

**Universidad Autónoma de Querétaro**

Facultad de Ciencias Naturales

Licenciatura en Geografía Ambiental

**CAMBIO CLIMÁTICO Y SEQUÍAS EN QUERÉTARO**

Tesis individual

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de

Licenciado en Geografía Ambiental

**Presenta:**

Francisco Solsona Igual

**Dirigido por:**

Hugo Luna Soria

**SINODALES**

Hugo Luna Soria

Presidente

Juan Alfredo Hernández Guerrero

Secretario

Diana Patricia García Tello

Vocal

Centro Universitario

Querétaro, Qro.

Octubre de 2024

**México**

La presente obra está bajo la licencia:  
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.es>



CC BY-NC-ND 4.0 DEED

Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0 Internacional

### Usted es libre de:

**Compartir** — copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato

La licenciante no puede revocar estas libertades en tanto usted siga los términos de la licencia

### Bajo los siguientes términos:



**Atribución** — Usted debe dar [crédito de manera adecuada](#), brindar un enlace a la licencia, e [indicar si se han realizado cambios](#). Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que usted o su uso tienen el apoyo de la licenciante.



**NoComercial** — Usted no puede hacer uso del material con [propósitos comerciales](#).



**SinDerivadas** — Si [remezcla, transforma o crea a partir](#) del material, no podrá distribuir el material modificado.

**No hay restricciones adicionales** — No puede aplicar términos legales ni [medidas tecnológicas](#) que restrinjan legalmente a otras a hacer cualquier uso permitido por la licencia.

### Avisos:

No tiene que cumplir con la licencia para elementos del material en el dominio público o cuando su uso esté permitido por una [excepción o limitación](#) aplicable.

No se dan garantías. La licencia podría no darle todos los permisos que necesita para el uso que tenga previsto. Por ejemplo, otros derechos como [publicidad, privacidad, o derechos morales](#) pueden limitar la forma en que utilice el material.

## Índice

1. Resumen.....	3
2. Abstract .....	3
3. Introducción .....	4
4. Antecedentes .....	5
5. Área de estudio .....	7
6. Métodos .....	11
Fase 1. Creación de malla hexagonal.....	11
Fase 2. Cálculo de valores SPDI.....	12
2.1 Cálculo de SPDI.....	12
2.2 Cálculo de valores calibrados scPDSI .....	14
Fase 3. Test de Mann Kendall para cada sitio.....	15
Fase 4. Regionalización de los resultados.....	15
7. Resultados .....	16
8. Conclusiones.....	20
9. Referencias bibliográficas .....	22
10. Anexos .....	26

## **1. Resumen**

Las sequías son un problema que está cobrando relevancia en la actualidad. Patrones climáticos globales se ven afectados por el cambio climático que, a su vez, afecta la frecuencia e intensidad con la que ocurren los fenómenos climáticos como huracanes, inundaciones y sequías. El objetivo es conocer de qué manera las sequías y sus patrones de intensidad y frecuencia se han visto modificados en los últimos 58 años (1961-2021) en las tres regiones del estado de Querétaro, presentando en esta investigación el índice scPDSI para una malla hexagonal de la zona de estudio. Los resultados demuestran que las tres zonas de estudio han presentado cambios en los patrones de humedad en el suelo. Las estaciones en el eje neovolcánico y la sierra madre oriental respectivamente, presentan un aumento en la frecuencia e intensidad de periodos de sequía agrícola; mientras que la región de la mesa del centro, presenta una reducción de intensidad y frecuencia en los periodos de sequía agrícola. Los resultados son de vital importancia ya que permiten a gobierno, instituciones y sociedad civil, prepararse para responder al comportamiento cambiante de las sequías.

Palabras Clave: Cambio climático; sequía; vulnerabilidad, sequía agrícola, scPDSI.

## **2. Abstract**

Droughts are a problem that is currently gaining relevance. Global climate patterns are affected by climate change which, in turn, affects the frequency and intensity with which climatic phenomena such as hurricanes, floods and droughts occur. The objective is to know how droughts and their patterns of intensity and frequency have been modified in the last 58 years (1961-2021) in the 3 regions of the state of Querétaro, presenting in this research the scPDSI index for a hexagonal grid covering the region of interest. The results show that the 3 regions have had changes in soil moisture patterns. The stations in the Eje Neovolcanico and Sierra Madre Oriental regions, respectively, showed an increase in the frequency and intensity of periods of agricultural drought; while the central mesa region, showed a reduction in intensity and frequency in periods of agricultural drought. The results are of great importance as they enable government, institutions, and civil society to prepare to respond to the changing behavior of droughts.

Keywords: Climate change; drought, vulnerability, agricultural drought, scPDSI.

### 3. Introducción

El propósito de este trabajo es realizar un análisis para conocer el comportamiento histórico de las sequías en las zonas de estudio, en este caso las 3 regiones fisiográficas que conforman el estado de Querétaro. Se utilizará información de estaciones meteorológicas (temperatura promedio y precipitaciones) para analizar información meteorológica en el estado de Querétaro. Debido a que el estado se encuentra dividido en 3 regiones fisiográficas el análisis se centrará en el registro de datos históricos para comparar las 3 regiones. El primer paso es obtener los datos climáticos, para esto se utilizó la base de datos de *TerraClimate: Clima y balance hídrico para la superficie terrestre global*, de la universidad de Idaho (Abatzoglou, et al., 2018), que cuenta con una disponibilidad temporal de datos de 1958 hasta el año 2021.

Se utilizarán los datos climáticos para generar la evapotranspiración mensual por el método de Thornthwaite (1948) (Vicente-Serrano *et al.*, 2010; Beguería *et al.*, 2014) y posteriormente generar el índice *scPDSI* o índice estandarizado y calibrado de severidad de sequías utilizado por Ma *et al.* (2014) para analizar estaciones climáticas en distintos puntos del planeta, y por Campos-Aranda (2018) para analizar el cambio en las condiciones climáticas de las distintas regiones del estado de San Luis Potosí en México. El método es una versión estandarizada del Índice de Severidad de Sequías de Palmer (PDSI) por sus siglas en inglés, método propuesto por Palmer (1965) para analizar la propensión y severidad de las sequías en Estados Unidos.

El propósito de este trabajo de investigación es abonar al conocimiento del comportamiento del fenómeno de las sequías en el estado de Querétaro. Conocer más a fondo no solo el comportamiento actual de las sequías, pero el cambio en sus patrones de intensidad y espacialidad. Esto permitirá a tomadores de decisiones en el ámbito privado y público prepararse para posibles cambios en la forma en que este fenómeno impacta el territorio. De igual manera el aportar el conocimiento generado en esta investigación será de ayuda para académicos o población en general que busquen adentrarse en el conocimiento del comportamiento de este fenómeno.

La falta de acceso a la información sobre las consecuencias de la crisis climática a pequeña escala impide y dificulta la toma de decisiones, pues aunque existen incentivos internacionales tales como los que emergen a partir del Programa de las Naciones Unidas (ONU, 2015; PNUD, 2019) para el Desarrollo en sus enfoques de la Agenda 2030 como la prevención de la crisis y el aumento de la

resiliencia de las poblaciones, muchas veces las consecuencias de la crisis no se consideran en la vida cotidiana.

En el reporte titulado *Climate Change* (IPCC, 2007) se pronostica que el cambio climático ocasionará que en las zonas áridas y latitudes medias de los trópicos las precipitaciones anuales se vean reducidas, mientras que en las regiones semiáridas se verá reducido aún más el acceso a recursos hídricos. Estos cambios en los patrones de precipitación vienen acompañados de una elevación en la temperatura de la superficie terrestre, al respecto, en el quinto reporte de *Climate Change* (IPCC, 2012) se menciona la probabilidad que durante el siglo XXI ocurran incrementos en la frecuencia y magnitud de temperaturas cálidas extremas y disminuciones en los extremos fríos.

