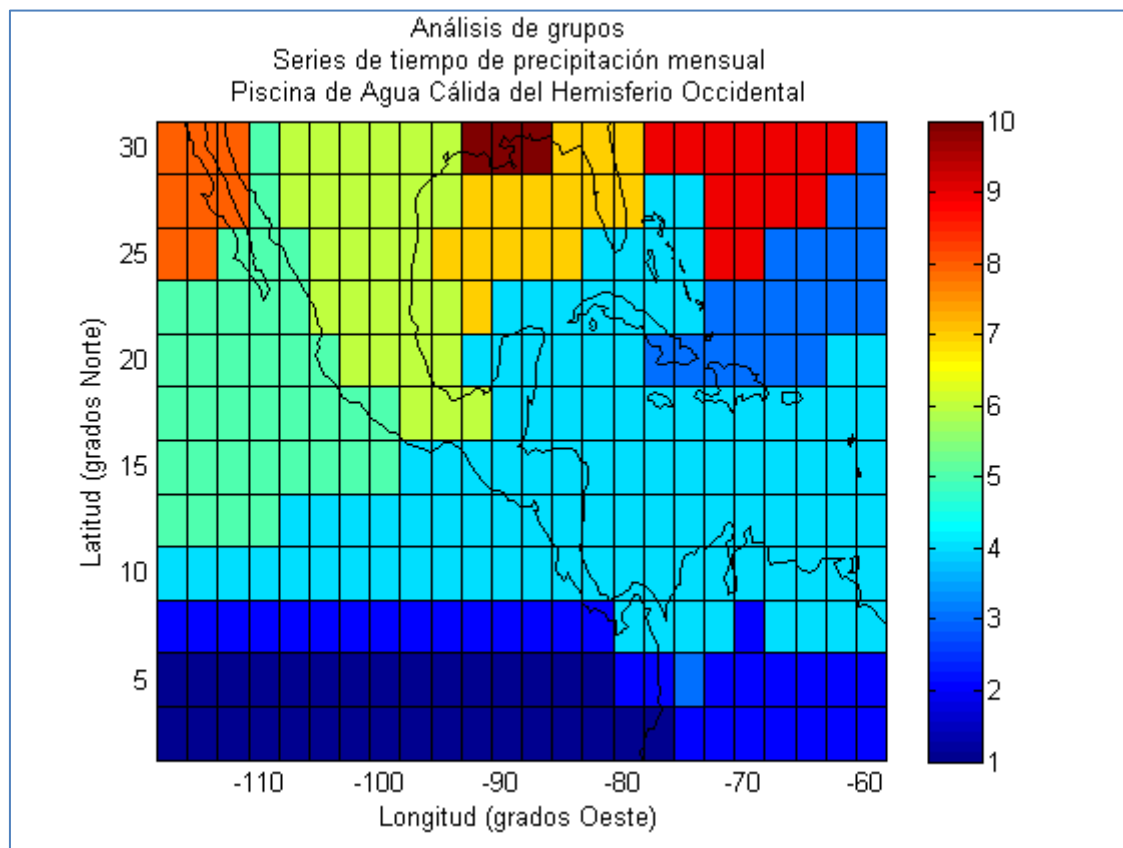


Figura 2. Mapa de grupos de series de tiempo de precipitación en la Piscina de Agua Cálida del Hemisferio Occidental.

¿Cómo son las interacciones océano – atmosfera con valores extremos de precipitación?

