

Detección de extremos climáticos de precipitación y temperatura en el estado de Guerrero

Mendoza Uribe, I.¹, Vázquez Zavaleta, M. A.²

Fecha de recepción: 01 de febrero de 2017 – Fecha de aprobación: 23 de marzo de 2017

Resumen

Existen evidencias científicas de cambios en numerosos fenómenos meteorológicos y climáticos extremos. Los registros señalan aumento en la precipitación y temperatura mundial. Además, existen pruebas del incremento del nivel del mar y derretimiento de los glaciares. La precipitación y la temperatura son variables moderadoras del clima, por lo que un cambio en su comportamiento puede tener afectaciones en la salud humana, ecosistemas, plantas y animales. Derivado a estos hechos, algunos países como México, han formulado políticas públicas a nivel nacional para enfrentar los efectos adversos que acompañan a esta alteración en el clima. El objetivo de este trabajo es detectar la presencia de extremos climáticos, asociados a las variables de precipitación y temperatura, en el Estado de Guerrero. Para obtener estos extremos se aplican los 27 índices de extremos climáticos propuestos por el Grupo de Expertos en Detección e Índices de Cambio Climático en 47 estaciones climatológicas del sistema Clima Computarizado que opera la Coordinación General del Servicio Meteorológico Nacional de la Comisión Nacional del Agua para el periodo de estudio 1971-2000.

Palabras clave: Cambio Climático, Control de Calidad, Estado de Guerrero, Extremos Climáticos, Precipitación, Temperatura.

Detection of rain and temperature climate extremes in the state of Guerrero

Abstract

There is scientific evidence of changes in extreme weather and climate phenomena. Records indicate the increase in rainfall and global temperature. In addition, there is evidence of sea level rise and glacier melt. Precipitation and temperature are moderating variables of the climate, so a change in their behavior can affect human health, ecosystems, plants and animals. Due to these facts, some countries like Mexico have formulated public policies at national level to face the adverse effects that accompany this alteration in the climate. The objective of this work is to detect the presence of extreme climates, associated with precipitation and temperature variables, in the State of Guerrero. To obtain these extremes, the 27 climatic extremes indexes proposed by the Panel of Experts on Detection and Indices of Climate Change are applied in 47 meteorological stations in the Computerized Climate System, which operates the General Coordination of the National Meteorological Service of the National Water Commission for the 1971-2000 study period.

Keywords: Climate Change, Quality Control, Guerrero State, Climate Extremes, Precipitation, Temperature.

¹ Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Correo electrónico: indalecio_mendoza@tlaloc.imta.mx

² Consultor en Tecnologías de la Información. Correo electrónico: miguel.leta@gmail.com

Nota: Este artículo de investigación es parte de Ingeniería Revista Académica de la Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán, Vol. 21, No.1, 2017. ISSN: 2448-8364

INTRODUCCIÓN

Desde 1950, aproximadamente, se han observado cambios en numerosos fenómenos meteorológicos y climáticos extremos (IPCC, 2013). Son evidentes los aumentos de precipitación y temperatura mundial (U.S. EPA, 2016). Además, existen pruebas del aumento del nivel del mar y derretimiento de los glaciares (Martínez, 2004). Tal situación ha alertado a gran parte de la población mundial por sus posibles afectaciones en diferentes escalas geográficas y temporales, por lo que algunos países como México, han formulado políticas públicas nacionales para enfrentar los efectos adversos que acompañan a esta alteración en el clima. La precipitación y la temperatura son variables moderadoras del clima, por lo que un cambio en su comportamiento puede tener afectaciones en la salud humana, ecosistemas, plantas y animales. Un incremento en la temperatura puede resultar en una onda de calor y causar un cambio en las especies de animales y plantas. Cambios similares en las formas de precipitación pueden tener un efecto generalizado sobre la disponibilidad de agua y pueden causar un cambio en los ecosistemas. Así mismo, la tendencia en el incremento en la tendencia de

precipitación puede también resultar en un incremento de inundaciones y calidad del agua. Por otro lado, una disminución en la tendencia de las precipitaciones podría implicar un aumento en los casos de sequía. Las dos variables, precipitación y temperatura, también están interconectadas, un incremento en la temperatura de la Tierra conduce a mayor evaporación y ocurrencia de nubosidad que, a su vez, aumenta la precipitación (Karmeshu, 2012). El objetivo de este trabajo consiste en la detección de extremos climáticos, asociados con las variables de precipitación y temperatura, en el Estado de Guerrero, situado en el sur de la República Mexicana, entre los 16° 18' y 18° 48' de latitud norte y los 98° 03' y 102° 12' de longitud Oeste. En el estado de Guerrero viven 3,533,251 habitantes que representan el 3% de la población nacional, ocupando de esta manera el lugar número 12 (INEGI, 2015). Respecto al territorio, Guerrero tiene una extensión de 63,596 kilómetros cuadrados, por ello ocupa el lugar número 14 representando el 3.2% de la superficie del país. Por otra parte, Guerrero cuenta con 522 km de litorales, lo que equivale al 4.7% del total nacional (ver figura 1).



Figura 1. Área de estudio. En color negro se rellena la zona geográfica correspondiente al Estado de Guerrero, México.

DATOS Y CONTROL DE CALIDAD

El tratamiento de una serie de datos tiene como objetivo descubrir las irregularidades en el tiempo de la variable de estudio. Estas regularidades son su tendencia, sus oscilaciones periódicas, momentos de

alza o caída, entre otras. No siempre es posible obtener todas las observaciones de las variables en el periodo de estudio, aun así, es posible que a partir de series sesgadas se puede lograr buenos resultados. Este fenómeno está explicado en la naturaleza del

tratamiento univariante de series de datos, donde en cada instante de tiempo se observa un único valor numérico y el fin del análisis es buscar la comparación de los valores observados en la variable a través del tiempo. La característica fundamental para juzgar sobre la consistencia de una serie temporal es la invariabilidad en la forma de observación o recolección de datos, a través del tiempo, es decir, que el método o instrumento de medición sea el mismo utilizado durante todo el periodo de observación de las variables de estudio. Una serie temporal recopilada con un método primitivo, sesgado, pero inmutable a través de los años, es mucho más consistente en relación con una serie recopilada a través de métodos más eficientes, pero con cambios en el transcurso del tiempo (Aguirre, 1994), por ejemplo, para el registro de precipitación acumulada en 24 horas, se puede utilizar un pluviómetro convencional basado en un balancín mecánico durante todo el periodo de estudio, con su mantenimiento correspondiente, lo cual nos dará observaciones más consistentes que si en un periodo intermedio del estudio se realiza el muestreo con un sensor electrónico, incluso si se instala en la misma ubicación donde estaba el pluviómetro convencional, esto se debe a que la precisión de los instrumentos de medición no es la misma entre diferentes dispositivos por lo que al unir las dos series de datos no habrá una correspondencia exacta, lo que repercute en los resultados del análisis.

En México existen diversas redes de observación, entre las que se encuentran la red nacional de estaciones climatológicas tradicionales, la red de estaciones meteorológicas automáticas (EMAS) y la red de estaciones sinópticas meteorológicas (ESIMES). La Organización Meteorológica Mundial recomienda para estudios de clima tomar periodos de 30 años (OMM, 2007), bajo esta recomendación solo la red de estaciones climatológicas tradicionales cumple con dicho requisito, ya que las otras dos fuentes oscilan entre 10 y 15 años de datos. Para este estudio se consultó la base de datos CLICOM (CLIMA COMputarizado), que es un sistema de software de manejo de datos climatológicos desarrollado por las Naciones Unidas, que en México es operado por la Coordinación General del Servicio Meteorológico Nacional (CGSMN) en conjunto con la Gerencia de Aguas Superficiales e Ingeniería de Ríos (GASIR), ambas de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), el cual almacena los datos de más de 5000 estaciones climatológicas tradicionales distribuidas en todo el territorio nacional. El método de lectura y registro de los datos en el CLICOM consiste en la lectura que el observador realiza manualmente en los instrumentos de medición de la

estación climatológica todos los días a las 8:00 AM, estos datos se vacían en la hoja de registro, la cual se envía mensualmente a la CONAGUA donde se procede a la captura en el sistema. Es importante recalcar que las estaciones se encuentran ubicadas tanto en zonas rurales como urbanas, este proceso ocasiona retrasos en la actualización de la base de datos. Para el caso específico de las estaciones administradas por la GASIR, el observador captura los datos diariamente en una página Web, los cuales son verificados y en caso de detectar un valor anormal, este se corrobora directamente con el observador.

Se define como periodo de estudio el comprendido entre los años 1971 y 2000, para el cual se buscó una gama de estaciones tan amplia como fuera posible, a condición de que las estaciones dispongan de datos completos o al menos en cantidad suficiente. Para tal propósito, se realizó una primera selección de las estaciones que contaran con al menos 85% de datos. De las 237 estaciones disponibles en el Estado de Guerrero, solo 59 cumplieron con el mínimo de datos establecidos. El sistema CLICOM reporta datos diarios, de los cuales se utilizaron para este estudio únicamente los registros correspondientes a las variables de precipitación acumulada en 24 horas (mm), temperatura máxima en 24 horas (°C) y temperatura mínima en 24 horas (°C). Como segundo filtro de control de calidad se aplicaron las pruebas de consistencia temporal, consistencia interna, congruencia de datos en segmentos locales y validación de rango en datos diarios, las cuales se describen a continuación.

Consistencia Temporal

La consistencia temporal verifica la continuidad en la serie de datos, su principal objetivo se centra en buscar una diferencia significativa entre los datos durante un periodo de tiempo. La norma UNE 500540:2004 establece que la consistencia temporal se debe validar con series de datos de diez valores, donde los cinco primeros preceden al valor a verificar y los últimos cinco son aquellos sucesores del mismo. En esta validación se debe calcular la media \bar{X} de cada conjunto de datos y su desviación estándar $\hat{\sigma}$ para posteriormente comparar si el valor a verificar X_i es menor al valor de la media \pm tres veces la desviación estándar, de ser así se considera como un dato válido.

$$\hat{\sigma} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n}} \quad (1)$$

Si $(\bar{X} \pm 3\hat{\sigma}) > X_i$ entonces “El valor X_i es correcto”

La prueba de consistencia temporal se aplicó a las series de datos correspondientes a temperatura máxima y temperatura mínima.

