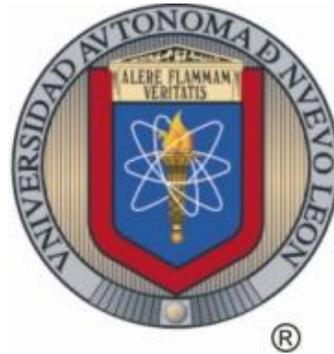


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
FACULTAD DE AGRONOMÍA  
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



CAMBIO CLIMÁTICO Y COMPORTAMIENTO DE ELEMENTOS  
CLIMÁTICOS EN NUEVO LEÓN, MÉXICO

Por: SALVADOR HERRERA SALCEDO

COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE  
DOCTOR EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

Escobedo, N. L. Junio 2011

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
FACULTAD DE AGRONOMÍA  
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



CAMBIO CLIMÁTICO Y COMPORTAMIENTO DE ELEMENTOS  
CLIMÁTICOS EN NUEVO LEÓN, MÉXICO

Por: SALVADOR HERRERA SALCEDO

COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE  
DOCTOR EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

Escobedo, N. L., Junio 2011

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
FACULTAD DE AGRONOMÍA  
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



CAMBIO CLIMÁTICO Y COMPORTAMIENTO DE ELEMENTOS  
CLIMÁTICOS EN NUEVO LEÓN, MÉXICO

Por: SALVADOR HERRERA SALCEDO

COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE  
DOCTOR EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

Escobedo, N. L., Junio 2011

**CAMBIO CLIMÁTICO Y COMPORTAMIENTO DE ELEMENTOS CLIMÁTICOS EN  
NUEVO LEÓN, MÉXICO**

**Realizado bajo la dirección del Comité de Tesis, ha sido  
aprobado por el mismo y aceptado como requisito parcial  
para obtener el grado de Doctor en Ciencias Agrícolas**

**Asesor Principal:**

---

Dr. Ricardo David Valdez Cepeda

**Coasesores:**

---

Dr. Emilio Olivares Sáenz

---

Dr. Juan Antonio Vidales Contreras

---

Dr. Humberto Rodríguez Fuentes

---

Dr. Rigoberto Vázquez Alvarado

---

Dr. Marisela Pando Moreno

**Subdirector de Estudios de Posgrado e Investigación:**

---

Dr. Francisco Zavala García

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco a las Instituciones Comisión Nacional del Agua, Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología y la Universidad Autónoma de Nuevo León, por los apoyos otorgados para la realización de este proyecto de investigación.

A los autores de investigaciones sobre técnicas estadísticas avanzadas, cuyas publicaciones, me ayudaron a comprender mejor el análisis de series de tiempo.

Al Dr. Ricardo David Valdez Cepeda, Asesor Principal de Tesis, por impartir sus conocimientos y su asesoría sobre mis estudios académicos realizados y su orientación para desarrollar el presente estudio.

A los demás Asesores del Comité particular de Tesis que realizaron aportaciones a este proyecto de investigación.

A los profesores de la FAUANL, por sus consejos y apoyo durante mi estancia; también a mis compañeros estudiantes por su buena disposición y apoyo.

A mi esposa María Illalí, a mi hija Claudia y a mi familia (padres, hermanos y tíos) y amigos por su apoyo y cariño recibido en estos años de estudio y dedicación para obtener el doctorado.

A mi maravilloso Ser Interno y a mis amados Maestros Superiores por su infinita voluntad misericordiosa y por haberme permitido realizar este anhelo de prepararme un poco más para dar un mejor servicio en mi profesión.

## ÍNDICE

	Página
ÍNDICE	iv
ÍNDICE DE CUADROS	viii
ÍNDICE DE FIGURAS	x
RESUMEN AUTOBIOGRÁFICO	xii
RESUMEN	xiii
SUMMARY	xv
CAPITULO 1. PLANTEAMIENTO GENERAL DE LA INVESTIGACIÓN: CAMBIO CLIMÁTICO Y COMPORTAMIENTO DE ELEMENTOS CLIMÁTICOS EN NUEVO LEÓN	1
1.1. RESUMEN	1
1.2. SUMMARY	2
1.3. INTRODUCCIÓN	3
1.3.1. Antecedentes	5
1.3.2. Justificación	8
1.3.2.1. Temperatura	8
1.3.2.2. Evaporación	9
1.3.3. Objetivo general	10
1.3.3.1. Objetivos específicos	10
1.3.4. Hipótesis general	10
1.3.4.1. Hipótesis específicas	10
1.4. METODOLOGÍA GENERAL	12
1.4.1. Recopilación de datos y acopio de información	12
1.4.2. Preparación de datos para su análisis	12
1.4.3. Realización de series de datos o series históricas	12

1.4.4.	Identificación de señales de fenómenos seculares	13
1.4.5.	Preparación de mapas temáticos	13
1.5.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN GENERAL	14
1.6.	CONCLUSIONES GENERAL	15
1.7.	BIBLIOGRAFÍA	16

CAPITULO 2.	TENDENCIAS DE TEMPERATURAS EXTREMAS Y EVAPORACIÓN	23
-------------	---	----

2.1.	RESUMEN	23
2.2.	SUMMARY	24
2.3.	INTRODUCCIÓN	25
2.3.1.	Antecedentes	25
2.3.2.	Objetivo	28
2.3.3.	Hipótesis	28
2.4.	MATERIALES Y MÉTODOS	29
2.5.	RESULTADOS	34
2.6.	DISCUSIÓN	42
2.7.	CONCLUSIONES	44
2.8.	BIBLIOGRAFÍA	48

CAPITULO 3.	ANÁLISIS FRACTAL DE TEMPERATURAS EXTREMAS Y EVAPORACIÓN	50
-------------	---	----

3.1.	RESUMEN	50
3.2.	SUMMARY	52
3.3.	INTRODUCCIÓN	53
3.3.1.	Antecedentes	53

3.3.2.	Objetivo	55
3.3.3.	Hipótesis	55
3.4.	MATERIALES Y MÉTODOS	56
3.5.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	59
3.6.	CONCLUSIONES	68
3.7.	BIBLIOGRAFÍA	69

CAPITULO 4. RELACIÓN ENTRE TEMPERATURAS EXTREMAS Y EVAPORACIÓN CON LA ACTIVIDAD SOLAR MEDIANTE ANÁLISIS DE COHERENCIA DE ONDELETAS	73
--	----

4.1.	RESUMEN	73
4.2.	SUMMARY	74
4.3.	INTRODUCCIÓN	75
4.3.1.	Antecedentes	75
4.3.2.	Objetivo	78
4.3.3.	Hipótesis	78
4.4.	MATERIALES Y MÉTODOS	79
4.5.	RESULTADOS	82
4.6.	DISCUSIÓN	90
4.7.	CONCLUSIONES	92
4.8.	BIBLIOGRAFÍA	93

CAPITULO 5. MAPAS DE TENDENCIA Y DIMENSIÓN FRACTAL DE TEMPERATURAS EXTREMAS Y EVAPORACIÓN	96
---	----

5.1.	RESUMEN	96
------	---------	----

5.2.	SUMMARY	97
5.3.	INTRODUCCIÓN	98
5.3.1.	Antecedentes	98
5.3.2.	Objetivo	101
5.3.3.	Hipótesis	101
5.4.	MATERIALES Y MÉTODOS	102
5.5.	RESULTADOS	105
5.6.	DISCUSIÓN	112
5.7.	CONCLUSIONES	115
5.8.	BIBLIOGRAFÍA	116
	ANEXO	119
	CAMBIO CLIMÁTICO: COMPORTAMIENTO DE LAS TEMPERATURAS EXTREMAS Y LA EVAPORACIÓN EN NUEVO LEÓN, MÉXICO	+155

## Índice de Cuadros

Cuadro	Título	Página
1	Análisis de regresión lineal simple de la temperatura máxima extrema mensual registrada en 30 estaciones del Estado de Nuevo León	45
2	Análisis de regresión lineal simple de la temperatura mínima extrema mensual registrada en 30 estaciones del Estado de Nuevo León	46
3	Análisis de regresión lineal simple de la evaporación mensual observada en 30 estaciones del Estado de Nuevo León	47
4	Parámetros de auto afinidad para series de tiempo de temperatura máxima extrema mensual y de sus anomalías en 29 estaciones del estado de Nuevo León	65
5	Parámetros de auto afinidad para series de tiempo de temperatura mínima extrema mensual y de sus anomalías en 30 estaciones del estado de Nuevo León	66
6	Parámetros de auto afinidad para series de tiempo de evaporación mensual y de sus anomalías en 30 estaciones del estado de Nuevo León	67
7	Frecuencia y periodo en el que las transformadas de coherencia de ondeletas entre series de temperatura máxima mensual registrada en Nuevo León y número de manchas solares presentaron covarianza significativa	82
8	Frecuencia y periodo en el que las transformadas de coherencia de ondeletas entre series de temperatura mínima mensual registrada en Nuevo León y número de manchas solares presentaron covarianza significativa	83

- 9 Frecuencia y periodo en el que las transformadas de coherencia de ondeletas entre series de evaporación mensual registrada en Nuevo León y número de manchas solares presentaron covarianza significativa 83

## Índice de Figuras

Figura	Título	Página
1	Ubicación de las 30 localidades consideradas en el territorio de Nuevo León	30
2	Tendencias lineales significativas de temperaturas máxima y mínima extrema mensual y evaporación mensual para la estación Camacho-Linares, Nuevo León	42
3	Densidad de espectro potencial versus frecuencia para la temperatura mínima extrema mensual registrada en Lampazos, Nuevo León	59
4	Transformadas de ondeleta discreta para serie de temperatura extrema máxima mensual registrada en Paras, Nuevo León (arriba) y número de manchas solares (abajo)	84
5	Transformadas de ondeleta discreta para serie de temperatura extrema mínima mensual registrada en Paras, Nuevo León	84
6	Transformadas de ondeleta discreta para serie de evaporación mensual registrada en Paras, Nuevo León	84
7	Transformada de coherencia de ondeletas entre las series de temperatura extrema máxima mensual registrada en Paras, Nuevo León y número de manchas solares	85
8	Transformada de coherencia de ondeletas entre las series de temperatura extrema mínima mensual registrada en Parás, Nuevo León y número de manchas solares	85
9	Transformada de coherencia de ondeletas entre las series de evaporación mensual registrada en Paras, Nuevo León y número de manchas solares	86
10	Mapa de tendencia (°C/decenio) de series de temperatura extrema máxima mensual en Nuevo León	106
11	Mapa de tendencia (°C/decenio) de series de temperatura extrema mínima mensual en Nuevo León	107
12	Mapa de tendencia (mm/decenio) de series de	

	evaporación mensual en Nuevo León	108
13	Mapa de dimensión fractal de anomalías de temperatura extrema máxima mensual en Nuevo León	109
14	Mapa de dimensión fractal de anomalías de temperatura extrema mínima mensual en Nuevo León	110
15	Mapa de dimensión fractal de anomalías de evaporación mensual en Nuevo León	111

## RESUMEN AUTOBIOGRÁFICO

Nombre: M. C. Salvador Herrera Salcedo  
Lugar de nacimiento: Nogales, Sonora  
Fecha de nacimiento: 10 de abril del 1965

### Preparación Académica:

Doctorado: Ciencias Agrícolas con Orientación al Agua-Suelo.  
Institución: Facultad de Agronomía de la U.A.N.L.  
Fecha en que se otorgó el grado: Junio 2011  
Maestría: Estadística Aplicada  
Institución; ITESM Campus Monterrey  
Fecha de egreso; Diciembre del 1999

Licenciatura: Ingeniero Civil  
Institución: Universidad Autónoma de Chihuahua  
Fecha de egreso Diciembre del 1997

### Experiencia Profesional

Dependencia: UANL  
Fecha de ingreso Febrero del 2000  
Adscripción actual: Facultad de Ingeniería Civil  
Puesto actual: Profesor de Asignatura "A"  
Antigüedad: 6 años

### Distinciones otorgadas

Dependencia Facultad de Ingeniería. UACH  
Fecha 1994  
Testimonio Por su participación en la Olimpiada ANEIC.

## RESUMEN

La variabilidad solar es una posible causa natural que influye sobre el cambio climático y es probable que un cambio en la varianza del comportamiento de los elementos climáticos sea más importante para la frecuencia de los eventos extremos que un cambio en la media. Por consiguiente, es importante generar conocimiento del comportamiento de las temperaturas extremas.

El objetivo general fue identificar las tendencias de elementos climáticos en el territorio de Nuevo León y su posible relación con fenómenos seculares mediante la realización de análisis de series de tiempo.

En las series históricas se identificaron tendencias mediante análisis de regresión lineal simple. Se evidenciaron señales de fenómenos oscilatorios mediante el uso de análisis espectral y análisis de coherencia de ondeletas. Se construyeron mapas temáticos con los resultados de tendencias y dimensión fractal mediante la técnica kriging ordinario.

Se detectó en un área, mediante los mapas temáticos, el fenómeno '*Paradoja de la Evaporación*' y en otras se identificaron aumentos de temperaturas extremas mayores que el incremento de temperatura media global. Se determinó que en prácticamente todo el territorio del estado de Nuevo León, las series de datos tienden a tener un comportamiento persistente o de memoria de largo plazo y se evidenció la posible influencia de la actividad solar en ambos tipos de

temperaturas extremas y evaporación mensual durante las décadas de 1970 y 1980.

## ABSTRACT

Solar variability is a possible natural cause with impact on the climatic change, and perhaps a switch in the variance of the behavior of climate elements to explain the frequency of extreme events is more relevant than a change in the mean. Consequently it is important to generate knowledge about the behavior of extreme temperatures.

The overall objective was to identify trends in the climatic elements across the Nuevo Leon state territory, and find out possible relationships between the behavior of the climatic elements and some secular phenomena by performing time series analyses.

In historical series trends were identified by simple linear regression analysis. In addition, signals of oscillatory phenomena were detected by spectral and wavelet coherence analyses. The results of trends and fractal dimension permitted the map construction by using ordinary kriging technique.

These maps allowed, in a particular area, to perceive the phenomenon known as “evaporation paradox”. Furthermore, increments in extreme temperature superior to the global mean temperature increment were detected in other areas. Virtually in the entire state of Nuevo Leon, the data series tend to have a persistent behavior or of long-term memory, and demonstrated the possible influence of solar activity upon both extreme temperatures and monthly evaporation through the 1970-1980 interval.

## **CAPÍTULO 1**

### **PLANTEAMIENTO GENERAL DE LA INVESTIGACIÓN: CAMBIO CLIMÁTICO Y COMPORTAMIENTO DE ELEMENTOS CLIMÁTICOS EN NUEVO LEÓN**

#### **1.1. Resumen**

En Cambio Climático es posible que un cambio en la varianza sea más importante para la frecuencia de los eventos extremos que un cambio en la media. La variabilidad solar es una posible causa natural que influye sobre el clima y es necesario evaluar el alcance de su influencia. Por consiguiente, se presentó una propuesta para identificar las tendencias de elementos climáticos en el territorio de Nuevo León y su relación con fenómenos seculares mediante la realización de análisis de series de tiempo. En las series históricas se identificaron señales de fenómenos oscilatorios mediante el uso de técnicas estadísticas avanzadas como análisis espectral y análisis de coherencia de ondeletas. Se construyeron mapas temáticos con los resultados obtenidos útiles para la toma de decisiones.

## **1.2. Summary**

In Climatic Change it is possible that a change in the variance is more important for the frequency of the extreme events than a change in the average. The solar variability is a possible natural cause that influences the climate and is necessary to evaluate the reach of its influence. Therefore, a research proposal appeared in order to identify trends of climatic elements in Nuevo Leon, Mexico. Oscillatory phenomena of these parameters were elucidated by means of advanced statistical approaches such as spectral analysis and wavelet coherence determinations. The resulting information of this research work was taken into account to draw thematic maps useful for decision makers.

### 1.3. Introducción

El papel de la actividad solar sobre el cambio climático y ambiental es un tema de gran controversia. Los últimos dos decenios de investigación (Kasatkina *et al.*, 2007) en física solar, geofísica y climatología han conducido a comprender que:

1. La influencia antropogénica en el ambiente ha sobrecargado una serie de factores naturales alterando el clima, la atmósfera y la biosfera de la Tierra (Priem, 1997; Singer, 1999; Soon y Baliunas, 2003).

2. El factor heliofísico principal que actúa sobre el clima, la biosfera y el estado de la atmósfera es la irradiancia solar (Reid, 1991; Lean *et al.*, 1995; Douglass y Clader, 2002), pues la intensidad de los rayos solares y cósmicos alteran la capa de nubes de la atmósfera (Tinsley *et al.*, 1989; Shumilov *et al.*, 1996; Svensmark y Friis-Christensen, 1997; Palle y Butler, 2001; Carslaw *et al.*, 2002; Kasatkina y Shumilov, 2005), y también la radiación ultravioleta.

3. Los factores heliofísicos han mostrado un comportamiento cíclico que se ha identificado en un gran número de registros de temperatura y registros de variables *proxy*, como el número de manchas solares cuyo ciclo promedio es de 11 años, actividad magnética del sol con un ciclo de 22 años (Hale) y otro de 80-90 años (Gleissberg) (King, 1975; Mann y Park, 1994; Stocker, 1994; Plaut *et al.*, 1995; Molinari *et al.*, 1997; Neff *et al.*, 2001; Roig *et al.*, 2001; Douglass y Clader, 2002; Rigozo *et al.*, 2005; Gleisner y Thejll, 2003; Gusev *et al.*, 2004).

Los efectos de radiación solar y rayos cósmicos están presentes en los ciclos solares de 11 años y 80-90 años (Tinsley *et al.*, 1989; Lean *et al.*, 1995; Svensmark y Friis-Christensen, 1997; McCracken *et al.*, 2001). Simultáneamente, el ciclo de Hale, relacionado a una inversión de la dirección del campo magnético solar, está prácticamente ausente en la radiación solar (Lean *et al.*, 1995) y en la variación de los rayos cósmicos (Webber y Lockwood, 1988). Sin embargo, hasta la fecha no se ha identificado algún mecanismo físico por medio del cual una inversión en el campo magnético solar pueda influenciar el clima de la tierra.

No obstante, el ciclo de 22 años ha sido identificado en numerosos registros climáticos (sequías y lluvias) regionales en el mundo (King, 1975; Cook *et al.*, 1997; Gusev *et al.*, 2004; Kasatkina *et al.*, 2006). El ciclo solar de 80-90 años es mínimamente preservado en registros climáticos (Stocker, 1994). La naturaleza física del ciclo solar de 33 años (Buckner) actualmente permanece desconocida, solo ha sido identificado en un número limitado de regiones: Norte de Finlandia (Stocker, 1994), Tasmania (Cook *et al.*, 1995), Chile (Roig *et al.*, 2001), México (Mendoza *et al.*, 2001), y América del Norte (Scuderi, 1993; Dean *et al.*, 2002). Por ello, el papel de la actividad solar sobre la variación de la temperatura terrestre es el aspecto medular de una gran controversia.

Se presentó una propuesta para identificar las tendencias de elementos climáticos en el territorio de Nuevo León y su relación con fenómenos seculares mediante la realización de análisis de series de tiempo. En las series históricas se identificaron señales de fenómenos oscilatorios mediante el uso de técnicas

estadísticas avanzadas como análisis espectral y análisis de coherencia de ondeletas. Se construyeron mapas temáticos con los resultados obtenidos útiles para la toma de decisiones.

En el capítulo 2 se procesó la base de datos y se identificaron las tendencias lineales mediante análisis de regresión lineal simple. En el capítulo 3 se evidenciaron las periodicidades ocultas y sus posibles causas mediante el análisis conjunto de la densidad del espectro potencial de las series de tiempo originales y sus respectivas anomalías. En el capítulo 4 se evidenciaron, mediante análisis de coherencia de ondeletas, los dominios de tiempo-frecuencia con covarianza significativa entre las series de tiempo y la serie de número de mancha solares. En el capítulo 5 se diseñaron mapas temáticos con los resultados de tendencia y dimensión fractal por medio de la técnica kriging ordinario. Por último, en el anexo se presentó una publicación indexada.

### **1.3.1. Antecedentes**

En el período 1906-2005, la temperatura media de la atmósfera del planeta ha aumentado  $0.74 \pm 0.18$  °C (Agencia Europea de Medio Ambiente, 2006). Según Trenberth *et al.* (2007), en el hemisferio norte, el incremento de la temperatura media terrestre desde 1901 a 2005 fue de  $0.063$  a  $0.079$  °C·decenio<sup>-1</sup>, mientras que para el periodo de 1979 a 2005 fue entre  $0.294$  y  $0.344$  °C·decenio<sup>-1</sup>. En Europa, el calentamiento observado ha sido más importante, con un incremento desde 1900 a la fecha de  $0.95$  °C, especialmente en regiones como el noroeste de Rusia y la península Ibérica (González *et al.*, 2008).

Estudios reportados en México muestran que la tendencia al calentamiento es evidente en la mayor parte del desierto de Sonora, donde las temperaturas mínimas muestran tendencias positivas durante todo el año (Weiss y Overpeck, 2005). Sin embargo, la tendencia al calentamiento no es un fenómeno generalizado en México ya que también se observan tendencias negativas en las temperaturas mínimas, por ejemplo, hacia el extremo sureste del desierto de Sonora (Weiss y Overpeck, 2005).

La tendencia de la temperatura extrema ha sido estudiada en algunas regiones de los Estados Unidos de América. Easterling (2002) encontró una tendencia de enfriamiento en la región suroeste de los Estados Unidos de América a través de una tendencia negativa de la temperatura mínima media anual durante los meses invernales. Este tipo de tendencia también ha sido reportado para la temperatura mínima extrema mensual registrada en Guanajuato, México (Valdez-Cepeda *et al.*, 2003a).

El Sol es la fuente única de energía para los procesos climáticos de la tierra. Cualquier desviación del balance entre la energía recibida desde el sol y la reflejada al espacio está destinada a cambiar el clima de la tierra (Friis-Christensen y Lassen, 1991; Bond *et al.*, 2001). El clima de la tierra exhibe variabilidad en dominios de diferentes escalas de tiempo desde la anual hasta la milenial. Varias causas que gobiernan la variabilidad climática en diferentes escalas de tiempo han sido identificadas, y pueden ser agrupadas en causas internas y externas (Tiwari y Ramesh, 2007).

Las causas internas involucran: (i) oscilaciones en el sistema océano-atmósfera (e. g. cambios en la circulación termohalina que redistribuye el calor entre los trópicos y las regiones polares); (ii) erupciones volcánicas (aerosoles y otras partículas finas inyectadas dentro de la atmósfera que obstruyen la radiación solar por dispersarse en la superficie de la tierra); (iii) cambios en la concentración atmosférica de gases invernadero (tales como CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, NO<sub>2</sub>, CFCs, O<sub>3</sub> que absorben la radiación saliente de onda larga); (iv) vapor de agua y nubes de altitud baja que forman un mecanismo importante de realimentación (calor adicional, vapor de agua adicional, el cual absorbe mayor cantidad de la radiación saliente); y (v) cubierta de hielo y extensión de vegetación (que controlan el albedo, i.e. la porción reflejada de la radiación incidente tal como otro mecanismo de realimentación).

Las causas externas incluyen: (i) variaciones en la radiación solar entrante debidas a cambios en la geometría sol-tierra (los ciclos de Milankovitch involucran cambios en la excentricidad de la órbita de la tierra, su oblicuidad y precedencia del perihelio; solo los cambios de excentricidad afectan a la energía solar que llega a la tierra, mientras los otros dos solo redistribuyen calor entre diferentes latitudes); y (ii) variación en la irradiancia solar entrante en varias longitudes de onda debido a cambios en la actividad solar. Todos afectan el clima de la tierra sobre escalas de tiempo de decenios a milenios (Mende y Stellmacher, 2001; Rind, 2002; Eddy, 1976; Reid, 1987).

### **1.3.2. Justificación**

#### **1.3.2.1. Temperatura**

La mayoría de los estudios sobre cambio climático se han realizado con base en temperaturas medias anuales y mensuales asociadas a bases de datos construidas para puntos equidistantes (interpolados) a partir de series históricas largas, europeas en su mayoría (Valdez-Cepeda *et al.*, 2003a). Karl *et al.* (2000) han señalado que el calentamiento no ha sido constante, e inclusive, han sugerido cómo los eventos extremos pueden cambiar al modificarse el clima. En otras palabras, es posible que un cambio en la varianza sea más importante para la frecuencia de los eventos extremos que un cambio en la media (Valdez-Cepeda *et al.*, 2003a).

Por consiguiente, las temperaturas extremas deben ser examinadas acuciosamente. Así, la tendencia de la temperatura extrema ha sido estudiada en algunas regiones de los Estados Unidos de América. Easterling (2002) encontró una tendencia de enfriamiento en la región suroeste de los Estados Unidos de América a través de una tendencia negativa de la temperatura mínima media anual durante los meses invernales. Este tipo de tendencia también ha sido reportado para la temperatura mínima extrema mensual registrada en Guanajuato, México (Valdez-Cepeda *et al.*, 2003a).

En consecuencia, se cuenta con evidencias que sustentan la idea de que puede haber tendencias locales sin representatividad global (Herrera *et al.*, 2007). Por lo que uno de los retos en estudios climáticos es separar los efectos antropogénicos de

los naturales sobre el comportamiento de las temperaturas medias y extremas (Valdez-Cepeda *et al.*, 2003a; Herrera *et al.*, 2007).

La variabilidad solar es una posible causa natural que influye sobre el clima y es necesario evaluar el alcance de su influencia para una mejor comprensión de sus efectos que permita elaborar políticas y programas dirigidos a mitigar el impacto presente y futuro del cambio climático a nivel local o regional (Herrera *et al.*, 2007). Sin duda alguna, el contar con esta información también en mapas temáticos facilitará el proceso de toma de decisiones.

#### **1.3.2.2. Evaporación**

Los efectos de la actividad solar y los fenómenos de gran escala que tienen, entre otras consecuencias, la disminución o el aumento de evaporación en la superficie terrestre son irregulares y, aunque se ha establecido un cierto patrón de comportamiento, es difícil su predicción (Galván, 2006). Para amortiguar las consecuencias negativas de este tipo de eventos, la mejor opción es tener información climática sobre cómo ocurren estos fenómenos y tomar medidas preventivas (Galván, 2006).

La existencia de un sistema estatal de predicción a largo plazo para episodios climáticos extremos en Nuevo León, como inundaciones y sequías, podría ahorrar millones de pesos al permitir tomar medidas preventivas y disminuir los costos para resarcir daños.

### **1.3.3. Objetivo general**

Identificar las tendencias de temperaturas máxima y mínima extremas y evaporación y su posible relación con fenómenos oscilatorios, como la duración del ciclo solar y 'El Niño'.

#### **1.3.3.1. Objetivos específicos**

1. Identificar las tendencias de las temperaturas máxima y mínima extremas y evaporación para 30 estaciones meteorológicas localizadas en Nuevo León.

2. Identificar el posible efecto de la actividad periódica solar y otros fenómenos oscilatorios sobre las temperaturas máxima y mínima extremas y evaporación en 30 localidades del estado de Nuevo León.

3. Elaborar mapas temáticos con los resultados del trabajo de investigación sobre el comportamiento de las temperaturas y evaporación que sirvan de base en la toma de decisiones.

### **1.3.4. Hipótesis general**

Las temperaturas máxima y mínima extremas y evaporación presentan tendencias significativas y presentan relación significativa con la actividad solar.

#### **1.3.4.1. Hipótesis específicas**

1. Las temperaturas máxima y mínima extremas y la evaporación presentan tendencias lineales significativas.

2. El posible efecto de la actividad periódica solar sobre las temperaturas máxima y mínima extremas y evaporación presenta efectos significativos.

3. Es factible elaborar mapas temáticos sobre el comportamiento de las temperaturas máxima y mínima extremas y evaporación.

## **1.4. Metodología general**

### **1.4.1. Recopilación de datos**

Esta etapa consistió en el acopio de las bases de datos de series de temperaturas extremas (máxima y mínima) y media, precipitación y evaporación a nivel mensual y su captura en hojas de cálculo, así como en la consulta amplia de bibliografía sobre los temas del proyecto. Se utilizó Microsoft Office 2003 para la captura de datos, y se visitaron bibliotecas para recopilar literatura científica. La Comisión Nacional de Agua y el Servicio Meteorológico fueron las principales fuentes de datos climáticos (sección 2.4.1.).