#### **4. Antecedentes**

Un estudio realizado por Villers y Trejo (2000) muestra que los cambios ocasionados por el cambio climático, como el aumento de la temperatura, favorecen el establecimiento de comunidades tropicales, restando terreno a bosques templados de encino y de coníferas establecidos en climas templados y semifríos; estos últimos desaparecerían. Los mismos autores señalan que el pastizal y ciertos tipos de matorrales con afinidades templadas, serían desplazados por los matorrales xerófilos con preferencias de climas cálidos y más secos.

Aterrizar el conocimiento que se tiene sobre las consecuencias de la crisis climática en la escala local, puede ser una herramienta útil a la concientización de las personas sobre cuán vulnerables son ante fenómenos como las sequías de tal forma que se generen planes de acción para reducir su vulnerabilidad, esto es la propensión o predisposición a ser afectado negativamente por sequías. (IPCC, 2014)

En el continente americano Below, Grover-Kopec y Dilley (2007) realizaron un estudio de las sequías para un periodo de 100 años (1900-2004), en este se muestra que las américas tienen una propensión del 23 % de sufrir algún grado de sequía. Se considera como sequía a un lapso caracterizado por un prolongado y anormal déficit de humedad (CONABIO, 2015). En el mismo estudio se muestra que para este periodo 12 millones de personas perdieron la vida a nivel global consecuencia de las sequías, y se registraron pérdidas monetarias de 78.9 millones de dólares. Los resultados del estudio muestran una reducción del 56 % de eventos de sequía a nivel global, pero la pérdida de vidas muestra un aumento del 20 % y las pérdidas monetarias un aumento de 35 %.

Un estudio de Swain y Hayhoe (2015) proyecta que en América del Norte las primaveras y veranos tendrán climas cada vez más extremos, indicando que el cambio climático podría afectar el ciclo hidrológico se espera que exista un aumento en la frecuencia de climas extremos tanto de temporada de lluvias como en la temporada de secas. En el sur de Estados Unidos y México se espera que en verano la temporada sin lluvias aumente gradualmente, de igual manera durante primavera se proyecta que las condiciones secas sean cada vez más comunes (Wang, 2005).

En México, García-Acosta (1993) presenta una revisión histórica de sequías a escala regional, sea desde México prehispánico hasta el siglo XX, en el cual se muestra que los registros de sequías en la región Centro-Sur y Sur no comenzaron hasta 1521, mientras que en las regiones Centro y Centro Norte se tienen 100 registros en el México prehispánico de sequías. Para el siglo XIX e inicios del XX a nivel regional se tiene registro de al menos 39 sequías de distintas intensidades, de las cuales la más intensas y prolongadas aparecen en la segunda mitad del siglo (Contreras, 2005). Los estados que se vieron azotados por los eventos más importantes durante este siglo fueron Querétaro y San Luis Potosí con 13 eventos de sequía, seguido por Nuevo León con 9 eventos.

Durante el siglo XX se presentaron en Querétaro cuatro grandes periodos de sequía, el primero de 1948-1954 de intensidad regular, los siguientes 4 periodos de sequía (1960-1964, 1970-1978, 1993-1996 y 1998) fueron de intensidad severa, la segunda mitad de la década vio afectado ampliamente el norte de México, Querétaro incluido.

En México, el INECC (2015) registra un aumento en la frecuencia de los fenómenos meteorológicos extremos como días de calor extremo y disminución en la frecuencia e intensidad de fenómenos meteorológicos como heladas, así como un aumento de ciclones de categoría 3 o más y sequías más severas que han llegado a afectar hasta a un 90 % del territorio nacional. A nivel estatal el Centro Nacional para la Prevención de Desastres (2018) muestra que los estados más propensos a eventos de sequías son: Durango, Chihuahua y Coahuila; en segundo orden: Nuevo León, Zacatecas, San Luis Potosí, Aguascalientes, Guanajuato y Querétaro, sin embargo, la CONABIO (2015) incluye entre los Estados más propensos a las sequías a Hidalgo y Tlaxcala.

En el periodo 2000-2015 se han presentado cinco eventos importantes desde el norte de México hasta la región central: entre 2000 y 2003, en 2006, entre 2007 y 2008, en 2009 y entre 2010 y 2012. Estas sequías afectaron principalmente al sector agrícola y ganadero, tan sólo en el periodo 2011-2012 las sequías afectaron 130 millones de hectáreas, más del 60 % del territorio nacional con una marcada tendencia en el centro, centro-norte de México. Al menos hasta la segunda década del siglo

XXI podemos hablar de 7 eventos de sequías excepcionales, agregando la del periodo 2019-2020 y la del año 2021, está última considerada la más fuerte y extensa en casi 10 años desde la sequía ocurrida en el 2011 (ICACC, 2021).

Protección Civil del estado de Querétaro (2015) señala que en la zona serrana los municipios más afectados por sequías son Jalpan de Serra, Arroyo Seco y Landa de Matamoros, mientras que en el semidesierto son Cadereyta, Tolimán, Colón, Ezequiel Montes, San Joaquín y Peñamiller, por último, en la zona centro-sur los municipios más afectados son Querétaro, Huimilpan, Amealco de Bonfil y San Juan del Río. Los municipios de Corregidora, Pinal de Amoles, Arroyo Seco, El Marqués, Pedro Escobedo, San Juan del Río y Tequisquiapan no son considerados como los más afectados.

## 5. Área de estudio

Las tres provincias fisiográficas sin litoral que conforman el área de estudio se encuentran en el centro de México y colindan al norte con la Llanura Costera del Golfo Norte, y al sur con la Sierra Madre del Sur (Ver figura 1). Cada una presenta una serie de características particulares que las distinguen de las otras regiones.

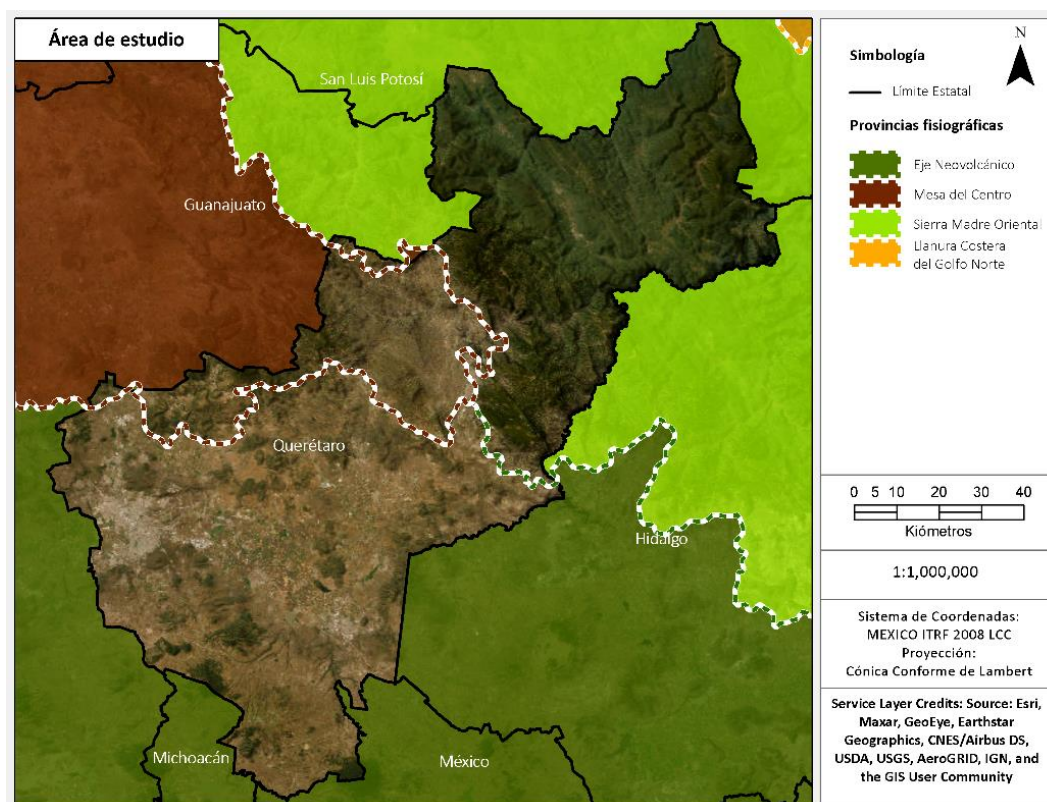


Figura 1. Fisiografía en el área de estudio. Fuente: Elaborado con información de la CONABIO (2008).