Consistencia interna

Los datos meteorológicos se pueden asumir como un valor resultante de una función denotada por las características ambientales y estacionales (Vanlesberg et al., 2004). En este nivel de validación son consideradas las relaciones climatológicas entre las observaciones generadas en la misma estación del año, ya que durante una lectura en el mismo tiempo y lugar no puede existir incompatibilidad. En la prueba de consistencia interna se verifican dos teorías lógicas:

1. La temperatura mínima debe ser menor o igual que la temperatura media y así mismo la temperatura media debe ser menor o igual que la temperatura máxima

$$T_{\min} \leq T_{\text{med}} \leq T_{\max} \quad (2)$$

2. Los registros de precipitación tienen que ser mayores o iguales que 0

$$R_i \geq 0 \quad (3)$$

Congruencia de datos en segmentos locales

La variabilidad en una serie de datos debe estar en un límite aceptable según la estación climatológica a la que pertenece, es decir, una observación en un tiempo "t" no puede tener una amplia variación con respecto a una observación "t+1". En la validación de congruencia de datos en segmentos locales se implementan los algoritmos deterministas de suavización exponencial junto con el Filtro de Hann. La prueba consta de tres pasos:

1. Calcular la dispersión total de los datos y el valor de la regla de decisión.
2. Generar la serie de predicción basado en los datos observados y asimismo obtener el valor con el Filtro de Hann.
3. Evaluar los datos de observación en contra de los datos calculados con el Filtro de Hann.

Para calcular la dispersión total de los datos se lleva a cabo la desviación estándar marginal, esta medición se utiliza para calcular el valor que se va a ser utilizado por la regla de decisión.

$$C = 3 * \sigma \quad (4)$$

El propósito de aplicar un pronóstico sobre la serie de datos observado es identificar la continuidad y la congruencia en fragmentos de la serie.

El Filtro de Hann toma tres valores de suavizado generados por el algoritmo exponencial para medir la discontinuidad aplican un valor de 0.25 para los valores precedentes y sucesores, y el valor de 0.5 para la observación de que se comparará.

$$\text{FiltroHann}_i = 0.25x_{i-1} + 0.5x_i + 0.25x_{i+1} \quad (5)$$

Al mismo tiempo, se calcula el valor absoluto entre los datos de observación en un tiempo determinado y los datos de predicción

$$\text{ValorAbsoluto} = |x_t - \text{FiltroHann}_i| \quad (6)$$

El último paso es comprobar la regla de decisión para establecer si la validación en este tiempo es correcto,

$$\begin{aligned} \text{ValorAbsoluto} &= |x_t - \text{FiltroHann}_i| \\ \text{Si ValorAbsoluto} &> C \\ \text{entonces "Dato sospechoso"} \end{aligned} \quad (7)$$

Si el Valor Absoluto es etiquetado como "Dato sospechoso", la validación puede ser considerada no superado.

La prueba de congruencia en segmentos locales se aplicó únicamente a las series de datos de las variables de temperatura máxima y temperatura mínima.

Validación de rango en datos diarios

En la validación de rango de datos diarios, también llamada prueba de límites básica, se comparan los datos contra un límite establecido de acuerdo con la norma UNE 500540:240 (ver, tabla 1). Este nivel de validación está asociado a un extremo máximo y a uno mínimo, donde se verifica que cada dato debe estar dentro del rango establecido como válido, en caso contrario la serie se considera sospechosa.

$$X_{\min} \leq X_t \leq X_{\max} \quad (8)$$

La variable "X_t" representa un dato de la serie, "X_{min}" denota el valor mínimo y "X_{max}" se refiere al valor máximo aceptable.

Tabla 1. Rango de datos diarios basado en el estándar UNE 500540:2004

Variable	Rango		Unidad
	Mínima	Máxima	
Temperatura máxima	-21	45	°C
Temperatura mínima	-21	45	°C
Precipitación	0	150	mm

Tras aplicar los cuatro filtros de control de calidad, se descartaron 12 estaciones climatológicas en las que se detectaron valores inconsistentes. Seleccionando de esta manera las series de datos correspondientes a 47 estaciones climatológicas que cumplieron con los filtros de control de calidad (ver, tabla 2). En la figura 2 se presenta la distribución geográfica de las estaciones climatológicas seleccionadas en el Estado de Guerrero.

Tabla 2. Estaciones que cumplieron con el filtro de control de calidad

Clave	Nombre	Municipio	Latitud	Longitud	Altitud	Región
12003	Agua salada (CFE)	Acapulco de Juárez	17.18	-99.63	233	Acapulco
12004	Ahuehuepan	Iguala de la independencia	18.34	-99.65	760	Norte
12006	Apango (CFE)	Mártir de Cuilapan	17.74	-99.33	1065	Norte
12007	Aratichanguio	Zirándaro de los Chávez	18.48	-101.36	1065	Tierra Caliente
12008	Arcelia	Arcelia	18.32	-100.28	226	Tierra Caliente
12009	Arroyo frio	Tecpan de Galeana	17.41	-100.61	414	Costa Grande
12016	Carrera larga	Coyuca de Benítez	17.04	-100.12	290	Costa Grande
12019	Ciudad Altamirano	Pungarabato	18.36	-100.66	20	Tierra Caliente
12020	Coacoyulillo (CFE)	Chilpancingo de los Bravo	17.33	-99.63	250	Centro
12023	Copalillo	Copalillo	18.03	-99.04	530	Norte
12027	Cundancito	Coyuca de Catalán	18.02	-101.14	900	Tierra Caliente
12036	El gallo	Cutzamala de Pinzón	18.73	-100.67	1110	Tierra Caliente
12037	El manchon	Coyuca de Catalán	18.10	-101.05	400	Tierra Caliente
12039	El terrero (CFE)	Juan R. Escudero	17.13	-99.35	1796	Centro
12047	Iguala (SMN)	Iguala de la independencia	18.34	-99.54	338	Norte
12048	Ixcateopan de tlapa	Alpoyeca	17.62	-98.51	738	La Montaña
12050	La Parota (CFE)	Acapulco de Juárez	16.93	-99.62	1036	Acapulco
12052	La unión	Unión de Isidoro Montes de Oca	17.98	-101.88	106	Costa Grande
12053	Las mesas (CFE)	San marcos	17.01	-99.46	60	Costa Chica
12057	Malinaltepec (CFE)	Malinaltepec	17.24	-98.67	440	La Montaña
12058	Mexcala (CFE)	Tepecoacuilco	17.94	-99.59	1514	Norte
12063	Palos altos	Arcelia	18.36	-100.27	457	Tierra Caliente
12066	Quetzala	Igualapa	16.66	-98.50	380	Costa Chica
12071	San marcos	San marcos	16.78	-99.42	33	Costa Chica
12076	Santa barbara (CFE)	Chilpancingo de los Bravo	17.31	-99.87	80	Centro
12077	Santa fe	Ajuchitlan del Progreso	18.10	-100.68	1040	Tierra Caliente
12080	Santo tomas (CFE)	Arcelia	18.09	-100.23	500	Tierra Caliente
12091	Tlapa (CFE)	Tlapa de Comonfort	17.54	-98.59	355	La Montaña
12093	Presa valerio trujano	Tepecoacuilco	18.30	-99.48	1110	Norte

Mendoza-Uribe y Vázquez-Zavaleta / Ingeniería 21-1 (2017) 13-30

12095	Xaltianguis (CFE)	Acapulco de Juárez	17.10	-99.72	842	Acapulco
12096	Colotlipa (CFE)	Quechultenango	17.41	-99.17	545	Centro
12099	San jeronimo	Benito Juárez	17.13	-100.52	769	Costa Grande
12100	San cristobal	Ajuchitlan del progreso	18.17	-100.49	20	Tierra Caliente
12106	Alcozauca (dge)	Alcozauca de guerrero	17.47	-98.40	290	La Montaña
12107	Ayutla	Ayutla	17.09	-99.09	1360	Costa Chica
12114	Huamuxtitlan (dge)	Huamuxtitlan	17.80	-98.56	874	La Montaña
12116	Iguala (dge)	Iguala de la independencia	18.35	-99.55	883	Norte
12117	Ixcateopan de Cuauhtémoc	Ixcateopan de Cuauhtémoc	18.50	-99.79	730	Norte
12120	San Cristóbal	Chilpancingo de los Bravo	17.28	-99.94	1830	Centro
12121	San jeronimito	Petatlán	17.57	-101.34	780	Costa Grande
12123	Teloloapan (CFE)	Teloloapan	18.30	-99.87	20	Norte
12126	Tlacotepec (CFE)	General Heliodoro Castillo	17.75	-99.96	1693	Centro
12135	Olinalá (CFE)	Olinalá	17.78	-98.74	1712	La Montaña
12138	Ajuchitlán	Ajuchitlán del Progreso	18.15	-100.50	1400	Tierra Caliente
12141	Tlapehuala	Tlapehuala	18.25	-100.54	280	Tierra Caliente
12142	Acapulco de Juárez (SMN)	Acapulco de Juárez	16.87	-99.91	275	Acapulco
12156	El Ocotito	Chilpancingo de los Bravo	17.25	-99.58	20	Centro