### **1.4.2. Preparación de datos para su análisis**

En ésta etapa se evaluó la calidad de la homogeneidad de varianza y continuidad de cada una de las series de tiempo mediante la inspección de su semivariograma. Se contempló involucrar las series históricas de más de 30 años. Se consideraron los datos correspondientes a 30 localidades o estaciones localizadas en el territorio Neoleonés (Figura 1). Los programas de cómputo que se utilizaron para la realización de dicho ejercicio estadístico fueron GS+ 3.1, SPSS 12.0 y Microsoft Office 2003.

### **1.4.3. Análisis de series de datos o series históricas**

En esta fase se consideró la identificación de tendencias lineales de temperaturas máxima y mínima extremas (evento puntual) y evaporación a nivel mensual para cada localidad o estación. El análisis se realizó con SPSS 12.0 y Excel de Microsoft Office 2003.

#### **1.4.4. Identificación de señales de fenómenos seculares**

Esta etapa consistió en identificar señales de fenómenos oscilatorios en las series históricas de temperaturas extremas (máxima y mínima) y evaporación a nivel mensual para cada estación. La identificación de señales se realizó con análisis espectral (Valdez-Cepeda *et al.*, 2003ab) con el programa Benoit 1.3 y el análisis de coherencia de ondeletas se hizo con programas *ex profeso* en MatLab 7.0.

#### **1.4.5. Preparación de Mapas temáticos**

Las coordenadas de las estaciones involucradas en el estudio se ligaron a los resultados y a un modelo de elevación digital para verificar coherencia de los resultados con la altimetría u orografía del estado de Nuevo León que construyó el Instituto Nacional de Geografía e Informática (INEGI). De esta manera se construyó un sistema de información geográfica que permitió diseñar mapas temáticos con los resultados en formatos Arc Info y Arc View tanto en formato digital como impreso, de tal manera que se identificaron unidades climáticas e indicadores de riesgo y vulnerabilidad (tendencia y dimensión fractal) según el caso, de amplia utilidad para la toma de decisiones. El software que se usó en este rubro fue Arc View versión 3.2.

### 1.5. Resultados y Discusión General

En un área se detectó el fenómeno de '*La Paradoja de la Evaporación*' (Liepert, 2004) (Figura 10, Figura 11 y Figura 12) y en otras se identificaron cambios de temperaturas extremas mayores que el incremento de temperatura media, reportado a nivel global (Houghton *et al.*, 2001) (Figura 10 y Figura 11).

Los picos importantes (sección 3.5.) sugirieron la posible influencia de las oscilaciones intra-anual, cuasi-anual, cuasi-bianual, El Niño y la Niña y el Ciclo de Manchas Solares en ambos tipos de temperaturas extremas y evaporación y sus anomalías tal como ha sido señalado por otros autores.

En general, los resultados (sección 4.5.) sugieren una posible relación entre el número de manchas solares y la temperatura máxima, el número de manchas solares y la temperatura mínima y el número de manchas solares y la evaporación en las regiones consignadas de los dominios de tiempo-frecuencia, pues son lo suficientemente grandes para aseverar que no ocurrieron de forma circunstancial, aunque la posible relación no implica causalidad (Grinsted *et al.*, 2004) (sección 4.6.).

## **1.6. Conclusiones General**

La actividad solar (mediante la variable número de manchas solares) posiblemente afectó a las temperaturas extremas y la evaporación registradas en Nuevo León durante los decenios de 1970 y 1980 (Cuadro 7, Cuadro 8 y Cuadro 9).

En general, los resultados evidenciaron que, en prácticamente todo el territorio del estado de Nuevo León, las series de anomalías de temperaturas extremas y evaporación mensual tienden claramente a tener un comportamiento persistente o de memoria de largo plazo (Figura 13, Figura 14 y Figura 15). Esto significa que la variación de largo plazo es más importante que la variación de corto plazo en prácticamente todas las series de anomalías analizadas (Cuadro 4, Cuadro 5 y Cuadro 6). Por consiguiente, es posible y recomendable construir un modelo de predicción de variables climáticas al involucrar parámetros de fractalidad.

### 1.7. Bibliografía

- Agencia Europea de Medio Ambiente. 2006. Impactos del cambio climático en Europa. *Ministerio de Medio Ambiente*. 99 pp.
- Bond, G., B. Kromer, J. Beer, R. Muscheler, M.N. Evans, W. Showers, Sh. Hoffmann, R. Lotti-Bond, I. Hajdas and G. Bonani. 2001. Persistent solar influence on North Atlantic climate during the Holocene. *Science*, **294**, 2130–2136.
- Carslaw, K. S., Harrison, R. G., and Kirkby, J. 2002. Cosmic rays, clouds, and climate, *Science*, **298**, 1732–1737.
- Cook, E. R., Buckley, B. M., and D'Arrigo, R. D. 1995. Interdecadal temperature oscillations in the Southern hemisphere: evidence from Tasmanian tree rings since 300 B.C., in: *Natural Climate Variability on Decade-to Century Time Scales*, National Research Council, 523–532.
- Cook, E. R., Meko, D. M., and Stockton, C. W. 1997. A new assessment of possible solar and lunar forcing of the bidecadal drought rhythm in the Western United States, *J. Climate*, **10**, 1343–1356.
- Dean, W., Anderson, R., Bradbury, J. P., and Anderson, D. 2002. A 1500- year record of climatic and environmental change in Elk Lake, Minnesota I: Varve thickness and gray-scale density, *J. Paleolimnology*, **27**, 287–299.
- Douglass, D. H. and Clader, B. D. 2002. Climate sensitivity of the Earth to solar irradiance, *Geophys. Res. Lett.*, **29**, 1029–1032.
- Easterling, D.R. 2002. Recent changes in frost days and the frost-free season in the United States. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, **83**(9), 132.
- Eddy, J. A., The Maunder minimum. *Science*, 1976, **192**, 1189–1202.

- Friis-Christensen, E. and Lassen, K. 1991. Length of the solar cycle: An indicator of solar activity closely associated with climate. *Science*, **192**, 1189–1202.
- Ghil, M., M.R. Allen, M.D. Dettinger, K. Ide, D. Kondrashov, M.E. Mann, A.W. Robertson, A. Saunders, Y. Tian, F. Varadi and P. Yiou. 2002. Advanced Spectral Methods for Climatic Time Series. *Rev. Geophys.*, **40**, 1.
- Gleisner, H. and Thejll, P. 2003. Patterns of tropospheric response to solar variability, *Geophys. Res. Lett.*, **30**, 1029–1032.
- González, M., Mader, J., Fontán, A., Uriarte, Ad., Del Campo A., Ferrer, L. y Revilla, M. 2008. Análisis de la tendencia de la temperatura atmosférica en Donostia-San Sebastián (SE del golfo de Vizcaya) a partir del estudio de la serie del Observatorio del Monte Igeldo (1928-2007). '*Revista de Investigación Marina*'. **7**: 7 pp.
- Grinsted, A., J. C. Moore, and S. Jevrejeva. 2004. Application of the cross wavelet transform and wavelet coherence to geophysical time series. *Nonlinear Processes in Geophysics* **11**: 561–566.
- Gusev, A. A., Martin, I. M., Mello, M. G. S., Pankov, V., Pugacheva, G., Schuch, N. G., and Spjeldvik, W. N. 2004. Bidecadal cycles in liquid precipitations in Brazil, *Adv. Space Res.*, **34**, 370–375.
- Herrera, S., Valdez-Cepeda, R. D., Vidales, J. A., Olivares, E., Rodríguez, H., Vázquez, R. y Pando, M. 2007. Cambio Climático: Comportamiento de las Temperaturas Extremas y la Evaporación en Nuevo León, México. *Revista Chapingo Serie Zonas Áridas* **6**:155-163.

- Houghton, J.T. Ding, Y., Griggs, D.J., Noguer, M., van der Linden, P.J., Dai, X., Maskell, K., Johnson, C.A. 2001. *Climate Change 2001: The Scientific Basis*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Karl, T.R., R.W. Knight, and B. Baker. 2000. The record breaking global temperatures of 1997 and 1998: evidence for an increase in the rate of global warming? *Geophys. Res. Lett.*, **27**, 719-722.
- Kasatkina, E. A. and Shumilov, O. I. 2005. Cosmic ray-induced stratospheric aerosols: A possible connection to polar ozone depletions, *Ann. Geophys.*, **23**, 675–679, <http://www.ann-geophys.net/23/675/2005/>.
- Kasatkina, E. A., O. I. Shumilov, and M. Krapiec. 2007. On periodicities in long term climatic variations near 68° N, 30° E. *Adv. Geosci.*, **13**, 25–29.
- Kasatkina, E. A., Shumilov, O. I., and Kanatjev, A. G. 2006. Solar cycle signatures in atmosphere of the North Atlantic and Europe, *Meteorology and Hydrology*, **1**, 55–59.
- King, J. W. 1975. Sun-weather relationships, *Aeronaut. Astronaut.*, **13**, 10–19.
- Lean, J., Beer, J., and Bradley, R. 1995. Reconstruction of solar irradiance since 1610: Implications for climate change, *Geophys. Res. Lett.*, **22**, 3195–3198.
- Liepert, B. 2004. Reduced surface solar radiation, global warming and the water cycle. Proceedings of Workshop on Pan Evaporation, Australian National Academy of Sciences Canberra, Nov 22-23.
- Lorenz, E. N. 1963. Deterministic non periodic flow, *J. Atmos. Sci.*, **20**, 130-141.
- Mann, M. E. and Park, J. 1994. Global-scale modes of surface temperature variability on interannual to century timescales, *J. Geophys. Res.*, **99**, 25 819–25 833.

- McCracken, K. G., Dreschhoff, G. A. M., Smart, D. F., and Shea, M. A. 2001. Solar cosmic ray events for the period 1561-1994 2. The Gleissberg periodicity, *J. Geophys. Res.*, **106**, 21 599–21 609.
- Mende, W. and Stellmacher, R. 2001. Effect of the Earth orbit and solar variability on climate. In *Climate of the 21st Century: Changes and Risks* (eds Lozan, J. L., Graßl, H. and Hupfer, P.), Wissenschaft flische, Hamburg, Germany, pp. 27–33.
- Mendoza, B., A. Lara, D. Maravilla and E. Jáuregui. 2001. Temperature variability in central Mexico and its possible association to solar activity. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, **63**, 1891.
- Mendoza, B., Lara, A., Maravilla, D., and Jauregui, E. 2001. Temperatura variability in central Mexico and its possible association to solar activity, *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, **63**, 1891–1900.
- Molinari, R. L., Mayer, D. A., Festa, J. F., and Bezdek, H. F. 1997. Multiyear variability in the near-surface temperature structure of the midlatitude western North Atlantic Ocean, *J. Geophys. Res.*, **102**, 3267–3278.
- Neff, U., Burns, S. J., Mangini, A., Mudelsee, M., Fleitman, D., and Matter, A. 2001. Strong coherence between solar variability and the monsoon in Oman between 9 and 6 kyr ago, *Nature*, **411**, 290–293.
- Palle, E. and Butler, J. 2001. Sunshine records from Ireland: Cloud factors and possible links to solar activity and cosmic rays, *Int. J. Climatol.*, **21**, 709–729.
- Plaut, G., Ghil, M., and Vautard, R. 1995. Interannual and interdecadal variability in 335 years of Central England temperatures, *Science*, **268**, 710–713.

- Priem, H. N. A. 1997. CO and climate: a geologist's view, *Space Sci. Rew.*, **81**, 193–197.
- Reid, G. C. 1987. Influence of solar variability on global sea surface temperatures. *Nature*, **329**, 142–143.
- Reid, G. C. 1991. Solar irradiance variations and the global sea surface temperature record, *J. Geophys. Res.*, **96**, 2835–2844.
- Rigozo, N. R., Nordemann, D. J. R., Echer, E., Vieira, L. E. A., Echer, M. P. S., and Prestes, A. 2005. Tree-ring width wavelet and spectral analysis of solar variability and climatic effects on a Chilean cypress during the last two and a half millennia, *Clim. Past Discuss.* **1**, 121–135, <http://www.clim-past-discuss.net/1/121/2005/>.
- Rind, D. 2002. The sun's role in climate variations. *Science*, **296**, 673–677.
- Roig, F. A., Le-Quesne, C., Boninsegna, J. A., Briffa, K. R., Lara, A., Grudd, H., Jones, P. D., and Villagran, C. 2001. Climate variability 50,000 years ago in mid-latitude Chile as reconstructed from tree rings, *Nature*, **410**, 567–570.
- Scuderi, L. A. 1993. A 2000-year tree ring record of annual temperatures in the Sierra Nevada mountains, *Science*, **259**, 1433–1436.
- Shumilov, O. I., Kasatkina, E. A., Henriksen, K., and Vashenyuk, E. V. 1996. Enhancement of stratospheric aerosols after solar proton event, *Ann. Geophys.*, **14**, 1119–1123, <http://www.ann-geophys.net/14/1119/1996/>.
- Singer, S. F. 1999. Human contribution to climate change remains questionable, EOS Transactions, *AGU*, **80**, 183–187.
- Soon, W. and Baliunas, S. 2003. Proxy climatic and environmental changes of the past 1000 years, *Clim. Res.*, **23**, 89–100.

- Stocker, T. F. 1994. The variable ocean, *Nature*, **367**, 221–222.
- Svensmark, H. and Friis-Christensen, E. 1997. Variation of cosmic ray flux and global cloud coverage – a missing link in Solar-climate relationships, *J. Atmos. Terr. Phys.*, **59**, 1225–1232.
- Tinsley, B. A., Brown, G. M., and Scherrer, P. H. 1989. Solar variability influences on weather and climate: possible connections through cosmic ray fluxes and storm intensifications, *J. Geophys. Res.*, **94**, 14 783–14 792.
- Tiwari, M. and Ramesh, R. 2007. Solar variability in the past and palaeoclimate data pertaining to the southwest monsoon. *Current Science*, **93**, 477-487.
- Trenberth, K.E., P.D. Jones, P. Ambenje, R. Bojariu, D. Easterling, A. Klein Tank, D. Parker, F. Rahimzadeh, J.A. Renwick, M. Rusticucci, B. Soden and P. Zhai. 2007. Observations: Surface and Atmospheric Climate Change. In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Valdez-Cepeda, R.D., D. Hernández-Ramírez, B. Mendoza, J. Valdés-Galicia and Dolores Maravilla. 2003a. Fractality of Monthly Extreme Minimum Temperature. *Fractals*, **11**, 137.

- Valdez-Cepeda, R.D., B. Mendoza, R. Díaz-Sandoval, J. Valdés-Galicia, J.D. López-Martínez and E. Martínez-Rubín de Celis. 2003b. Power-Spectrum Behavior of Yearly Mean Grain Yields. *Fractals*, **11**, 295.
- Webber, W. R. and Lockwood, J. A. 1988. Characteristics of the 22-year modulation of cosmic rays as seen by neutron monitors, *J. Geophys. Res.*, **93**, 8735–8740.
- Weiss J.L. and J.T. Overpeck. 2005. Is the Sonoran Desert losing its cool?. *Global Change Biology*, **11**: 2065-2077.

## CAPÍTULO 2

### TENDENCIAS DE TEMPERATURAS EXTREMAS Y EVAPORACIÓN

#### 2.1. Resumen

Las tendencias lineales de temperaturas extremas y evaporación registradas mensualmente en el territorio de Nuevo León se identificaron mediante la realización de análisis de regresión lineal simple. Las observaciones ausentes se estimaron al usar la técnica kriging puntual. En algunas localidades, las temperaturas extremas máxima y mínima tienden a incrementarse y la evaporación tiende a decrecer con respecto al tiempo. Este fenómeno se conoce como '*La Paradoja de la Evaporación*'. En algunas de las localidades estudiadas en el territorio Neoleonés se presentaron cambios de temperaturas extremas mayores que el incremento de temperatura media, reportado a nivel global.

## 2.2. Summary

Extreme monthly temperatures and evaporation linear trends were estimated for several meteorological locations in the Nuevo León state territory through analysis of time series. Missing values in time series were estimated by means of punctual kriging interpolation approach. For some locations, extreme monthly temperatures, maximum and minimum, tended to increase, whereas evaporation tend to decrease over time. This phenomenon is known as '*Evaporation Paradox*'. In other locations within Nuevo León state territory, changes in temperature were higher than the increase for mean temperature reported at global level.

## **2.3. Introducción**

### **2.3.1. Antecedentes**

Calentamiento global y cambio climático son conceptos clave en la discusión del cambio global actual. Las emisiones de gases invernadero y aerosoles debidas a las actividades antropogénicas continúan alterando la atmósfera reconocidas por afectar al clima. La concentración de dióxido de carbono en la atmósfera ha aumentado más del 30% desde 1750. Estos sucesos tienen el potencial de elevar la temperatura superficial global y, en consecuencia, impactar otros componentes del sistema climático.

Es aceptado que la temperatura promedio global del aire superficial se ha incrementado  $0.74^{\circ}\text{C}$  (de  $0.56^{\circ}\text{C}$  a  $0.92^{\circ}\text{C}$ ) en los últimos 100 años, 1906 a 2005 (IPCC, 2007). La tendencia correspondiente para el periodo observado de 1901 a 2000 es  $0.6^{\circ}\text{C}$  (de  $0.4^{\circ}\text{C}$  a  $0.8^{\circ}\text{C}$ ) que depende del forzamiento general de la tendencia de calentamiento durante los últimos decenios: El período de 1995 y 2006 comprende a once de los últimos doce años (1995 a 2006) enlistados entre los 12 años más calientes en el registro instrumental de temperatura superficial global (desde 1850) (IPCC, 2007).

Aunque el incremento de temperatura se ha manifestado ampliamente sobre la tierra, las características espaciales y temporales de las tendencias de la temperatura pueden hallarse con valores grandes en latitudes norte; adicionalmente, las regiones continentales se han calentado más rápido que los océanos (IPCC, 2007). En consecuencia, el cambio climático y sus impactos son un tema de gran interés desde 1990.

Debido a las diferencias espaciales y temporales de las tendencias de temperatura, es muy importante analizar datos de campo para un mejor entendimiento del comportamiento de las tendencias en escalas regionales y locales (Schaefer y Domroes, 2009).

La temperatura extrema máxima puede causar muertes masivas por hipertermia, pérdidas de cosechas a gran escala y escasez de agua (Haines *et al.*, 2006; McMichael *et al.*, 2006). Las autoridades y la sociedad están comenzando a reconocer la necesidad de mejorar acciones sistemáticas de mitigación para reducir el riesgo creciente a la economía, el ambiente y la sociedad por ese tipo de temperatura extrema. Por lo tanto, es necesario hacer una evaluación total para entender el clima y las tendencias de largo plazo en variaciones de eventos extremos (Wei y Chen, 2009).

El oscurecimiento progresivo de la Tierra es objeto de diversas interpretaciones científicas y se considera que constituye una de las consecuencias de las actividades antropogénicas. Liepert (2004) confirma que la disminución de la radiación solar se desprende no sólo de los instrumentos de medición, sino también del análisis de la evaporación de agua.

Mientras que la atmósfera del planeta Tierra se calienta, como así revela la evolución de la temperatura global, lo lógico es que la evaporación de agua aumente también. Sin embargo, Liepert (2004) ha podido comprobar que a menor radiación solar en la superficie del agua, se produce también menos evaporación y, en consecuencia, menos precipitación. Otra constatación es que, a pesar de la

disminución de la radiación solar, la superficie de la Tierra sigue calentándose, por lo que Rotstayn *et al.* (2006) suponen que los aerosoles juegan un papel determinante en el oscurecimiento global.

Liepert (2004) ha confirmado que el calentamiento global aumenta la humedad en la atmósfera, lo que a su vez incrementa la capacidad de retención de agua en las nubes. Esto significa que las nubes, sin que lleguen a ser más abundantes, se han densificado porque el hecho de que retengan mayor cantidad de agua no es consecuencia de que llueva más, el resultado es que impiden el paso de la luz solar con mayor intensidad.

Otra explicación posible de la disminución de la radiación solar es el aumento de la cantidad de micro partículas en el aire, lo que implica que los rayos de Sol chocan con ellas y se reflejan hacia el espacio, disminuyendo así la radiación solar sobre la Tierra. Sin embargo, no se puede concluir que la disminución de la radiación solar se produzca únicamente en las zonas geográficas más contaminadas, ya que en otras regiones limpias, como la Antártida, el oscurecimiento también ha sido evidenciado (Roderick *et al.*, 2005).

El oscurecimiento global impacta sobre el ciclo hidrológico (Brutsaert y Parlange, 1998) reduce la evaporación y la precipitación, lo que resulta particularmente grave para las regiones áridas. El oscurecimiento incide negativamente sobre la fotosíntesis, afectando a los bosques, a la agricultura y a la vegetación planetaria en su conjunto. Por consiguiente, es de primordial

importancia analizar las tendencias de las temperaturas extremas y evaporación (la justificación se fundamenta en la sección 1.3.2.).

### **2.3.2. Objetivo**

Identificar las tendencias de las temperaturas máxima y mínima extremas y la evaporación para 30 estaciones meteorológicas localizadas en Nuevo León.

### **2.3.3. Hipótesis**

Las temperaturas máxima y mínima extremas y la evaporación presentan tendencias lineales significativas.

## **2.4. Materiales y métodos**

### **2.4.1. Datos**

La base de datos usada estuvo constituida de registros mensuales de series de tiempo de temperaturas extremas máxima y mínima y evaporación. Las observaciones correspondieron a las siguientes 30 estaciones meteorológicas localizadas en el estado de Nuevo León: El Cuchillo, La Boca, Montemorelos, Agualeguas, Allende, El Canadá, Cerralvo, Colombia, Dr. Arroyo, Marín, Espinazo, Galeana, Anáhuac, Camacho-Linares, Ciénega de Flores, El Cerrito, Higueras, La Laja, Lampazos, La Arena, Las Brisas, La Ciénega (Municipio de Juárez), Los Ramones, Madero, Parás, Puerto del Ébano, Sierra Morena, San Rafael, Santa Catarina y Zaragoza (Figura 1). Los datos fueron proporcionados por la Comisión Nacional del Agua, la institución oficial a cargo del registro de los datos climatológicos y meteorológicos en México.

Originalmente, la base de datos constó de 88 estaciones y 5 variables, de las cuales se seleccionaron 30 estaciones con la información más completa. Esto significa que se transformaron 175 matrices a un formato vectorial, es decir, de serie de tiempo, por medio de un programa codificado en Fortran 95. Para lograr esto, las observaciones faltantes fueron rellenas con una constante conocida y después de la transformación se eliminaron las mismas por medio del paquete SPSS 12.0. Enseguida, los datos ausentes se estimaron mediante la técnica Kriging puntual. Se identificaron las tendencias lineales mediante análisis de regresión lineal simple.

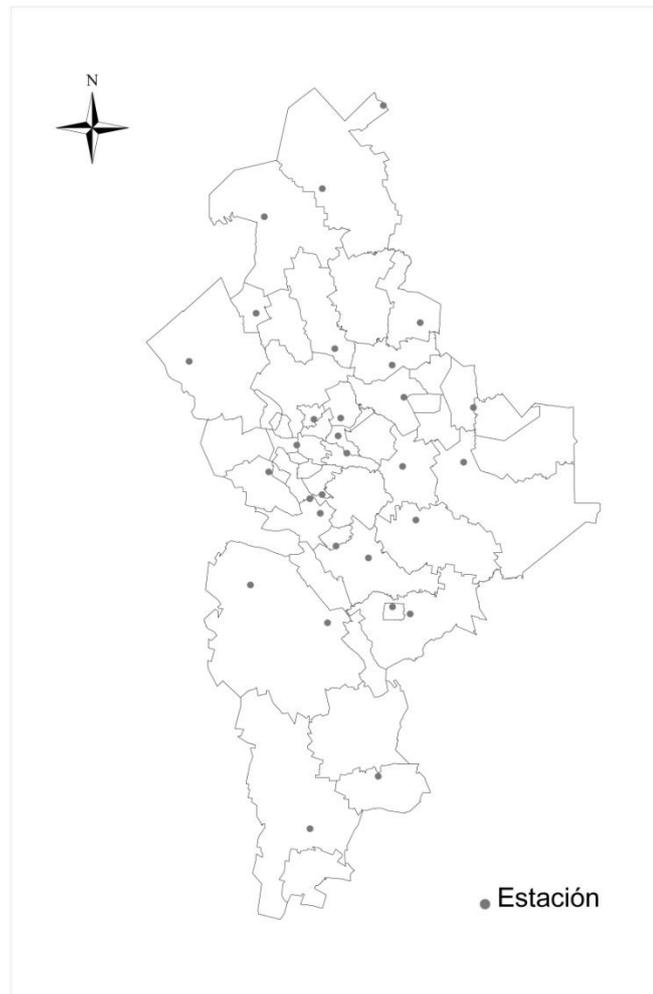


Figura 1. Ubicación de las 30 localidades consideradas en el territorio de Nuevo León.

#### 2.4.2. Técnica Kriging Ordinario Puntual

La interpolación kriging puntual estima valores ( $Z^*$ ) que son idénticos a los valores observados ( $Z$ ) de temperaturas extremas y evaporación en cada localidad y minimiza la varianza de estimación de los valores en los meses ( $x_o$ ) sin observación. El procedimiento es minimizar

$$E\{[Z^*(x_o) - Z(x_o)]^2\}$$

Con respecto a  $w_1, w_2, \dots, w_n, \lambda$  y sujeto a  $\sum_{i=1}^n w_i = 1$  (Journel y Huijbregts, 1993).

El sistema kriging puntual en su forma matricial se representa como sigue

$$AW=b,$$

donde

$$A = \begin{bmatrix} \gamma(x_1 - x_1) & \gamma(x_1 - x_2) & \cdots & \gamma(x_1 - x_n) & 1 \\ \gamma(x_2 - x_1) & \gamma(x_2 - x_2) & \cdots & \gamma(x_2 - x_n) & 1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \gamma(x_n - x_1) & \gamma(x_n - x_2) & \cdots & \gamma(x_n - x_n) & 1 \\ 1 & 1 & \cdots & 1 & 0 \end{bmatrix},$$

$$W = [w_1, w_2, \dots, w_n, \lambda]^T, \text{ y}$$

$$b = [\gamma(x_o - x_1), \gamma(x_o - x_2), \dots, \gamma(x_o - x_n), 1]^T.$$

La matriz  $A$  es simétrica no singular de  $(n+1) \times (n+1)$ ,  $\gamma$  es el semivariograma. Las ponderaciones óptimas  $w_1, w_2, \dots, w_n$  y el multiplicador de Lagrange  $\lambda$  pueden obtenerse por  $W=A^{-1}b$  (Journel y Huijbregts, 1993).

### 2.4.3. Regresión lineal simple

El modelo de regresión lineal simple es una ecuación lineal que ajusta una serie de datos de observaciones, mediante la estimación de la ordenada en el origen y la pendiente por mínimos cuadrados (Montgomery y Runger, 1996).

El análisis de regresión lineal simple es útil para caracterizar cuantitativamente el comportamiento de series de tiempo, en particular para evidenciar tendencias lineales significativas de largo plazo de incremento o decremento (Montgomery y Runger, 1996).

El ejemplo más simple de una aproximación por mínimos cuadrados es mediante el ajuste de un conjunto de pares de observaciones:  $(x_1, y_1)$ ,  $(x_2, y_2)$ , ...,  $(x_n, y_n)$  a una línea recta. La expresión matemática para esta última es:

$$y = a_0 + a_1x + e, \quad (1)$$

Donde  $a_0$  y  $a_1$  son los coeficientes que representan el intercepto y la pendiente, respectivamente, y  $e$  es el error, o residuo, entre el modelo y las observaciones, las cuales se pueden representar al reordenar la Ec. 1 como

$$e = y - a_0 - a_1x$$

Así, el *error* o *residuo* es la discrepancia entre el valor real de  $y$  y el valor aproximado  $a_0 + a_1x$ , predicho por la ecuación lineal. Una estrategia para ajustar a la “mejor” línea es minimizar la suma de los cuadrados de los residuos entre la  $y$  medida y la  $y$  calculada con el modelo lineal

$$S_r = \sum_{i=1}^n (y_i - a_0 - a_1 x_i)^2, \quad (2)$$

Este criterio tiene varias ventajas, entre ellas el hecho de que se obtiene una línea única para un cierto conjunto de datos (Montgomery y Runger, 1996).

## 2.5. Resultados

La calidad de las series históricas de temperaturas extremas y evaporación a nivel mensual, en cuanto a continuidad y homogeneidad, fue aceptable. Todos los semivariogramas teóricos presentaron valores de  $R^2$  entre 0.994 y 0.999, una *varianza de pepita* pequeño ( $\sim 1^\circ\text{C}^2$ ), *rango* de  $\sim 5$  meses y *meseta o umbral* estable a  $\sim 9.5^\circ\text{C}^2$ .