La provincia que se encuentra al noreste del estado es la **Sierra Madre Oriental**, se trata de una cadena montañosa muy elevada que recorre del norte al sur de México con altitudes que superan los 3000 msnm en algunos puntos. La región está formada por una serie de sierras y cordilleras que se extienden a lo largo de 1200 kilómetros. La vegetación que se encuentra generalmente son bosques de pino y encino, así como una amplia variedad de fauna que incluye especies como el oso negro (el carnívoro más grande en el estado de Querétaro), venados, coyotes y pumas.

En cuanto al clima en la región es muy variado y depende en gran medida de la altitud y las topoformas que lo conforman (Ver figura 2), en promedio la temperatura ronda los 30°C en verano y se puede mencionar que en las partes más altas el clima es frío y húmedo, mientras que en las zonas más bajas el clima puede ser más cálido y seco. En general la región tiene un clima tropical, con una temporada de lluvias de Mayo a Octubre y una temporada seca de Noviembre a Abril. En la región las precipitaciones anuales varían entre los 600 y 2000 milímetros dependiendo de la altitud y la ubicación.

Por otro lado, en el centro-este del estado se encuentra la **Mesa del Centro**, esta es una gran meseta que en promedio tiene una altitud de 2000 m.s.n.m., aunque en algunos puntos puede alcanzar los 3000 m.s.n.m. La región tiene una topografía generalmente plana o ligeramente ondulada, con algunas elevaciones y cerros aislados, está rodeada por cadenas montañosas de la Sierra Madre Occidental y la Sierra Madre Oriental, y es atravesada por varios ríos de gran importancia como el Lerma y el Pánuco. La región se caracteriza por un suelo fértil que ha permitido el desarrollo de agricultura y ganadería. La vegetación que predomina son los pastos y matorrales, sin embargo, en las mayores elevaciones se pueden encontrar bosques de pino y encino.

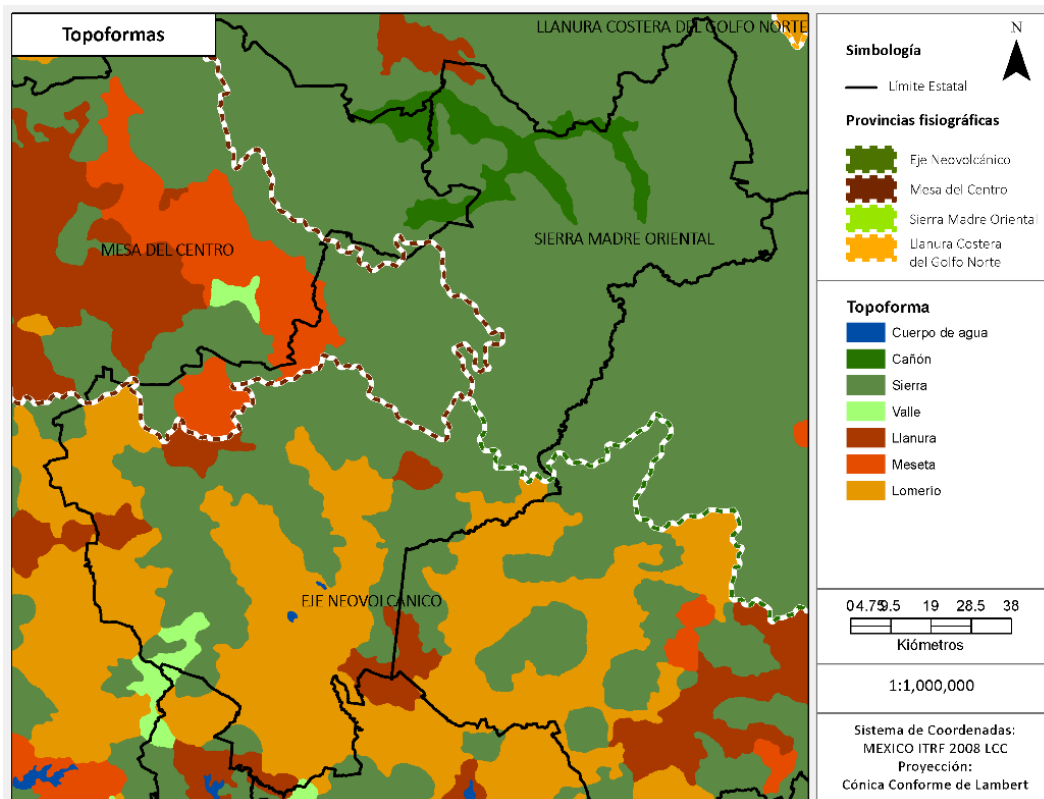
En cuanto al clima es generalmente semiárido a templado con lluvias escasas y concentradas en verano, la temporada de lluvias de Mayo a Octubre y una temporada seca de Noviembre a Abril. La precipitación anual varía entre los 400 y 800 milímetros dependiendo de la altitud y orografía. Las temperaturas son muy extremas por lo que en el día pueden alcanzar los 35°C fácilmente y durante la noche bajar hasta los 0°C

Finalmente, al suroeste del estado se encuentra el **Eje Neovolcánico**, es una zona de alta montaña que tiene una altitud promedio de 3000 m.s.n.m. la cual está conformada por varios volcanes activos e inactivos como el Popocatepetl, el Iztaccíhuatl y el Citlaltépetl (Pico de Orizaba). Tiene una topografía muy accidentada y cuenta con valles, cañones y barrancas, así como una gran cantidad de río y arroyos que descienden de las montañas. Tiene una gran variedad de vegetación que se ve

influenciada por la altitud y humedad. En las zonas más altas predominan los pastos y arbustos, mientras que en las zonas más bajas abundan los bosques de coníferas, encinos y matorrales.

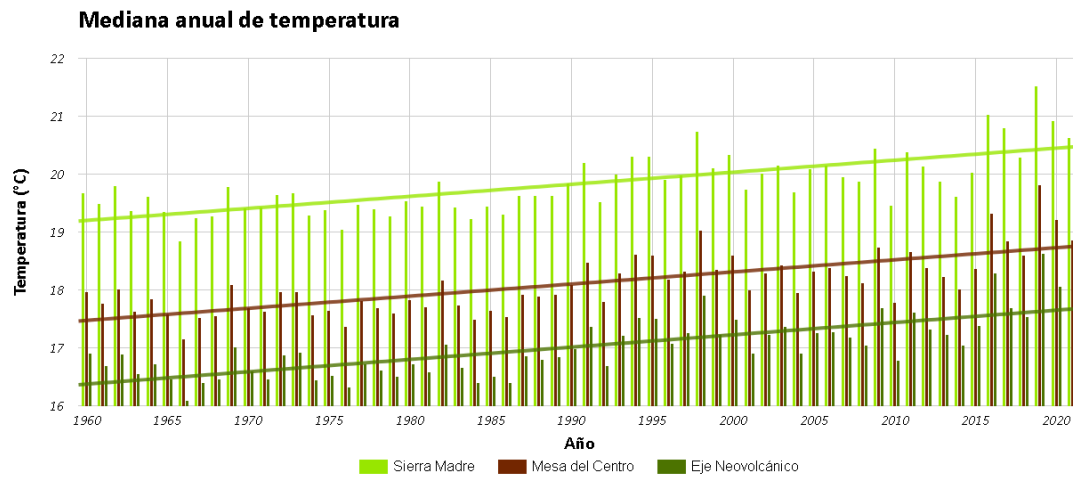
El clima en el Eje Neovolcánico es muy variado, en general se trata de un clima templado y húmedo en las zonas más altas, con lluvias frecuentes en verano y temperaturas frías en invierno que pueden llegar hasta los 0°C. En las zonas más bajas el clima es más cálido y seco con una media anual de 20°C. La temporada de lluvias se extiende de Mayo a Octubre, temporada en que se pueden presentar abundantes precipitaciones y tormentas eléctricas. La precipitación anual promedio varía entre los 600 a 1000 milímetros en las zonas más bajas, mientras que en las zonas más altas existe una mayor cantidad de precipitaciones a lo largo de la temporada de lluvias.