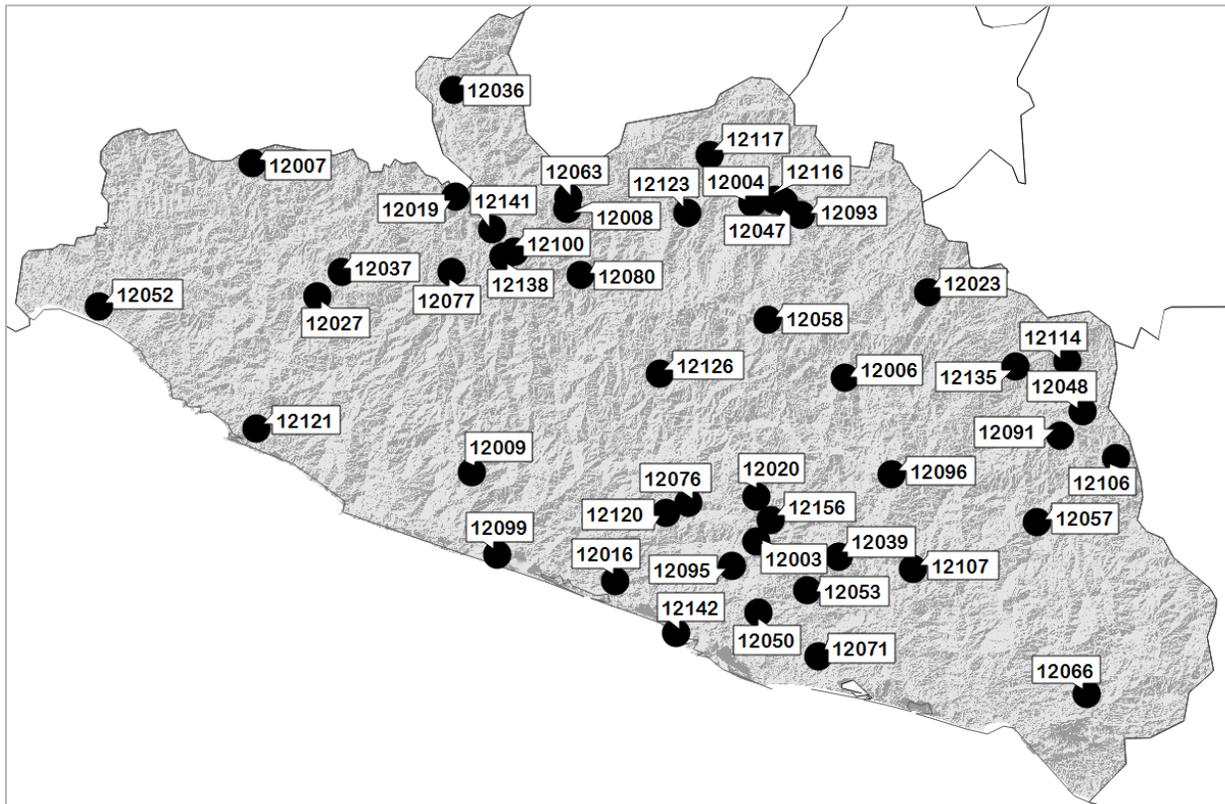


Figura 2. Distribución geográfica de las estaciones climatológicas seleccionadas en el Estado de Guerrero.

METODOLOGÍA

El Grupo de Expertos en Detección e Índices de Cambio Climático (ETCCDI) formado conjuntamente por la Organización Meteorológica Mundial (OMM), el proyecto de variabilidad climática (CLIVAR) y la Comisión Conjunta de Oceanografía y Meteorología Marítima (JCOMM), ha propuesto un conjunto de 27 índices de cambio climático útiles en la detección y el monitoreo de cambios en los extremos del clima (Karl et al 1999; Peterson 2007). Los índices son calculados a partir de series de datos observados de precipitación y temperatura. Los índices del ETCCDI proveen una base teórica común de modo que pueden ser

calculados consistentemente en diferentes regiones del planeta para luego comparar o integrar los resultados de diversas regiones. En la tabla 3 se listan los 27 índices del ETCCDI. Para este estudio se utilizó el software Rclimdex, desarrollado por Zhang and Yang (2004) en el Servicio Meteorológico de Canadá, para obtener índices de extremos climáticos. RclimDex provee de los 27 índices definidos por el ETCCDI. Rclimdex se implementó en el lenguaje de programación R, el cual es robusto, multiplataforma, distribución libre y con gran capacidad para la generación de gráficos y análisis estadístico. RclimDex incluye el módulo RHTest, a través del cual se verifica la homogeneidad de las series de datos de las estaciones climatológicas.

Tabla 3. Lista de los 27 índices de extremos climáticos propuestos por el ETCCDI

No	Índice	Significado	Unidad
1	CDD	Días secos consecutivos	Días
2	CSDI	Duración de periodos fríos	Días
3	CWD	Días húmedos consecutivos	Días
4	DTR	Rango diurno de temperatura	°C
5	FD0	Días de helada	Días
6	GSL	Duración de la estación de cultivo	Días
7	ID0	Días de hielo	Días
8	PRCPTOT	Precipitación total anual de los días húmedos	mm
9	R10MM	Días con precipitación mayor a 10 mm	Días
10	R20MM	Días con precipitación mayor a 20 mm	Días
11	R95P	Días muy húmedos	Días
12	R99P	Días extremadamente húmedos	Días
13	R50MM	Días con precipitación mayor a 50 mm	Días
14	RX1DAY	Precipitación máxima en 1 día	mm
15	RX5DAY	Precipitación máxima en 5 días	mm
16	SDII	Índice simple de intensidad diaria	mm
17	SU25	Días de verano	Días
18	TN10P	Noches frías	Días
19	TN90P	Noches calientes	Días
20	TNN	Temperatura mínima extrema	°C
21	TXN	Temperatura mínima más alta	°C
22	TR20	Noches tropicales	Días
23	TX10P	Días frescos	Días
24	TX90P	Días calurosos	Días
25	TNX	Temperatura máxima más baja	°C
26	TXX	Temperatura máxima extrema	°C
27	WSDI	Duración de los periodos cálidos	Días

Es importante mencionar que RclimDex tiene las siguientes consideraciones: 1) No todos los índices

son calculados en una base mensual; 2) Los índices mensuales son calculados si en un mes no hay más de

3 días faltantes, mientras que los valores anuales son calculados si en un año no hay más de 15 días faltantes; 3) No se calculan los valores anuales si falta un mes de datos; 4) Para índices con umbral, este se calcula si al menos el 70% de los datos están presentes; 5) Para indicadores de duración de temporada, una temporada puede continuar en el año siguiente y se la cuenta en el año en que la temporada termina. Las series de datos correspondientes a las estaciones climatológicas 12023, 12027, 12036, 12037, 12039, 12047, 12063, 12114, 12116, 12117, 12120, 12121 y 12123 no cumplieron con algunas de las consideraciones antes mencionadas, por lo que los índices CSDI, TN10P, TN90P, TX10P, TX90P, y WSDI no se calcularon para estas estaciones.

A continuación se describen las formulas aplicadas para el cálculo de los 27 índices de cambio climático.

1. Días secos consecutivos (CDD)

Sea RR_{ij} la cantidad diaria de precipitación en el día i en el periodo j . Cuente el más grande número de días consecutivos donde:

$$RR_{ij} < 1 \text{ mm} \quad (9)$$

2. Duración de periodos fríos (CSDI)

Sea Tn_{ij} la temperatura mínima diaria en el día i en el periodo j y sea $Txin10$ el día calendario del percentil 10th centrado en una ventana de 5 días. Entonces el número de días por periodo es sumado en intervalos de por lo menos 6 días consecutivos:

$$Tn_{ij} < Txin10 \quad (10)$$

3. Días húmedos consecutivos (CWD)

Sea RR_{ij} la cantidad diaria de precipitación en el día i en el periodo j . Cuente el más grande número de días consecutivos donde:

$$RR_{ij} \geq 1 \text{ mm} \quad (11)$$

4. Rango diario de temperatura (DTR)

Sean Tx_{ij} y Tn_{ij} las temperaturas diarias máximas y mínimas respectivamente en el día i en el periodo j . Si I representa el número de días en j , entonces:

$$DTR_j = \frac{\sum_{i=1}^I (Tx_{ij} - Tn_{ij})}{I} \quad (12)$$

5. Días de helada (FD0)

Sea Tn_{ij} la temperatura mínima diaria en el día i en el periodo j . Cuente el número de días cuando:

$$Tn_{ij} < 0^\circ\text{C} \quad (13)$$

6. Duración de la estación de cultivo (GSL)

Sea T_{ij} la temperatura media en el día i en el periodo j . Cuente el número de días entre la primera

ocurrencia de por lo menos 6 días consecutivos con:

$$T_{ij} > 5^\circ\text{C} \quad (14)$$

Y la primera ocurrencia después de 1st Julio (1st enero en el hemisferio sur) de por lo menos 6 días consecutivos con:

$$T_{ij} < 5^\circ\text{C} \quad (15)$$

7. Días de hielo (ID0)

Sea Tx_{ij} la temperatura máxima diaria en el día i en el periodo j . Cuente el número de días cuando:

$$Tx_{ij} < 0^\circ\text{C} \quad (16)$$

8. Precipitación total anual de los días húmedos (PRCPTOT)

Sea RR_{ij} la cantidad diaria de precipitación en el día i en el periodo j . Si I representa el número de días en j , entonces:

$$Tx_j = \sum_{i=1}^I RR_{ij} \text{ donde } RR_{ij} \geq 1 \text{ mm} \quad (17)$$