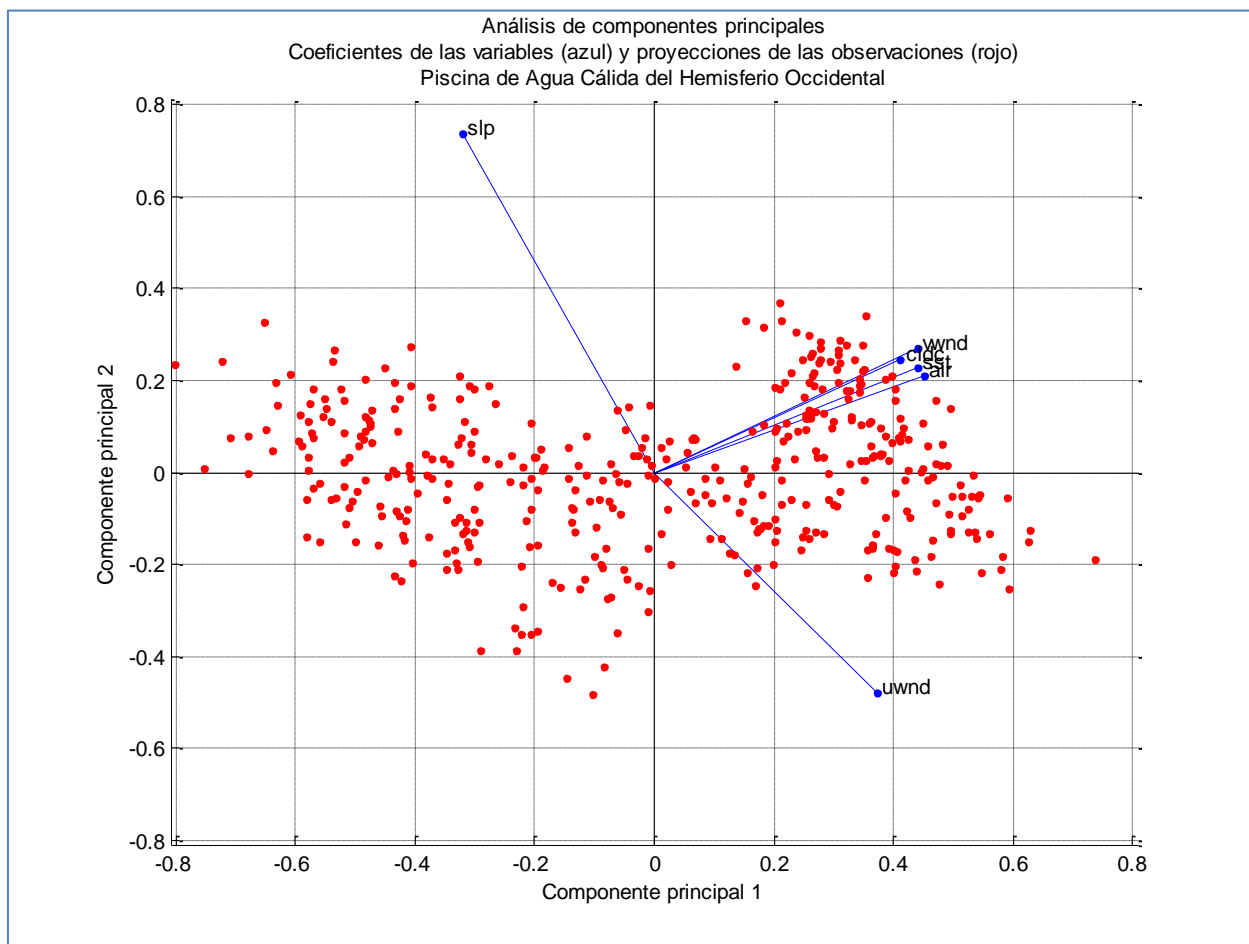


Figura 3. Coeficientes de las variables (6) y proyecciones de las observaciones (420) en la Piscina de Agua Cálida del Hemisferio Occidental.

¿Cómo son las interacciones océano – atmosfera con valores extremos de precipitación?