Cada una de las regiones presenta un sistema de topoformas distinto (Ver figura 2) que afecta en gran medida la distribución y cantidad de precipitaciones que puede llegar a presentar cada una de las provincias.



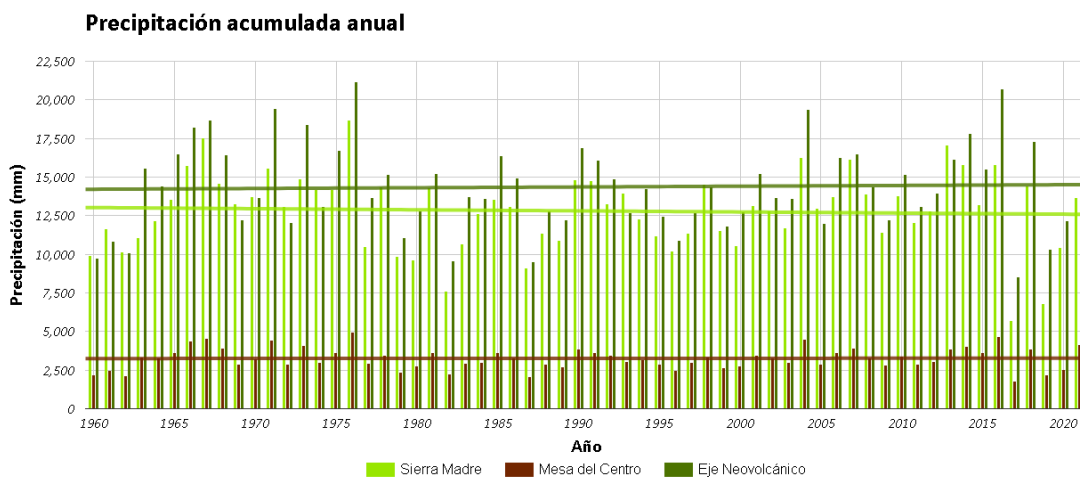
**Figura 2.** Sistema de topoformas en la zona de estudio. Fuente: Elaboración propia con información del Conjunto de datos vectoriales Fisiográficos. Continuo Nacional. Escala 1:1 000 000. Serie I. INEGI. (2001).

En la figura 2a se puede observar que la región fisiográfica con mayores temperaturas es la Sierra Madre Oriental, mientras que la que ha mantenido las menores temperaturas es el Eje Neovolcánico al sur. A pesar de esto en el eje Neovolcánico es el que recibe más precipitaciones que la Sierra Madre Oriental Queretana. En general se puede mencionar que en las 3 regiones existe una tendencia al aumento de las temperaturas en los últimos 60 años.



**Figura 2a.** Mediana anual de temperatura de la zona de estudio. Fuente: Elaboración propia con información de TERRACLIMATE (2022).

En la figura 2b se presentan las precipitaciones acumuladas encada año en los hexágonos formados (figura 3). La región de la Mesa del Centro es la que menos percibe agua de las 3 y ha mantenido relativa estabilidad en su percepción de precipitaciones. La región de la Sierra Madre Oriental es la segunda que percibe más precipitaciones y tiene una ligera tendencia a percibir menos agua. Por otro lado el Eje Neovolcánico ha tenido una ligera tendencia al aumento en las precipitaciones.



**Figura 2b.** Precipitación promedio de la zona de estudio. Fuente: Elaboración propia con información de TERRACLIMATE (2022).

## 6. Métodos

La finalidad del trabajo es conocer el efecto que el cambio climático tiene en los fenómenos hidrometeorológicos, en este estudio las sequías, que se presentan en las distintas regiones del estado de Querétaro. En este trabajo se utilizará información de temperatura promedio y precipitaciones de la base de datos de *TerraClimate: Clima y balance hídrico para la superficie terrestre global*, de la universidad de Idaho (Abatzoglou, et al., 2018); que cuenta con una disponibilidad temporal de datos de 1958 hasta el año 2021, para analizar información meteorológica en el estado de Querétaro.

El método utilizado para esta investigación es el modelo calibrado del *Palmer Drought Severity Index* (scPDSI) utilizado por Ma *et al.* (2014) para analizar estaciones climáticas en distintos puntos del planeta, y por Campos-Aranda (2018) para analizar el cambio en las condiciones climáticas de las distintas regiones del estado de San Luis Potosí en México y el método estandarizado elaborado y utilizado por Wells *et al.* (2004). El método es una versión estandarizada del Índice de Severidad de Sequías de Palmer (PDSI) por sus siglas en inglés, método propuesto por Palmer (1965) para analizar la propensión y severidad de las sequías en Estados Unidos.

El método fue elegido porque utiliza información de precipitaciones y temperatura mensual, así como información sobre la retención de agua en distintos tipos de suelo para indicar la severidad de sequías con una extensión temporal de meses a años. De igual manera el scPDSI ha sido utilizado extensamente para determinar y pronosticar las posibles sequías que se presentan según las condiciones climáticas de distintas zonas de estudio con tendencias climáticas distintas debido a las ventajas que presenta las correcciones que se realizan en el producto anterior, el PDSI.

Posteriormente de obtener el scPDSI se procederá a realizar una prueba estadística propuesta para analizar información de tendencias y anomalías en las series climáticas, específicamente para analizar la tendencia de recurrencia y de intensidad de las sequías presentes en el estudio (Buishand, 1982; Campos-Aranda, 2018). La prueba a realizar es Kendall-Spearman (Buishand, 1982; Machiwal & Jha, 2008).

### Fase 1. Creación de malla hexagonal.

El paquete utilizado para generar el estadístico del scPDSI no soporta computaciones que requieran mucha potencia como lo puede ser la malla con resolución de 4638.3 metros de TerraClimate, debido a esto se crea una malla hexagonal homogénea que cubra todo el estado de Querétaro. Los

hexágonos creados tienen una altura de 10 kilómetros y para asignarle un valor se promedia los pixeles de la malla de TerraClimate que se encuentren dentro de cada hexágono. En total 139 hexágonos cubren los 11,599 Km<sup>2</sup> del territorio del estado.

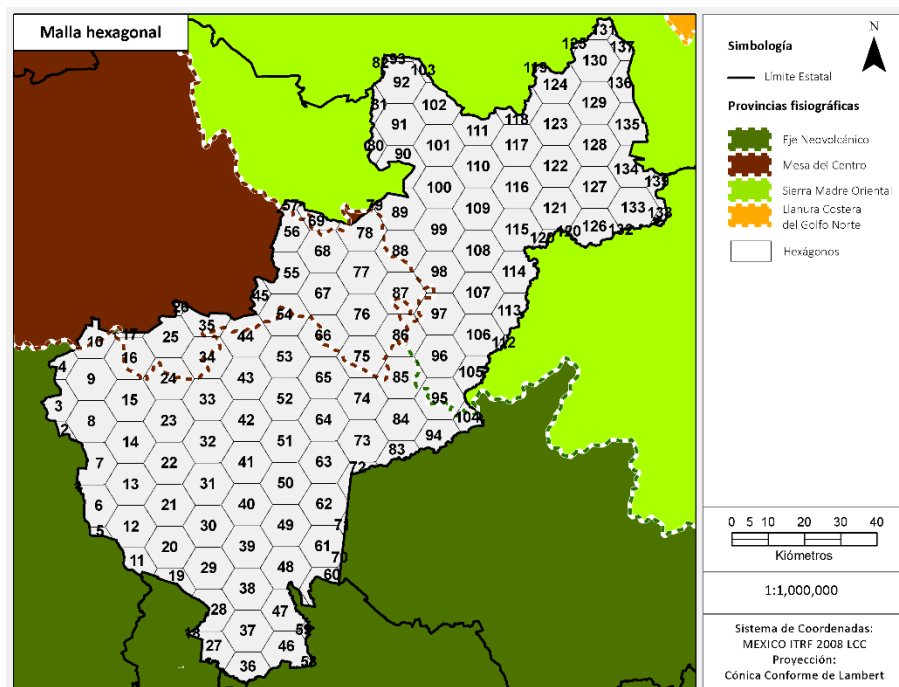


Figura 3. Malla hexagonal creada sobre la zona de estudio. Fuente: Elaboración propia.