9. Días con precipitación mayor a 10 mm (R10MM)

Sea RR_{ij} la cantidad diaria de precipitación en el día i en el periodo j . Cuente el número de días donde:

$$RR_{ij} \geq 10 \text{ mm} \quad (18)$$

10. Días con precipitación mayor a 20 mm (R20MM)

Sea RR_{ij} la cantidad diaria de precipitación en el día i en el periodo j . Cuente el número de días donde:

$$RR_{ij} \geq 20 \text{ mm} \quad (19)$$

11. Días muy húmedos (R95P)

Sea RR_{wj} la cantidad diaria de precipitación en un día húmedo en el periodo j y sea RR_{wn95} el percentil 95th de precipitación en los días húmedos en el periodo 1971-2000. Si W representa el número de días húmedos en el periodo, donde $RR_{wj} \geq 1 \text{ mm}$, entonces:

$$R95p_j = \sum_{w=1}^w RR_{wj} \text{ donde } RR_{wj} > RR_{wn95} \quad (20)$$

12. Días extremadamente húmedos (R99P)

Sea RR_{wj} la cantidad diaria de precipitación en un día húmedo en el periodo j y sea RR_{wn99} el percentil 99th de precipitación en los días húmedos en el periodo 1971-2000. Si W representa el número de días húmedos en el periodo, donde $RR_{wj} \geq 1 \text{ mm}$, entonces:

$$R99p_j = \sum_{w=1}^w RR_{wj} \text{ donde } RR_{wj} > RR_{wn99} \quad (21)$$

13. Días con precipitación mayor a 50 mm (R50MM)

Sea RR_{ij} la cantidad diaria de precipitación en el día i

en el periodo j . Si nn representa cualquier valor razonable de precipitación diaria entonces, cuente el número de días donde:

$$RR_{ij} \geq nn \text{ mm} \quad (22)$$

14. Precipitación máxima en 1 día (RX1DAY)

Sea RR_{ij} el total diario de precipitación en el día i en el periodo j . Entonces los valores máximos de 1 día para el periodo j son:

$$RX1day_j = \max (RRa_{ij}) \quad (23)$$

15. Precipitación máxima en 5 días (RX5DAY)

Sea RR_{kj} la cantidad de precipitación para el intervalo de cinco días terminando en k , del periodo j . Entonces los valores máximos de 5-días para el periodo j son:

$$Rx5day_j = \max (RRa_{ij}) \quad (24)$$

16. Índice simple de intensidad diaria (SDII)

Sea RR_{wj} la cantidad diaria de precipitación en días húmedos. Si W representa el número de días húmedos en j , donde $RR_{wj} \geq 1 \text{ mm}$, entonces:

$$SDII_j = \frac{\sum_{w=1}^w RR_{ij}}{W} \quad (25)$$

17. Días de verano (SU25)

Sea Tx_{ij} la temperatura máxima diaria en el día i periodo j . Cuente el número de días cuando:

$$Tx_{ij} > 25^\circ\text{C} \quad (26)$$

18. Noches frías (TN10P)

Sea Tn_{ij} la temperatura mínima diaria en el día i en el periodo j y sea $TNin10$ el día calendario del percentil 10th centrado en una ventana de 5 días. El porcentaje del tiempo es determinado, donde:

$$Tn_{ij} < TNin10 \quad (27)$$

19. Noches calientes (TN90P)

Sea Tn_{ij} la temperatura mínima diaria en el día i en el periodo j y sea $TNin90$ el día calendario del percentil 90th centrado en una ventana de 5 días. El porcentaje del tiempo es determinado, donde:

$$Tn_{ij} < TNin90 \quad (28)$$

20. Temperatura mínima extrema (TNN)

Sea Tn_{kj} la temperatura mínima diaria en el mes k , periodo j . La mínima temperatura mínima diaria en cada mes es entonces:

$$TNN_{kj} = \min (Tn_{kj}) \quad (29)$$

21. Temperatura mínima más alta (TXN)

Sea Tx_{kj} la temperatura máxima diaria en el mes k , periodo j . La mínima temperatura máxima diaria cada

mes es entonces:

$$TXn_{kj} = \min (Tx_{kj}) \quad (30)$$

22. Noches tropicales (TR20)

Sea Tn_{ij} la temperatura mínima diaria en el día i en el periodo j . Cuente el número de días cuando:

$$Tn_{ij} > 20^\circ\text{C} \quad (31)$$

23. Días frescos (TX10P)

Sea Tx_{ij} la temperatura máxima diaria en el día i en el periodo j y sea $Txin10$ el día calendario del percentil 10th centrado en una ventana de 5 días. El porcentaje del tiempo es determinado, donde:

$$Tx_{ij} > TXin10 \quad (32)$$

24. Días calurosos (TX90P)

Sea Tx_{ij} la temperatura máxima diaria en el día i en el periodo j y sea $Txin90$ el día calendario del percentil 90th centrado en una ventana de 5 días. El porcentaje del tiempo es determinado, donde:

$$Tx_{ij} > Tx_{in90} \quad (33)$$

25. Temperatura máxima más baja (TNX)

Sea Tn_{kj} la temperatura mínima diaria en el mes k , periodo j . La máxima temperatura mínima diaria cada mes es entonces:

$$TNx_{kj} > \max (Tn_{kj}) \quad (34)$$

26. Temperatura máxima extrema (TXX)

Sea Tx_{kj} la temperatura máxima diaria en el mes k , periodo j . La máxima temperatura máxima diaria cada mes es entonces:

$$TXX_{kj} = \max (Tx_{kj}) \quad (35)$$

27. Duración de los periodos cálidos (WSDI)

Sea Tx_{ij} la temperatura máxima diaria en el día i en el periodo j y sea $Txin90$ el día calendario del percentil 90th centrado en una ventana de 5 días. Entonces el número de días por periodo es sumado donde, en intervalos de por lo menos 6 días consecutivos:

$$Tx_{ij} > TXin90 \quad (36)$$

RESULTADOS

Con el programa RCLimDex se calcularon los 27 índices de cambio climático para cada una de las 47 estaciones climatológicas del estado de Guerrero. El programa arroja como resultado el valor de la tendencia para cada uno de los índices en cada una de las estaciones climatológicas. Esta tendencia tiene tres posibles valores: positiva, negativa o nula. La presencia de una tendencia positiva o negativa indica un incremento o disminución respectivamente en el índice, en ambos extremos corresponde a la evidencia de la existencia de cambio climático. Mientras que una tendencia nula o cercana a cero indica que no

existe una señal contundente de cambio climático en el sitio de observación.

Dada la ubicación geográfica del estado de Guerrero y la altitud donde están instaladas las estaciones climatológicas utilizadas en este estudio, resulta evidente que los índices de Días de Hielo (ID0) y Días de Heladas (FD0) tengan una pendiente igual a cero. Por otra parte, los índices Días Húmedos Consecutivos (CWD), Rango Diurno de Temperatura (DTR), Duración de la Estación de Cultivo (GSL), Días con Precipitación Mayor a 20 mm (R20MM), Días con Precipitación Mayor a 50 mm (R50MM), Índice Simple de Intensidad Diaria de Precipitación (SDII), Temperatura Mínima Extrema (TNN), Temperatura Máxima Más Baja (TNX); Temperatura Mínima Más Alta (TXN), Temperatura Máxima

Extrema (TXX), Noches Frías (TN10P), Días Frescos (TX10P) y Días Calurosos (TX90P) presentaron tendencias poco significativas, lo cual describe una señal propia de variabilidad climática más que una tendencia de cambio climático como tal.

Once de los veintisiete índices están relacionados con precipitación y los otros dieciséis con temperatura. Posterior al cálculo de los de los 27 índices de tendencia de extremos climáticos, solo en once de ellos resultado evidente la existencia de cambio en el comportamiento del clima, de los cuales cinco están asociados con precipitación y seis con temperatura. En la tabla 3 se presentan los valores correspondientes a los once índices de extremos climáticos con tendencia significativa.

Tabla 3. Valores de tendencia significativa en 11 índices de extremos climáticos

CLAVE	CDD (Días)	CSDI (Días)	PRCPT OT (mm)	RX1D AY (mm)	RX5D AY (mm)	R10M M (Días)	R95P (Días)	R99P (Días)	SU25 (Días)	TR20 (Días)	WSDI (Días)
12003	1.0	0.5	3.2	-2.3	-2.8	0.4	-2.4	-4.4	-0.1	-2.9	0.0
12004	-0.1	1.0	-1.8	-0.4	-0.9	-0.1	-3.2	0.7	0.1	-4.1	-0.8
12006	0.3	0.1	-1.4	-0.4	-0.8	0.1	-5.6	-2.5	-0.1	-0.6	-0.5
12007	0.9	0.5	1.5	0.1	-0.1	0.1	-0.6	-0.6	0.0	-0.6	-0.3
12008	1.5	0.1	-2.2	-0.3	0.5	0.1	-2.1	-1.2	0.1	-0.4	0.4
12009	2.4	1.5	30.8	-0.1	0.4	1.4	5.5	-0.3	-0.2	0.3	0.5
12016	-0.1	-2.5	5.3	-0.8	0.0	0.2	-0.4	-2.5	-0.3	5.1	0.4
12019	0.8	0.1	1.2	0.1	0.1	0.0	2.5	1.2	-0.1	3.0	0.4
12020	1.1	0.2	-3.6	-0.9	-1.7	0.2	-7.0	-2.2	0.0	-3.3	-0.2
12023	1.7	NC	-4.4	-0.4	-0.3	-0.1	0.0	-0.9	0.3	4.6	NC
12027	1.6	NC	19.1	1.1	2.0	0.6	6.7	3.1	0.0	2.2	NC
12036	1.2	NC	-3.5	-0.6	-1.0	-0.1	-4.9	-1.2	0.0	2.4	NC
12037	1.0	NC	9.8	0.8	1.8	0.3	5.9	1.2	1.6	2.3	NC
12039	1.8	NC	0.0	-0.7	-0.6	0.2	-0.7	-0.7	0.0	-4.7	NC
12047	1.7	NC	2.0	1.0	0.4	0.1	3.1	1.2	-0.1	-2.6	NC
12048	1.5	-0.1	3.3	0.1	0.1	0.3	0.5	-0.4	0.1	1.6	0.0
12050	1.9	0.0	12.0	0.2	0.2	0.3	4.2	-1.7	0.0	1.3	0.4
12052	1.5	0.0	8.9	0.1	1.4	0.2	2.3	0.9	0.1	-0.5	0.0
12053	-2.0	0.1	9.2	-0.2	-0.2	0.1	1.0	0.8	0.0	-2.0	-0.2
12057	0.8	-0.1	-2.8	-0.2	-0.5	0.1	-0.1	0.6	2.2	0.0	0.3
12058	0.1	0.1	6.0	0.4	0.5	0.0	9.1	2.7	0.0	-0.8	-0.9
12063	-0.5	NC	-4.1	-0.6	-1.0	-0.1	-3.0	0.1	-0.1	-3.0	NC
12066	-2.5	0.2	0.1	-2.3	-11.5	0.1	-6.0	-9.3	0.0	-0.1	0.7
12071	1.6	-0.8	4.0	0.3	-0.5	0.3	-3.0	-1.6	0.1	3.1	-2.1
12076	0.7	0.2	5.3	0.6	-0.1	0.0	1.4	2.3	-2.6	-0.1	-0.3
12077	1.5	-0.2	16.1	0.8	1.3	0.3	11.0	6.8	-0.1	0.1	0.9
12080	0.0	0.1	-0.6	0.3	0.8	0.0	2.1	0.9	0.0	-2.4	0.0
12091	2.5	0.4	2.1	0.0	-0.7	0.2	-0.7	0.0	0.0	-4.5	-0.7
12093	1.0	0.2	-6.1	-0.5	-0.9	0.0	-2.9	-0.2	-0.3	-1.2	2.2
12095	1.7	0.2	10.6	0.0	-0.2	0.3	4.4	0.5	-0.1	-1.5	-0.1
12096	0.8	0.1	-1.3	-0.1	0.2	0.0	2.5	2.1	-0.1	0.3	0.1
12099	2.0	0.4	10.4	0.3	1.3	0.3	6.2	1.6	0.0	-1.4	0.2