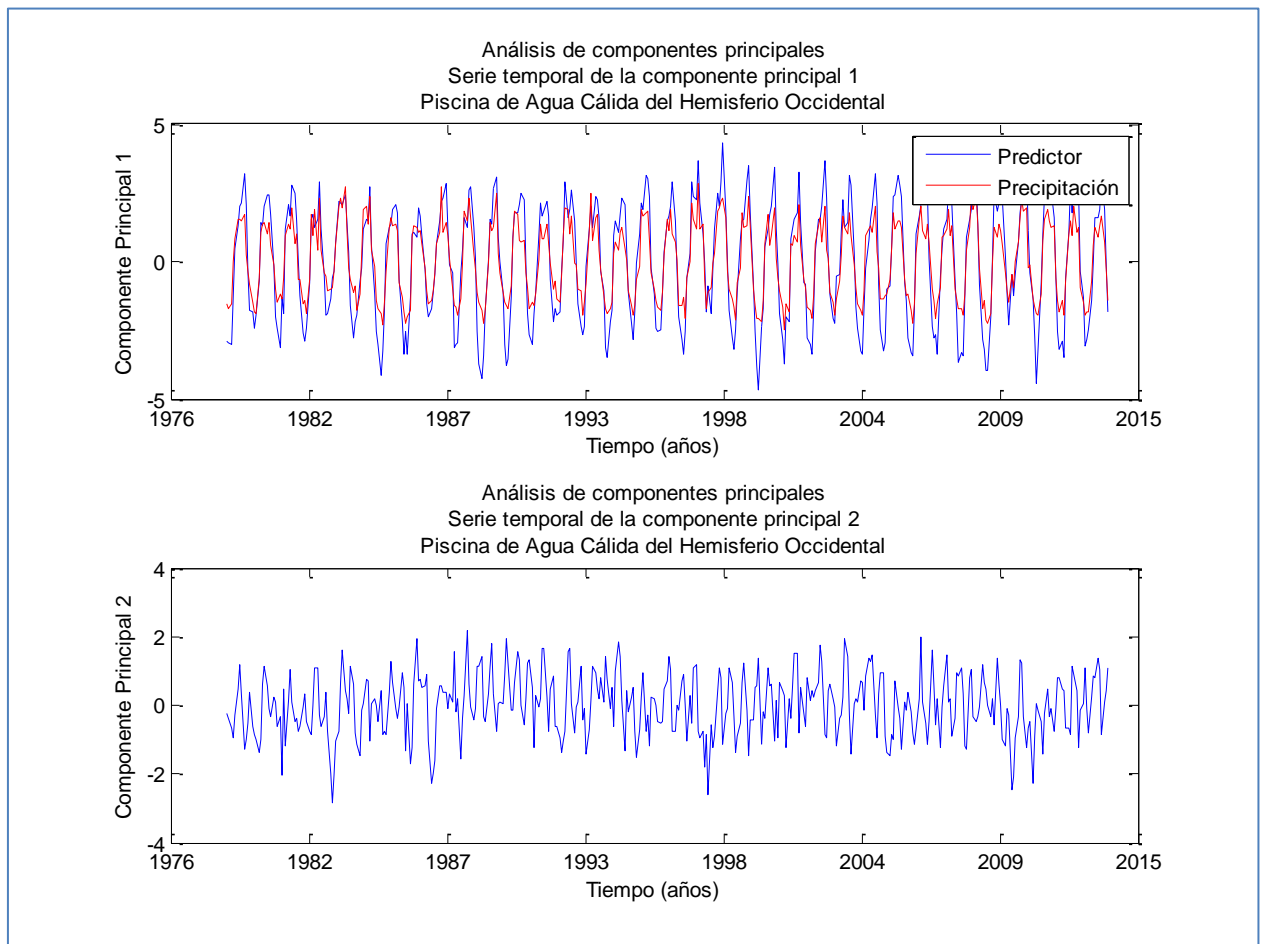


Figura 4. Series temporales del primer (74% de la varianza) y segundo predictor (14% de la varianza). La correlación entre el primer predictor y la precipitación en la Piscina de Agua Cálida del Hemisferio Occidental es del 94%.

¿Cómo son las interacciones océano – atmosfera con valores extremos de precipitación?