## Fase 2. Cálculo de valores SPDI.

El lenguaje de programación utilizado para calcular el SPDI y scPDSI fue R, los paquetes utilizados para la operación fueron obtenidos del repositorio en línea de <https://github.com/>. Se descargaron dos paquetes, el primer paquete llamado “SPEI”, fué utilizado para obtener la evapotranspiración potencial por el método de Thornthwaite (1948) (Vicente-Serrano *et al.*, 2010; Beguería *et al.*, 2014). Posteriormente se utilizó el paquete “scPDSI”, este paquete fué generado a partir del cálculo de Palmer (1965) del SPDI, y las correcciones propuestas por Nathan Wells, Steve Goddard y Michael J. (2004). El resultado es un índice (scPDSI) con valores que van de -8 a 8.

### 2.1 Cálculo de SPDI.

La primera parte consta de 6 pasos. El primer paso es calcular el Balance Hídrico Edafológico (*BHE*) mensual con el método de Palmer (1965), y obtener la Evapotranspiración Potencial mensual por el método de Thornthwaite (1948). El *BHE* depende en gran medida del agua disponible en el suelo (*AWC*) y considera en el suelo 2 capas de distinta porosidad, la primera capa de aproximadamente una pulgada de profundidad, y la segunda capa variando su profundidad según el suelo. El indicador

de ambas capas de suelo es  $S'$ . Con el fin de utilizar información viable y adecuada sobre las características del suelo se utiliza la capa de texturas de suelo y retención de agua proporcionada por Webb *et al.* (2000).

Para obtener el  $AWC$  se usa la fórmula ( $AWC=S_s+S_u$ ) siendo  $S_s$  la humedad almacenada en la capa superior al inicio del mes y  $S_u$  en la capa inferior al inicio del mes. Posteriormente se puede obtener la pérdida de humedad de la capa superior del suelo ( $L_s$ ) y la pérdida de humedad en la capa inferior del suelo ( $L_u$ ). Una vez obtenidos  $AWC$ ,  $L_s$  y  $L_u$  se procede a obtener el  $BHE$ , 4 valores relacionados con la humedad:

- Evapotranspiración ( $ET$ ) que ocurre cuando la vegetación crece de forma activa por lo que en zonas áridas o semiáridas no se presenta durante la época de estiaje. La fórmula para obtener la  $ET$  es ( $ET=P+[L_s+L_u]$ ).
- Escurrimiento ( $RO$ ) que solo se presenta cuando ambas capas de suelo ( $S'$ ) alcanzan su máximo almacenamiento de agua ( $AWC$ ). La fórmula para obtener el escurrimiento ( $RO=[P-PE]-\Delta S_s-\Delta S_u$ ).
- La recarga ( $R$ ) y pérdida ( $L$ ) se calculan según las pérdidas ocasionadas por la  $PE$ , que ocurren cuando  $PE>P$ . Siendo entonces que  $L=L_s+L_u$ .

Una vez se cuente con los 4 valores originales relacionados con la humedad ( $ET$ ,  $RO$ ,  $L$  y  $R$ ) y la  $PE$  se obtienen los valores complementarios:

- Recarga potencial ( $PR$ ) es una medida relativamente similar a la  $ET$  y se define como la cantidad de humedad requerida para llevar al suelo a su "capacidad de campo" (Palmer, 1965, p.9). Se obtiene con la fórmula ( $PR=AWC-S'$ ).
- Escurrimiento potencial ( $PRO$ ) se obtiene con la fórmula ( $PRO=AWC-PR=S'$ ).
- Pérdida potencial ( $PL$ ) es la cantidad de humedad que puede perder el suelo considerando que la precipitación en el periodo es cero.

Después de haber generado los 4 valores complementarios se procede a generar los valores de ponderación para cada uno, siendo *alfa*, *beta*, *gamma* y *delta* sus respectivos coeficientes. Estos 4 nuevos valores son llamados también coeficientes de balance del agua o climáticamente normales. En estos índices el subíndice indica el número de meses (1 al 12), mientras que la línea sobre el coeficiente indica que es el valor promedio en el total de años de registro.

$$\alpha_i = \frac{\overline{ET}_i}{\overline{PE}_i} \quad \beta_i = \frac{\overline{R}_i}{\overline{PR}_i}$$

$$y_i = \frac{\overline{RO}_i}{\overline{PRO}_i} \quad \delta_i = \frac{\overline{L}_i}{\overline{PL}_i}$$

Una vez obtenidos los coeficientes climáticamente normales para la zona de estudio, se calcula la Precipitación Mensual Climáticamente Normal o Precipitación CAFEC (Palmer, 1965; Alley, 1984). Una vez calculada la Precipitación CAFEC se debe calcular la desviación de humedad ( $d$ ), este componente es el resultado de la diferencia entre la precipitación CAFEC y la precipitación mensual (Palmer, 1965; Ma et al., 2014).

$$d = P - \hat{P} = P - (\alpha_i PE + \beta_i PR + y_i PRO - \delta_i PL)$$

Debido a que  $d$  puede significar distintas cosas en el espacio y tiempo, se utiliza el factor de corrección  $K$  derivado de  $K'$ , llamado también característica climática. En la fórmula,  $D$  es la desviación de humedad ( $d$ ) promedio mensual del paso anterior. La característica climática  $K$  permite ajustar el valor de  $d$  según las características climáticas particulares de la zona de estudio, de forma que el SPDI pueda ser comparado en distintas temporalidades o zonas de estudio.

## 2.2 Cálculo de valores calibrados scPDSI

Para calibrar correctamente el SPDI debe de considerarse el clima histórico que acontece en la zona de estudio, debido a esto para la calibración se utilizan la característica climática sin corregir  $K'$  y  $d$ , de forma similar a la fórmula anterior con la fórmula  $Z=dK'$ . Lo que distingue esta calibración es que el índice SPDI utilizado inicialmente tiene valores en una escala del +4 a -4, estos valores fueron derivados de forma empírica en las distintas ubicaciones en que Palmer trabajó, esto genera un desfase entre las locaciones donde se utilizó el SPDI originalmente (Estados Unidos) y cualquier otra locación con condiciones climáticas distintas que pudieran no tomar en cuenta la temporalidad y espacialidad de las sequías.

El primer paso es calibrar la intensidad de las sequías desde la aproximación de Palmer (1965) y Wells *et al.*, (2004), donde se equiparán los rangos 4 a -4 de Palmer con los percentiles de Wells. Este último considera las sequías con valor -4 en la escala palmer como las más severas, estas se encuentran en el percentil 2 (%) de los casos al ser anormales, mientras que las sequías con valor 4 en la escala palmer se encontrarán en el percentil 98 (%) de Wells.

$$K = \begin{cases} K'(-4.00(2do \text{ percentil})), & \text{si } d < 0 \\ K'(4.00(98vo \text{ percentil})), & \text{si } d \geq 0 \end{cases}$$

El código utilizado para calcular el scPDSI automáticamente selecciona la muestra más grande, es decir la serie de tiempo completa es utilizada. Una vez calibrado el factor climático en el scPDSI el programa calcula automáticamente el factor de duración calibrado por el método de mínimos cuadrados para las condiciones extremadamente húmedas y extremadamente secas con la fórmula

$$X_i = \left(1 - \frac{m}{m+b}\right) X_{i-1} + \frac{CZ_i}{m+b}$$

Esta fórmula arroja dos valores  $X_1$  y  $X_2$  para periodos extremadamente secos y extremadamente húmedos. Calibrar la duración con los valores extremos de humedad y sequía tiene sentido ya que en el método inicial de Palmer se utilizó el valor extremo de sequía, y en la literatura se considera que los extremos climáticos ocurren únicamente entre el 1-3 % del tiempo (Guttman *et al.*, 1992; Hayes *et al.*, 1999; Palmer, 1965; Wells *et al.*, 2004).