12100	0.9	0.5	4.4	0.4	0.2	0.0	4.3	4.2	0.0	-1.3	-0.2
12106	-0.2	0.0	23.2	0.6	2.3	1.1	9.5	1.1	-0.2	0.0	-0.2
12107	-1.0	1.1	29.5	0.7	0.6	0.8	8.9	3.4	-0.2	-1.2	0.3
12114	0.2	NC	13.7	0.5	1.1	0.4	4.5	0.6	0.0	-0.4	NC
12116	1.0	NC	-4.4	-0.2	-0.8	0.0	-4.0	-5.0	0.0	2.3	NC
12117	1.2	NC	1.8	0.2	-0.2	-0.2	4.9	2.0	0.4	0.0	NC
12120	-0.4	NC	-18.4	-5.2	-7.1	0.1	-19.3	-15.1	0.7	0.2	NC
12121	-0.6	NC	5.0	-1.0	-2.5	0.3	-7.1	-2.0	0.1	1.1	NC
12123	0.7	NC	-1.3	0.3	-0.2	-0.1	0.9	2.3	-3.5	0.1	NC
12126	2.4	0.0	2.2	0.0	-0.5	0.2	1.0	1.2	-3.4	0.0	0.2
12135	-0.5	-0.1	1.2	0.4	0.3	-0.1	4.3	2.3	0.1	0.5	0.2
12138	2.2	1.4	5.8	0.5	-0.6	0.1	1.0	2.7	0.0	-2.8	1.0
12141	2.1	1.3	6.5	1.1	2.3	0.1	7.2	2.4	0.0	-0.8	0.8
12142	1.7	-0.3	11.0	2.0	2.0	0.2	7.8	3.1	0.2	0.3	-0.2
12156	1.8	-0.2	-7.9	-3.3	-5.8	-0.2	-5.7	-5.7	0.6	2.7	0.0

* NC indica que el índice no fue calculado debido a datos insuficientes en la estación climatológica.

* Las casillas sombreadas indican tendencias significativas tanto positivas como negativas. Que para los índices expresados en número de días parten de ± 1 unidad, mientras que para los índices expresados en mm parten en ± 5 unidades.

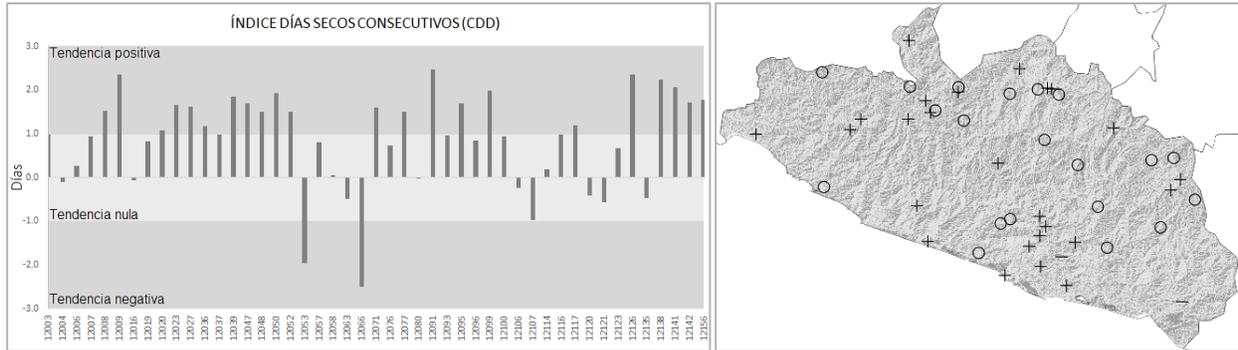


Figura 3. Tendencia del índice de Días Secos Consecutivos (CDD). La imagen izquierda muestra el valor de la tendencia por estación climatológica. La imagen derecha presenta la distribución geográfica de las estaciones con su tendencia: + indica tendencia positiva; - indica tendencia negativa; y O indica una tendencia neutra.

El índice de Días Secos Consecutivos (CDD) nos indica el aumento o disminución de los periodos de días consecutivos con precipitaciones inferiores a 1 mm. Se observó un incremento en la tendencia, que va desde 1 hasta 2.5 días, en 24 estaciones distribuidas en las diferentes regiones del estado, mientras que en extremo opuesto, en la región de la Costa Chica, específicamente en las estaciones de 12063 y 12066, de los municipios de San Marcos e Igualapa, se observó una tendencia negativa de -2.15 y -1.0 días respectivamente (ver figura 3).

Para el índice de Precipitación Total Anual de los Días Húmedos (PRCPTOT), que representa la precipitación anual acumulada cuando la precipitación diaria es mayor a 1 mm. En 19 estaciones existe una tendencia positiva de incremento, si bien esta tendencia se presenta en las diferentes regiones del estado, solo en la región de la Costa Grande se presentó este incremento en la

totalidad de las estaciones, llegando a ser de 30 mm en la estación 12009 ubicada en el municipio de Tecpan de Galeana. En el extremo opuesto, en la región Centro y Norte del estado, se observó una tendencia negativa en el índice, específicamente en las estaciones 12093, en el municipio de Tepecoacuilco de Trujano, 12120 y 12156, ambas en el municipio de Chilpancingo de los Bravo, con valores de -6.1, -18.4 y -7.9 mm respectivamente (ver figura 4).

Por otra parte, el índice de Días con Precipitación Mayor a 10 mm (R10MM), es un indicador para detectar el número de días en los que la precipitación superó los 10 mm. Se observó un incremento en la tendencia en dos localidades, en la estación 12009, instalada en el municipio de Tecpan de Galeana en la región de la Costa Grande, y en la estación 12106, instalada en el municipio Alcozauca de Guerrero en la región de la Montaña, con una tendencia positiva de

1.4 y 1.1 días respectivamente, en el resto de las estaciones se observó una variación de la tendencia poco significativa con valores menores a ± 1 un día (ver figura 5).

En el caso del índice de Días Muy Húmedos (R95P), que indica el incremento o decremento de días al año con precipitaciones que se encuentran en el percentil 95 en la serie de datos. Se observó la presencia de este índice en 39 de las 47 estaciones, 25 con una tendencia positiva y 14 con una tendencia negativa. Analizando los resultados por zona, observamos que en la región Norte se presentó una tendencia completamente neutra; para las dos estaciones instaladas en el región de Acapulco, en la 12003 se obtuvo decremento en la tendencia con -2.4 días, mientras que de forma opuesta, en la estación 12142 se calculó un valor de incremento en el índice de 7.8 días; para la región de Costa Chica y Costa Grande el índice tiene un comportamiento balanceado en las estaciones con valores positivos y negativos; mientras que para la región de la Montaña y Tierra Caliente se observan tendencias de incremento

positivas. El mayor incremento se presentó en la estación 12077, en el municipio de Ajuchitlán de Progreso en la región de Tierra Caliente, con un valor de 11 días. Por otra parte, la mayor disminución en el índice se observó en la estación 12120 con un valor de -19.3 días, en el municipio de Chilpancingo de los Bravo en la región centro (ver figura 6).

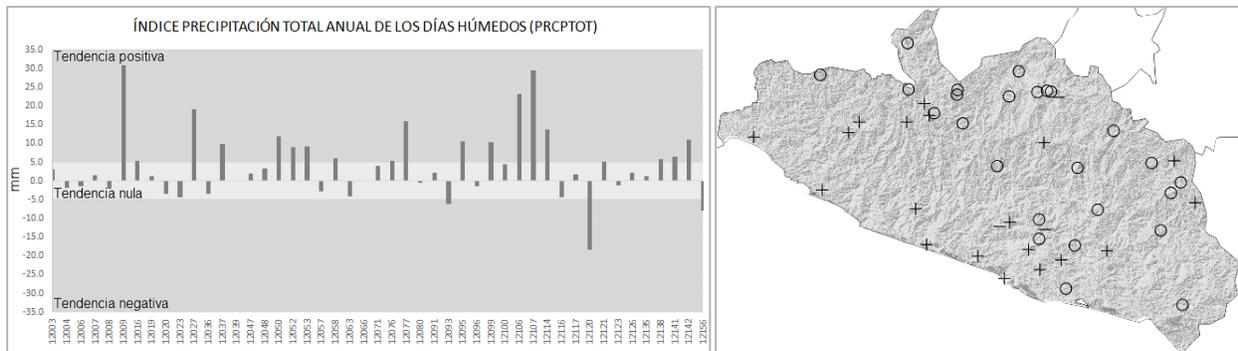


Figura 4. Tendencia del índice de Precipitación Total Anual de los Días Húmedos (PRCPTOT). La imagen izquierda muestra el valor de la tendencia por estación climatológica. La imagen derecha presenta la distribución geográfica de las estaciones con su tendencia: + indica tendencia positiva; - indica tendencia negativa; y O indica una tendencia neutra.