### 2.5.1. Temperatura máxima extrema

Una tendencia lineal creciente altamente significativa ( $p < 0.0001$ ) de  $0.60^\circ\text{C decenio}^{-1}$  fue identificada para la serie de temperatura máxima mensual de la estación Montemorelos, N.L. mediante el modelo lineal  $Y = 34.861 + 0.005 X$  (donde  $Y$  es la temperatura en  $^\circ\text{C}$ , y  $X$  es el tiempo en meses) cuando se consideró una muestra de  $n = 509$  meses (1960 a 2003). Una tendencia lineal decreciente altamente significativa ( $p < 0.01$ ) de  $-0.96^\circ\text{C decenio}^{-1}$  fue identificada para la serie de temperatura máxima mensual de la estación Agualeguas, N.L. mediante el modelo lineal  $Y = 37.761 - 0.008 X$  cuando se consideró una muestra de  $n = 220$  meses (1979 a 2003).

Una tendencia lineal decreciente significativa ( $p < 0.017$ ) de  $-0.36^\circ\text{C decenio}^{-1}$  fue identificada para la serie de temperatura máxima mensual de la estación Cerralvo, N.L. mediante el modelo lineal  $Y = 36.679 - 0.003 X$  cuando se consideró una muestra de  $n = 515$  meses (1960 a 2005). Una tendencia lineal decreciente altamente significativa ( $p < 0.0001$ ) de  $-4.08^\circ\text{C decenio}^{-1}$  fue identificada para la temperatura máxima mensual de la estación Colombia, N.L.

mediante el modelo lineal  $Y = 36.434 - 0.034 X$  cuando se consideró una muestra de  $n = 188$  meses (1976 a 1996).

Una tendencia lineal creciente significativa ( $p < 0.031$ ) de  $0.24 \text{ }^\circ\text{C decenio}^{-1}$  fue identificada para la serie de temperatura máxima mensual de la estación Anáhuac, N.L. mediante el modelo lineal  $Y = 35.671 + 0.002 X$  cuando se consideró una muestra de  $n = 613$  meses (1954 a 2006). Una tendencia lineal creciente altamente significativa ( $p < 0.009$ ) de  $0.36 \text{ }^\circ\text{C decenio}^{-1}$  fue identificada para la serie de temperatura máxima mensual de la estación Camacho-Linares, N.L. mediante el modelo lineal  $Y = 35.446 + 0.003 X$  cuando se consideró una muestra de  $n = 531$  meses (1960 a 2004).

Una tendencia lineal creciente ( $p < 0.053$ ) de  $0.24 \text{ }^\circ\text{C decenio}^{-1}$  fue identificada para la serie de temperatura máxima mensual de la estación Ciénega de Flores, N.L. mediante el modelo lineal  $Y = 36.205 + 0.002 X$  cuando se consideró una muestra de  $n = 516$  meses (1960 a 2003). Una tendencia lineal creciente altamente significativa ( $p < 0.001$ ) de  $1.08 \text{ }^\circ\text{C decenio}^{-1}$  fue identificada para la serie de temperatura máxima mensual de la estación Higueras, N.L. mediante el modelo lineal  $Y = 32.795 + 0.009 X$  (donde  $Y$  es la temperatura en  $^\circ\text{C}$ , y  $X$  es el tiempo en meses) cuando se consideró una muestra de  $n = 298$  meses (1979 a 2003).

Una tendencia lineal creciente altamente significativa ( $p < 0.001$ ) de  $0.96 \text{ }^\circ\text{C decenio}^{-1}$  fue identificada para la serie de temperatura máxima mensual de la estación Lampazos, N.L. mediante el modelo lineal  $Y = 34.492 + 0.008 X$  (donde

Y es la temperatura en °C, y X es el tiempo en meses) cuando se consideró una muestra de  $n = 384$  meses (1972 a 2003). Una tendencia lineal creciente altamente significativa ( $p < 0.0001$ ) de  $0.6 \text{ } ^\circ\text{C decenio}^{-1}$  fue identificada para la serie de temperatura máxima mensual de la estación Los Ramones, N.L. mediante el modelo lineal  $Y = 35.312 + 0.005 X$  (donde Y es la temperatura en °C, y X es el tiempo en meses) cuando se consideró una muestra de  $n = 528$  meses (1960 a 2003).

Una tendencia lineal creciente significativa ( $p < 0.022$ ) de  $0.6 \text{ } ^\circ\text{C decenio}^{-1}$  fue identificada para la serie de temperatura máxima mensual de la estación Madero, N.L. mediante el modelo lineal  $Y = 36.96 + 0.005 X$  (donde Y es la temperatura en °C, y X es el tiempo en meses) cuando se consideró una muestra de  $n = 404$  meses (1970 a 2003). Una tendencia lineal creciente altamente significativa ( $p < 0.0001$ ) de  $0.6 \text{ } ^\circ\text{C decenio}^{-1}$  fue identificada para la serie de temperatura máxima mensual de la estación Parás, N.L. mediante el modelo lineal  $Y = 34.66 + 0.005 X$  (donde Y es la temperatura en °C, y X es el tiempo en meses) cuando se consideró una muestra de  $n = 528$  meses (1960 a 2003).

Una tendencia lineal decreciente altamente significativa ( $p < 0.0001$ ) de  $-1.8 \text{ } ^\circ\text{C decenio}^{-1}$  fue identificada para la serie de temperatura máxima mensual de la estación Zaragoza, N.L. mediante el modelo lineal  $Y = 35.207 - 0.015 X$  (donde Y es la temperatura en °C, y X es el tiempo en meses) cuando se consideró una muestra de  $n = 300$  meses (1974 a 1999) (Cuadro 1).

### 2.5.2. Temperatura mínima extrema

Una tendencia lineal decreciente ( $p < 0.084$ ) de  $-0.48 \text{ } ^\circ\text{C decenio}^{-1}$  fue identificada para la serie de temperatura mínima mensual de la estación El Cuchillo, China, N.L. mediante el modelo lineal  $Y = 10.802 - 0.004 X$  cuando se consideró una muestra de  $n = 535$  meses (1960 a 2006). Una tendencia lineal creciente significativa ( $p < 0.020$ ) de  $0.60 \text{ } ^\circ\text{C decenio}^{-1}$  fue identificada para la serie de temperatura mínima mensual de la estación Montemorelos, N.L. mediante el modelo lineal  $Y = 8.470 + 0.005 X$  cuando se consideró una muestra de  $n = 496$  meses (1960 a 2003).

Una tendencia lineal decreciente altamente significativa ( $p < 0.010$ ) de  $-1.56 \text{ } ^\circ\text{C decenio}^{-1}$  fue identificada para la serie de temperatura mínima mensual de la estación Agualeguas, N.L. mediante el modelo lineal  $Y = 12.706 - 0.013 X$  cuando se consideró una muestra de  $n = 220$  meses (1979 a 2003). Una tendencia lineal creciente altamente significativa ( $p < 0.0001$ ) de  $3.0 \text{ } ^\circ\text{C decenio}^{-1}$  fue identificada para la serie de temperatura mínima mensual de la estación Allende, N.L. mediante el modelo lineal  $Y = 6.949 + 0.025 X$  cuando se consideró una muestra de  $n = 204$  meses (1984 a 2003).

Una tendencia lineal decreciente significativa ( $p < 0.041$ ) de  $-1.8 \text{ } ^\circ\text{C decenio}^{-1}$  fue identificada para la serie de temperatura mínima mensual de la estación Colombia, N.L. mediante el modelo lineal  $Y = 10.443 - 0.015 X$  cuando se consideró una muestra de  $n = 187$  meses (1976 a 1996). Una tendencia lineal creciente altamente significativa ( $p < 0.01$ ) de  $1.92 \text{ } ^\circ\text{C decenio}^{-1}$  fue identificada para la serie de temperatura mínima mensual de la estación Galeana, N.L.

mediante el modelo lineal  $Y = 2.960 + 0.016 X$  cuando se consideró una muestra de  $n = 191$  meses (1984 a 2000).

Una tendencia lineal creciente ( $p < 0.080$ ) de  $0.48 \text{ } ^\circ\text{C decenio}^{-1}$  fue identificada para la temperatura mínima mensual de la estación Camacho-Linares, N.L. mediante el modelo lineal  $Y = 8.315 + 0.004 X$  cuando se consideró una muestra de  $n = 522$  meses (1960 a 2003). Una tendencia lineal creciente altamente significativa ( $p < 0.002$ ) de  $5.52 \text{ } ^\circ\text{C decenio}^{-1}$  fue identificada para la serie de temperatura mínima mensual de la estación Sierra Morena, N.L. mediante el modelo lineal  $Y = 3.387 + 0.046 X$  cuando se consideró una muestra de  $n = 157$  meses (1982 a 1995) (Cuadro 2).

### **2.5.3. Evaporación**

Una tendencia lineal decreciente altamente ( $p < 0.0001$ ) de  $-7.92 \text{ mm decenio}^{-1}$  fue identificada para la serie de evaporación mensual de la estación El Cuchillo, China, N.L. mediante el modelo lineal  $Y = 233.513 - 0.066 X$  (donde  $Y$  es la evaporación en mm, y  $X$  es el tiempo en meses) cuando se consideró una muestra de  $n = 780$  meses (1939 a 2005). Una tendencia lineal decreciente altamente significativa ( $p < 0.007$ ) de  $-4.68 \text{ mm decenio}^{-1}$  fue identificada para la serie de evaporación mensual de la estación La Boca, Santiago, N.L. mediante el modelo lineal  $Y = 130.025 - 0.039 X$  cuando se consideró una muestra de  $n = 525$  meses (1958 a 2003).

Una tendencia lineal creciente altamente significativa ( $p < 0.006$ ) de  $40.32 \text{ mm decenio}^{-1}$  fue identificada para la serie de evaporación mensual de la estación

Agualeguas, N.L. mediante el modelo lineal  $Y = 145.789 + 0.336 X$  cuando se consideró una muestra de  $n = 112$  meses (1979 a 1992). Una tendencia lineal decreciente ( $p < 0.083$ ) de  $-3.36 \text{ mm decenio}^{-1}$  fue identificada para la serie de evaporación mensual de la estación Allende, N.L. mediante el modelo lineal  $Y = 115.216 - 0.028 X$  cuando se consideró una muestra de  $n = 445$  meses (1958 a 1997).

Una tendencia lineal decreciente altamente significativa ( $p < 0.001$ ) de  $-6.0 \text{ mm decenio}^{-1}$  fue identificada para la serie de evaporación mensual de la estación Cerralvo, N.L. mediante el modelo lineal  $Y = 135.901 - 0.05 X$  cuando se consideró una muestra de  $n = 365$  meses (1958 a 1994). Una tendencia lineal decreciente significativa ( $p < 0.036$ ) de  $-41.16 \text{ mm decenio}^{-1}$  fue identificada para la serie de evaporación mensual de la estación Colombia, N.L. mediante el modelo lineal  $Y = 211.390 - 0.343 X$  cuando se consideró una muestra de  $n = 119$  meses (1984 a 1995).

Una tendencia lineal decreciente altamente significativa ( $p < 0.0001$ ) de  $-21.0 \text{ mm decenio}^{-1}$  fue identificada para la serie de evaporación mensual de la estación Dr. Arroyo, N.L. mediante el modelo lineal  $Y = 158.046 - 0.175 X$  cuando se consideró una muestra de  $n = 152$  meses (1974 a 1993). Una tendencia lineal decreciente significativa ( $p < 0.017$ ) de  $-28.56 \text{ mm decenio}^{-1}$  fue identificada para la serie de evaporación mensual de la estación Marín, N.L. mediante el modelo lineal  $Y = 200.563 - 0.238 X$  cuando se consideró una muestra de  $n = 191$  meses (1979 a 1995).

Una tendencia lineal decreciente significativa ( $p < 0.030$ ) de  $-7.20 \text{ mm decenio}^{-1}$  fue identificada para la serie de evaporación mensual de la estación Anáhuac, N.L. mediante el modelo lineal  $Y = 186.986 - 0.06 X$  cuando se consideró una muestra de  $n = 491$  meses (1954 a 1995). Una pendiente decreciente altamente significativa ( $p < 0.004$ ) de  $-31.32 \text{ mm decenio}^{-1}$  fue identificada para la serie de evaporación mensual de la estación Camacho-Linares mediante el modelo lineal  $Y = 155.728 - 0.261 X$  cuando se consideró una muestra de  $n = 168$  meses (1960 a 1973).

Una tendencia lineal decreciente altamente significativa ( $p < 0.007$ ) de  $-19.68 \text{ mm decenio}^{-1}$  fue identificada para la serie de evaporación mensual de la estación Higueras, N.L. mediante el modelo lineal  $Y = 151.41 - 0.164 X$  (donde  $Y$  es la evaporación en mm, y  $X$  es el tiempo en meses) cuando se consideró una muestra de  $n = 196$  meses (1979 a 1995). Una tendencia lineal decreciente significativa ( $p < 0.069$ ) de  $-14.76 \text{ mm decenio}^{-1}$  fue identificada para la serie de evaporación mensual de la estación La Laja, N.L. mediante el modelo lineal  $Y = 142.804 - 0.123 X$  (donde  $Y$  es la evaporación en mm, y  $X$  es el tiempo en meses) cuando se consideró una muestra de  $n = 184$  meses (1979 a 1994).

Una tendencia lineal decreciente altamente significativa ( $p < 0.004$ ) de  $-8.4 \text{ mm decenio}^{-1}$  fue identificada para la serie de evaporación mensual en la estación Los Ramones, N.L. mediante el modelo lineal  $Y = 185.43 - 0.070 X$  (donde  $Y$  es la evaporación en mm, y  $X$  es el tiempo en meses) cuando se consideró una muestra de  $n = 428$  meses (1960 a 1995). Una tendencia lineal creciente significativa ( $p < 0.056$ ) de  $31.68 \text{ mm decenio}^{-1}$  fue identificada para la serie de

evaporación mensual de la estación Puerto del Ébano, N.L. mediante el modelo lineal  $Y = 151.461 + 0.264 X$  (donde  $Y$  es la evaporación en mm, y  $X$  es el tiempo en meses) cuando se consideró una muestra de  $n = 134$  meses (1983 a 1995). Una tendencia lineal decreciente altamente significativa ( $p < 0.0001$ ) de  $-13.2 \text{ mm decenio}^{-1}$  fue identificada para la serie de evaporación mensual de la estación San Rafael, N.L. mediante el modelo lineal  $Y = 140.109 - 0.11 X$  (donde  $Y$  es la evaporación en mm, y  $X$  es el tiempo en meses) cuando se consideró una muestra de  $n = 274$  meses (1973 a 1995).

Una tendencia lineal decreciente altamente significativa ( $p < 0.001$ ) de  $-15.0 \text{ mm decenio}^{-1}$  fue identificada para la serie de evaporación mensual de la estación Santa Catarina, N.L. mediante el modelo lineal  $Y = 174.153 - 0.125 X$  (donde  $Y$  es la evaporación en mm, y  $X$  es el tiempo en meses) cuando se consideró una muestra de  $n = 344$  meses (1960 a 1988). Una tendencia lineal decreciente altamente significativa ( $p < 0.0001$ ) de  $-25.56 \text{ mm decenio}^{-1}$  fue identificada para la serie de evaporación mensual de la estación Zaragoza, N.L. mediante el modelo lineal  $Y = 177.433 - 0.213 X$  (donde  $Y$  es la evaporación en mm, y  $X$  es el tiempo en meses) cuando se consideró una muestra de  $n = 299$  meses (1974 a 1999) (Cuadro 3).

El resto de series de tiempo no presentó tendencias significativas, cuando se consideró la hipótesis de igualdad a cero de la pendiente del modelo.

## 2.6. Discusión

En el caso de la estación Camacho-Linares, N. L., tanto la temperatura máxima como la temperatura mínima tendieron a incrementarse y la evaporación decreció. Este fenómeno se conoce como '*Paradoja de la Evaporación*' (Liepert, 2004) (Figura 2).

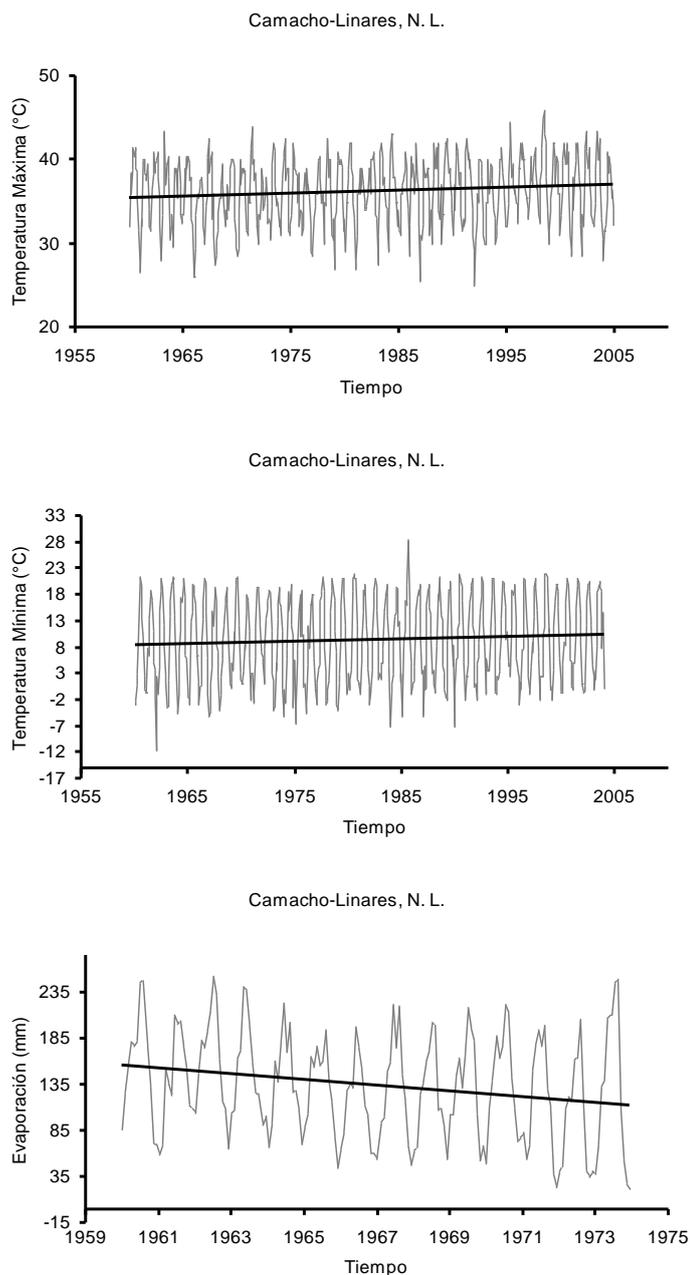


Figura 2. Tendencias lineales significativas de temperaturas máxima y mínima extrema mensual y evaporación mensual para la estación Camacho-Linares, N. L.

Las estaciones Montemorelos, Anáhuac, Camacho-Linares, Ciénega de Flores, Higueras, Lampazos, Los Ramones, Madero y Parás, N.L. mostraron tendencias lineales crecientes, para la temperatura máxima mensual, mayores que el incremento promedio de temperatura superficial global de 0.06 °C para el siglo XX, reportada por Houghton *et al.* (2001). Asimismo, las tendencias de las estaciones Montemorelos, Anáhuac, Camacho-Linares, Ciénega de Flores, Higueras, Lampazos, Los Ramones, Madero y Parás, N.L. fueron mayores que el incremento de 0.19 °C de temperatura superficial global para las decenios entre 1978 y 1998, tal como lo reportaron Houghton *et al.* (2001).

Las estaciones Montemorelos, Allende, Galeana, Camacho-Linares y Sierra Morena, N.L. mostraron tendencias lineales crecientes, para la temperatura mínima mensual, mayores que el incremento promedio de temperatura superficial global de 0.06 °C para el siglo XX, reportada por Houghton *et al.* (2001). Asimismo, las tendencias de las estaciones Montemorelos, Allende, Galeana, Camacho-Linares y Sierra Morena, N.L. fueron mayores que el incremento de 0.19 °C de temperatura superficial global para las decenios entre 1978 y 1998, tal como lo reportaron Houghton *et al.* (2001).

Sin embargo, esos resultados de temperaturas extremas registradas en diferentes localidades de Nuevo León no se contraponen a los reportados a nivel global, pues estos últimos se obtuvieron al considerar temperaturas medias anuales o mensuales en diversas localidades del planeta Tierra, en su mayoría valores interpolados. Entonces, algunos resultados son tendencias locales sin representatividad global.

## 2.7. Conclusiones

Se evidenciaron 38 tendencias lineales significativas ( $p \leq 0.05$ ) y altamente significativas ( $p \leq 0.01$ ) de un total de 90 series de tiempo (de temperaturas extremas mensuales máxima y mínima y evaporación mensual) analizadas para 30 localidades en el territorio del estado de Nuevo León. En una estación se presentó el fenómeno de la '*Paradoja de la Evaporación*', ya que tanto la temperatura máxima mensual como la temperatura mínima mensual tendieron a incrementarse y la evaporación mensual tendió a decrecer. En cinco estaciones se presentaron tendencias lineales crecientes para la temperatura mínima mensual, sustancialmente mayor que el incremento promedio de temperatura superficial global de  $0.06 \text{ }^\circ\text{C}$  para el siglo XX.

En cinco estaciones se presentaron tendencias lineales crecientes para la temperatura mínima mensual, sustancialmente mayores que el incremento de  $0.19 \text{ }^\circ\text{C}$  de temperatura superficial global para la decenio entre 1978 y 1998. Los resultados muestran que el cambio climático se manifiesta en el estado de Nuevo León de forma diferente dependiendo de la localidad. Se evidenció que puede existir una gran cantidad de tendencias locales sin representatividad global. Por consiguiente, aún es una necesidad prioritaria el analizar series largas de temperaturas extremas y evaporación, porque sus tendencias podrían tener impactos profundos en la sociedad Neoleonesa.

Se recomienda caracterizar cuantitativamente el comportamiento de las temperaturas extremas y la evaporación, al comprobar la existencia de caos y definir el nivel de complejidad (Labitzke y van Loon, 1989) en las series de tiempo

por medio de técnicas de dominio de tiempo-frecuencia y de coherencia de ondeletas, con el fin de evidenciar periodicidades ocultas y sus posibles causas, así como cuándo se asocian las posibles causas y los efectos sobre elementos climáticos.

Cuadro 1. Resultados del análisis de regresión lineal simple de la temperatura máxima extrema mensual registrada en 30 estaciones del Estado de Nuevo León.

Estación	Coordenadas	msnm	Período	n (m)	Y = a + bx		Tendencia/decenio
					a	b	
Montemorelos ***	25° 12' N 99° 50' W	309	60-03	509(19)	34.861	0.005	0.6
					R <sup>2</sup> =.042	p<.0001	
Agualeguas ***	26° 18' N 99° 39' W	184	79-03	220(80)	37.761	-0.008	-0.96
					R <sup>2</sup> =.022	p<.010	
Cerralvo **	26° 6' N 99° 37' W	282	60-05	515(37)	36.679	-0.003	-0.36
					R <sup>2</sup> =.010	p<.017	
Colombia ***	27° 42' N 99° 45' W	332	76-96	188(47)	36.434	-0.034	-4.08
					R <sup>2</sup> =.107	p<.000	
Anahuac **	27° 26' N 100° 2' W	267	54-06	613(20)	35.671	0.002	0.24
					R <sup>2</sup> =.007	p<.031	
Camacho ***	24° 52' N 99° 34' W	684	60-04	531(33)	35.446	0.003	0.36
					R <sup>2</sup> =.013	p<.009	
C. de Flores *	25° 57' N 100° 10' W	382	60-03	516(12)	36.205	0.002	0.24
					R <sup>2</sup> =.007	p<.053	
Higueras ***	25° 55' N 101° 0' W	1110	79-03	293(5)	32.795	0.009	1.08
					R <sup>2</sup> =.036	p<.001	
Lampazos ***	27° 2' N 100° 31' W	335	72-03	352(32)	34.492	0.008	0.96
					R <sup>2</sup> =.030	p<.001	
Los Ramones ***	25° 42' N 99° 38' W	208	60-03	507(21)	35.312	0.005	0.6
					R <sup>2</sup> =.024	p<.0001	
Madero **	25° 53' N 98° 59' W	90	70-03	392(12)	36.96	0.005	0.6
					R <sup>2</sup> =.013	p<.022	
Parás ***	26° 30' N 99° 32' W	150	60-03	409(119)	34.66	0.005	0.6
					R <sup>2</sup> =.023	p<.0001	
Zaragoza ***	23° 59' N 99° 45' W	1377	74-99	260(40)	35.207	-0.015	-1.8
					R <sup>2</sup> =.132	p<.0001	

\* Significativo a p = .10; \*\* Significativo a p = .05; \*\*\*Significativo a p = .01

Cuadro 2. Resultados del análisis de regresión lineal simple de la temperatura mínima extrema mensual registrada en 30 estaciones del Estado de Nuevo León.

Estación	Coordenadas	msnm	Período	n (m)	Y = a + bx		Tendencia/decenio
					a	b	
El Cuchillo	25° 44' N	131	60-06	535(29)	10.802	-0.004	-0.48
*	99° 15' W				R <sup>2</sup> =.005	p<.084	
Montemorelos	25° 12' N	309	60-03	496(32)	8.47	0.005	0.6
**	99° 50' W				R <sup>2</sup> =.010	p<.020	
Agualeguas	26° 18' N	184	79-03	220(80)	12.706	-0.013	-1.56
***	99° 39' W				R <sup>2</sup> =.022	p<.010	
Allende	25° 17' N	474	84-03	204(34)	6.949	0.025	3
***	100° 2' W				R <sup>2</sup> =.060	p<.000	
Colombia	27° 42' N	332	76-96	187(48)	10.443	-0.015	-1.8
**	99° 45' W				R <sup>2</sup> =.018	p<.041	
Galeana	24° 50' N	1670	84-00	191(11)	2.96	0.016	1.92
***	100° 5' W				R <sup>2</sup> =.033	p<.010	
Camacho	24° 52' N	684	60-03	522(6)	8.315	0.004	0.48
*	99° 34' W				R <sup>2</sup> =.006	p<.080	
Sierra Morena	26° 23' N	500	82-95	145(12)	3.387	0.046	5.52
***	100° 31' W				R <sup>2</sup> =.061	p<.002	

\* Significativo a p = .10; \*\* Significativo a p = .05; \*\*\*Significativo a p = .01

Cuadro 3. Resultados del análisis de regresión lineal simple de la evaporación mensual observada en 30 estaciones del Estado de Nuevo León.

