

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^{1,2}, R. D. Valdez Cepeda^{3*}, J. A. Vidales Contreras², E. Olivares Sáenz², H. Rodríguez Fuentes², R. Vázquez Alvarado² y M. Pando Moreno²

^{1,2}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.

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

³Universidad 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)
			a	b	
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, Higueras, 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, Higueras, 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.; Noguer, 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.** *Climate 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.; Noguer, 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 1st 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.