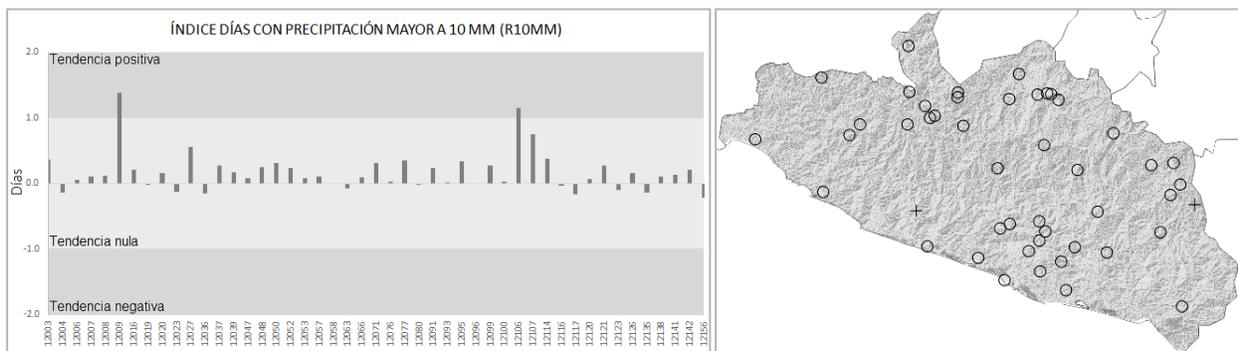


Figura 5. Tendencia del índice de Días con Precipitación Mayor a 10 mm (R10MM). La imagen izquierda muestra el valor de la tendencia por estación climatológica. La imagen derecha presenta la distribución geográfica de las estaciones con su tendencia: + indica tendencia positiva; - indica tendencia negativa; y O indica una tendencia neutra.

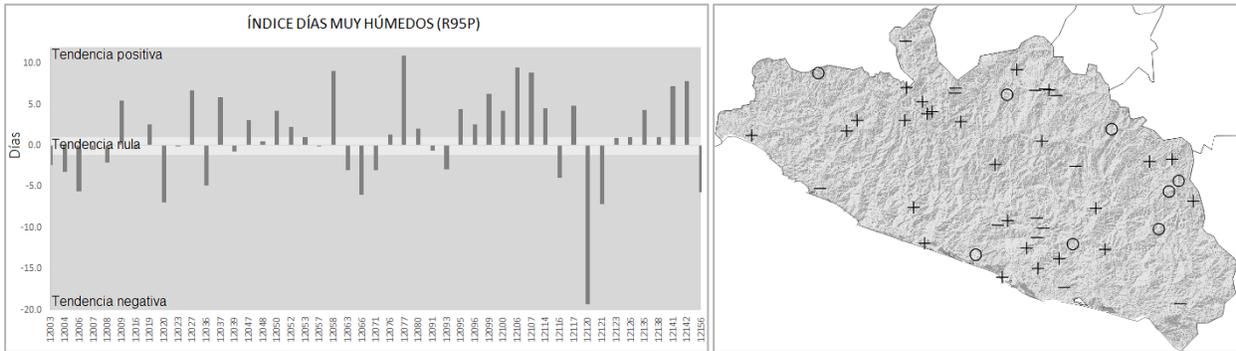


Figura 6. Tendencia del índice de Días Muy Húmedos (R95P). La imagen izquierda muestra el valor de la tendencia por estación climatológica. La imagen derecha presenta la distribución geográfica de las estaciones con su tendencia: + indica tendencia positiva; - indica tendencia negativa; y O indica una tendencia neutra.

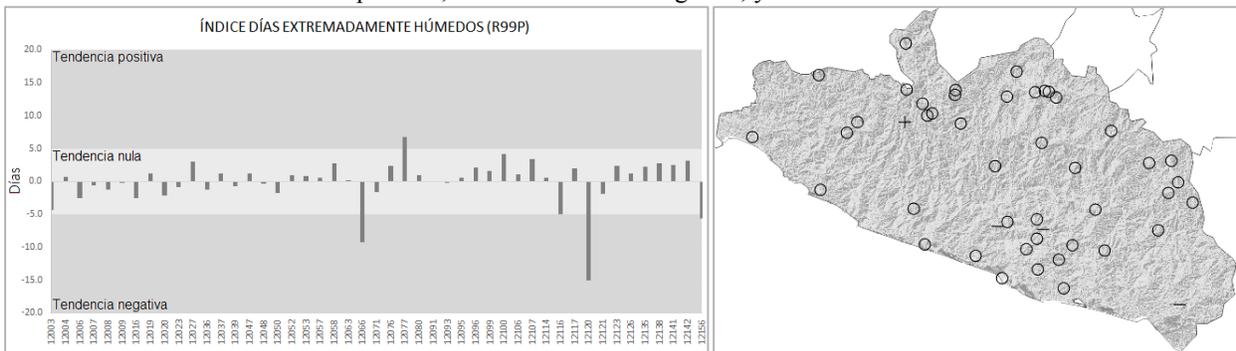


Figura 7. Tendencia del índice de Días Extremadamente Húmedos (R99P). La imagen izquierda muestra el valor de la tendencia por estación climatológica. La imagen derecha presenta la distribución geográfica de las estaciones con su tendencia: + indica tendencia positiva; - indica tendencia negativa; y O indica una tendencia neutra.

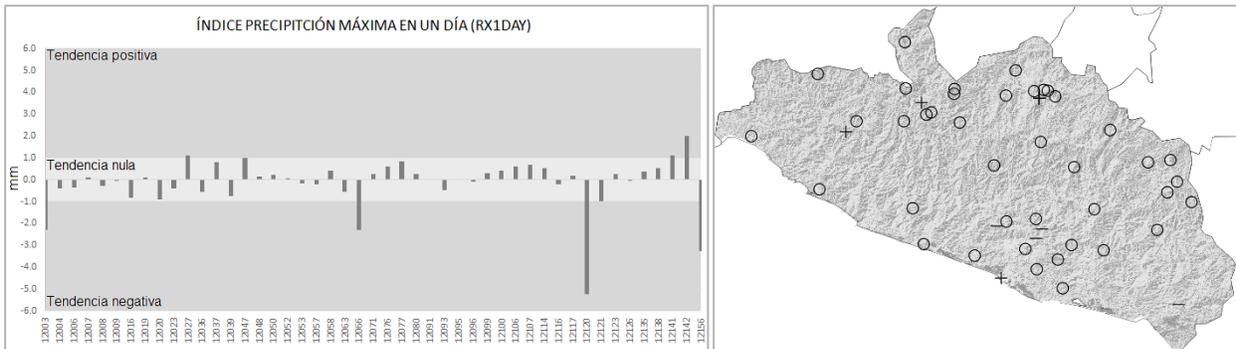


Figura 8. Tendencia del índice de Precipitación Máxima en un Día (RX1DAY). La imagen izquierda muestra el valor de la tendencia por estación climatológica. La imagen derecha presenta la distribución geográfica de las estaciones con su tendencia: + indica tendencia positiva; - indica tendencia negativa; y O indica una tendencia neutra.

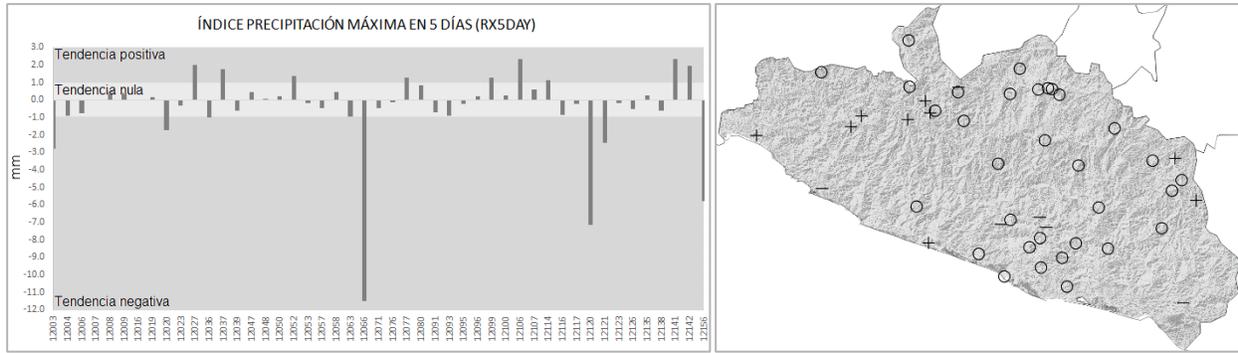


Figura 9. Tendencia del índice de Precipitación Máxima en cinco Días (RX5DAY). La imagen izquierda muestra el valor de la tendencia por estación climatológica. La imagen derecha presenta la distribución geográfica de las estaciones con su tendencia: + indica tendencia positiva; - indica tendencia negativa; y O indica una tendencia neutra.

El índice de Días Extremadamente Húmedos (R99P), permite identificar el aumento o disminución de los registros de precipitación que se encuentran en el percentil 99. En este índice, solo en la región de Tierra Caliente se observó un incremento de 6.8 días en el periodo de estudio, específicamente en la estación 12077, en el municipio Ajuchitlán del Progreso. En el extremo opuesto, se detectó un decremento en el índice en las regiones de Costa Chica, Centro y Norte del estado, específicamente en las estaciones de 12066, en el municipio de Igualepa, 12117, en el municipio Ixcateopan de Cuauhtémoc, 12120 y 12156, estas dos últimas instaladas en el municipio de Chilpancingo de la Bravo, con valores en el índice de -9.3, -5.0, -15.1 y -5.7 días respectivamente (ver figura 7).