Estación	Coordenadas	msnm	Período	n (m)	Y = a + bx		Tendencia/decenio
					a	b	
El Cuchillo	25° 44' N	131	39-05	780(24)	233.513	-0.066	-7.92
***	99° 15' W				R <sup>2</sup> =.029	p<.0001	
La Boca	25° 25' N	445	58-03	525(27)	130.025	-0.039	-4.68
***	100° 9' W				R <sup>2</sup> =.013	p<.007	
Agualeguas	26° 18' N	184	79-92	112(45)	145.789	0.336	40.32
***	99° 39' W				R <sup>2</sup> =.047	p<.006	
Allende	25° 17' N	474	58-97	445(35)	115.216	-0.028	-3.36
*	100° 2' W				R <sup>2</sup> =.006	p<.083	
Cerralvo	26° 6' N	282	58-94	365(74)	135.901	-0.05	-6
***	99° 37' W				R <sup>2</sup> =.024	p<.001	
Colombia	27° 42' N	332	84-95	119(18)	211.39	-0.343	-41.16
**	99° 45' W				R <sup>2</sup> =.032	p<.036	
Dr. Arroyo	23° 39' N	1756	74-93	152(79)	158.046	-0.175	-21
***	100° 11' W				R <sup>2</sup> =.089	p<.000	
Marín	25° 50' N	1706	79-95	191(2)	200.563	-0.238	-28.56
**	101° 0' W				R <sup>2</sup> =.029	p<.017	
Anahuac	27° 26' N	267	54-95	491(7)	186.986	-0.06	-7.2
**	100° 2' W				R <sup>2</sup> =.009	p<.030	
Camacho	24° 52' N	684	60-73	168(0)	155.728	-0.261	-31.32
***	99° 34' W				R <sup>2</sup> =.050	p<.004	
Higueras	25° 55' N	1110	79-95	165(31)	151.41	-0.164	-19.68
***	101° 0' W				R <sup>2</sup> =.037	p<.007	
La Laja	24° 55' N	410	79-94	117(67)	142.804	-0.123	-14.76
*	99° 40' W				R <sup>2</sup> =.018	p<.069	
Los Ramones	25° 42' N	208	60-95	366(62)	185.43	-0.07	-8.4
***	99° 38' W				R <sup>2</sup> =.019	p<.004	
P. del Ébano	25° 30' N	310	83-95	103(31)	151.461	0.264	31.68
*	100° 5' W				R <sup>2</sup> =.027	p<.056	
San Rafael	25° 2' N	1855	73-95	186(88)	140.109	-0.11	-13.2
***	100° 33' W				R <sup>2</sup> =.050	p<.0001	
Sta. Catarina	25° 41' N	700	60-88	318(26)	174.153	-0.125	-15
***	100° 28' W				R <sup>2</sup> =.035	p<.001	
Zaragoza	23° 59' N	1377	74-99	203(96)	177.433	-0.213	-25.56
***	99° 45' W				R <sup>2</sup> =.185	p<.0001	

\* Significativo a p = .10; \*\* Significativo a p = .05; \*\*\*Significativo a p = .01

## 2.8. Bibliografía

- Brutsaert, W. and Parlange, M.B. 1998. Hydrologic cycle explains the evaporation paradox. *Nature* 396: 30.
- Gaytán-Ortiz, L.A. 2007. Auto afinidad y ruido  $f^\beta$  de temperaturas extremas mensuales. Tesis de Maestría en Matemática Educativa. Universidad Autónoma de Zacatecas.
- Haines, A., R. S. Kovats, D. Campbell-Lendrum. 2006. Climate change and human health: Impacts, vulnerability, and mitigation, *The Lancet*, **367**(9528), 2101–2109.
- Houghton, J.T. Ding, Y., Griggs, D.J., Noguer, M., van der Linden, P.J., Dai, X., Maskell, K., Johnson, C.A. 2001. *Climate Change 2001: The Scientific Basis*, Cambridge University Press, Cambridge.
- IPCC. 2007. Climate Change 2007: The Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, edited by: Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K. B., Tignor, M., and Miller, H. L., Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 996 pp..
- Journel, A.G. and J.C. Huijbregts. 1993. *Mining Geostatistics*, Academic Press, San Diego.
- Labitzke, K. and van Loon, H. 1989. Associations between the 11-year solar cycle, the QBO and the atmosphere. Part I: the troposphere and stratosphere in the Northern Hemisphere in winter, *J. Atmosph. & Solar-Terr. Phys.* **50**, pp. 197.

- Liepert, B. 2004. Reduced surface solar radiation, global warming and the water cycle. Proceedings of Workshop on Pan Evaporation, Australian National Academy of Sciences Canberra, Nov 22-23.
- McMichael, A. J., R. E. Woodruff, and S. Hales. 2006. Climate change and human health: Present and future risks, *The Lancet*, **367**(9513), 859–869.
- Montgomery, D. C. y Runger, G. C. 1996. Probabilidad y estadística aplicadas a la ingeniería, primera edición, McGraw-Hill. ISBN: 970-10-1017-5. págs. 474-490.
- Roderick, M.L. 2005. Oscurecimiento global. <http://blogs.larioja.com/index.php/oscarecimiento-global/2005/05/30/>
- Rotstayn L.D., Cai W., Dix M.R., Farquhar G.D., Feng Y., Ginoux P., Herzog M., Ito A., Penner J.E., Roderick M.L. and Wang M. 2006. Have Australian rainfall and cloudiness increased due to the remote effects of Asian anthropogenic aerosols? *Journal of Geophysical Research*, in press (accepted 24-10-06).
- Schaefer, D. and Domroes, M. 2009. Recent climate change in Japan, spatial and temporal characteristics of trends of temperature. *Clim. Past*, **5**, 13–19.
- Wei, K. and Chen, W. 2009. Climatology and Trends of High Temperature Extremes across China in Summer. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, **2** (3), 153–158.

## CAPÍTULO 3

### ANÁLISIS FRACTAL DE TEMPERATURAS EXTREMAS Y EVAPORACIÓN

#### 3.1. Resumen

Se analizaron registros de largo plazo de temperaturas máxima y mínima extremas y evaporación a nivel mensual registradas en el estado de Nuevo León, México. Todos los conjuntos de datos de 30 estaciones meteorológicas se trataron como perfiles o series fractales a través de la técnica de espectro potencial. La variación de la densidad del espectro potencial,  $P(f)$ , con frecuencia  $f$  parece seguir una ley potencial en los perfiles.

Se obtuvo la densidad de espectro potencial como una función de la frecuencia para las series originales y de anomalías. Se ajustó una línea recta con el procedimiento de mínimos cuadrados a la función log-log considerando que la densidad del espectro potencial de las frecuencias ( $P(f)$ ) es proporcional a las frecuencias ( $f$ ) a la  $-\beta$ ,  $P(f) \sim f^{-\beta}$ . Los picos más importantes se marcaron y asociaron a las frecuencias correspondientes, a fin de dilucidar las posibles fuentes de fuerzas externas que afectan el comportamiento de las series de tiempo.

Las series se comportaron como fenómenos fractales en el rango de escala de dos a 98–804 meses, dependiendo de la estación meteorológica. Los picos importantes sugieren la influencia de oscilaciones intra–anuales, cuasi–anuales, cuasi–bianuales, del fenómeno El Niño y el Número de Manchas Solares en las

series de ambos tipos de temperaturas extremas y evaporación mensual, así como de las de sus anomalías. El ruido (variabilidad en la serie de tiempo) tiende a ser persistente (memoria de largo plazo) en la mayoría de las series.

### 3.2. Summary

Long-term records of monthly extreme maximum and minimum temperatures and evaporation, and their anomalies for 30 meteorological stations within Nuevo Leon state, Mexico have been analyzed. All 180 data sets were treated as fractal profiles through power-spectral approach. The variation of the power spectrum,  $P(f)$ , with frequency  $f$  appears to follow a power law in profiles.

The power spectrum density was obtained like a function of the frequency for the original series and anomalies series. It was adjusted to a straight line with the minimum squares procedure to the log-log function considering that the power spectrum density of the frequencies ( $P(f)$ ) is proportional to the frequencies ( $f$ ) elevated to  $-\beta$ ,  $P(f) \sim f^{-\beta}$ . The most important peaks were marked and associated to the corresponding frequencies, in order to explain the possible external power sources that they affect the behavior of the time series.

Profiles of their anomalies obey fractal statistics in scale ranges from two to 98-804 months depending on the meteorological station. Important peaks suggest the influence of intra-annual, quasi-yearly, quasi-biennial, El Niño Southern Oscillation phenomena and Sunspot Solar Number oscillations on series of both types of monthly extreme temperatures and evaporation and on series of their anomalies. Noise in the majority of the profiles tends to show persistent (long-term memory) behavior.

### 3.3. Introducción

#### 3.3.1. Antecedentes

La densidad de espectro potencial es un concepto generalmente aplicado a una señal que tiene dimensiones físicas tales como Potencia por Hertz o Energía por Hertz o ninguna de ellas. Para una señal dada, el espectro de ley potencial proporciona una gráfica de la porción del poder de la señal (energía por unidad de tiempo) que cae dentro de un rango de frecuencias (Gaytán-Ortiz, 2007).

El Sol es la fuente fundamental de energía que induce el clima de la Tierra y mantiene la vida; su variabilidad tiene un impacto profundo sobre nuestro planeta. En el último siglo, los estudios sistemáticos sobre la relación entre la actividad solar y el clima han sido conducidos usando bases de datos meteorológicos y parámetros solares de largo plazo. Existe evidencia de que en modelos de gran escala la variación de la circulación atmosférica y las interacciones atmósfera-océano ocurren en el orden de decenios a siglos.

Ejemplos recientes de variaciones en escala de decenios son las condiciones cambiantes en la atmósfera y el océano Pacífico Norte (e. g. Trenberth y Hurrell, 1994); en el océano Atlántico, variaciones en la oscilación del Atlántico Norte en escala de decenios han sido detectadas (Hurrell, 1995); otras señales de periodicidades en escala de decenios aparecen en cambios de la circulación meridional versus zonal sobre América del Norte (e. g. Granger, 1984).

Además, el número de manchas solares y temperatura de la superficie del mar de 1870 a 1980 para los océanos Pacífico, Atlántico e Índico y la temperatura

media global de la superficie del mar mostraron variaciones similares de largo plazo (Reid, 2000).

Algunas estimaciones del calentamiento global en el siglo XX indican un incremento promedio de la temperatura del aire de  $0.6\pm 0.2^{\circ}\text{C}$  (IPCC TAR, 2001). Generalmente, este incremento ha sido atribuido a la actividad antropogénica; sin embargo, los resultados de varias investigaciones indican que la variabilidad solar juega un papel importante en ese problema (e. g. Lean *et al.*, 1995; Crowley, 2000; Cubach y Voss, 2000; Mars y Svensmark, 2000; Shindell *et al.*, 2001; Solanki y Krivova, 2003; Ramírez *et al.*, 2004).

En la parte superior de la atmósfera y en la estratosfera abajo de los 30 km de altitud se encontró en la temperatura una clara influencia del ciclo solar de 11 años (e. g. van Loon y Labitzke, 2000).

En México, los registros de temperatura están disponibles desde fines del siglo XVIII y de temperatura y precipitación desde principios del siglo XIX; algunas investigaciones han sido realizadas considerando esos datos (Jáuregui, 1997). Klaus (1973) observó una correlación alta de la temperatura media anual entre Puebla y Europa central; basado en estos resultados él reconstruyó fluctuaciones de temperatura en Puebla desde 1760.

Wallen (1955) escribió el primer estudio sobre tendencias de precipitación de largo plazo en México, y posteriormente estudios como los de Sánchez y Kutzbach (1974), Klaus y Jáuregui (1976) y Byrne *et al.* (1982) estuvieron tratando

con variabilidad climática y lluvia en México. A pesar de eso, ningún intento ha sido hecho para estudiar esos datos en el contexto de su posible asociación con la actividad solar.

Recientemente Mendoza *et al.* (2001) y Maravilla *et al.* (2004), analizando datos de temperatura extrema mínima del centro y norte de México, encontraron algunas evidencias de señal solar, particularmente aquella asociada con número de manchas solares, ciclo solar magnético, flujos de rayos cósmicos y actividad geomagnética. También las señales meteorológicas posiblemente relacionadas con el fenómeno del Niño y la oscilación quasi bianual estuvieron presentes.

La densidad de espectro potencial es útil (Király y Jánosi, 2002) para evidenciar periodicidades y sus posibles causas, es decir, fenómenos exógenos (e.g. fenómenos asociados a la actividad solar) (la justificación de la investigación correspondiente se fundamenta en la sección 1.3.2.).

### **3.3.2. Objetivo**

Definir el nivel de complejidad de series y anomalías de temperaturas máxima y mínima extremas y evaporación registradas mensualmente en el estado de Nuevo León, a través de parámetros de auto afinidad, y evidenciar las posibles frecuencias importantes a través del análisis del espectro potencial.

### **3.3.3. Hipótesis**

La actividad periódica solar presenta posible efecto significativo sobre las temperaturas máxima y mínima extremas y la evaporación.

### **3.4. Materiales y métodos**

#### **3.4.1. Datos**

La base de datos que se involucró en este trabajo estuvo constituida de registros mensuales de series de tiempo de temperaturas máxima y mínima extremas y evaporación y la de sus anomalías, mismas que se estimaron al eliminar las tendencias lineales.

Las observaciones correspondieron a las siguientes 30 estaciones meteorológicas localizadas en el estado de Nuevo León: El Cuchillo, La Boca, Montemorelos, Agualeguas, Allende, El Canadá, Cerralvo, Colombia, Dr. Arroyo, Marín, Espinazo, Galeana, Anáhuac, Camacho-Linares, Ciénega de Flores, El Cerrito, Higueras, La Laja, Lampazos, La Arena, Las Brisas, La Ciénega (Municipio de Juárez), Los Ramones, Madero, Parás, Puerto del Ébano, Sierra Morena, San Rafael, Santa Catarina y Zaragoza. Los datos fueron proporcionados por la Comisión Nacional del Agua, la institución oficial a cargo del registro de los datos climatológicos y meteorológicos en México.

Se evidenciaron las periodicidades ocultas y sus posibles causas mediante el análisis conjunto de la densidad del espectro potencial de las series de tiempo originales y sus respectivas anomalías.

#### **3.4.2. Técnica de Espectro Potencial**

Los fractales auto afines generalmente son tratados cuantitativamente utilizando técnicas espectrales (Turcotte, 1992). La variación del espectro potencial  $P(f)$  con frecuencia  $f$  parece seguir una ley potencial (Turcotte, 1992):

$$P(f) \sim f^{-\beta}, \quad (3)$$

El espectro potencial  $P(f)$  se define como el cuadrado de la magnitud de la transformada de Fourier de temperatura mínima o máxima extrema. Denotando la temperatura mínima o máxima extrema mensual como una función del tiempo mediante  $Z(t)$ , así se tiene:

$$P(f) = \left| \int_{t_0}^{t_1} Z(t) e^{-i2\pi ft} dt \right|^2, \quad (4)$$

Donde  $t_0$  y  $t_1$  son los límites del tiempo sobre el que se extiende la serie. En el caso del registro de temperatura, el cual se muestrea a intervalos de tiempo discretos, se debe utilizar una versión discreta de la Ec. 4

$$P(f) = \left| \sum_{t=t_0}^{t_1} Z(t) e^{-i2\pi ft} \right|^2, \quad (5)$$

Después se obtiene una relación entre el exponente  $\beta$  y la dimensión fractal  $D_s$ . Considerando dos series de tiempo  $Z_1(t)$  y  $Z_2(t)$  relacionadas mediante

$$Z_2(t) = \frac{1}{r^H} Z_1(rt), \quad (6)$$

Se puede observar que  $Z_1(t)$  tiene las mismas propiedades estadísticas que  $Z_2(t)$ , y dado que  $Z_2(t)$  es una versión reescalada de  $Z_1$ , sus densidades de

espectro potencial también deben ser reescaladas apropiadamente. Por lo que se puede escribir

$$P(f) = \frac{1}{r^{2H+1}} P\left(\frac{f}{r}\right), \quad (7)$$

$$\beta = 2H + 1 = 5 - 2D_s, \quad (8)$$

$$D_s = \frac{5 - \beta}{2}, \quad (9)$$

y

$$H = 2 - D_s, \quad (10)$$

donde  $D_s$  denota la dimensión fractal estimada a partir del espectro potencial y  $H$  es el exponente de Hurst.

En la práctica, para obtener una estimación de la dimensión fractal  $D_s$ , se calcula el espectro potencial  $P(f)$  (donde  $f=2p/l$  es el número de onda y  $l$  es la longitud de onda), y se grafica el logaritmo de  $P(f)$  contra los logaritmos de  $f$  (Valdez-Cepeda *et al.*, 2003). Si el perfil es auto afín, esta gráfica deberá seguir una línea recta con una pendiente negativa  $-\beta$  (Valdez-Cepeda *et al.*, 2003).

### 3.5. Resultados y Discusión

Se obtuvo la densidad de espectro potencial como una función de la frecuencia para las series originales y de anomalías de temperaturas extremas máxima y mínima y evaporación a nivel mensual para las 30 estaciones mencionadas. Los valores estimados de la pendiente ( $\beta$ ), la dimensión fractal ( $D_s$ ) y el exponente de Hurst (H) se reportaron en los Cuadros 4, 5 y 6.

Por ejemplo, en la Figura 3, la línea recta es la función log-log ajustada con el procedimiento de mínimos cuadrados al considerar que la densidad del espectro potencial de las frecuencias ( $P(f)$ ) es proporcional a las frecuencias ( $f$ ) a la  $-\beta$ ,  $P(f) \sim f^{-\beta}$ . Los picos más importantes se marcaron y asociaron a las frecuencias correspondientes, a fin de dilucidar las posibles fuentes de fuerzas externas que afectaron el comportamiento de las temperaturas extremas y la evaporación.

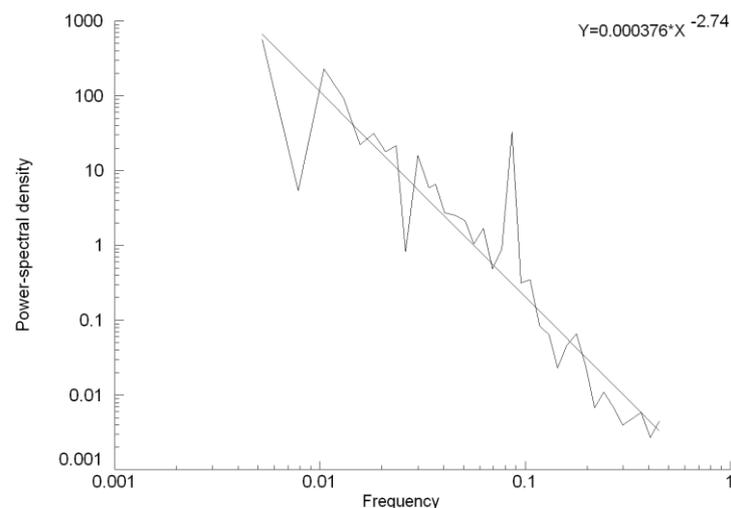


Figura 3. Densidad de espectro potencial versus frecuencia para la temperatura mínima extrema mensual registrada en Lampazos, Nuevo León. La densidad de espectro potencial está dada como una función de frecuencia para escalas de

tiempo de 2 a 192 meses. La línea log-log ajustada se usó para estimar la dimensión fractal ( $D_s$ ).  $Y = 3.76e-04 X^{-2.74}$ ;  $D_s = [(5 - \beta)/2]$ ;  $D_s = [(5 - 2.74)/2]$ ;  $D_s = 1.131$ .

### 3.5.1. Temperatura máxima

Las series de datos para 27 de las 30 estaciones se ajustaron a líneas rectas en las gráficas log-log con pendiente  $-\beta$  que varió de  $-1.173$  a  $-2.851$  para las series originales y de  $-1.173$  a  $-3.023$  para las anomalías lo que sugiere que  $P(f) \sim f^\beta$  (Cuadro 4). Por lo tanto, el espectro es singular y está representado por una curva en el plano complejo en 54 de los 60 casos. Los valores de  $D_s$  variaron de 1.074 a 1.914 para las series originales y de 0.989 a 1.913 para las anomalías. Los valores de  $H$  cambiaron de 0.086 a 0.926 para las series originales y de 0.087 a 1.011 para las anomalías.

Los resultados indicaron que las series de tiempo de las estaciones Colombia, Dr. Arroyo y La Arena, así como de la serie de anomalías de Colombia tuvieron un comportamiento antipersistente, es decir, en ellas predominaron los casos de que a un valor grande sigue un valor pequeño o viceversa. Así, el ruido en la mayoría de las series de temperatura máxima extrema y de sus anomalías tendió claramente a tener un comportamiento persistente (memoria de largo plazo,  $1 < D_s < 1.5$ ), las excepciones son las series ya señaladas y la de anomalías de Marín que presentaron un comportamiento similar al del movimiento Browniano. Es notable que el valor de  $H$  (0.86) para la estación Higuera es el mismo reportado por Scafetta y West (2003) para la región continental ( $H=0.86$ ).

El comportamiento de la temperatura se puede comprender mejor si se conocen sus tendencias y complejidad, así como su relación con los fenómenos

naturales. Por ejemplo, es notorio que la oscilación cuasi-anual se presentó en todas las series y anomalías de temperatura máxima extrema mensual. Asimismo, para las series y anomalías de Allende, El Canadá, Colombia, Dr. Arroyo, Las Brisas, La Ciénega, Puerto de Ébano, El Espinazo y Zaragoza la estacionalidad semestral fue evidenciada.

En todas las series y anomalías de temperatura máxima se observaron picos asociados a 1.67 y 6.24 años. El primero puede estar relacionado con la oscilación cuasi-bianual, lo cual está de acuerdo con la relación entre las temperaturas estratosféricas del polo norte y la actividad solar (Labitzke y van Loon, 1989; Mendoza *et al.*, 2001); mientras que los picos asociados a 6.24 años pueden asociarse al fenómeno El Niño con periodicidades de 3 a 5 años (Weber y Talkner, 2001) o de 3 a 6 años (Monetti *et al.*, 2003).

Los picos asociados a frecuencias de 7.55-14.73 años se evidenciaron para la temperatura máxima extrema mensual registrada en las estaciones Allende, Anáhuac, Camacho, El Cuchillo, El Espinazo, General Bravo, La Boca, Montemorelos, La Laja, Los Ramones, Paras, Madero y Santa Catarina, mismas que pueden vincularse a la actividad solar, porque el ciclo de número de manchas solares varía de 8 a 14 años.

### **3.5.2. Temperatura mínima**

Se determinó el espectro potencial de 29 series de temperatura mínima extrema y en 29 series de sus anomalías (Cuadro 5). Los casos de las estaciones El Canadá, El Espinazo, Camacho y Los Ramones tuvieron un comportamiento

con ruido  $1/f^2$  al igual que el movimiento Browniano, tal como se observa en el Cuadro 5. La relación  $D = 2 - H$  se mantuvo para esos registros auto afines; así el exponente de Hurst (H) es muy cercano a 0.5.

De esta manera, esas series de tiempo y anomalías correspondieron a procesos aleatorios independientes en los cuales la temperatura mínima actual no influye sobre la temperatura mínima futura (de la Fuente *et al.*, 1999) ya que la correlación entre los movimientos pasados y futuros es nula (Widom y Chen, 1995). Tales resultados sugirieron que la variación de corto plazo es tan importante como la variación de largo plazo para esos perfiles de temperatura mínima extrema mensual.

En otro contexto, en las series de tiempo de Dr. Arroyo, Ciénega de Flores, Madero, Sierra Morena y Santa Catarina, así como las series de anomalías de Galeana, Camacho, Madero y Sierra Morena predominó la variación de corto plazo, pues sus valores de  $D_s$  son mayores a 1.5.

Así como en las series originales y de anomalías de temperatura máxima extrema mensual, la oscilación cuasi-anual se presentó en todos los perfiles de temperatura mínima extrema mensual; además, para las estaciones Agualeguas, Allende, Marín, El Espinazo, La Laja, La Ciénega, Puerto de Ébano, Sierra Morena y San Rafael se evidenció la estacionalidad semestral.

En todas las series de temperatura mínima y sus anomalías se observaron picos asociados a 1.81 años que pueden estar relacionados a la oscilación cuasi-

bianual, lo que está en acuerdo con la relación entre las temperaturas de la estratosfera del polo norte y la actividad solar (Labitzke y van Loon, 1989; Mendoza *et al.*, 2001); la frecuencia de 6.29 años puede vincularse con las oscilaciones del fenómeno El Niño con periodicidades de 3 a 5 años (Weber y Talkner, 2001) o de 3 a 6 años (Monetti *et al.*, 2003).

Picos asociados a frecuencias de 8.83 a 17.37 años, posiblemente causados por la actividad solar, se evidenciaron para la temperatura mínima extrema mensual registrada en las estaciones Anáhuac, Camacho, Ciénega de Flores, Dr. Arroyo, General Bravo, La Boca, Montemorelos, Lampazos, Los Ramones, Madero, Parás y Santa Catarina.

### **3.5.3. Evaporación**

Así como en las series y anomalías de temperatura mínima extrema mensual, la oscilación cuasi-anual se presentó en 58 perfiles de evaporación y sus anomalías (Cuadro 6). Para las estaciones Agualeguas, Camacho, El Canadá, Dr. Arroyo, Lampazos, La Ciénega, Madero, Puerto de Ébano y San Rafael se evidenció la estacionalidad semestral.

En todas las series y anomalías de evaporación se observaron picos asociados a frecuencias de 1.66 a 6.40 años que pueden estar relacionados a la oscilación cuasi-bianual, lo que está en acuerdo con la relación entre las temperaturas de la estratosfera del polo norte y la actividad solar (Labitzke y van Loon, 1989; Mendoza *et al.*, 2001), y con las oscilaciones del evento El Niño cuya

periodicidad varía de 3 a 5 años (Weber y Talkner, 2001) o de 3 a 6 años (Monetti *et al.*, 2003).

Picos asociados a frecuencias de 8.68 y 22.44 años se evidenciaron para la evaporación mensual registrada en las estaciones Allende, Cerralvo, Ciénega de Flores, El Cuchillo, General Bravo, La Boca, Montemorelos, Parás y Santa Catarina, de manera que la actividad solar es una fuerza exógena que pudo estar influyendo sobre el comportamiento de la evaporación en dichas estaciones.

Cuadro 4. Parámetros de auto afinidad para series de tiempo de temperatura máxima extrema mensual y de sus anomalías en 27 estaciones del estado de Nuevo León.

Estación	Temperatura Máxima			Anomalías		
	Parámetros			Parámetros		
	$-\beta$	H	$D_s$	$-\beta$	H	$D_s$
El Cuchillo	2.536	0.768	1.232	2.617	0.809	1.191
La Boca	2.123	0.561	1.439	2.098	0.549	1.451
Montemorelos	2.121	0.561	1.439	2.226	0.613	1.387
Agualeguas	2.466	0.733	1.267	3.021	1.011	0.989
Allende	2.324	0.662	1.338	2.718	0.859	1.141
El Canadá	1.996	0.498	1.502	2.128	0.564	1.436
Cerralvo	2.328	0.664	1.336	2.442	0.721	1.279
Colombia	3.048	1.024	0.976	3.041	1.021	0.979
Dr. Arroyo	1.655	0.327	1.673	2.526	0.763	1.237
Marín	2.166	0.583	1.417	2.126	0.563	1.437
Espinazo	1.990	0.495	1.505	2.681	0.841	1.159
Galeana	2.137	0.569	1.431	1.864	0.432	1.568
Anáhuac	2.252	0.626	1.374	2.196	0.598	1.402
Camacho	2.001	0.501	1.499	1.902	0.451	1.549
Ciénega de Flores	1.868	0.434	1.566	2.063	0.532	1.468
La Laja	2.11	0.56	1.45	2.19	0.59	1.41
Lampazos	2.79	0.9	1.11	2.74	0.87	1.13
La Arena	2.17	0.58	1.42	2.26	0.63	1.37
Las Brisas	2.62	0.81	1.19	3.03	1.01	0.99
La Ciénega	2.26	0.63	1.37	2.17	0.59	1.41
Los Ramones	2.01	0.5	1.5	2.29	0.65	1.35
Madero	1.63	0.32	1.68	1.97	0.49	1.51
Parás	2.06	0.53	1.47	2.55	0.78	1.22
Puerto de Ébano	2.34	0.67	1.33	2.16	0.58	1.42
Sierra Morena	1.08	0.04	1.96	1.08	0.04	1.96
San Rafael	2.19	0.6	1.41	2.48	0.74	1.26
Santa Catarina	1.93	0.46	1.54	2.1	0.55	1.45

Cuadro 5. Parámetros de auto afinidad para series de tiempo de temperatura mínima extrema mensual y de sus anomalías en 29 estaciones del estado de Nuevo León.

Estación	Temperatura Mínima			Anomalías		
	- $\beta$	H	Ds	- $\beta$	H	Ds
El Cuchillo	2.337	0.668	1.332	2.495	0.747	1.253
La Boca	2.035	0.518	1.482	2.305	0.652	1.348
Montemorelos	2.577	0.789	1.211	2.547	0.774	1.226
Aguaaleguas	2.450	0.725	1.275	2.805	0.903	1.097
Allende	2.084	0.542	1.458	2.489	0.744	1.256
El Canadá	2.239	0.619	1.381	2.366	0.683	1.317
Cerralvo	2.092	0.546	1.454	2.516	0.758	1.242
Colombia	1.173	0.086	1.914	1.173	0.087	1.913
Dr. Arroyo	1.899	0.450	1.550	2.634	0.817	1.183
Marín	2.106	0.553	1.447	2.011	0.506	1.494
Espinazo	2.128	0.564	1.436	2.294	0.647	1.353
Galeana	2.249	0.625	1.375	2.206	0.603	1.397
Anahuac	2.190	0.595	1.405	2.266	0.633	1.367
Camacho	2.304	0.652	1.348	2.294	0.647	1.353
Ciénega de Flores	2.177	0.588	1.412	2.348	0.674	1.326
Higueras	2.12	0.56	1.44	2.72	0.86	1.14
La Laja	2.22	0.61	1.39	2.46	0.73	1.27
Lampazos	2.85	0.93	1.07	2.79	0.9	1.1
La Arena	1.92	0.46	1.54	2.47	0.74	1.26
Las Brisas	2.62	0.81	1.19	2.77	0.88	1.12
La Ciénega	2.64	0.82	1.18	2.59	0.79	1.21
Los Ramones	2.42	0.71	1.29	2.32	0.66	1.34
Madero	2.28	0.64	1.36	2.38	0.69	1.31
Parás	2.47	0.74	1.26	2.36	0.68	1.32
Puerto de Ébano	2.28	0.64	1.36	2.21	0.61	1.39
Sierra Morena	2.13	0.57	1.43	2.17	0.58	1.42
San Rafael	2.09	0.54	1.46	3.02	1.01	0.99
Santa Catarina	2.26	0.63	1.37	2.26	0.63	1.37
Zaragoza	2.29	0.65	1.36	2.74	0.87	1.13

Cuadro 6. Parámetros de auto afinidad para series de tiempo de evaporación mensual y de sus anomalías en 29 estaciones del estado de Nuevo León.