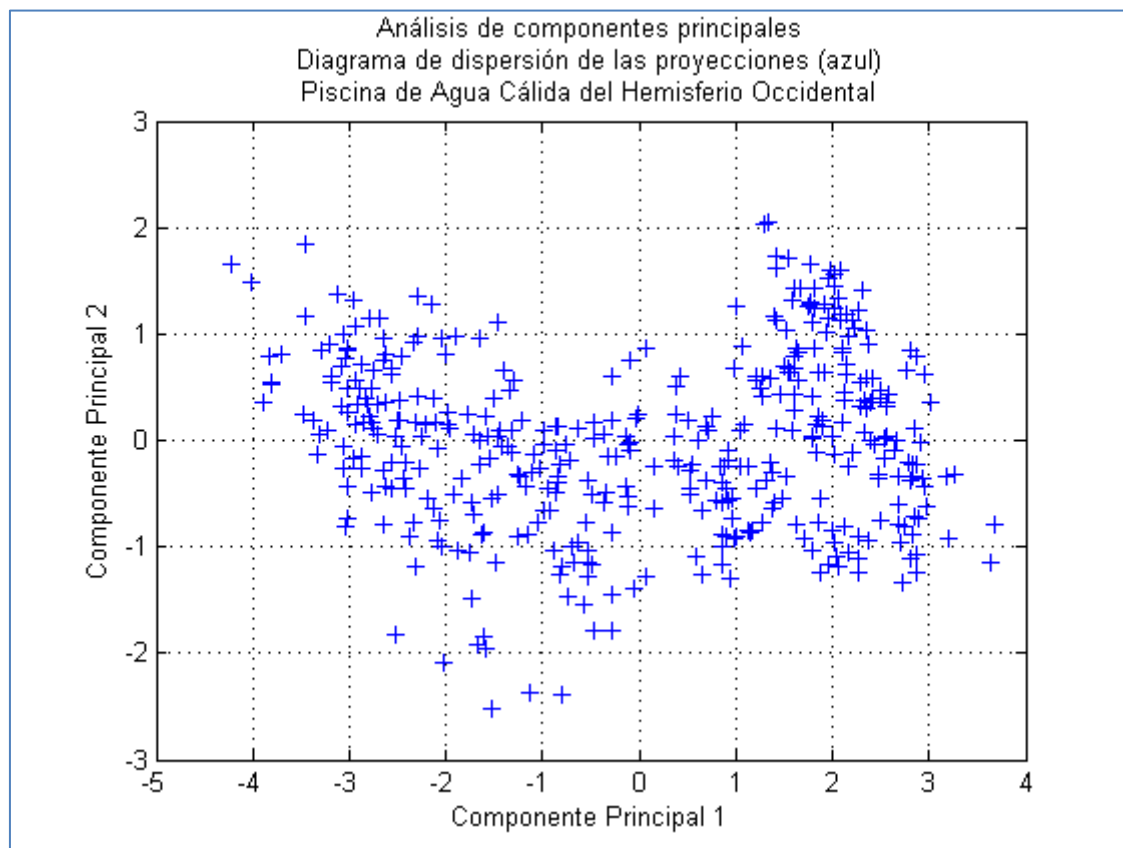


Figura 5. Diagrama de dispersión de las proyecciones en el sistema de referencia Componente Principal 1 – Componente Principal 2.

¿Cómo son las interacciones océano – atmosfera con valores extremos de precipitación?

7. Tablas

Área	Máximo (percentil 99)	Mínimo (percentil 1)
Norte de Suramérica	1983 (mayo) Niño	1985 (marzo) Niña
	1983 (junio) Niño	1989 (diciembre) Neutro
	1998 (abril) Niño	1999 (diciembre) Niña
	1998 (junio) Neutro	2013 (enero) Neutro
Caribe y Centroamérica	1987(julio) Niño	1980 (marzo) Neutro
	1998 (octubre) Niña	1993 (febrero) Neutro
	1999 (septiembre) Niña	1997 (marzo) Neutro
	2005 (junio) Neutro	2001 (febrero) Niña
Península de California y costa Oeste de México	1982 (septiembre) Niño	2000 (marzo) Niña
	1989 (septiembre) Neutro	2011 (marzo) Niña
	1997 (septiembre) Niño	2011 (abril) Niña
	2001 (septiembre) Neutro	2012 (marzo) Niña
Península de Florida y costa Este de México	1998 (septiembre) Niña	1998 (mayo) Neutro
	2002 (septiembre) Niño	1999 (febrero) Niña
	2010 (julio) Niña	1999 (noviembre) Niña
	2013 (septiembre) Neutro	2011 (abril) Niña

Tabla 1. Fechas de valores extremos de las series de tiempo de precipitación en las diferentes áreas con el criterio del percentil. La fase del fenómeno ENOS es con base al Índice Oceánico El Niño (ONI por sus siglas en ingles), el cual es el valor promedio móvil de 3 meses de la anomalía de la variable climática con respecto al valor promedio en 30 años actualizados cada 5 años. La variable climática es la temperatura en la superficie del mar en la región Niño 3.4 (120° - 170° W, 5° S – 5° N).

¿Cómo son las interacciones océano – atmosfera con valores extremos de precipitación?

Variable	CP-1 (74%)	CP-2 (14%)	CP-3 (7%)	CP-4 (4%)	CP-5 (1%)	CP-6 (<1%)
Temperatura del aire	0.44	0.23	-0.40	-0.27	-0.19	0.70
Temperatura del agua	0.45	0.21	-0.27	-0.02	-0.50	-0.65
Componente zonal del viento	0.37	-0.48	0.64	-0.37	-0.28	0.07
Componente meridional del viento	0.44	0.27	0.11	-0.33	0.75	-0.22
Presión atmosférica	-0.32	0.74	0.45	-0.29	-0.26	0.04
Cobertura nubosa	0.41	0.24	0.38	0.77	0.01	0.18

Tabla 2. Matriz de coeficientes. Correlaciones entre variables y componentes principales en la Piscina de Agua Cálida del Hemisferio Occidental.