En el caso del índice de Precipitación Máxima en un Día (RX1DAY), el cual determina la tendencia de incremento o decremento de la precipitación máxima acumulada en un día. Se observó un incremento en las regiones de Acapulco, Norte y Tierra Caliente, específicamente en las estaciones, 12142, en el municipio de Acapulco de Juárez, 12047, en el municipio de Iguala de la Independencia, 12027, en el municipio de Coyuca de Catalán, y 12141, en el municipio de Tlapehuala, con valores de 1.1, 1.0, 1.1 y 2.0 mm por día respectivamente. En el otro extremo, se detectó un decremento del índice en la región de Acapulco, Centro, Costa Chica y Costa Grande, en las estaciones 12003, en el municipio de Acapulco de Juárez, 12066, en el municipio de Iguala, 12120 y 12156, ambas en el municipio de Chilpancingo de los Bravo, y 12121, en el municipio de Petatlán, con valores de -2.3, -2.3, -5.2, -3.3 y -1.0 mm respectivamente (ver figura 8). Como último

índice asociado a la variable de precipitación, el índice de Precipitación Máxima en Cinco Días (RX5DAY) determina la tendencia de aumento o disminución de la precipitación máxima acumulada en periodos de cinco días. Se observó un incremento en el índice en las regiones Acapulco, Costa Grande, Montaña y Tierra Caliente, específicamente en las estaciones 12027, 12037, 12052, 12077, 12099, 12114, 12141, y 12142 con valores de 2.0, 1.8, 1.4, 1.3, 1.3, 1.1, 2.3 y 2.0 mm respectivamente. En el extremo opuesto, en siete estaciones se presentó una disminución de la tendencia, distribuidas en todo el estado con excepción de la región de la Montaña y Norte, específicamente en las estaciones 12003, 12020, 12063, 12066, 12120, 12121 y 12156 con valores de -2.8, -1.7, -1.0, -11.5, -7.1, -2.5 y -5.8 mm. Para el resto de las estaciones se presentó una tendencia poco significativa inferior a ± 5 mm (ver figura 9).

Con respecto a los índices relacionados con temperatura, en el índice de Duración de Periodos Fríos (CSDI), que nos indica los periodos de días contiguos donde la temperatura es menor al valor del percentil 10, se observó un incremento en la tendencia de un día por periodo en las regiones de Costa Chica, Costa Grande y Tierra Caliente, en las estaciones 12107, en el municipio de Ayutla de los Libres, 12009, en el municipio de Tecpan de Galeana, 12138, en el municipio de Ajuchitlán de Progreso, y 12141, en el municipio de Tlapehuala, con valores de 1.1, 1.5, 1.4 y 1.3 días respectivamente. En el extremo opuesto, solo en la estación 12016, en el municipio de Coyuca de Benítez en la región de la Costa Chica, se presentó un decremento de -2.5 días (ver figura 10).

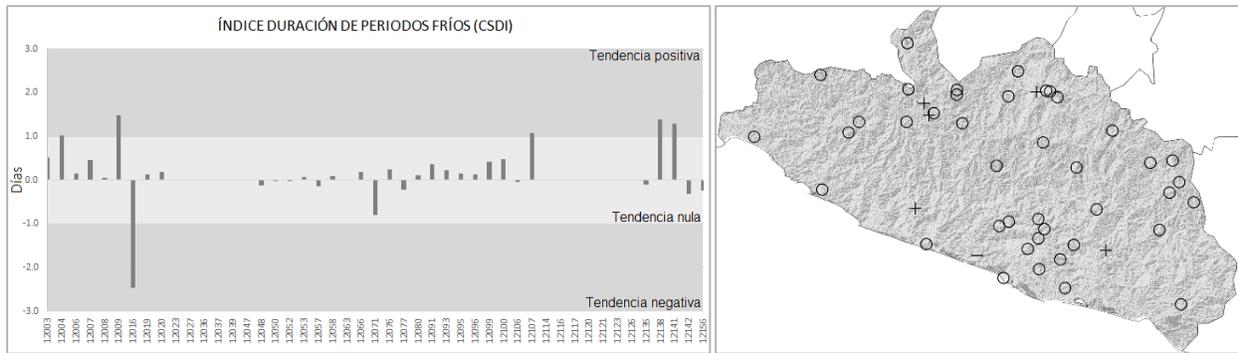


Figura 10. Tendencia del índice de Duración de Periodos Fríos (CSDI). La imagen izquierda muestra el valor de la tendencia por estación climatológica. La imagen derecha presenta la distribución geográfica de las estaciones con su tendencia: + indica tendencia positiva; - indica tendencia negativa; y O indica una tendencia neutra.

Por otra parte, en el índice de Días de Verano (SU25), que nos permite identificar la tendencia de aumento o disminución de días al año con temperatura superior a 25 °C. Se observó un incremento en la región de Tierra Caliente y Montaña en las estaciones 12037, en el municipio de Coyuca de Catalán, y 12057, municipio Malinaltepec, con valores de 1.6 y 2.2 días. En el otro extremo, se detectó una tendencia negativa en la región Centro y Norte del estado, específicamente en las estaciones 12076, en el municipio de Chilpancingo de los Bravo, 12126, en el municipio General Heliodoro Castillo, y 12123, en el municipio de Teloloapan, con decrementos en el índice de -2.6, -3.5 y -3.4 días respectivamente (ver

figura 11).

En relación al índice de Noches Tropicales (TR20), que presenta la tendencia de aumento o disminución de días al año cuya temperatura mínima es mayor a 20°C. Se observó un incremento en la tendencia en las siete diferentes regiones del estado, no en todas las estaciones, solo en 12 de ellas, con incrementos que van desde uno hasta cinco días. En el otro extremo, también a nivel estatal, en 15 estaciones se detectó una tendencia negativa en este índice, con valores que van desde -1.2 hasta -4.7 días (ver figura 12).

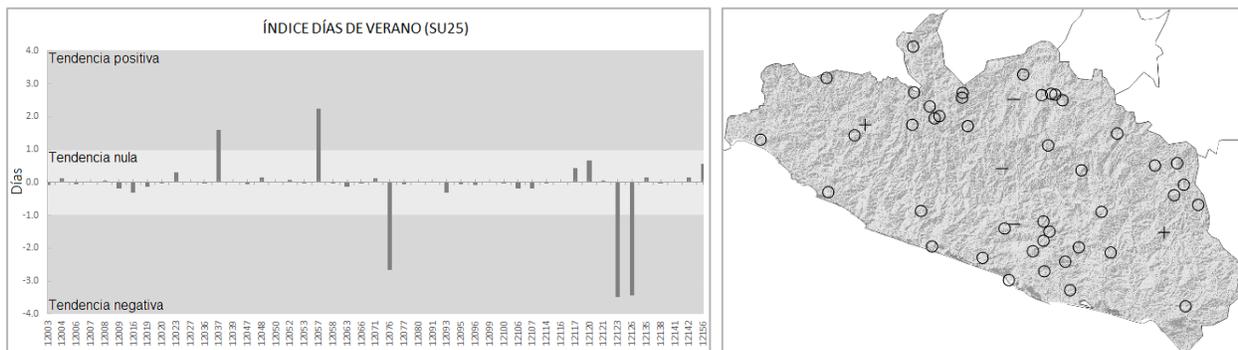


Figura 11. Tendencia del índice de Días de Verano (SU25). La imagen izquierda muestra el valor de la tendencia por estación climatológica. La imagen derecha presenta la distribución geográfica de las estaciones con su tendencia: + indica tendencia positiva; - indica tendencia negativa; y O indica una tendencia neutra.

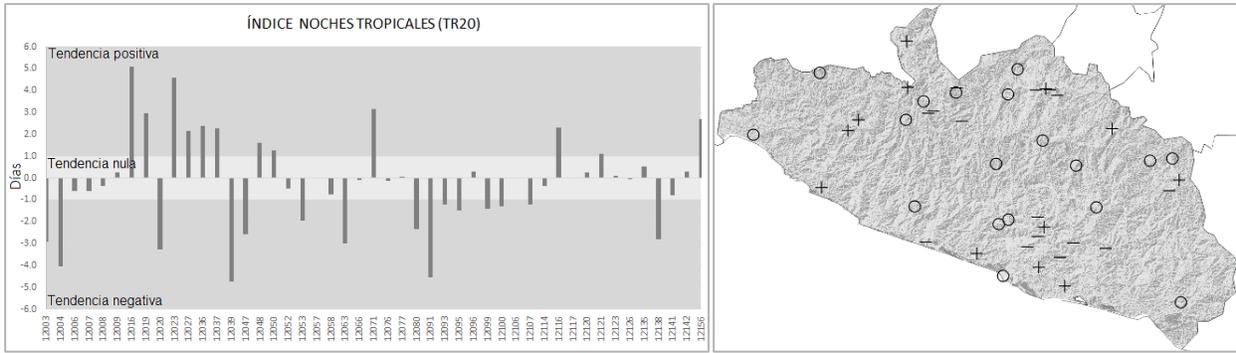


Figura 12. Tendencia del índice de Noches Tropicales (TR20). La imagen izquierda muestra el valor de la tendencia por estación climatológica. La imagen derecha presenta la distribución geográfica de las estaciones con su tendencia: + indica tendencia positiva; - indica tendencia negativa; y O indica una tendencia neutra.