Estación	Evaporación			Anomalías		
	$-\beta$	H	$D_s$	$-\beta$	H	$D_s$
El Cuchillo	2.370	0.685	1.315	2.438	0.719	1.281
La Boca	2.263	0.632	1.368	2.464	0.732	1.268
Montemorelos	2.041	0.521	1.479	2.343	0.672	1.328
Agualeguas	2.794	0.897	1.103	2.413	0.706	1.294
Allende	1.668	0.334	1.666	2.476	0.738	1.262
El Canadá	2.111	0.555	1.445	2.455	0.727	1.273
Cerralvo	2.458	0.729	1.271	2.821	0.910	1.090
Colombia	2.559	0.780	1.220	2.857	0.928	1.072
Dr. Arroyo	2.582	0.791	1.209	2.794	0.897	1.103
Marín	2.440	0.720	1.280	2.295	0.648	1.352
Espinazo	2.194	0.597	1.403	2.029	0.515	1.485
Anáhuac	1.89	0.45	1.55	2.43	0.72	1.28
Camacho	2.24	0.62	1.38	2.45	0.72	1.28
Ciénega de Flores	2.45	0.72	1.28	2.54	0.77	1.23
El Cerrito	2.43	0.72	1.28	3.04	1.02	0.98
Higueras	2.2	0.6	1.4	2.77	0.88	1.12
La Laja	2.43	0.72	1.29	3.02	1.01	0.99
Lampazos	1.71	0.35	1.65	2.24	0.62	1.38
La Arena	2.08	0.54	1.46	2.19	0.59	1.41
Las Brisas	2.64	0.82	1.18	2.62	0.81	1.19
La Ciénega	2.27	0.64	1.37	2.7	0.85	1.15
Los Ramones	2.16	0.58	1.42	2.69	0.85	1.15
Madero	2.01	0.51	1.5	2.18	0.59	1.41
Parás	1.95	0.47	1.53	2.6	0.8	1.2
Puerto de Ébano	2.86	0.93	1.07	2.75	0.87	1.13
Sierra Morena	1.88	0.44	1.56	2.44	0.72	1.28
San Rafael	2.42	0.71	1.29	3.06	1.03	0.97
Santa Catarina	2.2	0.6	1.4	2.93	0.96	1.04
Zaragoza	2.22	0.61	1.39	2.74	0.87	1.13

### 3.6. Conclusiones

La variación de la densidad de espectro potencial  $P(f)$  con respecto a la frecuencia  $f$  parece seguir una ley potencial en los registros de largo plazo de temperaturas máxima y mínima extremas y de evaporación, así como de sus anomalías a nivel mensual, de manera que se comportaron como fenómenos fractales en el rango de escala de dos a 98–804 meses dependiendo de la estación meteorológica.

Los picos importantes sugirieron la posible influencia de las oscilaciones intra–anual, cuasi–anual, cuasi–bianual, El Niño y la Niña y el Ciclo de Manchas Solares en ambos tipos de temperaturas extremas y evaporación y sus anomalías tal como ha sido señalado por otros autores.

El ruido en la mayoría de las series de temperaturas extremas y evaporación así como de sus anomalías tendió a tener un comportamiento persistente (memoria de largo plazo).

### 3.7. Bibliografía

- Byrne R., O. Granger, and J. Monteverdi. 1982. Rainfall trends on the margins of the subtropical deserts. *Quart. Res.* **17**, 14-25.
- Crowley T. J. 2000. Causes of the climate change over the past 1000 years. *Science* **289**, 270-277.
- Cubash, U., and R. Voss. 2000. The influence of total solar irradiance on climate. *Space Sc. Rev.* **94**, 185-198.
- De la Fuente, I.M., Martínez, L., Aguirregabiria, J.M., Veguillas J. and Iriarte, M. 1999. Long-range correlations in the phase-shifts of numerical simulations of biochemical oscillations and in experimental cardiac rhythms, *J. Biol. Systems* **7**, pp. 113-130.
- Gaytán-Ortiz, L.A. 2007. Auto afinidad y ruido  $f^\beta$  de temperaturas extremas mensuales. Tesis de Maestría en Matemática Educativa. Universidad Autónoma de Zacatecas.
- Granger O. E. 1984. Twentieth-century climate anomaly patterns over the southwestern United States. *Physical Geography* **5**, 164-185.
- Hurrell J. W. 1995. Decadal trends in the North Atlantic Oscillation: regional temperatures and precipitation. *Science* **269**, 676-679.
- IPCC TAR (Intergovernmental Panel on Climate Change, Third Assessment Report). 2001. Climate Change 2001: The scientific basis, J. T. Houghton, Y. Ding, D. J. Giggs, M. Noguer, P. J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell, and C. A. Johnson, Cambridge Univ. Press.
- Jáuregui E. 1997. Climate change in México during the historical and instrumented periods. *Quat. Int.* **43-44**, 7-17.

- Király, A. and Jánosi, M. 2002. Stochastic modeling of daily temperature fluctuations, *Phys. Rev. E* **65**, 051102, 6 p.
- Klaus D. 1973. Inversiones de aire polar en México. *Geofís. Int.* **13**, 99-143.
- Klaus D., and E. Jáuregui. 1976. Some aspects of climate fluctuations in México in relation to drought. *Geofís. Int.* **16**, 45-62.
- Labitzke, K. and van Loon, H. 1989. Associations between the 11-year solar cycle, the QBO and the atmosphere. Part I: the troposphere and stratosphere in the Northern Hemisphere in winter, *J. Atmosph. & Solar-Terr. Phys.* **50**, pp. 197.
- Lean J., J. Beer, and R. Bradley. 1995. Reconstruction of solar irradiance since 1610: Implications for climate change. *Geophys. Res. Lett.* **22**, 3195-3198.
- Maravilla D., B. Mendoza, E. Jáuregui and A. Lara. 2004. The main periodicities in the minimum extreme temperature in Northern Mexico and their relation with solar variability. *Advances in Space Res.*, in press.
- Mars N. D. and H. Svensmark. 2000. Low cloud properties influenced by cosmic rays. *Physical Review Letters* **85**, 5004-5007.
- Mendoza B., A. Lara, D. Maravilla and E. Jáuregui. 2001. Temperature variability in central México and its possible association to solar activity. *J. Atmos. Solar-Terrestrial Phys.* **63**, 1891-1900.
- Mendoza, B., Maravilla, D. and Jáuregui, E. 2006. Main Periodicities of the Minimum Extreme Temperature of Three Stations Near de Mexican Pacific Cost. *Atmósfera* **19(1)**, 9-22.
- Monetti, R.A., Havlin, S. and Bunde, A. 2003. Long-term persistence in sea-surface temperature fluctuations. *Physica A* **320**, pp. 581-589.

- Ramírez J., B. Mendoza, V. Mendoza and J. Adem. 2004. Modelling the effect of an assumed cosmic ray-modulated global cloud cover on the terrestrial surface temperature. *J. Atmos. Solar-Terrestrial Phys.*, in press.
- Reid G. C. 2000. Solar variability and the Earth's climate: introduction and overview. *Space Science Review* **94**, 1-11.
- Sánchez W. and J. Kutzbach. 1974. Climate of the American Tropics in the 1960s. *Quart. Res.* **4**, 128-135.
- Scafetta, N. and West, B.J. 2003. Solar flare intermittency and the Earth's temperature anomalies, *Phys. Rev. Letters* 90 (2003), 248701, 4 p.
- Shindell D. T., G. A. Schmidt, M. E. Mann, D. Rind and A. Waple. 2001. Solar forcing of regional climate change during the Maunder minimum. *Science* **294**, 2149-2152.
- Solanki S. K. and N. A. Krivova. 2003. Can solar variability explain global warming since 1970? *J. Geophys. Res.* **108**, 1200-1207.
- Trenberth K. E. and J. W. Hurrell. 1994. Decadal atmospheric-ocean variations in the Pacific. *Clim. Dyn.* **9**, 303-319.
- Turcotte, D.L. 1992. *Fractals and Chaos in Geology and Geophysics* (Cambridge University Press).
- Valdez-Cepeda, R.D., Hernández-Ramírez, D., Mendoza, B., Valdés-Galicia, J. and Maravilla, D. 2003. Fractality of monthly extreme minimum temperature, *Fractals* **11**, pp. 137-144.
- Van Loon H. and K. Labitzke. 2000. The influence of the 11-year solar cycle on the stratosphere below 30 km: a review. *Space Sci. Rev.* **94**, 259-278.
- Wallén C. C. 1955. Some characteristics of precipitation in Mexico. *Geografiska Annaler* **37**, 51-85.

Weber, R.O. and Talkner, P. 2001. Spectra and correlations of climate data from days to decades. *J. Geophys. Res. D* **106**, pp. 20131-20144.

Widom, A. and Chen, H.J. 1995. Fractal Brownian motion and nuclear spin echoes, *J. Phys. A.: Math. Gen.* **28**, pp. 1243-124.

## **CAPÍTULO 4**

### **RELACIÓN ENTRE TEMPERATURAS EXTREMAS Y EVAPORACIÓN CON LA ACTIVIDAD SOLAR MEDIANTE COHERENCIA DE ONDELETAS**

#### **4.1. Resumen**

Se analizaron registros de largo plazo de temperaturas máxima y mínima extremas y evaporación a nivel mensual registradas en el estado de Nuevo León, México. Las series de tiempo de 30 estaciones meteorológicas se analizaron junto con la serie de número de manchas solares mediante la técnica de coherencia de ondeletas. Los resultados sugirieron la posible influencia de la actividad solar en ambos tipos de temperaturas extremas y evaporación mensual durante los decenios de 1970 y 1980.

## **4.2. Summary**

Long-term records of monthly extreme maximum and minimum temperatures and evaporation registered at Nuevo Leon state, Mexico have been analyzed. All profiles of time series for extreme temperatures and evaporation from 30 meteorological stations were analyzed together with number of solar sunspots through wavelet coherence approach. The results suggest a possible influence of solar activity on both types of extreme temperature and evaporation during the decades of 1970 and 1980.

### 4.3. Introducción

#### 4.3.1. Antecedentes

El análisis de ondeletas es una técnica matemática para analizar la magnitud y periodicidad de la variabilidad de señales en el tiempo. El análisis de coherencia de ondeletas provee más información de los cambios de fase dependientes de la escala de tiempo y de correlación entre dos diferentes señales en el tiempo. Es decir, el análisis de coherencia de ondeletas provee una alternativa cuantitativa para describir la correlación entre dos señales de tiempo en función de la escala de tiempo y del cambio de fase (Liu *et al.*, 2004).

Existe gran controversia por la intensidad de la conexión Sol-Clima (Moore *et al.*, 2006). Gran número de series de tiempo climáticas presentan potencia significativa en la banda de 11-14 años, varios de esos autores han estado tentados de atribuirlo al ciclo de manchas solares. Sin embargo, análisis estadísticos detallados de muchas de esas correlaciones les mostraron ser ilegítimos o no ser estadísticamente significativos (Laut, 2003; Tsiropoula, 2003).

Los ciclos de algunos fenómenos están claramente ubicados a través del planeta, y son por tanto indicadores de un mecanismo del clima a escala global (Jevrejeva *et al.*, 2004). Varios mecanismos han sido propuestos para amplificar los cambios frecuentemente débiles (0.1%) de la energía solar de salida sobre el ciclo solar de 11-12 años a un nivel suficiente para producir cambios en el tiempo y el clima.

Varios de esos factores de amplificación dependen de la alta variabilidad de la energía solar en las ondas ultravioleta para inducir cambios en el ozono de la estratosfera y la temperatura, las cuales pueden entonces propagarse hacia abajo a la tropósfera (e.g., Baldwin y Dunkerton, 2005; Labitzke, 2005).

Las principales particularidades del clima del planeta son el ENSO y el modo polar anular. La intensidad del vórtice estratosférico polar determina el índice del modo anular, el cual es llamado oscilación ártica, (AO) y el modo anular antártico (AAM) (Thompson y Wallace, 1998). La oscilación cuasi bianual (QBO) es una oscilación cuasi periódica del viento ecuatorial entre este y oeste de la estratósfera tropical con un periodo promedio de 28 meses.

Casi todas las posibles conexiones Sol-Clima dependen de la modificación de la estratosfera polar, usualmente con algún papel mediador de la QBO. Labitzke (2005) resume la posible influencia del ciclo solar sobre la QBO. Kuroda y Shibata (2005) modelaron el impacto del ciclo solar sobre la AAM usando un modelo pareado química-clima en dos corridas de 21 años con repetición constante de la temperatura de la superficie del mar (SST). Ellos encontraron que el incremento de la radiación ultravioleta conduce a una señal más persistente de la AAM en la estratósfera Antártica que aquella durante corridas del modelo de bajo UV debido a la formación de una anomalía de ozono (ascendiendo a 2-3%). Además, mostraron que esos UV más bien que los rayos cósmicos producen la diferencia en su modelo.

Barnston y Livezey (1989), y después Hameed y Lee (2005) mostraron que las perturbaciones estratosféricas penetran más a la tropósfera durante el ciclo solar máximo que en el mínimo, y que también el efecto es dependiente de la dirección del viento zonal en los trópicos. Sin embargo, esos análisis dependen sólo de datos disponibles desde 1948 y, por tanto, son estadísticamente no significativos.

Kodera y Kuroda (2002) interpretaron datos de 1979 a 1998 y propusieron un mecanismo de dinámica y forzamiento radiativo de la estratosfera por el ciclo solar; sin embargo, existe duda de robustez estadística porque fueron pocos datos. Lo que se sabe con certidumbre es que las anomalías estratosféricas pueden descender y penetrar en la troposfera, como un fenómeno atípico (Baldwin y Dunkerton, 1999, 2001); además, en general la troposfera gobierna a la estratosfera.

Mayr *et al.* (2006) discutieron un modelo de simulación del ciclo solar y la QBO, y presentaron evidencia de una conexión débil, pero su modelación de ciclo solar es de periodo y amplitud fijos. De cualquier modo, considerando ambos estudios, observacional y modelado, está claro que la estratosfera puede proveer un mecanismo de transporte eficiente y rápido para conectar el clima tropical y polar (Baldwin y Dunkerton, 2005; Jevrejeva *et al.*, 2004). Así pues, la estratosfera provee un puente entre el modo anular y el fenómeno ENSO, y entonces se espera que un factor como ese es especialmente sensible al ciclo solar.

El análisis de coherencia de ondeletas es útil para relacionar la fase relativa a dos series de tiempo a través de un amplio espectro de escalas de tiempo. Si la variable representada por una de las series de tiempo es realmente el agente causal de la variabilidad en la segunda serie de tiempo, entonces un cambio en la primera siempre debe anteceder una reacción en la segunda (Moore *et al.*, 2006). Además, la técnica de análisis de coherencia de ondeletas permite identificar regiones en el dominio de tiempo-frecuencia donde dos variables involucradas presentan covarianza importante (Grinsted *et al.*, 2004) (la justificación de la investigación correspondiente se fundamenta en la sección 1.3.2.).

#### **4.3.2. Objetivo**

Evidenciar la posible relación entre series de largo plazo de temperaturas extremas y evaporación registradas mensualmente en el estado de Nuevo León con la actividad solar, mediante la técnica de coherencia de ondeletas.

#### **4.3.3. Hipótesis**

La actividad secular solar tiene efecto significativo sobre las temperaturas extremas y la evaporación.

## **4.4. Materiales y métodos**

### **4.4.1. Datos**

La base de datos, que se involucró en este trabajo, estuvo constituida por registros mensuales de series de tiempo de temperaturas extremas máxima y mínima y evaporación.

Las observaciones correspondieron a las siguientes 30 estaciones meteorológicas localizadas en el estado de Nuevo León: El Cuchillo, La Boca, Montemorelos, Agualeguas, Allende, El Canadá, Cerralvo, Colombia, Dr. Arroyo, Marín, Espinazo, Galeana, Anáhuac, Camacho-Linares, Ciénega de Flores, El Cerrito, Higueras, La Laja, Lampazos, La Arena, Las Brisas, La Ciénega (Municipio de Juárez), Los Ramones, Madero, Parás, Puerto del Ébano, Sierra Morena, San Rafael, Santa Catarina y Zaragoza. Los datos fueron proporcionados por la Comisión Nacional del Agua, la institución oficial a cargo del registro de los datos climatológicos y meteorológicos en México.

Se evidenciaron, mediante análisis de coherencia de ondeletas, los dominios de tiempo-frecuencia con covarianza significativa entre las series de tiempo y la serie de número de mancha solares.

### **4.4.2. Análisis de coherencia de ondeletas**

El proceso de calcular la función de coherencia de ondeleta de dos señales de tiempo y encontrar la función de coherencia de ondeleta máxima (MWCF) es llamado análisis de coherencia de ondeletas de dos señales de tiempo.

Para definir el análisis de coherencia de ondeletas, se usa el espectro de periodo-amplitud de ondeleta (WAPS) (Liu *et al.*, 2000). Para una función de tiempo  $f(t) \in L^1(\mathbb{R})$ , su WAPS está definida por

$$W_{\psi} f(a, b) = \frac{1}{c_{\psi} a} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt, \quad a, b \in \mathbb{R}, \quad a > 0, \quad (11)$$

donde  $a$  es el índice de escala de tiempo y  $b$  es el índice de traslación de tiempo;

$\psi(t) = \exp\left(\frac{-t^2}{2\delta_2}\right) \cos 2\pi t$ , siendo  $\delta$  una constante real; y la constante

$c_{\psi} = \int \psi(t) \cos 2\pi t dt$ . Aquí  $\psi(t)$  (parte real de la ondeleta de Morlet) es llamada la ondeleta madre.

Para dos funciones de tiempo  $f_1(t), f_2(t) \in L^1(\mathbb{R})$ , la coherencia de ondeletas está definida por

$$c_{12}(a, s) = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} W_{\psi} f_1(a, b-s) W_{\psi} f_2(a, b) db}{\sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} |W_{\psi} f_1(a, b)|^2 db} \sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} |W_{\psi} f_2(a, b)|^2 db}}, \quad (12)$$

donde  $s$  denota el intervalo de retardo de fase de  $W_{\psi} f_2(a, b)$  contra  $W_{\psi} f_1(a, b)$  en una escala de tiempo  $a$ , la cual puede ser considerada como el intervalo de retraso de fase de  $f_2(t)$  con respecto a  $f_1(t)$  en una escala de tiempo  $a$ . Con la escala de tiempo  $a$  fijo, tanto  $W_{\psi} f_1(a, b)$  como  $W_{\psi} f_2(a, b)$  deben variar alrededor de cero cuando el tiempo de traslado  $b$  cambia.

Eso significa que en una escala de tiempo fijo  $a$ , tanto  $W_{\psi}f_1(a,b)$  como  $W_{\psi}f_2(a,b)$  deben de tener un valor esperado de cero. Así pues, la función de coherencia de ondeletas  $c_{12}(a, s)$ , como se definió en la Ec. 12, determina el coeficiente de correlación de las funciones de tiempo  $f_1(t)$  y  $f_2(t)$  cuando  $f_2(t)$  se demora con respecto a  $f_1(t)$  con una magnitud  $s$  en una escala de tiempo  $a$ .

En primera instancia,  $c_{12}(a, 0)$ , llamada función de coherencia de ondeletas sin intervalo de retardo (NWCF), mide el coeficiente de correlación de  $f_1(t)$  y  $f_2(t)$  sin intervalo de retardo en una escala de tiempo  $a$ . Con la escala de tiempo  $a$  fija, debe ser una coherencia de ondeletas máxima con intervalo de retardo de fase  $s$  y rango dentro de  $[-a/2, a/2]$ , i.e., debe existir una función

$$Mc_{12}(a) = \max \left\{ c_{12}(a, s) \mid s \in \left[ \frac{-a}{2}, \frac{a}{2} \right] \right\}, \quad (13)$$

la cual es la función de coherencia de ondeletas máxima (MWCF) (Liu *et al.*, 2004).

#### 4.5. Resultados

Se obtuvo la transformada de coherencia de ondeletas entre las variables climáticas y el número de manchas solares a nivel mensual para las 30 estaciones mencionadas. Así, se identificaron las regiones en el dominio de tiempo-frecuencia donde las variables climáticas y el número de manchas solares presentaron covarianza importante (cuadros 7 a 9). En las Figuras 4 a 9, la línea negra delgada delimita el espacio dentro del nivel de significancia del 5%, es decir, define el cono de influencia significativo.

Cuadro 7. Frecuencia y periodo en el que las transformadas de coherencia de ondeletas entre series de temperatura máxima mensual registrada en Nuevo León y número de manchas solares presentaron covarianza significativa.

Estación	Frecuencia (años)	Periodo
Agualeguas	4 - 5	1991-1995
Anahuac	4 - 6	1981-1996
Canada	2.25 - 3	1986-1989
Ciénega de Flores	2 - 3.5	1985-1992
Dr. Arroyo	7 - 9	1985-1992
Marín	4 - 4.25	1991-1996
Espinazo	4 - 4.5	1989-1996
Galeana	8 - 10	1984-1990
Gral. Bravo	9 - 12	1973-1986
La Boca	4 - 5.5	1978-1992
La Laja	2 - 3	1986-1994
Lampazos	3 - 4.5	1976-1982
La Arena	2 - 3	1986-1991
Las Brisas	5 - 6	1990-1993
La Ciénega	3.5 - 5	1992-1995
Madero	3.5 - 4	1974-1977
Montemorelos	2.5 - 4	1985-1996
Parás	4 - 6	1978-1995
Santa Catarina	10 - 12	1973-1981
Zaragoza	3.5 - 5.5	1978-1989

Cuadro 8. Frecuencia y periodo en el que las transformadas de coherencia de ondeletas entre series de temperatura mínima mensual registrada en Nuevo León y número de manchas solares presentaron covarianza significativa.

Estación	Frecuencia (años)	Período
Agualeguas	3 - 3.5	1986-1989
Anáhuac	9 - 15	1968-1978
Ciénega de Flores	2 - 3.5	1986-1994
Espinazo	2 - 3.5	1985-1992
Gral. Bravo	2 - 3	1970-1975
Lampazos	4 - 5.5	1977-1981
La Arena	7 - 10	1977-1987
Madero	9 - 11	1983-1987
Montemorelos	2 - 3.75	1985-1994
Paras	9 - 12	1972-1989
Puerto de Ébano	3 - 3.5	1985-1988
Santa Catarina	8 - 10	1979-1990
San Rafael	4.5 - 6	1978-1982

Cuadro 9. Frecuencia y periodo en el que las transformadas de coherencia de ondeletas entre series de evaporación mensual registrada en Nuevo León y número de manchas solares presentaron covarianza significativa.

Estación	Frecuencia (años)	Período
Cerralvo	8 - 12	1969-1983
Ciénega de Flores	7 - 11	1977-1990
El Cerrito	3 - 3.75	1987-1993
Gral. Bravo	7 - 10	1977-1984
La Boca	7 - 10	1968-1991
La Laja	2.75 - 4	1986-1991
Lampazos	3 - 5	1976-1981
La Arena	2.5 - 3	1970-1974
Los Ramones	9 - 11	1973-1982
Madero	3 - 4	1986-1992
Montemorelos	9 - 11	1972-1988
Parás	5 - 7	1966-1973
Santa Catarina	4 - 6	1974-1982
Zaragoza	8 - 9	1986-1988

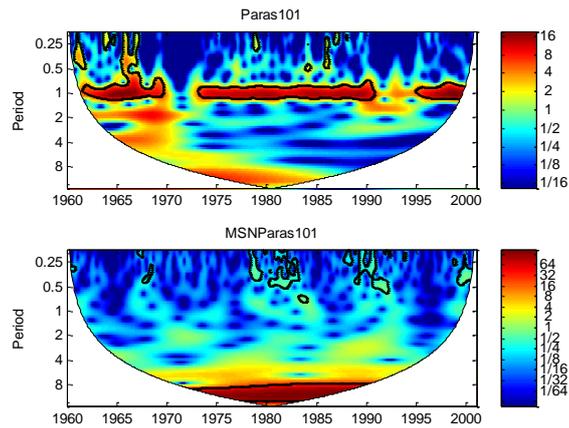


Figura 4. Transformadas de ondeleta discreta para serie de temperatura extrema máxima mensual registrada en Parás, Nuevo León (arriba) y número de manchas solares (abajo). La línea negra delgada delimita el espacio dentro del nivel de significancia del 5%, es decir, define el cono de influencia significativo.

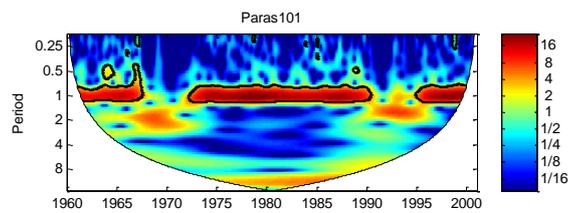


Figura 5. Transformadas de ondeleta discreta para serie de temperatura extrema mínima mensual registrada en Parás, Nuevo León. La línea negra delgada delimita el espacio dentro del nivel de significancia del 5%, es decir, define el cono de influencia significativo.

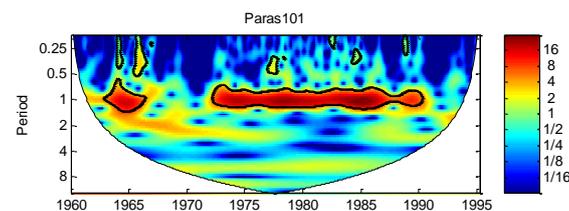


Figura 6. Transformadas de ondeleta discreta para serie de evaporación mensual registrada en Parás, Nuevo León. La línea negra delgada delimita el espacio dentro del nivel de significancia del 5%, es decir, define el cono de influencia significativo.

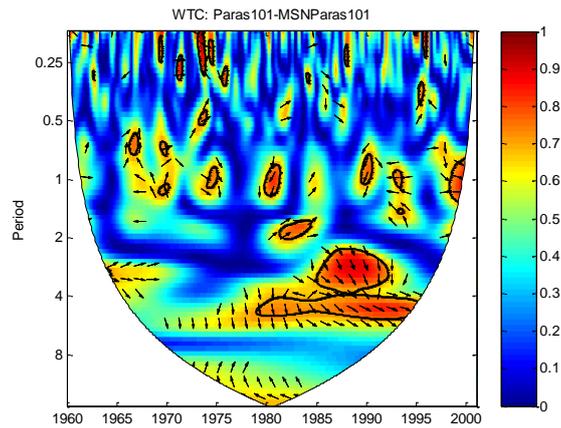


Figura 7. Transformada de coherencia de ondeletas entre la serie de temperatura extrema máxima mensual registrada en Parás, Nuevo León y número de manchas solares. La línea negra delgada delimita el espacio dentro del nivel de significancia del 5%, es decir, define el cono de influencia significativo.

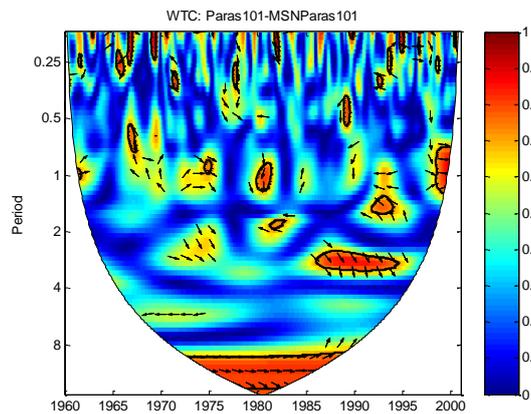


Figura 8. Transformada de coherencia de ondeletas entre la serie de temperatura extrema mínima mensual registrada en Parás, Nuevo León y número de manchas solares. La línea negra delgada delimita el espacio dentro del nivel de significancia del 5%, es decir, define el cono de influencia significativo.