#### Fase 3. Test de Mann Kendall para cada sitio.

Con los valores generados de scPDSI mensual para cada sitio en la zona estudio se realizó el test estadístico de Mann-Kendall. Este test no paramétrico es utilizado para detectar si en una serie de tiempo existe tendencia de aumento o disminución de los valores registrados (Pohlert, 2020), la hipótesis nula del test ( $p = >0.05$ ) indica que no existe ninguna tendencia a la alza o a la baja en los valores, mientras que la hipótesis alternativa refleja una tendencia al aumento o disminución en los valores.

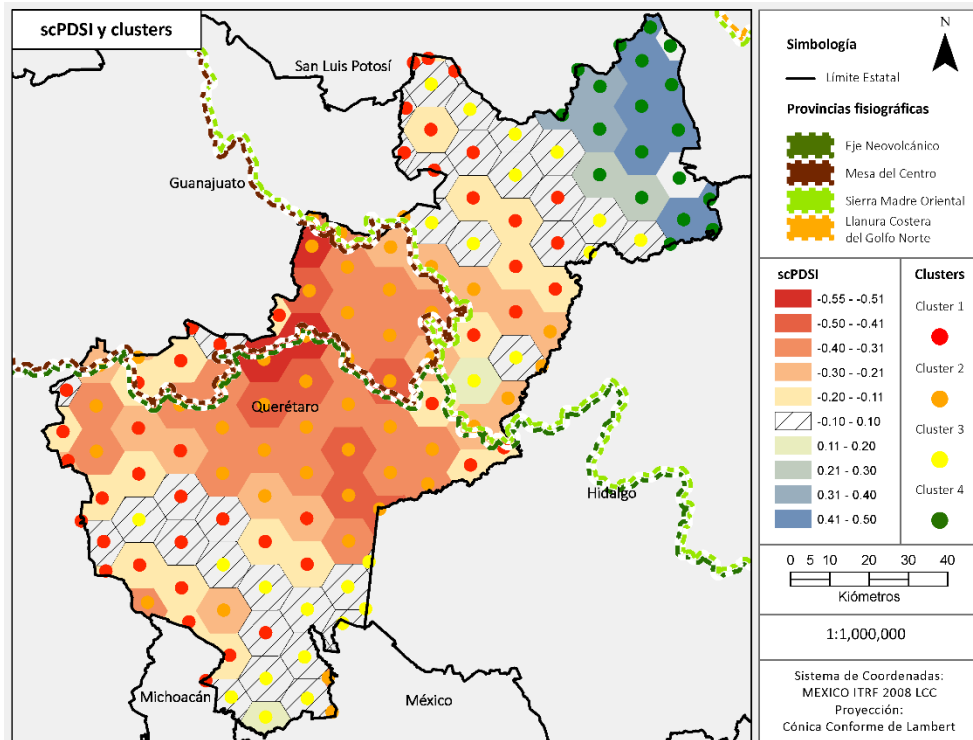
#### Fase 4. Regionalización de los resultados.

Finalmente se generan 4 conglomerados de la serie temporal del scPDSI que, a lo largo del tiempo, presentaron un comportamiento similar del índice. Las regiones se crean utilizando el paquete *Sickitlearn* en el lenguaje de programación Python por el método de medias de K, y reflejan la similitud en el comportamiento de cada uno de los hexágonos analizados. La razón por la que se crearon 4 conglomerados fue para distinguir de mejor manera el comportamiento histórico de las sequías en las 3 regiones.



## 7. Resultados

Las tres provincias que conforman la zona de estudio presentan condiciones distintas, sin embargo, se puede observar que generalmente mantuvieron valores negativos (Figura 4) a excepción de algunas porciones al noreste de la Sierra Madre Oriental y al sur en el Eje Neovolcánico que mantuvieron condiciones neutrales, y al este de la Sierra Madre Oriental donde se mantuvieron valores positivos.



**Figura 4.** Resultado del scPDSI interpolado y conglomerados. Fuente: Elaboración propia. Nota: Los valores que reflejan un déficit de humedad en el suelo están graficados de tono rojo, los valores que reflejan el aumento de humedad en el suelo están graficados en tono azul, y las condiciones de normalidad el achurado.

En la región de la Sierra Madre Oriental se aprecian condiciones disimilares, esto podría ser explicado en parte por su diversa orografía conformada por sierras, cañones y valles. En la parte central de la región se han mantenido condiciones neutrales de humedad en el suelo pero con una ligera tendencia a la pérdida de humedad como lo muestra el conglomerado 3, mientras que al este casi en colindancia con la Mesa del Centro ha mantenido una pérdida de humedad moderada y con tendencia a aumentar como lo muestra el conglomerado 1. Por último, al este de la región se han mantenido generalmente condiciones positivas y con una ligera tendencia positiva de humedad en el suelo.

En la región de la Mesa del Centro prácticamente toda la región ha mantenido una constante pérdida de humedad que ha tenido una intensidad moderada y severa en algunas partes. En el este de la región se ha mantenido la pérdida de humedad moderada, en esta parte de la región es donde en promedio se ha mantenido más constante y con mayor intensidad la pérdida de humedad en el suelo. Por otro lado, al oeste de la región se conforma en parte el conglomerado 1 que muestra que, a pesar de que la pérdida de humedad ha sido menor, las últimas 6 décadas ha perdido humedad a un ritmo más acelerado que el conglomerado 2 en el este de la región.

En el Eje Neovolcánico se presenta distintos grados de impacto Mientras que al noreste de la región existe en promedio una pérdida de humedad, esta pérdida de humedad ha sido mayor en el norte, justo en los límites con la Mesa del Centro, aquí se encuentra el conglomerado 3 donde la pérdida de humedad ha sido moderada. Al sureste de la región en los lomeríos se ha mantenido una relativa neutralidad en la humedad del suelo con una ligera tendencia a perderla en el conglomerado 3. Finalmente, al suroeste la tendencia es a una pérdida severa de humedad en el suelo como se muestra en el conglomerado 1.

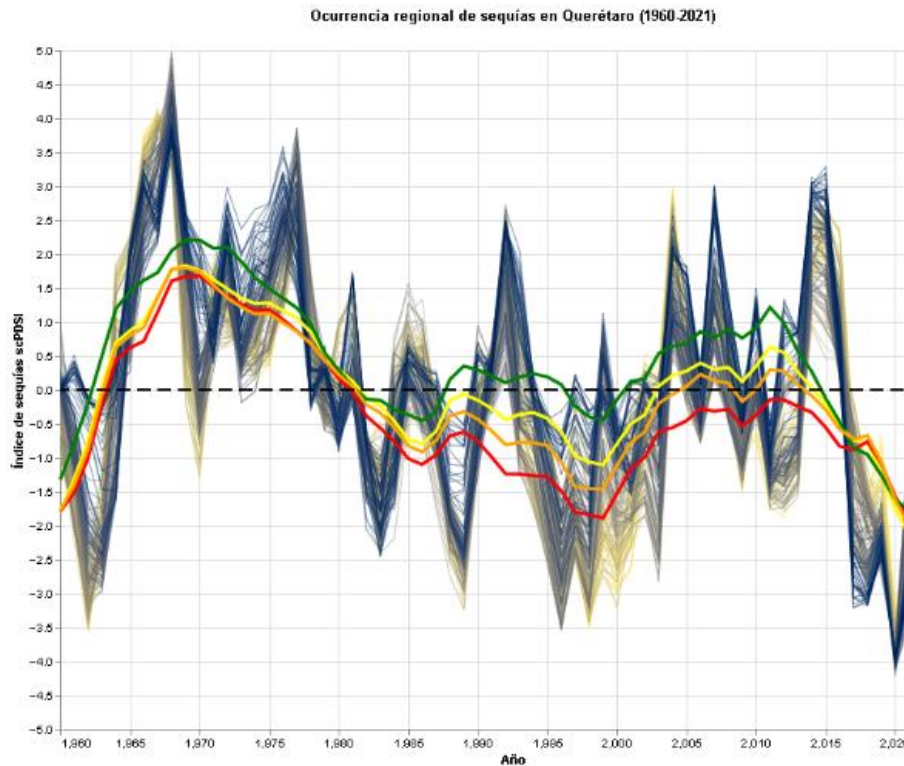
**Cuadro 1.** Índice scPDSI para los 4 conglomerados generados.