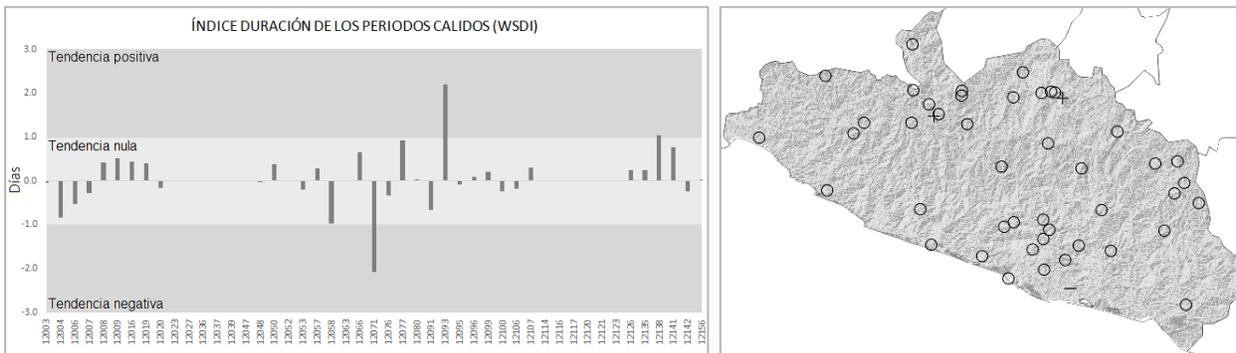


Figura 13. Tendencia del índice de Duración de Periodos Cálidos (WSDI). La imagen izquierda muestra el valor de la tendencia por estación climatológica. La imagen derecha presenta la distribución geográfica de las estaciones con su tendencia: + indica tendencia positiva; - indica tendencia negativa; y O indica una tendencia neutra.

Finalmente, en el índice de Duración de los Periodos Cálidos (WSDI), que indica la tendencia en número de periodos con temperaturas máximas superiores al percentil 90, se observó un incremento positivo en la región Norte y Tierra Caliente, específicamente en las estaciones 12093, municipio de Tepeoacuilco, y

12138, municipio de Ajuchitlan del Progreso, con valores de 2.2 y 1.0 días respectivamente. En el otro extremo, solo en la región de la Costa Chica, en la estación 12071, en el municipio de San Marcos, se detectó una tendencia negativa con un valor de -2.0 días (ver figura 13).

CONCLUSIONES

Este estudio presentó el análisis de tendencias de 27 índices de extremos climáticos de precipitación y temperatura propuestos por el Grupo de Expertos en Detección e Índices de Cambio Climático en el Estado de Guerrero para el periodo 1971-2000.

Para el análisis se utilizaron 47 estaciones climatológicas tradicionales que cumplieron con al menos 85% de datos en el periodo de estudio, aprobaron los filtros de control de calidad (consistencia temporal, consistencia interna, congruencia de datos en segmentos locales y validación de rango en datos diarios) y correspondieron a series homogéneas de datos.

De los once índices asociados a precipitación, en tres

de ellos existe una evidente tendencia positiva de incremento, estos son: Precipitación Total Anual de los Días Húmedos, Días Muy Húmedos y Días Extremadamente Húmedos. Por otra parte, en los índices de Días secos consecutivos, Días con Precipitación Mayor a 10 mm, Precipitación Máxima en un Día y Precipitación Máxima en 5 Días se presentó el incremento de este índice de manera discreta. El incremento predominante fue el de Precipitación Total Anual de los Días Húmedos con hasta 30 mm de incremento anual en la estación 12009, ubicada en el municipio de Tecpan de Galeana en la región de la Costa Grande.

Para el caso de los índices asociados a temperatura, solo los índices de Noches Tropicales y Duración de los Periodos Cálidos tuvieron un aumento positivo

bien definido en la tendencia. Una pendiente ligeramente significativa se encontró en los índices de Duración de Periodos Fríos y Días de Verano.

A partir de los resultados, se muestra que existe una tendencia alta de cambio climático sobre las zonas noroeste, oeste, sur y suroeste del estado de Guerrero, manteniendo una presencia en menor escala sobre la zona norte. Esta tendencia impacta principalmente en la zona norte de la sierra madre del sur y en la zona sur de la cuenca del río balsas; también se muestra que existe un comportamiento en los extremos climáticos con tendencia baja sobre la zona sur de la cuenca río balsas, pero afectando principalmente a la región sureste y noreste de Guerrero, manteniendo una señal muy baja de afectación a la sierra madre del sur con este tipo de tendencia.

En el Estado de Guerrero existe una señal significativa de incremento en los extremos climáticos en cinco índices (Precipitación Total Anual de los Días Húmedos, Días Muy Húmedos, Días Extremadamente Húmedos, Noches Tropicales y Duración de los Periodos Cálidos), mientras que en seis de ellos (Días secos consecutivos, Días con Precipitación Mayor a 10 mm, Precipitación Máxima en un Día, Precipitación Máxima en 5 Días, Duración de Periodos Fríos y Días de Verano) se percibe un ligero, pero no despreciable, incremento. Para el caso de los dieciséis índices restantes no existe una evidencia contundente de extremos climáticos.

Resalta el comportamiento de las dos estaciones climatológicas ubicadas en el municipio de Acapulco de Juárez, la 12003 y 12142, que presentan valores opuestos en la tendencia en los índices asociados a precipitación RX1DAY, RX5DAY, R95P y R99P. También se observa este mismo efecto en el índice TR20 asociado a temperatura. Esta diferencia en el comportamiento del clima se debe a que la estación 12142 se ubica cercana a la costa, mientras que la 12003 está a 31 kilómetros dentro del continente y con una altitud mayor a 33 metros.

La mayoría de los índices utilizados en este estudio pueden ser aplicados a diferentes escalas de análisis, ya sean nacionales, estatales, municipales e incluso a nivel de cuenca hidrográfica. El requisito fundamental corresponde a contar con series de datos completas, o con al menos 85% de ellos, de las variables de precipitación acumulada diaria, temperatura máxima diaria y temperatura mínima diaria. Además, se debe verificar que los datos sean consistentes mediante la aplicación de filtros de control de calidad y homogeneidad.

Finalmente, ante la evidente detección de extremos climáticos asociados a precipitación y temperatura en el territorio del Estado de Guerrero, se hace imperativo trabajar en acciones para mitigar los efectos del cambio climático en los sistemas naturales y especies que habitan esta región, creando acciones que encaminen a la adaptación natural o asistida y evitar el deterioro.

RECONOCIMIENTOS

Los datos del CLICOM fueron proporcionados por la Coordinación General del Servicio Meteorológico Nacional.

REFERENCIAS

Aguirre-Jaime, A. (1994). Introducción al tratamiento de series temporales: aplicación a las ciencias de la salud. Ediciones Díaz de Santos, España. ISBN 84-7978-153-X.

Asociación Española de Normalización y Certificación. (2004). Norma UNE 500540 - Redes de estaciones meteorológicas automáticas: Directrices para la validación de registros meteorológicos procedentes de redes de estaciones automáticas. Comité Técnico AEN/CTN 176 Meteorología y Climatología.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2015). Panorama sociodemográfico de México 2015. Encuesta Intercensal 2015. ISBN 978-607-739-718-2.

Green, T., Taniguchi, M., Koo, H., Gurdak, J., Allen, D., Hiscock, K., Treidel, H., Aureli, A. (2011). Beneath the surface of global change: Impacts of climate change of groundwater. *Journal of Hydrology* 405, Pages 532-560.

Panel Intergubernamental del Cambio Climático. (2013). Cambio Climático 2013: Bases Físicas. ISBN 978-92-9169-338-2.

Karmeshu, N. (2012). Trend Detection in Annual Temperature & Precipitation using the Mann Kendall Test – A Case Study to Assess Climate Change on Select States in the Northeastern United States. Master of Environmental Studies Capstone Projects 47.

Karl, T.R., Easterling, D.R. (1999). Climate extremes: selected review and future research directions. *Climatic Change* 42, Pages 309–325.

Martínez, J., Fernández, A. (2004). Cambio Climático: una visión desde México. Instituto Nacional de Ecología, Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. ISBN 968-817-704-0.

Mavromatis T., Stathis D. (2011). Response of the Water Balance in Greece to Temperature and Precipitation Trends. *Theoretical and Applied Climatology* 104, Pages 13-24.

Motiee, H., McBean, E. (2009). An Assessment of Long Term Trends in Hydrologic Components and Implications for Water Levels in Lake Superior. *Hydrologic Research*, 40, Pages 564-579.

Onoz, B., Bayazit, M. (2003). The Power of Statistical Test for Trend Detection”. *Turkish Journal of Engineering & Environmental Sciences* 27, Pages 247-251.

Organización Meteorológica Mundial. (2007). Función de las Normales Climatológicas en un Ambiente Cambiante. Programa Mundial de datos de Vigilancia del Clima. WMO/TD No. 1377.

Peterson, T.C., Zhang, X., Brunet-India, M., Aguirre, J.L.V. (2007). Changes in North American extremes derived from daily weather data. *Journal of Geographical Research Atmospheres* 113, D07209.

Tabari, H. Marofi, S., Aein, A., Talae, P.H., Mohammadi, K. (2011). Trend Analysis of Reference Evapotranspiration in the Western half of Iran. *Agricultural and Forest Meteorology* 151, Pages 128-136.

U.S. Environmental Protection Agency. (2016). Climate Change Indicators: U.S. and Global Temperature. Página web <https://www.epa.gov/climate-indicators/climate-change-indicators-us-and-global-temperature>, consultada el 23 de enero de 2017.

U.S. Environmental Protection Agency. (2016). Climate Change Indicators: U.S. and Global Precipitations. Página web <https://www.epa.gov/climate-indicators/climate-change-indicators-us-and-global-precipitation>, consultada el 23 de enero de 2017.

Vanlesberg, S., Fibbi, L., Ibarrola, S., Crotti, Ch. (2004). Datos meteorológicos, su control y tratamiento”, Centro de Investigación, Observación y Monitoreo Territorial y Ambiental, Universidad Católica de Santa Fe, Argentina.

Zhang, X., Yang, F. (2004). RCLimDex (1.0) User Guide. Climate Research Branch Environment Canada: Downsview, Ontario, Canada.