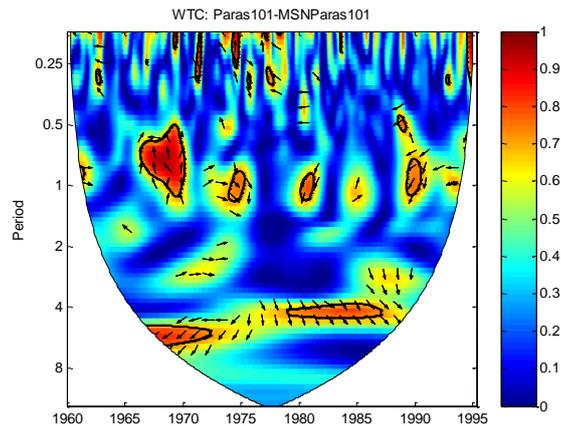


Figura 9. Transformada de coherencia de ondeletas entre la serie de evaporación mensual registrada en Parás, Nuevo León y número de manchas solares. La línea negra delgada delimita el espacio dentro del nivel de significancia del 5%, es decir, define el cono de influencia significativo.

#### 4.5.1. Temperatura máxima

Para la estación de Anáhuac, N. L., el lapso de 1981 a 1996 es significativo para un período de 4 a 6 años (cuadro 7), sin embargo, hay un desfase entre ambos procesos (temperatura y manchas solares). Para la estación de Dr. Arroyo, N. L. el lapso de 1985 a 1992 es significativo para un período de 7 a 9 años, sin embargo, hay un desfase entre ambos procesos.

Para la estación de Galeana, N. L., el lapso de 1984 a 1990 es significativo para un período de 8 a 10 años, e inclusive, ambas variables coinciden en fase. Para la estación de General Bravo, N. L. el lapso de 1973 a 1986 es significativo para un período de 9 a 12 años, e inclusive, ambas variables coinciden en fase.

Para la estación de La Boca, N. L., el lapso de 1978 a 1992 es significativo para un período de 4 a 5.5 años, e inclusive, ambas variables coinciden en fase. Para la estación de Madero, N. L., el lapso de 1974 a 1977 es significativo para un período de 3.5 a 4 años, sin embargo, hay un desfase entre ambos

procesos. Para la estación de Montemorelos, N. L., el lapso de 1985 a 1996 es significativo para un período de 2.5 a 4 años, sin embargo, hay un desfase entre ambos procesos.

Para la estación de Parás, N. L., el lapso de 1978 a 1995 es significativo para un período de 4 a 6 años, sin embargo, hay un desfase entre ambos procesos (Figura 7). Para la estación de Santa Catarina, N. L., el lapso de 1973 a 1981 es significativo para un período de 10 a 12 años, e inclusive, ambas variables coinciden en fase.

#### **4.5.2. Temperatura mínima**

En la estación de Anáhuac, N. L., el lapso de 1968 a 1978 es significativo para un período de 9 a 15 años (cuadro 8), e inclusive, ambas variables coinciden en fase. Para la estación de Madero, N. L., el lapso de 1983 a 1987 es significativo para un período de 9 a 11 años, sin embargo, hay un desfase entre ambos procesos.

Para la estación de La Arena, N. L., el lapso de 1977 a 1987 es significativo para un período de 7 a 10 años, e inclusive, ambas variables coinciden en fase. Para la estación de Parás, N. L. (Figura 8), el lapso de 1972 a 1989 es significativo para un período de 9 a 12 años, e inclusive, ambas variables coinciden en fase. Para la estación de Santa Catarina, N. L., el lapso de 1979 a 1990 es significativo para un período de 8 a 10 años, e inclusive, ambas variables coinciden en fase.

### **4.5.3. Evaporación**

En la estación de Cerralvo, N. L., el lapso de 1969 a 1983 es significativo para un período de 8 a 12 años (cuadro 9), sin embargo, hay un desfase entre ambos procesos. Para la estación de Ciénega de Flores, N. L., el lapso de 1977 a 1990 es significativo para un período de 7 a 11 años, e inclusive, ambas variables coinciden en fase.

Para la estación de General Bravo, N. L., el lapso de 1977 a 1984 es significativo para un período de 7 a 10 años, sin embargo, hay un desfase entre ambos procesos. Para la estación de La Boca, N. L., el lapso de 1968 a 1991 es significativo para un período de 7 a 10 años, sin embargo, hay un desfase entre ambos procesos.

Para la estación de Lampazos, N. L., el lapso de 1976 a 1981 es significativo para un período de 3 a 5 años, sin embargo, hay un desfase entre ambos procesos. Para la estación de Los Ramones, N. L., el lapso de 1973 a 1982 es significativo para un período de 9 a 11 años, e inclusive, ambas variables coinciden en fase.

Para la estación de Madero, N. L., el lapso de 1986 a 1992 es significativo para un período de 3 a 4 años, sin embargo, hay un desfase entre ambos procesos. Para la estación de Montemorelos, N. L., el lapso de 1972 a 1988 es significativo para un período de 9 a 11 años, sin embargo, hay un desfase entre ambos procesos. Para la estación de Paras, N. L., el lapso de 1966 a 1973 es significativo para un período de 5 a 7 años, sin embargo, hay un desfase

entre ambos procesos (Figura 9). Para la estación de Zaragoza, N. L., el lapso de 1986 a 1988 es significativo para un período de 8 a 9 años, sin embargo, hay un desfaseamiento entre ambos procesos.

#### 4.6. Discusión

El comportamiento de la temperatura se puede comprender mejor si se conoce su relación con los fenómenos naturales en cada estación meteorológica. La transformada de ondeleta discreta (TOD) expande la serie de tiempo en espacio o dominio de tiempo-frecuencia (Liu *et al.*, 2004). En la Figura 4, la TOD permite apreciar que las series de temperatura máxima presentan una periodicidad típica de entre 0.75 y 1.2 años, aunque significativa solo en los extremos del cono de influencia. Es decir, de 1962 a 1999, de 1973 a 1991 y de 1995 a 1999.

Por su parte, el número de manchas solares muestra una periodicidad amplia de 7.5 a 12 años en el lapso de 1973 a 1990. Cabe señalar que la periodicidad de 7.5 a 12 años apreciable para el número de manchas solares es múltiplo de la de 0.75 a 1.2 años mostrada por las series de temperatura máxima.

En la Figura 5, la TOD permite apreciar que las series de temperatura mínima presentan una periodicidad típica de entre 0.75 y 1.2 años, aunque significativa solo en los extremos del cono de influencia. Es decir, de 1962 a 1967, de 1972 a 1990 y de 1995 a 1999. Por su parte, el número de manchas solares muestra una periodicidad amplia de 7.5 a 12 años en el lapso de 1973 a 1990.

Cabe señalar que la periodicidad de 7.5 a 12 años apreciable para el número de manchas solares es múltiplo de la de 0.75 a 1.2 años mostrada por las series de temperatura mínima.

En la Figura 6, la TOD permite apreciar que las series de evaporación presentan una periodicidad típica de entre 0.7 y 1.25 años, aunque significativa solo en los extremos del cono de influencia. Es decir, de 1963 a 1966 y de 1972 a 1991. Por su parte, el número de manchas solares muestra una periodicidad amplia de 7.5 a 12 años en el lapso de 1973 a 1990.

Cabe señalar que la periodicidad de 7.5 a 12 años apreciable para el número de manchas solares es aproximadamente múltiplo de la de 0.7 a 1.25 años mostrada por las series de evaporación.

En general, los resultados del presente trabajo sugieren una posible relación entre el número de manchas solares y la temperatura máxima, el número de manchas solares y la temperatura mínima y el número de manchas solares y la evaporación en las regiones consignadas de los dominios de tiempo-frecuencia, pues son lo suficientemente grandes para aseverar que no ocurrieron de forma circunstancial, aunque la posible relación no implica precisamente causalidad (Grinsted et al., 2004).

En el contexto de los resultados encontrados, cabe hacer mención que Schaeffli *et al.* (2007), Zhang *et al.* (2004), Kirby *et al.* (2006), Labat *et al.* (2005) y Liu *et al.* (2004) han identificado relaciones significativas entre eventos hidrológicos y procesos hidrometeorológicos, entre flujo máximo anual y el evento “El Niño”, entre rigideces de la litósfera en diferentes direcciones, y entre las variaciones de la razón de rotación terrestre y el evento “El Niño”.

#### **4.7. Conclusiones**

La actividad solar (mediante la variable número de manchas solares) posiblemente afectó a las temperaturas extremas y la evaporación registradas mensualmente en el territorio del estado de Nuevo León durante los decenios de 1970 y 1980. Sin embargo, aún persiste la necesidad de analizar los datos disponibles de mayor largo plazo de temperaturas extremas y evaporación que las consideradas en el presente trabajo, ya que los cambios en la amplitud, la frecuencia o intensidad del comportamiento complejo de las temperaturas extremas y la evaporación pudieran tener impactos profundos sobre la naturaleza y la sociedad en el estado de Nuevo León.

#### 4.8. Bibliografía

- Baldwin, M. P., and T. J. Dunkerton. 1999. Propagation of the Arctic Oscillation from the stratosphere to the troposphere, *J. Geophys. Res.*, **104**, 30,937–30,946.
- Baldwin, M. P., and T. J. Dunkerton. 2001. Stratospheric harbingers of anomalous weather regimes, *Science*, **294**, 581– 584.
- Baldwin, M. P., and T. J. Dunkerton. 2005. The solar cycle and stratosphere-troposphere dynamical coupling, *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, **67**, 71– 82.
- Barnston, A. G., and R. E. Livezey. 1989. A closer look at the effect of the 11-year solar cycle and the quasi-biennial oscillation on Northern Hemisphere 700 mb height and extratropical North American surface temperature, *J. Clim.*, **2**, 1295–1313, doi:10.1175/1520-0442(1989)002.
- Grinsted, A., J. C. Moore, and S. Jevrejeva. 2004. Application of the cross wavelet transform and wavelet coherence to geophysical time series. *Nonlinear Processes in Geophysics* 11: 561–566.
- Hameed, S., and J. N. Lee. 2005. A mechanism for sun-climate connection, *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L23817, doi:10.1029/2005GL024393.
- Jevrejeva, S., J. C. Moore, and A. Grinsted. 2004. Oceanic and atmospheric transport of multi-year ENSO signatures to the polar regions, *Geophys. Res. Lett.*, **31**, L24210, doi:10.1029/2004GL020871.
- Kirby, J.F., and C.J. Swain. 2006. Mapping the mechanical anisotropy of the lithosphere using a 2D wavelet coherence, and its application to Australia. *Physics of the Earth and Planetary Interiors* **158**: 122–138.
- Kodera, K., and Y. Kuroda. 2002. Dynamical response to the solar cycle, *J. Geophys. Res.*, **107**(D24), 4749, doi:10.1029/2002JD002224.

- Kuroda, Y., and K. Shibata. 2005. Simulation of solar-cycle modulation of the Southern Annular Mode using a chemistry-climate model, *Geophys. Res. Lett.*, **33**, L05703, doi:10.1029/2005GL025095.
- Labat, D., J. Ronchail and J. L. Guyot. 2005. Recent advances in wavelet analyses: Part 2—Amazon, Parana, Orinoco and Congo discharges time scale variability. *Journal of Hydrology* **314**: 289–311.
- Labitzke, K. 2005. On the solar cycle-QBO relationship: A summary, *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, **67**, 45– 54.
- Laut, P. 2003. Solar activity and terrestrial climate: An analysis of some purported correlations, *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, **65**, 801– 812.
- Liu, L.T., H.T. Hsua and E.W. Grafarend. 2004. Wavelet coherence analysis of Length-Of-Day variations and El Niño-Southern Oscillation. *Journal of Geodynamics* **39**: 267–275.
- Liu, L.T., H.T. Hsua and E.W. Grafarend. 2004. Wavelet coherence analysis of Length-Of-Day variations and El Niño-Southern Oscillation. *Journal of Geodynamics* **39**: 267–275.
- Liu, L.T., Hsu, H.T., Gao, B.X., Wu, B. 2000. Wavelet analysis of the variable Chandler wobble. *Geophys. Res. Lett.* **27** (18), 3001–3004.
- Mayr, H. G., J. G. Mengel, C. L. Wolff, and H. S. Porter. 2006. QBO as potential amplifier of solar cycle influence, *Geophys. Res. Lett.*, **33**, L05812, doi:10.1029/2005GL025650.
- Moore, J., A. Grinsted, and S. Jevrejeva. 2006. Is there evidence for sunspot forcing of climate at multi-year and decadal periods?, *Geophys. Res. Lett.*, **33**, L17705, doi:10.1029/ 2006GL026501.

- Schaefli, B., D. Maraun and M. Holschneider. 2007. What drives high flow events in the Swiss Alps? Recent developments in wavelet spectral analysis and their application to hydrology. *Advances in Water Resources* **30**: 2511–2525.
- Thompson, D. W. J., and J. M. Wallace. 1998. The Arctic Oscillation signature in the winter geopotential height and temperature fields, *Geophys. Res. Lett.*, **25**, 1297– 1300.
- Tsiropoula, G. 2003. Signatures of solar activity variability in meteorological parameters, *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, **65**, 469– 482.
- Zhang, Q., Ch. Xu, T. Jiang and Y. Wu. 2007. Possible influence of ENSO on annual maximum streamflow of the Yangtze River, China. *Journal of Hydrology* **333**: 265– 274.

## CAPÍTULO 5

### MAPAS DE TENDENCIA Y DIMENSIÓN FRACTAL DE TEMPERATURAS EXTREMAS Y EVAPORACIÓN

#### 5.1. Resumen

Las tendencias y valores de dimensión fractal de temperaturas extremas y evaporación registradas mensualmente en el territorio de Nuevo León se obtuvieron mediante análisis de regresión lineal simple y análisis de espectro potencial. Se diseñaron mapas temáticos con los resultados mencionados mediante la técnica kriging ordinario. En una porción del estado se detectó el fenómeno '*Paradoja de la Evaporación*' y en otras se identificaron cambios de temperaturas extremas mayores que el incremento de temperatura media, reportado a nivel global. Los resultados evidenciaron que en prácticamente todo el territorio del estado de Nuevo León, las series de temperaturas extremas y evaporación tienden a tener un comportamiento persistente o de memoria de largo plazo.

## 5.2. Summary

Extreme monthly temperatures and evaporation linear trends and fractal dimensions were estimated for the Nuevo Leon state territory through linear regression and power spectrum analyses. Thematic maps were performed with those results through ordinary kriging technique. For some areas, '*Evaporation Paradox*' phenomenon is present; and in other areas, changes in temperature are higher than the increase for mean temperature reported at global level. The evidence was showed that profiles tend to be persistent (long-term memory) behavior on virtually most of the Nuevo Leon state territory.

### 5.3. Introducción

#### 5.3.1. Antecedentes

La tendencia lineal es un fenómeno estadístico-matemático que se produce en una serie de datos. Se produce tendencia lineal cuando la serie de datos sigue determinada pauta (una recta), denotando que estos datos son dependientes (Gaytán-Ortiz, 2007).

Los cambios en el sistema climático global han ocurrido durante toda la historia del planeta a partir de los primeros miles de millones de años de formación, dichas modificaciones se han presentado por causas naturales que incluyen: cambios en la órbita terrestre, alteraciones en la excentricidad del planeta, actividad volcánica intensa e impactos de meteoritos (Rivera, 1999).

Desde hace 10,000 años el planeta ha experimentado una relativa estabilidad climática; sin embargo, en la actualidad y desde una perspectiva más cercana a la experiencia humana, es decir dentro de un periodo factible de evaluar por el ser humano, se ha observado un incremento de la temperatura media anual global (actualmente la tierra está  $0.75^{\circ}$  C más caliente que en 1850 –IPCC, 2007-) sobretodo en el último decenio (once de los años más calurosos registrados desde 1850 ocurrieron entre 1995 y 2006 –Cornwall, 2008-).

El asunto más relevante es que se ha incluido al hombre como la principal causa de este cambio climático. Se ha llegado a un amplio consenso científico, mediante modelos matemáticos con un 90% de confiabilidad, de que las actividades humanas alteran de manera directa o indirecta la composición de la

atmósfera, que agregada a la variabilidad climática natural, han provocado que el clima global se vea alterado significativamente en los siglos XX y XXI, como resultado del aumento de la concentración de Gases de Efecto Invernadero (GEI), tales como el bióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), el metano ( $\text{CH}_4$ ), los óxidos de nitrógeno ( $\text{N}_2\text{O}$ ) y los clorofluorocarbonos (CFCs) (IPCC, 2001; Monterroso *et al.*, 2007).

Las concentraciones de  $\text{CO}_2$  durante el periodo 1750-2005 aumentaron en un 35% y siguen aumentando en casi 0.4% por año, debido principalmente a la quema de combustibles fósiles y al cambio del uso de los suelos (IPCC, 2007; Cornwall, 2008). Para México se estima un 2% de crecimiento anual de las emisiones de GEI. Sin embargo, son los países industrializados los que contribuyen con el 52% de las emisiones y los países en desarrollo con el 48% (Cabal, 2008).

Estos cambios en la concentración de los GEI son los que están relacionados con cambios regionales y globales en la temperatura, evaporación y otras variables climáticas, lo cual conlleva a cambios globales en la humedad del suelo, derretimiento de glaciares, incrementos en el nivel del mar y la ocurrencia más frecuente y severa de eventos extremos como huracanes, frentes fríos, inundaciones y sequías (Houghton *et al.*, 1996).

La identificación de la variabilidad espacial de la tendencia lineal de variables climáticas por medio de mapas temáticos es de gran utilidad en la toma de decisiones, principalmente, porque permite detectar zonas donde es prioritario revertir las tendencias que impactan negativamente a la naturaleza y sociedad, a

través de la mitigación y reducir la vulnerabilidad ante los eventos extremos, asociados al cambio climático. Ello se puede lograr mediante la adaptación y prevención ante contingencias ambientales (Santiago-Lastra *et al.*, 2008).

En geometría fractal, la dimensión fractal es un estadístico que indica cómo el objeto fractal llena el espacio en el que está inmerso, o bien qué tipo de variación predomina cuando se trata de series de tiempo de largo plazo (Gaytán-Ortiz, 2007). Así una dimensión fractal de una serie de tiempo con valor menor a 1.6 indica que predominan las variaciones de largo plazo. Mientras que valores de entre 1.5 y 2 indica la predominancia de variaciones de corto plazo y que el fenómeno es impredecible.

La temperatura es uno de los elementos climáticos con mayor variabilidad y comportamiento aleatorio. En las zonas tropicales las series de temperatura son irregulares, con periodos largos de comportamiento similar, de diferente duración y persistencia significativa a largo plazo. Este comportamiento es característico debido a los errores aleatorios sistemáticos en las series (Mandelbrot y Wallis, 1969; McGregor y Nieuwolt, 1998).

La persistencia a largo plazo es uno de los factores más importantes para caracterizar el patrón de una serie de temperatura, debido a que ésta es una variable con la propiedad de memoria larga donde la dependencia temporal persiste aún entre observaciones distantes (Montanari *et al.*, 1996). Estas series pueden ser caracterizadas por patrones cíclicos diferentes pero no periódicos.

Mandelbrot (1982), Turcote (1992) y Hall y Wolff (1995) señalan que estos procesos de memoria larga tienen dimensión fractal de entre 1 y 1.5.

Por lo tanto, los mapas temáticos de dimensión fractal de series temporales de variables climáticas son de suma utilidad para la toma de decisiones porque permiten delimitar zonas donde es posible predecir el cambio climático para diferentes escalas (Amaro *et al.*, 2004) (la justificación se fundamenta en la sección 1.3.2.).

### **5.3.2. Objetivo**

Diseñar mapas temáticos con los resultados de tendencia y dimensión fractal de las series y anomalías de largo plazo de temperaturas extremas y evaporación registradas mensualmente en el estado de Nuevo León.

### **5.3.3. Hipótesis**

Es factible elaborar mapas temáticos sobre el comportamiento de las temperaturas extremas y evaporación.

## **5.4. Materiales y métodos**

### **5.4.1. Datos**

La base de datos, que se involucró en este trabajo, estuvo constituida de registros mensuales de series de tiempo de temperaturas extremas máxima y mínima y evaporación. Las observaciones correspondieron a las siguientes 30 estaciones meteorológicas localizadas en el estado de Nuevo León: El Cuchillo, La Boca, Montemorelos, Agualeguas, Allende, El Canadá, Cerralvo, Colombia, Dr. Arroyo, Marín, Espinazo, Galeana, Anáhuac, Camacho-Linares, Ciénega de Flores, El Cerrito, Higueras, La Laja, Lampazos, La Arena, Las Brisas, La Ciénega (Municipio de Juárez), Los Ramones, Madero, Parás, Puerto del Ébano, Sierra Morena, San Rafael, Santa Catarina y Zaragoza. Los datos fueron proporcionados por la Comisión Nacional del Agua, la institución oficial a cargo del registro de los datos climatológicos y meteorológicos en México.

Se evidenciaron las tendencias mediante análisis de regresión lineal simple. Se determinó la dimensión fractal mediante el análisis de densidad del espectro potencial de las series de tiempo y sus respectivas anomalías. Después se diseñaron mapas temáticos con los resultados de tendencia y dimensión fractal de las series y anomalías de largo plazo de temperaturas extremas y evaporación mensual, por medio de la técnica kriging ordinario y del paquete Arc View versión 3.2.

### 5.4.2. Técnica kriging ordinario por bloques

Una formulación análoga de kriging ordinario puntual resulta cuando la propiedad se estima en ciertas regiones o bloques y se conoce como Kriging Ordinario por Bloques.

En kriging por bloques en lugar de estimar el valor en un punto  $x_k$  se considera una región  $V_k$  de área  $A_k$  con centro en el punto  $x_k$ . El estimador tiene la siguiente forma:

$$Z_{V_k}^* = \sum_{i=1}^n w_i Z(x_i), \quad (14)$$

En las ecuaciones del Kriging puntual el vector del miembro derecho con las semivarianzas  $\gamma_{ij}$  son reemplazadas por las semivarianzas promedios con respecto al bloque  $V_k$  que se expresan como:

$$\gamma_{V_k i} = \frac{1}{A_k} \int_{V_k} \gamma(x - x_i) dx, \quad (15)$$

Entonces las ecuaciones del Kriging por bloques son:

$$\begin{bmatrix} 0 & \gamma_{12} & \cdots & \gamma_{1n} & 1 \\ \gamma_{21} & 0 & \cdots & \gamma_{2n} & 1 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \gamma_{n1} & \gamma_{n2} & \cdots & 0 & 1 \\ 1 & 1 & \cdots & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \cdots \\ w_n \\ \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \gamma_{V_k 1} \\ \gamma_{V_k 2} \\ \cdots \\ \gamma_{V_k n} \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (16)$$

La estimación por bloques resulta más suave que la estimación puntual, debido a que se estima un promedio de la propiedad dentro del bloque (Cressie, 1991).

## 5.5. Resultados

Las coordenadas de las estaciones involucradas en el presente estudio se ligaron a los resultados de tendencia y dimensión fractal de las series y anomalías de largo plazo de temperaturas extremas y evaporación registradas mensualmente en el estado de Nuevo León. De esta manera se construyó un sistema de información geográfica que permitió diseñar mapas temáticos de amplia utilidad para la toma de decisiones.

En las Figuras 10, 11 y 12 se aprecian los mapas de tendencia de las series de tiempo de temperatura máxima, temperatura mínima y evaporación mensual, respectivamente. En las Figuras 13, 14 y 15 se muestran los mapas de dimensión fractal de las series de anomalías de temperatura máxima, temperatura mínima y evaporación mensual, respectivamente.

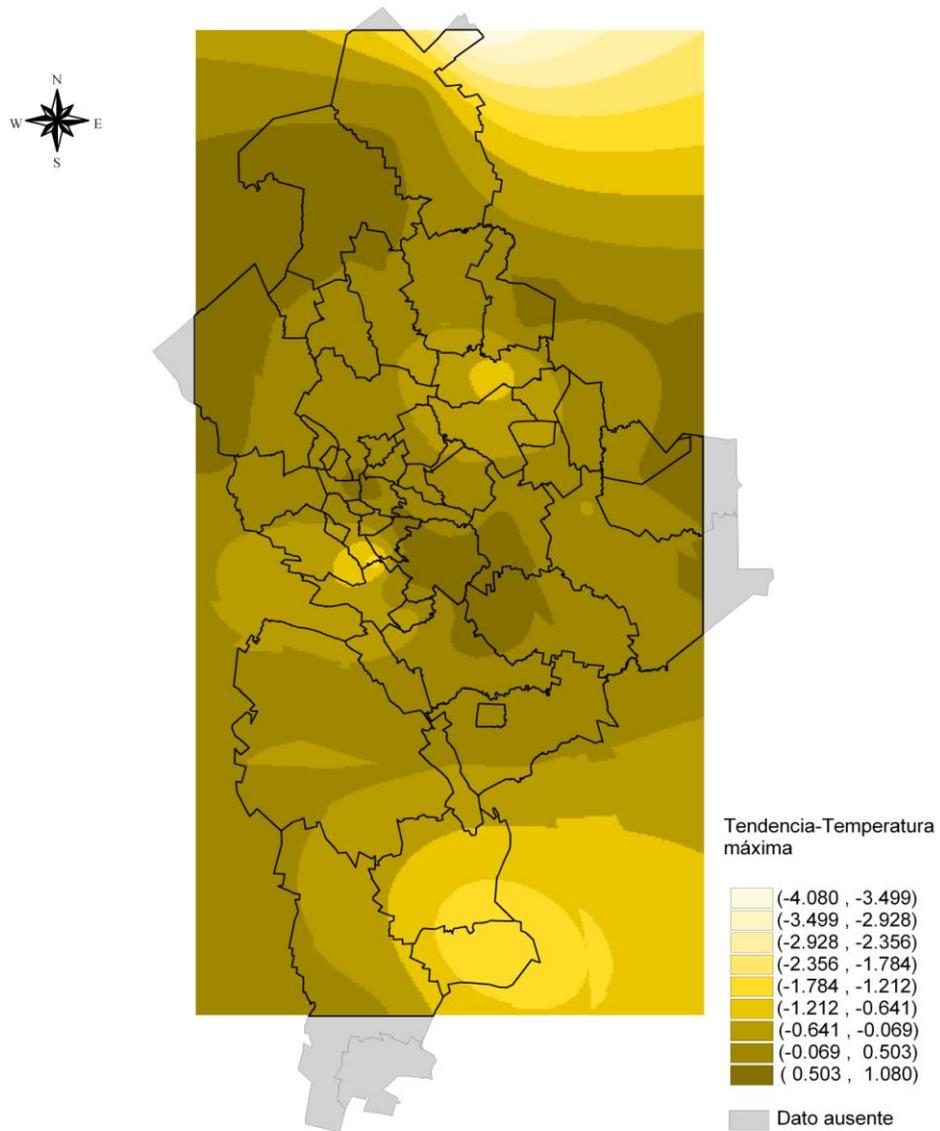


Figura 10. Mapa de tendencia (°C/decenio) de series de temperatura extrema máxima mensual en Nuevo León.