Conglomerado	1	2	3	4
scPDSI	-0.36	-0.13	-0.032	0.4

Nota: Valores negativos indican el grado de déficit hídrico y positivo el superávit.

En la figura 5 se puede apreciar la serie de tiempo de los 139 hexágonos que conforman la zona de estudio y la media móvil del comportamiento de las sequías en los 4 conglomerados generados. El conglomerado 4 ha sido el que en promedio ha mantenido más humedad que los otros conglomerados mientras que el conglomerado 3 ha perdido ligeramente humedad, el 2 ha perdido humedad de manera moderada y el 1 de manera. Por último, el conglomerado 4 de la región Sierra Madre Oriental ha sido el que ha mantenido un aumento en la humedad en el suelo.

Los promedios del índice por conglomerado son los siguientes:



**Figura 5.** scPDSI de las zonas de estudio. Nota: Las líneas de tonalidad azul representan cada uno de los hexágonos de la malla por lo que son 139 líneas. Las líneas de color rojo, naranja, amarillo y verde representan los 4 conglomerados creados.

Se pueden distinguir al menos 4 periodos con sequías excepcionales en los 4 conglomerados. El primero en la primera mitad de la década de 1960 llegó a alcanzar en algunos puntos valores de hasta -3.5 y se vio seguido por un periodo de extrema humedad en el suelo que alcanzó valores de hasta +5. El segundo periodo con una caída de humedad doble ocurrió en la década de 1980 donde los valores más bajos llegaron hasta -3 mientras que el repunte de humedad ocurrió al finalizar la década con valores de hasta +2.5. El tercer periodo de sequía, y el más prolongado, ocurrió a mediados de la década de 1990 hasta mediados del año 2000, en este periodo la pérdida de humedad fue desigual en los 4 conglomerados siendo el más afectado el conglomerado número 1. El periodo de sequías de 2016-2021 tuvo el mayor impacto en los 4 conglomerados llegando a valores de hasta -4 (sequía excepcional), este periodo se vio precedido por un periodo de humedad abundante.

En el estadístico de Mann-Kendall los resultados muestran que todos los puntos en la malla hexagonal tienen una tendencia a la pérdida de humedad en el suelo en mayor o menor medida (Ver Tabla 3 en Anexos). A pesar de que en algunos conglomerados como el 3 que cubre únicamente la porción este de la Sierra Madre Oriental tiene valores que podría reflejar condiciones de neutralidad, en el test estadístico los resultados muestran una tendencia a la pérdida de humedad a largo plazo. En general se puede mencionar que en todo el estado de Querétaro existe una tendencia a largo plazo (60 años) a perder gradualmente la humedad que se percibe en las capas superficiales del suelo.

Con base en los resultados presentados en la tabla 3 y la figura 5 se corrobora la hipótesis que indica el aumento en la frecuencia e intensidad de las sequías en la totalidad del estado de Querétaro siendo la zona más afectada el centro del estado, donde colindan la Mesa del Centro y el Eje Neovolcánico como se muestra en la figura 4 sin embargo, la zona con una tendencia mayor a sufrir sequías se encuentra en la periferia de la zona más afectada en el centro-oeste del eje Neovolcánico y al oeste de la Sierra Madre Oriental.

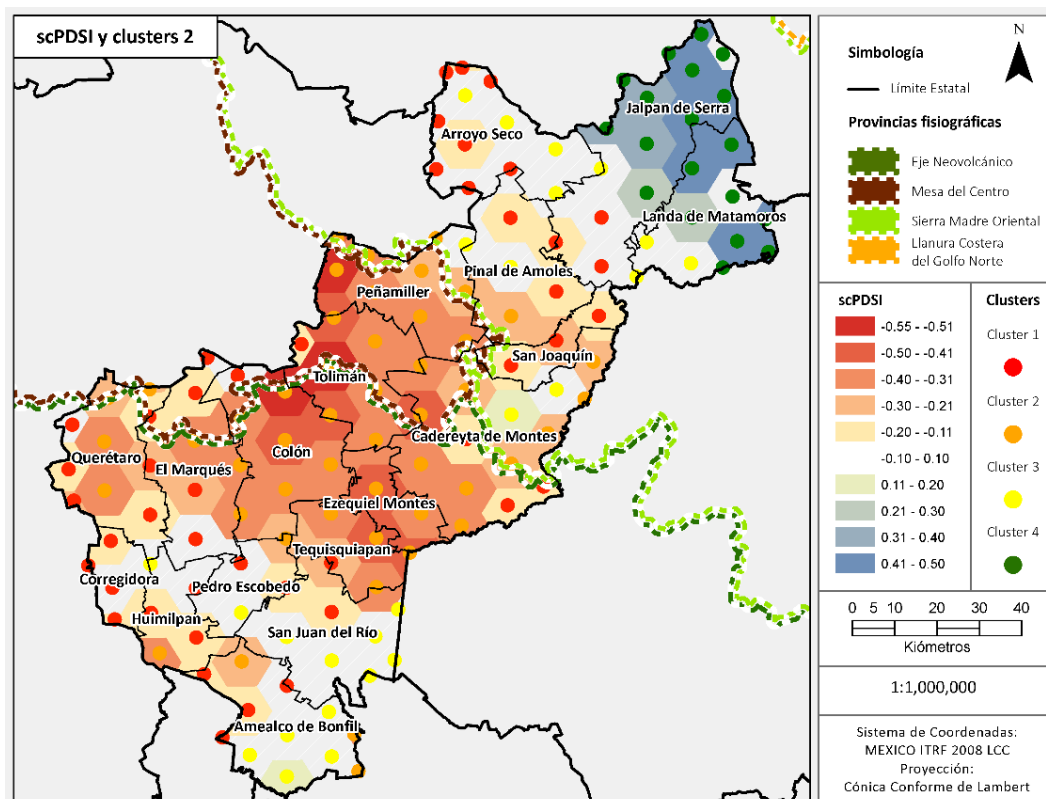


Figura 6. Resultados con límites municipales. Fuente: Elaboración propia.

En general el método es comparable con los resultados de Campos Aranda (2018) sobre todo con los resultados obtenidos en la región sur de San Luis Potosí en las estaciones Xilitla y Rio Verde que colinda con el noreste del estado de Querétaro los municipios de Jalpan y Landa de Matamoros ubicados en la Sierra Madre Oriental. En su análisis elaborado con las dos estaciones meteorológicas muestra periodos de sequía en los años 1962-1966, 1994-2004 y 2009-2014, aproximadamente los mismos periodos de sequía que existieron en el conglomerado 4 al este de Jalpan y Landa Matamoros (figura 6). A diferencia de la investigación de Campos Aranda se trabajó con datos de TerraClimate lo que puede ampliar los alcances del estudio al ser una malla continua de datos de distintas fuentes en lugar de estaciones a interpolar

## **8. Conclusiones**

Las sequías agrícolas reflejan un déficit de humedad en el suelo que tiene un gran impacto tanto a nivel ecosistémico como en la sociedad, al reducir la cantidad de vegetación potencial que puede emerger del suelo y la cantidad de parcelas que pueden percibir esta humedad. En este trabajo de investigación aportamos información sobre el comportamiento de las sequías y su relación del cambio climático, específicamente el cambio en la intensidad de las sequías y su frecuencia.