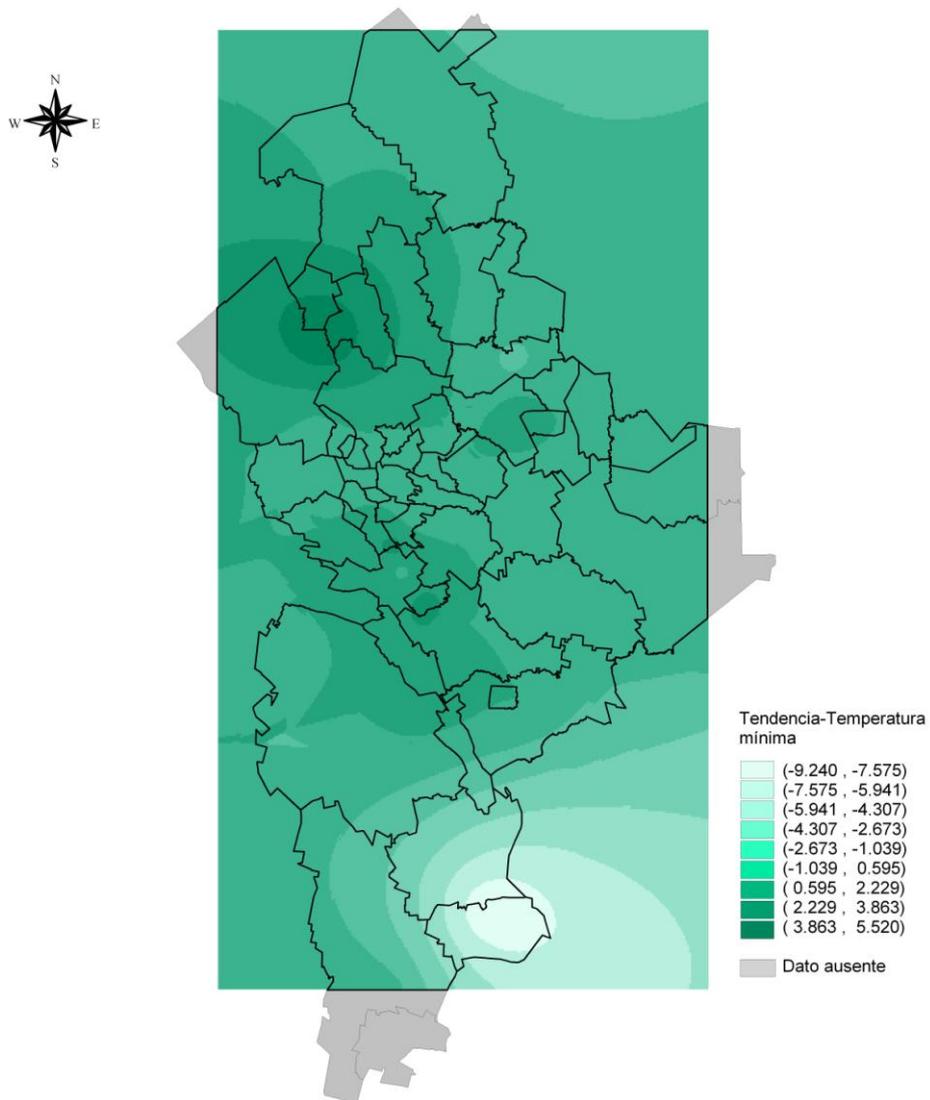


Figura 11. Mapa de tendencia (°C/decenio) de series de temperatura extrema mínima mensual en Nuevo León.

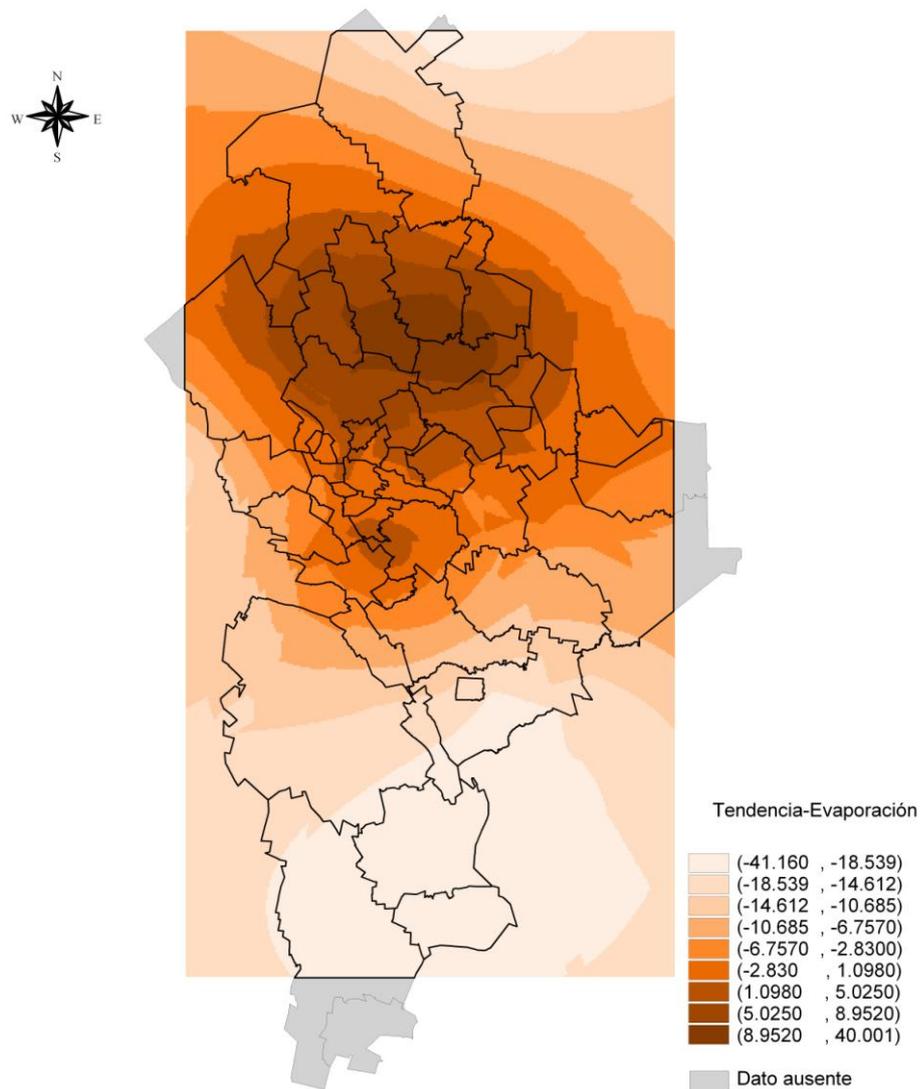


Figura 12. Mapa de tendencia (mm/decenio) de series de evaporación mensual en Nuevo León.

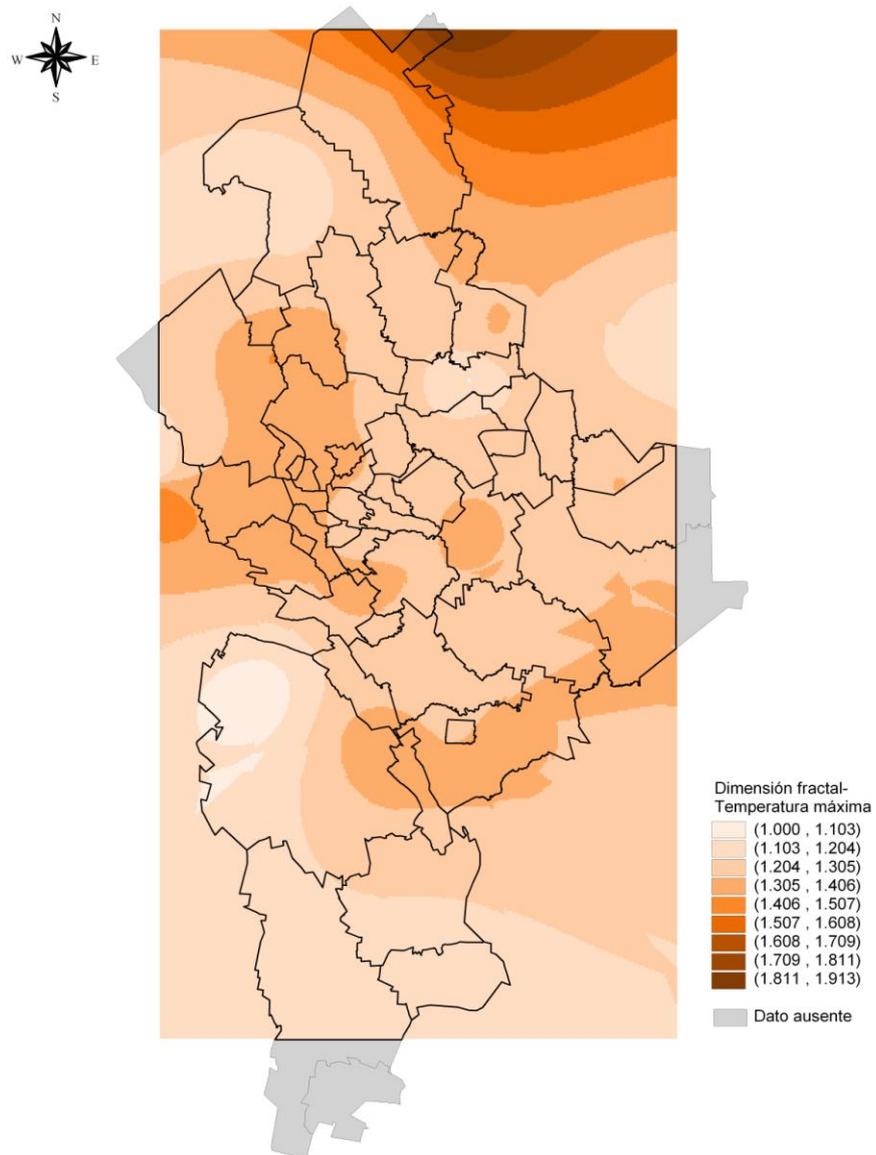


Figura 13. Mapa de dimensión fractal de anomalías de temperatura extrema máxima mensual en Nuevo León.

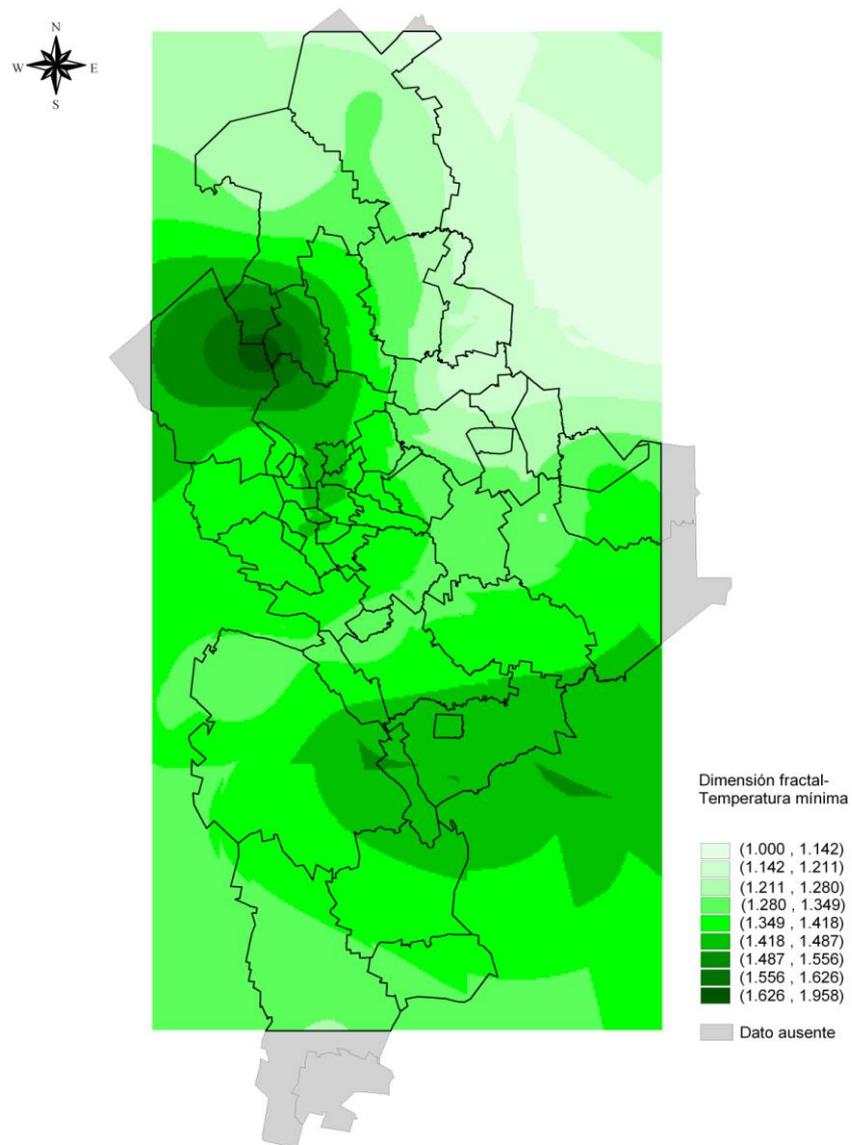


Figura 14. Mapa de dimensión fractal de anomalías de temperatura extrema mínima mensual en Nuevo León.

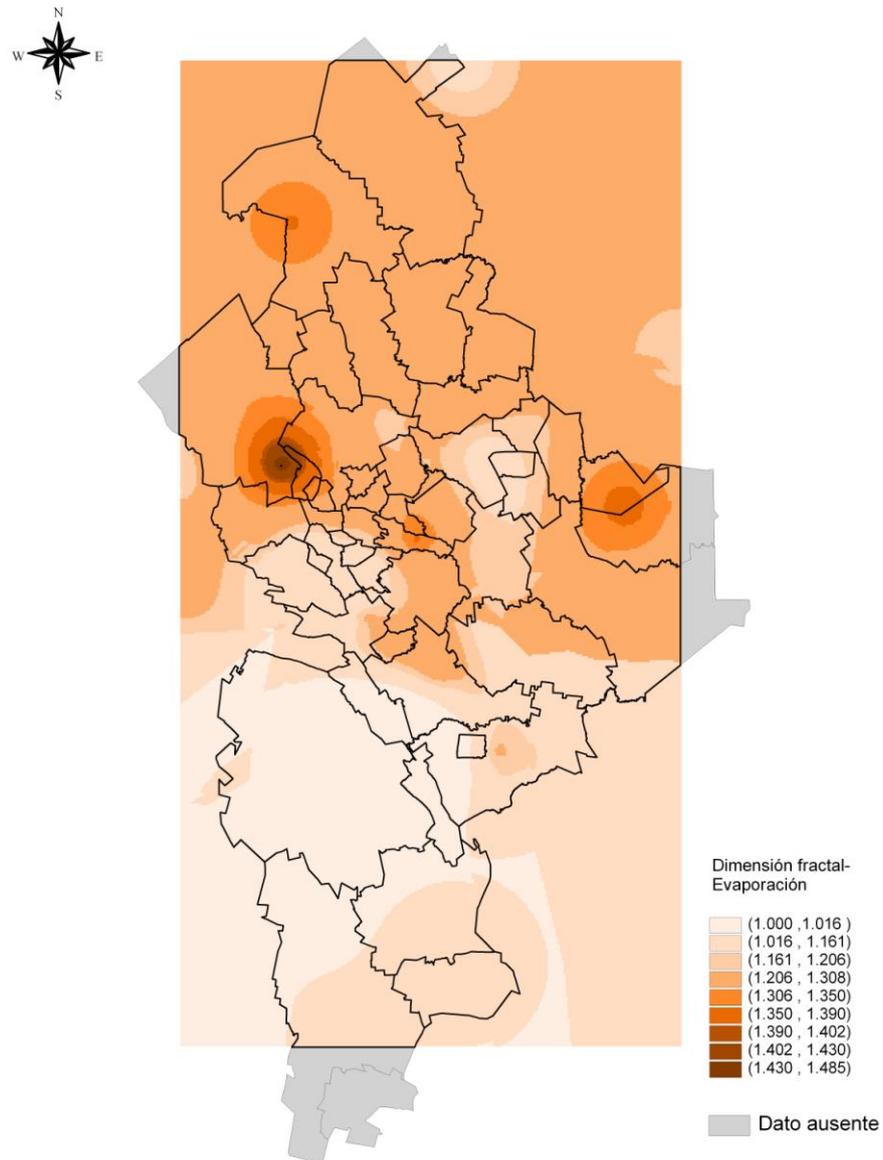


Figura 15. Mapa de dimensión fractal de anomalías de evaporación mensual en Nuevo León.

## 5.6. Discusión

El comportamiento de las variables climáticas se puede comprender mejor si se conoce el nivel de importancia de su variación de largo plazo y su tendencia en el área de estudio. En las Figuras 10, 11 y 12 se identificó que en una porción de la región centro-sur del estado, las temperaturas extremas mensuales máxima y mínima tienden a incrementarse y la evaporación mensual tiende a decrecer con respecto al tiempo. Este fenómeno se conoce como '*La Paradoja de la Evaporación*' (Liepert, 2004).

### 5.6.1. Temperatura máxima

En la Figura 10 se evidenció que las tendencias de incremento de temperatura máxima se presentaron en las regiones noroeste, centro, este y suroeste del estado. En algunas porciones de las regiones norte, noroeste, centro y este se identificaron cambios de temperatura máxima mayores que el incremento de temperatura media, reportado a nivel global (Houghton *et al.*, 2001).

Las tendencias de decremento de temperatura máxima se presentaron en las regiones norte, oeste, sureste y en una porción de la región noreste. Se identificó un gradiente positivo fuerte en las tendencias de temperatura máxima a partir del noreste de Colombia hasta el noroeste de Mina. Se identificó un gradiente positivo suave en las tendencias de temperatura máxima a partir del este de Zaragoza hasta el suroeste de los Ramones.

En la Figura 13 se evidenció que en Colombia y el noreste de Anáhuac las series de anomalías de temperatura máxima tienden a tener un comportamiento antipersistente o de memoria de corto plazo. En el resto del estado se evidenció que las series de anomalías de temperatura máxima tienden claramente a tener un comportamiento persistente o de memoria de largo plazo. Esto significa que la variación de largo plazo es más importante que la variación de corto plazo en las series de anomalías de temperatura máxima.

### **5.6.2. Temperatura mínima**

En la Figura 11 se evidenció que las tendencias de incremento de temperatura mínima se detectaron en las regiones noroeste y centro-suroeste del estado. En la región noroeste y en una porción de la región centro-suroeste se identificaron cambios de temperatura mínima mayores que el incremento de temperatura media, reportado a nivel global (Houghton *et al.*, 2001).

Las tendencias de decremento de temperatura mínima se presentaron en las regiones noreste, este, sur, sureste y una porción de las regiones centro y oeste. Se identificó un gradiente positivo fuerte en las tendencias de temperatura mínima a partir del este de Zaragoza hasta Allende. Se identificó un gradiente positivo suave en las tendencias de temperatura mínima a partir de Colombia hasta el este de Mina.

En la Figura 14 se evidenció que en Colombia y el noreste de Anáhuac el ruido de las series de anomalías de temperatura mínima tiende a tener un comportamiento antipersistente o de memoria de corto plazo. En el resto del

estado se evidenció que las series de anomalías de temperatura mínima tienden claramente a tener un comportamiento persistente o de memoria de largo plazo. Por lo tanto, la variación de largo plazo es más importante que la variación de corto plazo en las series de anomalías de temperatura mínima.

### **5.6.3. Evaporación**

En la Figura 12 se evidenció que las tendencias de incremento de evaporación se detectaron en la región norte-centro y en una porción de la región centro del estado. Las tendencias de decremento de evaporación se presentaron en las regiones norte, sur, centro-sur, este y oeste. Se identificó un gradiente positivo fuerte en las tendencias de evaporación a partir del noreste de Colombia hasta el noroeste de Agualeguas. Se identificó un gradiente positivo suave en las tendencias de evaporación a partir del norte de Aramberri hasta Juárez.

En la Figura 15 se evidenció claramente que las series de anomalías de evaporación tienden a tener un comportamiento persistente o de memoria de largo plazo en todo el territorio del estado de Nuevo León. Esto significa que la variación de largo plazo es más importante que la variación de corto plazo en las series de anomalías de evaporación mensual para todo el territorio neoleonés.

## 5.7. Conclusiones

En un área se detectó el fenómeno de '*La Paradoja de la Evaporación*' (Liepert, 2004) y en otras se identificaron cambios de temperaturas extremas mayores que el incremento de temperatura media, reportado a nivel global (Houghton *et al.*, 2001). En general, los resultados evidenciaron que en prácticamente todo el territorio del estado de Nuevo León, las series de anomalías de temperaturas extremas y evaporación mensual tienden claramente a tener un comportamiento persistente o de memoria de largo plazo. Esto significa que la variación de largo plazo es más importante que la variación de corto plazo en prácticamente todas las series de anomalías analizadas. Por consiguiente, es posible construir un modelo de predicción de variables climáticas al involucrar parámetros de fractalidad.

## 5.8. Bibliografía

- Amaro, I.R., Deney, J.R., Macchiavelli, R. 2004. Aplicación del Análisis R/S de Hurst para estudiar las propiedades Fractales de la Precipitación en Venezuela. *Interciencia*, Vol. 29, N°11, pp. 617-620.
- Cabal, Y. 2008. Cambio climático, situación actual y perspectiva para Tabasco. En: Primer Foro Cambio Climático en el Estado de Tabasco. Comisión de Ecología, Recursos Naturales y Desarrollo Sustentable. H. Congreso del Estado de Tabasco.
- Cornwall, C. 2008. La verdad sobre el calentamiento global. *Selecciones Reader's Digest*. pp: 37-43.
- Cressie, N.A.C. 1991. *Statistics for Spatial Data*, John Wiley and Sons, Inc., New York.
- Gaytán-Ortiz, L.A. 2007. Auto afinidad y ruido  $f^\beta$  de temperaturas extremas mensuales. Tesis de Maestría en Matemática Educativa. Universidad Autónoma de Zacatecas.
- Hall, P., Wolff, R.C.I. 1995. On the strength of dependence of a time series generated by a chaotic map. *J. Time Series Anal.* 16: 571-583.
- Houghton, J., Meira, L., Chander, B., Harris, N., Kattenberg, A. & K. Maskell. 1996. *Climate Change 1995: the science of climate change*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Houghton, J.T. Ding, Y., Griggs, D.J., Noguer, M., van der Linden, P.J., Dai, X., Maskell, K., Johnson, C.A. 2001. *Climate Change 2001: The Scientific Basis*, Cambridge University Press, Cambridge.
- IPCC. 2001. Tercer informe de evaluación. Cambio climático 2001: la base científica. Cambridge University Press. Cambridge. 94 p.

- IPCC. 2007. Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. IPCC, Ginebra, Suiza, 104 p.
- Liepert, B. 2004. Reduced surface solar radiation, global warming and the water cycle. Proceedings of Workshop on Pan Evaporation, Australian National Academy of Sciences Canberra, Nov 22-23.
- Mandelbrot, B.B. 1982. *The fractal geometry of nature*. Freeman. Nueva York, EEUU. 461 pp.
- Mandelbrot, B.B., Wallis, J.R. 1969. Some long-run properties of geophysical records. *Water Resources Res.* 5: 321-340.
- McGregor, G.R., Nieuwolt, S. 1998. *Tropical climatology: an introduction to the climates of the low latitudes*. 2<sup>nd</sup> ed. Wiley. Nueva York, EEUU.
- Montanari, A., Rosso, R. Taqqu, M.S. 1996. Some long-run properties of rainfall records in Italy. *J. Geophys. Res.* 101(D23): 29431-29438.
- Monterroso, A., Gómez, J., Tinoco, J. y J. Estrada. 2007. Impacto del cambio climático sobre dos especies representativas del trópico mexicano *Cedrela odorata* y *Swietenia macrophylla* en la Península de Yucatán. En: I Congreso sobre Manejo de Ecosistemas y Biodiversidad. Memorias. Ministerio de Medio Ambiente. Cuba.
- Rivera-Ávila, M. A. 1999. El cambio climático. Consejo Nacional para la Cultura y las Artes. México, D. F.
- Santiago-Lastra, J.A., López-Carmona, M. y López-Mendoza, S. 2008. Tendencias del Cambio Climático Global y los Eventos Extremos Asociados. *Ra Ximhai* Vol.4. No. 3, pp. 625-633.

Turcote, D.L. 1992. *Fractal and Chaos in Geology and Geophysics*. Cambridge University Press. Cambridge, RU. 221 pp.

**ANEXO**

# CAMBIO CLIMÁTICO: COMPORTAMIENTO DE LAS TEMPERATURAS EXTREMAS Y LA EVAPORACIÓN EN NUEVO LEÓN, MÉXICO

## CLIMATE CHANGE: EXTREME TEMPERATURES BEHAVIOR AND EVAPORATION IN NUEVO LEÓN, MEXICO

S. Herrera Salcedo<sup>1,2</sup>, R. D. Valdez Cepeda<sup>3\*</sup>, J. A. Vidales Contreras<sup>2</sup>, E. Olivares Sáenz<sup>2</sup>, H. Rodríguez Fuentes<sup>2</sup>, R. Vázquez Alvarado<sup>2</sup> y M. Pando Moreno<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Universidad Autónoma de Nuevo León. Facultad de Ingeniería Civil. Ave. Pedro de Alba s/n Cd. Universitaria, C.P. 66450. Apdo. Postal 58-F. San Nicolás de los Garza, N.L. México.

<sup>2</sup>Universidad Autónoma de Nuevo León. Facultad de Agronomía. Carretera Zuazua-Marín, Km 17. C.P. 66700. Marín N.L., México.

<sup>3</sup>Universidad Autónoma Chapingo. Centro Regional Universitario. Calle Cruz del Sur No. 100. Col. Constelación. CP 98085. Apdo. Postal 196. Zacatecas, Zac., México. \*E-mail: vacrida@hotmail.com

**RESUMEN.** El interés sobre el cambio climático se ha incrementado en los últimos 30 años debido, principalmente, a las predicciones globales asociadas con el efecto de invernadero, el cual parece indicar un incremento sustancial en la temperatura de la atmósfera terrestre. Se identificaron algunas tendencias lineales de temperaturas extremas mensuales y evaporación mensual en el territorio mexicano del estado de Nuevo León mediante análisis de regresión lineal simple. En varias localidades las temperaturas extremas mensuales máxima y mínima tienden a incrementarse y la evaporación mensual tiende a decrecer con respecto al tiempo. Este fenómeno se conoce como 'La Paradoja de la Evaporación'. En otras localidades del territorio Neoleonés se presentan cambios de temperatura mayores que el cambio global. Por lo tanto, es urgente el diseño de políticas públicas que contemplen la ejecución de programas de investigación y desarrollo tecnológico que incluyan estrategias de adaptación y mitigación de los posibles efectos del cambio climático sobre los sistemas de producción de alimentos de origen animal y vegetal.

**Palabras Clave:** Tendencia lineal, series de tiempo, regresión lineal simple, paradoja de la evaporación, producción de alimentos.

**SUMMARY.** Interest on climatic change has been increased during last 30 years due mainly to global predictions associated to the greenhouse effect, which appears to indicate a substantial increase of terrestrial atmosphere temperature. Extreme monthly temperatures and evaporation linear trends were estimated for several meteorological stations within the Mexican, Nuevo León state territory through simple regression analysis. For some locations, extreme monthly temperatures, maximum and minimum, tend to increase, whereas evaporation tends to decrease over time. This phenomenon is known as 'Evaporation Paradox'. In other locations within Nuevo León state territory, changes in temperature are higher than that reported for global level. Then, there is urgent to design public politics by considering execution of research and development of technology programs that include adaptation and mitigation strategies of the climatic change effects on agricultural systems for animal and vegetal production.

**Key Words:** Linear trend, time series, simple linear regression, evaporation paradox, food production, climate change.

### INTRODUCCIÓN

#### El Calentamiento Global

El interés sobre el cambio climático se ha incrementado en los últimos 30 años debido, principalmente, a las predicciones globales asociadas con el efecto de invernadero, el cual parece indicar un incremento sustancial en la temperatura de la atmósfera terrestre (Valdez-Cepeda *et al.*, 2003). Tal incremento ha sido de ~0.06 °C por década en el siglo XX y de ~0.19 °C por década entre 1978 y 1998 (Houghton *et al.*, 1995;

Houghton *et al.*, 2001) y se ha asociado a causas antropogénicas (IPCC, 2001) o a causas astronómicas (Landscheidt, 2000; Soon *et al.*, 2000a; Soon *et al.*, 2000b). Se prevé que el incremento continuo de gases con efecto de invernadero originará un incremento sustancial en la temperatura del aire, un incremento en el nivel del mar, descongelamiento de los polos y glaciares, y sequías en el interior de los continentes (Houghton *et al.*, 1995).

Las implicaciones de esos resultados han llevado a los científicos a examinar los registros climáticos de

diferentes regiones del mundo a fin de comprender el comportamiento de la temperatura (Valdez–Cepeda *et al.*, 2003). Un gran número de esos estudios se ha llevado a cabo usando registros de más de dos siglos de datos de estaciones europeas (Valdez–Cepeda *et al.*, 2003). Desafortunadamente, se carece de registros de largo plazo de temperaturas mensuales de más de un siglo y/o siglo y medio para muchas estaciones a través del continente americano, en particular para Latinoamérica (Valdez–Cepeda *et al.*, 2003). Por lo tanto, existen cuestionamientos serios acerca de la confiabilidad y la representatividad global de los registros europeos de largo plazo.

Pocos estudios (Cusbasch *et al.*, 1996; Jones *et al.*, 1997; Decqué *et al.*, 1998) han concluido que el incremento de la temperatura del aire en territorio europeo, con latitudes de medias a altas, será sustancialmente mayor que el incremento esperado en todo el planeta. Para ello, los investigadores han considerado modelos de simulación que toman en cuenta las observaciones mensuales ajustadas a una malla de datos (e. g. la base de datos Jones para temperatura) o alguna otra técnica. Por lo tanto, varios procedimientos incluyen problemas de calidad como la presencia de valores extremos y grandes cambios en la media y la varianza (Balling *et al.*, 1998). Algunos investigadores han notado que los cambios en la variabilidad de la temperatura también son importantes en la determinación de las distribuciones de la temperatura a futuro (Valdez–Cepeda *et al.*, 2003), pues los cambios en las temperaturas medias están asociados con cambios sustanciales en la ocurrencia de temperaturas extremas (Balling *et al.*, 1990). En otras palabras, es conveniente e instructivo conocer la complejidad del comportamiento de las temperaturas extremas cuando los datos se ordenan secuencialmente en el tiempo.

### La Paradoja de la Evaporación

El oscurecimiento progresivo de la atmósfera terrestre es objeto de diversas interpretaciones científicas y se considera que constituye una de las consecuencias de las actividades antropogénicas. Mientras que el aire se calienta, como así ha revelado la evolución de la temperatura global, lo lógico es que la evaporación de agua aumente. Sin embargo, Liepert (2004) ha podido comprobar que a menor radiación solar en la superficie del agua, se produce también menos evaporación y, en consecuencia, menos precipitación. Otra constatación es que, a pesar de la disminución de la radiación solar, el aire atmosférico sigue calentándose, de manera que Rotstain *et al.*, (2006) suponen que los aerosoles han seguido jugando un papel determinante en el oscurecimiento global.

Liepert (2004) ha confirmado que el calentamiento global aumenta la humedad en la atmósfera, lo que a su vez incrementa la capacidad de retención de agua en las nubes. Esto significa que las nubes, sin que lleguen a ser más abundantes, se han hecho más densas pues el hecho de que retengan mayor cantidad de agua no significa que llueva más, lo que significa es que impiden el paso de la luz solar con mayor intensidad. Otra explicación posible de la disminución de la radiación solar es el aumento de la cantidad de micro partículas en el aire, lo que implica que los rayos solares chocan con ellas y rebotan hacia el espacio, disminuyendo así la radiación solar sobre la superficie terrestre. Sin embargo, ello no significa que la disminución de la radiación solar se produzca únicamente en las zonas geográficas más contaminadas, ya que en otras regiones limpias, como la Antártida, el oscurecimiento también ha sido evidenciado (Roderick *et al.*, 2005).

El oscurecimiento global impacta sobre el ciclo hidrológico: reduce la evaporación y, en consecuencia, la precipitación, lo que resulta particularmente grave para las regiones áridas. El oscurecimiento incide negativamente sobre la fotosíntesis, afectando a los bosques, a la agricultura y a la vegetación planetaria en conjunto.

Brutsaert y Parlange (1998) demostraron que en localidades de regiones secas donde se presenta la tendencia de decremento de la evaporación registrada en tanques evaporímetros, ésta no es una buena referencia de la evaporación potencial; además, en muchas situaciones, la tendencia decreciente de la evaporación registrada en tanque evaporímetro provee una indicación de incremento de la evaporación terrestre. Ellos explicaron que en condiciones de restricción de humedad en la superficie terrestre, la evaporación actual decrece hasta ser menor que la evaporación potencial; entonces, la energía no usada por la evaporación actual se manifiesta por sí misma como un incremento en el flujo de calor sensible de manera que la evaporación actual es igual a la evaporación potencial menos el incremento señalado de flujo de calor sensible. Ello da pie a que la evaporación registrada en tanque sea usada preferentemente para estimar una evaporación potencial 'aparente'. El punto nodal es que la evaporación actual y la evaporación registrada en tanque exhiben más complementariedad que proporcionalidad: por ejemplo, en el caso extremo de una condición desértica la evaporación actual es nula, mientras que la evaporación del tanque evaporímetro es máxima. Así entonces, los decrementos de la evaporación en tanque, en tal situación, pueden ser interpretados como incrementos de la evaporación terrestre (Brutsaert y Parlange, 1998). Por lo tanto, es

de primordial importancia evidenciar las tendencias de los elementos climáticos como la evaporación, entre otros, en especial aquellos que pudieran ser indicadores de intensificación del ciclo hidrológico.

### TEMPERATURAS EXTREMAS Y LA EVAPORACIÓN EN NUEVO LEÓN

Varios métodos han sido usados para caracterizar cuantitativamente el comportamiento de la temperatura y la evaporación, entre otros elementos climáticos e

índices agroclimáticos. Para evidenciar tendencias de incremento o decremento, lo más común es identificar la tendencia de largo plazo a través del análisis de regresión lineal simple. Esta técnica se usó para evidenciar tendencias de temperaturas extremas y evaporación registradas en 15 localidades del estado de Nuevo León, México. Los resultados se aprecian en los Cuadros 1, 2 y 3.

Con respecto a la temperatura máxima, las series de Higuera, Lampazos, Los Ramones, Madero y Parás

Cuadro 1. Resultados del análisis de regresión lineal simple de la temperatura máxima mensual en 15 estaciones del Estado de Nuevo León, México.

Estación	Coordenadas	msnm	Período (años)	n(m) (meses)	$Y = a + bx$		Tendencia por década (°C)
					<i>a</i>	<i>b</i>	
El Cerrito	25° 31' N 100° 11' W	90	1995-2003	94(4)	36.174 $R^2=0.007$	-0.013 $p<0.403$	-1.56
Higuera	25° 55' N 101° 0' W	1110	1979-2003	293(5)	32.795 $R^2=0.036$	0.009 $p<0.001$	1.08
La Laja	24° 55' N 99° 40' W	410	1979-2003	256(35)	35.092 $R^2=0.001$	0.002 $p<0.562$	0.24
Lampazos	27° 2' N 100° 31' W	1600	1972-2003	352(32)	34.492 $R^2=0.030$	0.008 $p<0.001$	0.96
La Arena	25° 44' N 99° 56' W	223	1967-1995	335(7)	36.550 $R^2=0.000$	0.000 $p<0.980$	0.0
Las Brisas	26° 30' N 98° 44' W	325	1981-2003	240(28)	37.063 $R^2=0.008$	0.005 $p<0.141$	0.6
La Ciénega	25° 39' N 100° 5' W	403	1987-2003	204(0)	32.662 $R^2=0.012$	0.007 $p<0.125$	0.84
Los Ramones	25° 42' N 99° 38' W	208	1960-2003	507(21)	35.312 $R^2=0.024$	0.005 $p<0.0001$	0.6
Madero	25° 53' N 98° 59' W	208	1970-2003	392(12)	36.960 $R^2=0.013$	0.005 $p<0.022$	0.6
Parás	26° 30' N 99° 32' W	195	1960-2003	409(119)	34.660 $R^2=0.023$	0.005 $p<0.0001$	0.6
Puerto del Ébano	25° 30' N 100° 5' W	300	1982-2002	251(1)	36.911 $R^2=0.010$	0.006 $p<0.119$	0.72
Sierra Morena	26° 23' N 100° 31' W	480	1984-2003	237(3)	35.811 $R^2=0.001$	0.002 $p<0.672$	0.24
San Rafael	25° 2' N 100° 33' W	1714	1973-1997	220(72)	28.372 $R^2=0.0001$	0.001 $p<0.782$	0.12
Santa Catarina	25° 41' N 100° 28' W	113	1960-1995	401(24)	34.531 $R^2=0.0001$	0.0001 $p<0.995$	0.0
Zaragoza	23° 59' N 99° 45' W	272	1974-1999	260(40)	35.207 $R^2=0.132$	-0.015 $p<0.0001$	-1.8

n = número de observaciones, m = número de observaciones faltantes.

mostraron tendencias positivas significativas ( $p < 0.05$ ); mientras que la de Zaragoza fue negativa (Cuadro 1). La única serie de temperatura mínima con tendencia significativa a  $p < 0.05$  fue la de Sierra Morena (Cuadro 2). Referente a la evaporación, las series con tendencia negativa significativa ( $p < 0.05$ ) fueron Higueras, La Laja, Los Ramones, San Rafael, Santa Catarina y Zaragoza; mientras que la única positiva fue la de Puerto del Ébano (Cuadro 3). Así entonces, las estaciones de Higueras y Los Ramones experimentan la 'Paradoja de la

Evaporación', tal y como lo señalan Brutsaert y Parlange (1998) y Liepert (2004) con tendencias significativas de temperatura máxima y evaporación.

En los casos de las estaciones Higueras, La Laja y San Rafael, tanto la temperatura máxima como la temperatura mínima tienden a incrementarse (Cuadro 2) y la evaporación tiende a decrecer (Cuadro 3). Esto sugiere la ocurrencia del fenómeno 'Paradoja de la Evaporación' (Brutsaert y Parlange, 1998; Liepert, 2004) en dichas localidades.

Cuadro 2. Resultados del análisis de regresión lineal simple de la temperatura mínima mensual en 15 estaciones del Estado de Nuevo León, México.

Estación	Período (años)	n(m) (meses)	$Y = a + bx$		Tendencia por década (°C)
			<i>a</i>	<i>b</i>	
El Cerrito	1995-2000	68(4)	7.022	0.025	3.0
			$R^2=0.005$	$p < 0.543$	
Higueras	1995-2003	107(1)	8.839	0.005	0.6
			$R^2=0.000$	$p < 0.857$	
La Laja	1979-2003	251(40)	8.536	0.006	0.72
			$R^2=0.006$	$p < 0.207$	
Lampazos	1972-2003	338(46)	8.295	0.005	0.6
			$R^2=0.005$	$p < 0.180$	
La Arena	1967-1996	350(7)	8.684	0.005	0.6
			$R^2=0.004$	$p < 0.244$	
Las Brisas	1981-2001	229(17)	11.205	0.0001	0.0
			$R^2=0.000$	$p < 0.991$	
La Ciénega	1987-2003	192(0)	11.508	-0.004	-0.48
			$R^2=0.001$	$p < 0.709$	
Los Ramones	1960-2005	534(17)	11.170	-0.003	-0.36
			$R^2=0.003$	$p < 0.192$	
Madero	1970-2003	391(13)	9.631	0.003	0.36
			$R^2=0.003$	$p < 0.316$	
Parás	1960-2003	410(118)	11.108	-0.003	-0.36
			$R^2=0.002$	$p < 0.269$	
Puerto del Ébano	1982-1998	203(0)	7.430	0.011	1.32
			$R^2=0.008$	$p < 0.210$	
Sierra Morena	1982-1995	145(12)	3.387	0.046	5.52
			$R^2=0.061$	$p < 0.002$	
San Rafael	1973-1997	219(73)	1.511	0.002	0.24
			$R^2=0.001$	$p < 0.569$	
Santa Catarina	1960-2004	514(25)	9.223	0.003	0.36
			$R^2=0.004$	$p < 0.124$	
Zaragoza	1995-1999	53(0)	6.983	-0.077	-9.24
			$R^2=0.029$	$p < 0.223$	

n = número de observaciones, m = número de observaciones faltantes.

Las series de las estaciones Higueras, La Laja, Lampazos, Madero, Las Brisas, La Ciénega, Los Ramones, Madero, Parás, Puerto del Ébano, Sierra Morena y San Rafael mostraron tendencias lineales crecientes de temperatura máxima mensual (Cuadro 1)

mayores que el incremento promedio de temperatura superficial global de 0.06 °C estimado para el siglo XX, reportado por Houghton *et al.* (2001). Por otra parte, las tendencias de las estaciones Higueras, La Laja, Lampazos, Madero, Las Brisas, La Ciénega, Los

Cuadro 3. Resultados del análisis de regresión lineal simple de evaporación mensual en 15 estaciones del Estado de Nuevo León, México.

Estación	Período (años)	n(m) (meses)	$Y = a + bx$		Tendencia por década (°C)
			$a$	$b$	
El Cerrito	1978-1998	188(58)	106.240	0.058	6.96
			$R^2=0.008$	$p<0.176$	
Higueras	1979-1995	165(31)	151.410	-0.164	-19.68
			$R^2=0.037$	$p<0.007$	
La Laja	1979-1994	117(67)	142.804	-0.123	-14.76
			$R^2=0.018$	$p<0.069$	
Lampazos	1972-1996	284(12)	20.849	0.007	0.84
			$R^2=0.007$	$p<0.140$	
La Arena	1967-1995	331(11)	161.108	0.009	1.08
			$R^2=0.000$	$p<0.839$	
			1		
Las Brisas	1981-1995	153(21)	143.699	-0.146	-17.52
			$R^2=0.013$	$p<0.131$	
La Ciénega	1984-1998	145(33)	130.528	-0.119	-14.28
			$R^2=0.014$	$p<0.115$	
Los Ramones	1960-1995	366(62)	185.430	-0.070	-8.4
			$R^2=0.019$	$p<0.004$	
Madero	1970-1995	288(20)	158.840	0.045	5.4
			$R^2=0.005$	$p<0.235$	
Parás	1960-1995	284(140)	167.118	0.014	1.68
			$R^2=0.001$	$p<0.543$	
P. del Ébano	1983-1995	103(31)	151.461	0.264	31.68
			$R^2=0.027$	$p<0.056$	
Sierra Morena	1982-1995	141(16)	147.926	0.164	19.68
			$R^2=0.011$	$p<0.190$	
San Rafael	1973-1995	186(88)	140.109	-0.110	-13.2
			$R^2=0.050$	$p<0.0001$	
Santa Catarina	1960-1988	318(26)	174.153	-0.125	-15.0
			$R^2=0.035$	$p<0.001$	
Zaragoza	1974-1999	203(96)	177.433	-0.213	-25.56
			$R^2=0.185$	$p<0.0001$	

n = número de observaciones, m = número de observaciones faltantes.

Ramones, Madero, Parás, Puerto del Ébano y Sierra Morena (Cuadro 1) son mayores que el incremento de 0.19 °C de temperatura superficial global estimado para la década entre 1978 y 1998, tal como lo reportaron Houghton *et al.* (2001).

Las series de las estaciones El Cerrito, Higuera, La Laja, Lampazos, La Arena, Madero, Puerto del Ébano, Sierra Morena, San Rafael y Santa Catarina mostraron tendencias lineales crecientes de temperatura mínima mensual (Cuadro 2) mayores que el incremento promedio de temperatura superficial global de 0.06 °C asociado al siglo XX, reportado por Houghton *et al.* (2001). Por otra parte, las tendencias de las estaciones El Cerrito, Higuera, La Laja, Lampazos, La Arena, Madero, Puerto del Ébano, Sierra Morena, San Rafael y Santa Catarina (Cuadro 2) son mayores que el incremento de 0.19 °C de temperatura superficial global vinculado a la década entre 1978 y 1998, tal y como lo reportaron Houghton *et al.* (2001).

## POSIBLES IMPLICACIONES DEL CALENTAMIENTO DEL AIRE

### Sobre la Producción Animal

Las altas temperaturas y la humedad en el verano pueden resultar en cambios de comportamiento y fisiológico en el ganado que afectan la reproducción y el éxito reproductivo (Epperson y Salesky, 2002). Esos cambios comúnmente se refieren al agobio por calor e incluyen (Epperson y Salesky, 2002):

- incremento de la tasa de respiración,
- incremento de la temperatura rectal,
- incremento en el consumo de agua,
- decremento de consumo de alimento,
- decremento de la ganancia en peso y
- decremento de actividad.

Un agobio por calor muy avanzado se caracteriza por la descoordinación, el colapso y la muerte. Además de los síntomas ya señalados, ocurren cambios en los órganos reproductivos en toros y vacas que pueden provocar un decremento en la fertilidad. El agobio por calor ha sido observado en toros mantenidos en ambientes de 90°F (32.22°C) (Epperson y Salesky, 2002). Las temperaturas ambientales de 100°F (37.77°C) pueden ser dañinas y producir síntomas avanzados de agobio por calor e, inclusive, dicho agobio daña la calidad del semen en términos de malformación de las células (espermatozoides) y de sus colas (Epperson y Salesky, 2002). En vacas mantenidas en ambientes con temperatura de 86°F (30°C) se altera el patrón hormonal y se reducen la duración y la intensidad de los síntomas del estro (Epperson y Salesky, 2002). Un agobio por

calor que se presente a los 7–10 días después de la monta o la inseminación puede provocar una tasa de concepción baja asociada más a una muerte temprana del embrión y no a falla del huevo por fertilizar o fertilizado (Epperson y Salesky, 2002). Cuando el embrión muere, la vaca presenta estro a los 21 días después. Esto es un fuerte problema en hatos lecheros.

Algunos factores de manejo que pueden contrarrestar los efectos del agobio por calor son (Epperson y Salesky, 2002):

- ventilar adecuadamente (artificial y natural),
- proveer sombras y agua para refrescar a los animales,
- usar apropiadamente el agua,
- proveer agua y minerales adecuados y de buena calidad,
- minimizar el riesgo de otros agobios (moscas y otros) y
- mantener a los animales con buena condición corporal (los toros obesos son muy susceptibles a los agobios por calor).

También se ha evidenciado que, en vacas Holstein–Friesian, las horas de actividad pastoreo y las temperaturas ambientales, las horas luz, el nivel de producción lechera, el nivel de suplemento de concentrados y la edad se relacionan significativamente (Breinholt *et al.*, 1981). Las temperaturas máximas, por lo general, se vinculan con un decremento de la actividad pastoreo durante el día. Por ello, Breinholt *et al.* (1981) concluyen que es conveniente, en particular en la época seca, restringir el pastoreo durante el día y compensarlo durante la noche.

La raza Cebú ha sido usada en programas de cruzamiento genético para desarrollar ganado para producción de leche y carne en regiones con clima cálido, pero su éxito ha sido limitado por otras características desfavorables de dicho genotipo. Es ya una realidad la tecnología de expresión genética que permite la identificación específica de genes que se activan o desactivan durante periodos de agobio. Por lo tanto, un esquema alternativo es la incorporación de genes específicos termo-tolerantes de la raza cebú en animales de otras razas (europeas o americanas) evitando la transferencia de genes indeseables (Hansen, 2004).

### Sobre la Producción de Cosechas (Granos Básicos)

El calentamiento de la atmósfera ha mejorado los rendimientos (producción de alimentos por unidad de área terrestre) en algunas regiones, los ha reducido en otras y ha tenido impactos negligibles en otras (Lobell

y Field, 2007). Recientemente, Lobell y Field (2007) reportaron el balance de esos efectos a nivel global (Cuadro 4), al considerar los rendimientos globales de 1961 a 2002 en función del comportamiento de las temperaturas máximas, mínimas y promedio, así como de la precipitación (asociadas a la estación de crecimiento correspondiente) para el mismo período. El resultado indica claramente impactos negativos de las tendencias climáticas sobre la producción de granos básicos (trigo, arroz, maíz, soya, cebada y sorgo) a nivel global (Cuadro 4). Otros investigadores (Valdez–Cepeda *et al.*, 2003) y Valdez–Cepeda *et al.*, 2007) han demostrado efectos de fenómenos como los ciclos solares magnético y de manchas, El Niño, la oscilación quasi–bianual y, posiblemente, las quasi–periodicidades heliosféricas de medio plazo, que actúan a diferentes escalas de tiempo (o de espacio y espacio–tiempo), sobre los rendimientos medios y las anomalías de rendimientos en maíz, frijol, arroz y trigo. Esto es de importancia porque los desastres naturales (sequías, inundaciones e incendios forestales entre otros) y pérdidas de cosechas asociados(as) a fenómenos periódicos como El Niño han incrementado su frecuencia en los últimos 30 años.

Ante el escenario de calentamiento atmosférico y el incremento de la evaporación potencial en algunas regiones productoras de granos, es posible inducir impactos potenciales de incremento de la producción al considerar medidas de adaptación (Lobell y Field, 2007), tal y como lo hacen los agricultores al cambiar las fechas de siembra y usar diferentes materiales genéticos. Otra opción es cambiar el patrón de cultivos mediante la promoción del cultivo de especies con mejor

productividad del agua, es decir, de especies que tienen la capacidad de producir más biomasa por unidad de agua evapotranspirada. Al igual que en el caso de producción animal, otra alternativa es la transferencia de genes termo–tolerantes entre diversas fuentes de germoplasma, a fin de desarrollar variedades e híbridos tolerantes a agobio por calor.

## CONCLUSIONES

Se evidenciaron 14 tendencias lineales significativas y altamente significativas de un total de 45 series de tiempo (de temperaturas extremas máxima y mínima, y evaporación a nivel mensual) analizadas para 15 localidades en el territorio del estado de Nuevo León, México. En tres estaciones se presentó consistentemente el fenómeno de la ‘Paradoja de la Evaporación’, ya que tanto la temperatura máxima mensual como la temperatura mínima mensual tendieron a incrementarse y la evaporación mensual tendió a decrecer.

Los resultados sugieren que el cambio climático está presente en el estado de Nuevo León y se manifiesta de forma diferente en las localidades analizadas. Se encontraron evidencias de que puede existir una gran cantidad de tendencias locales sin representatividad global. Por consiguiente, aún es una necesidad prioritaria el analizar series de largo plazo disponibles de temperaturas extremas y evaporación, porque sus tendencias podrían tener impactos profundos en actividades de interés de la sociedad Neoleonesa, en particular.

Cuadro 4. Cambio estimado en la producción (Mt) de diferentes especies cultivadas para 2002, debido a la tendencia de la temperatura a nivel global (con base en información climática del período 1961–2002) (Lobell y Field, 2007).

Método	Variables (temperatura)	Trigo (Mt)	Arroz (Mt)	Maíz (Mt)	Soya (Mt)	Cebada (Mt)	Sorgo (Mt)	Total (Mt)
i	mínima, máxima	?18.9	?1.6	?12.5	1.8	?8.0	?0.8	?40.0
i	Promedio	?14.8	?1.5	?20.7	?1.6	?8.3	?1.0	?48.0
ii	mínima, máxima	?13.5	1.1	?5.6	2.8	?5.1	?1.2	?21.5
ii	promedio	?10.8	?1.0	?18.4	?0.7	?6.2	?1.2	?38.3
iii	mínima, máxima	?13.2	?1.2	?5.2	4.4	?6.6	?1.5	?23.3
iii	promedio	?11.0	?1.0	?15.2	?1.0	?6.6	?1.8	?36.5

Métodos: (i) primeras diferencias; (ii) remoción de la tendencia lineal; (iii) sin remoción de la tendencia lineal.

Se recomienda, en estudios posteriores, caracterizar cuantitativamente el comportamiento de las temperaturas extremas y la evaporación a fin de evidenciar el nivel de complejidad (la posible existencia de caos) en las series de tiempo por medio de técnicas de análisis fractal (Király y Jánosi, 2002), espectro potencial, dominios de tiempo–frecuencia (Valdez–Cepeda *et al.*, 2007) y coherencia de ondeletas con el fin de evidenciar periodicidades ocultas y su vinculación con fenómenos como El Niño, la Oscilación del Atlántico y la Actividad Solar, entre otros.

El escenario actual de calentamiento atmosférico implica un riesgo con respecto a la seguridad alimentaria en regiones y países donde la disponibilidad de agua es limitada para la producción de granos básicos y también en donde se hace un sobre–aprovechamiento del agua de los mantos acuíferos. En tal contexto, es urgente el diseño de políticas públicas que contemplen la ejecución de programas de investigación y desarrollo tecnológico que incluyan estrategias de adaptación y mitigación de los posibles efectos del cambio climático sobre los sistemas de producción de alimentos de origen animal y vegetal, considerando al menos lo señalado en la sección ‘Posibles implicaciones del calentamiento del aire’ en este documento.

#### LITERATURACITADA

- Balling, R.C. Jr.; Skindlov J.A. and Philips, D.H. 1990.** The impact of increasing summer mean temperatures on extreme maximum and minimum temperatures in Phoenix, Arizona. *J. Climate* 3: 1491–1494.
- Balling, R.C.Jr.; Vose, R.S. and Weber, G.–R. 1998.** Analysis of long–term European temperature records: 1751–1995. *Clim. Res.* 10: 193–200.
- Breinholt1, K.A.; Gowen, F.A. and Nwosu, C.C. 1981.** Influence of environmental and animal factors on day and night grazing activity of imported Holstein–friesian cows in the humid lowland tropics of Nigeria. *Trop. Anim. Prod.* 6(4): 300–307.
- Brutsaert, W. and Parlange, M.B. 1998.** Hydrologic cycle explains the evaporation paradox. *Nature* 396: 30.
- Cusbasch, U.; von Storch, H.; Waszkewitz, J. and Zorita, E. 1996.** Estimation of climate change in Southern Europe derived from dynamical climate model output. *Clim. Res.* 7: 129–149.
- Decqué, M.; Marque, P. and Jones, R.G. 1998.** Simulation of climate change over Europe using a global variable resolution general circulation model. *Clim. Dyn.* 14: 173–189.
- Epperson, B. and Salesky, D. 2002.** Effects of high heat and humidity on reproduction in cattle. College of Agriculture & Biological Sciences / South Dakota State University / USDA. <http://agbiopubs.sdstate.edu/articles/ExEx2018.pdf>
- Hansen, P.J. 2004.** Physiological and cellular adaptations of zebu cattle to thermal stress. *Animal Reprod. Sci.* (82–83): 349–360.
- Houghton, J.T.; Meira Filho, L.G.; Callander, B.A.; Harris, N., Kattenberg, A. and Maskell, K. (Eds.). 1995.** *Climate Change 1995: The Science of Climate Change.* Cambridge University Press, Cambridge.
- Houghton, J.T.; Ding, Y.; Griggs, D.J.; Noguier, M.; van der Linden, P.J.; Dai, X., Maskell, K. and Johnson, C.A. (Eds.). 2001.** *Climate Change 2001: The Scientific Basis.* Cambridge University Press, Cambridge.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2001.** *Climatic Change 2001: synthesis report.* Contribution of Working Group 1 and III to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge.
- Jones, R.G.; Murphy, J.M.; Noguier, M. and Keen, A.B. 1997.** Simulation of climate change over Europe using a nested regional–climate model. II: Comparison of driving and regional model responses to a doubling of carbon dioxide. *Q.J.R. Meteorol. Soc.* 123: 265–292.
- Király, A. and Jánosi, M. 2002.** Stochastic modeling of daily temperature fluctuations. *Phys. Rev. E.* 65: 051102, 6 p.
- Landscheidt, T. 2000.** Solar wind near Earth: Indicator of variations in global temperature. *Proceedings of the 1<sup>st</sup> Solar and Space Weather Euro–Conference on the Solar Cycle and Terrestrial Climate.* Santa Cruz de Tenerife, España. September 25–30, 2000. pp. 497–500.
- Liepert, B. 2004.** Reduced surface solar radiation, global warming and the water cycle. *Proceedings of Workshop on Pan Evaporation.* Australian National Academy of Sciences. Canberra, Australia. November 22–23, 2004.
- Lobell, D.B. and Field, C.B. 2007.** Global scale climate–crop yield relationships and the impacts of recent warming. *Environ. Res. Lett.* 2: 1–7.
- Roderick, M.L. 2005.** Oscurecimiento global. <http://blogs.larioja.com/index.php/oscurecimientoglobal/2005/05/30/>
- Rotstayn, L.D.; Cai, W.; Dix, M.R.; Farquhar, G.D.; Feng, Y.; Ginoux, P.; Herzog, M.; Ito, A.; Penner, J.E.; Roderick, M.L. and Wang, M. 2006.** Have Australian rainfall and cloudiness increased due to the remote effects of Asian anthropogenic aerosols? *J. Geophys. Res.* (In press, accepted October 24, 2006).
- Soon, W.; Baliunas, S.; Posmentier, E.S. and Okeke, P. 2000a.** Variations of solar coronal whole area and terrestrial tropospheric air temperature from 1979–to mid–1998: astronomical forcings of change in earth’s climate? *New Astron.* 4: 563–579.
- Soon, W.; Soon, W. and Baliunas, S. 2000b.** Climate hypersensitivity to solar forcing? *Ann. Geophysic.–Atm. Hydr.* 18: 583–588.
- Valdez–Cepeda, R.D.; Hernández–Ramírez, D.; Mendoza, B.; Valdés–Galicía, J. and Maravilla, D. 2003.**

- Fractality of monthly extreme minimum temperature. *Fractals* 11: 137–144.
- Valdez–Cepeda, R.D.; Mendoza, B.; Díaz–Sandoval, R.; Valdés–Galicía, J.; López–Martínez, J.D. and Martínez–Rubín de Celis, E. 2003.** Power–spectrum behaviour of yearly mean grain yields. *Fractals* 11(3): 295–301.
- Valdez–Cepeda, R.D.; Delgadillo–Ruiz, O.; Magallanes–Quintanar, R.; Miramontes de León, G.; García–Hernández, J.L.; Enciso–Muñoz, A. and Mendoza, B. 2007.** Scale–invariance of normalized yearly mean grain yield anomaly series. *Adv. Complex Syst.* 10(3): 395–412.