Las tres provincias que conforman la zona de estudio en Querétaro presentan condiciones distintas de humedad en el suelo. En la Sierra Madre Oriental se observa una variabilidad en las condiciones de humedad probablemente relacionada con su orografía, con algunas porciones al noreste y al este manteniendo condiciones neutrales o incluso positivas, mientras que en otras partes se mantienen valores negativos. En la Mesa del Centro se ha registrado una constante pérdida de humedad en el suelo, con intensidades moderadas y severas en algunas áreas. En el Eje Neovolcánico se presentan distintos grados de impacto, al noreste se ha registrado una pérdida moderada de humedad, al sureste ha sido una pérdida más severa, mientras que al sureste de la región se ha mantenido con una relativa neutralidad de humedad en el suelo.

En los conglomerados generados se obtuvieron resultados contrastantes que demostraron el impacto diferenciado que el cambio climático tiene en distintas regiones. El conglomerado 1 en el Eje Neovolcánico y la Sierra Madre Oriental mostraron tener la mayor aceleración en la pérdida de humedad en el suelo, este conglomerado emerge de la zona donde las sequías ya están establecidas, en la Mesa del Centro y sus colindancias con el Eje Neovolcánico.

Estos cambios en la frecuencia e intensidad de periodos de pérdida de humedad en el suelo muestran que a) mientras que las porciones que colindan con el conglomerado 2 presentan una tendencia a la aridez de mayor intensidad, b) en el conglomerado 2 al centro del estado es donde se ha mantenido condiciones de sequía con mayor intensidad (Gobena & Gan, 2013) y c) el noreste del estado tiene las condiciones más favorables en acceso a humedad en el suelo.

También es relevante mencionar que los datos obtenidos de la base de datos de TerraClimate son una buena alternativa a las series de tiempo de campo tradicionales, esto debido al registro irregular del tiempo atmosférico en algunas de las estaciones, lo que puede ocasionar algunos sesgos. Sin embargo, los datos obtenidos también pueden presentar algunas limitaciones en las series de tiempo, al contener información generada a partir de interpolaciones temporales de datos de estaciones climáticas, satélites de órbita polar, satélites geoestacionarios y aeronaves. Mientras que se usan las estaciones desde 1960 los satélites y aeronaves se utilizan a penas desde 1970-1980.

Los resultados obtenidos en la investigación tienen gran relevancia e impacto en México en varios aspectos: Comprender el cambio climático y la forma en que se manifiesta en las sequías, adaptación y resiliencia en la gestión del agua en las regiones con mayores pérdidas, planificación para el desarrollo sostenible en las regiones con una mayor tendencia a las sequías, y la elaboración de políticas que permitan mitigar el impacto del cambio climático a nivel estatal y regional. En resumen una investigación como la aquí presentada es relevante para comprender mejor los impactos del cambio climático, guiar la gestión del agua, promover la adaptación y resiliencia, informar la planificación del desarrollo sostenible y respaldar políticas de mitigación al cambio climático.

Por último, pero no de menor importancia, la información es relevante para el sector agrícola. Por un lado, la agricultura de temporal que depende de las precipitaciones y cantidad de agua almacenada en el suelo para su productividad. En menor medida también a la agricultura de riego ya que al reducirse cada vez más la cantidad de agua que se percibe naturalmente se ocupa cada vez más agua proveniente de otros estados, en el caso específico de Querétaro percibe agua que se recolecta en la presa Zimapán en Hidalgo. Dentro de las zonas agrícolas vulnerable podemos mencionar los municipios de El Marqués, Colón, Pedro Escobedo, Tequisquiapan y San Juan del Río, zona que, según los resultados de esta investigación tiene una tendencia alta de aumento a la frecuencia e intensidad de las sequías.

## 9. Referencias bibliográficas

- Abatzoglou, J.T., S.Z. Dobrowski, S.A. Parks, K.C. Hegewisch, 2018, Terraclimate, a high-resolution global dataset of monthly climate and climatic water balance from 1958-2015, *Scientific Data* 5:170191, doi:10.1038/sdata.2017.191
- Beguería, S., Vicente-Serrano, S.M., Reig, F. and Latorre, B. (2014), Standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) revisited: parameter fitting, evapotranspiration models, tools, datasets and drought monitoring. *International Journal of Climatology*. 34. pp 3001-3023.
- Below, R., Grover-Kopec, E., & Dilley, M. (2007). Documenting Drought-Related Disasters: A Global Reassessment. *The Journal of Environment & Development*. 16(3). 328
- Buishand, T. A. (1982). Some methods for testing the homogeneity of rainfall records. *Journal of Hydrology*. 58(1-2). 11-27.
- Campos-Aranda, Daniel Francisco. (2018). Contrastes del Índice de Sequías de Palmer Estandarizado (SPDI) en tres ubicaciones climáticas de San Luis Potosí, México. *Tecnología y ciencias del agua*. 9 (5). p. 246-279.
- Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED). (2001). Impacto socioeconómico de los desastres naturales. Centro Nacional de Prevención de Desastres. México.
- Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED). (2018). ¿Qué regiones del país son las más afectadas por las sequías?. Consultado el 13 de Febrero de 2022. CENAPRED. Recuperado de: <https://www.gob.mx/cenapred/articulos/que-regiones-del-pais-son-las-mas-afectadas-por-las-sequias#:~:text=Estad%C3%ADsticamente%20los%20estados%20del%20pa%C3%ADs,Luis%20Potos%C3%AD%2C%20Aguascalientes%20y%20Guanajuato.>
- Centro Nacional para la Prevención de Desastres (CENAPRED). (2022). Atlas Nacional de Riesgos: Sistema de información geográfica sobre riesgos. <http://www.atlasmnacionalderiesgos.gob.mx/archivo/visor-capas.html>
- Comisión Nacional de Aguas (CONAGUA). (2022). Monitor de Sequías de México. <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/monitor-de-sequia/m>
- Comisión Nacional de Aguas. (CONAGUA). (2021). Sesión Informativa 1491. Informe Semanal del Comité Nacional de Grandes Presas. Comunicado de Prensa No. 0364-21. Fecha de publicación 4 de Mayo de 2021. Recuperado de:

<https://www.gob.mx/conagua/prensa/informe-semanal-del-comite-nacional-de-grandes-presas-271441?idiom=es>

Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). (2015). Periodos de sequías históricas en México de 1948 a 1996. México. Recuperado de: <http://conabio.gob.mx/informacion/gis/Hidrometeorologico>.

Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). (2010). México: Atlas de la Biodiversidad. Recuperado de <http://www.biodiversidad.gob.mx/atlas/>

Contreras Servín, Carlos. (2005). Las sequías en México durante el siglo XIX. *Investigaciones geográficas*. (56). 118-133. México. Recuperado en 26 de febrero de 2022, de [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0188-46112005000100008&lng=es&tIng=es](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-46112005000100008&lng=es&tIng=es).

Diario Oficial de la Federación. DOF. (2000). *DECLARATORIA de Desastre Natural para efectos de las Reglas de Operación del Fondo de Desastres Naturales (FONDEN), provocada por la sequía prolongada y atípica en el Estado de Querétaro y que afectó infraestructura pública hidráulica, el abasto de agua potable en la entidad y activos privados productivos de la población de bajos ingresos, así como para la generación de fuentes transitorias de ingreso para la población de bajos ingresos*. México. Recuperado de: <http://www.ordenjuridico.gob.mx/Publicaciones/Compilacion/326.pdf> y de [http://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=2053702&fecha=31/12/1969](http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=2053702&fecha=31/12/1969).

García-Acosta, V. (1993). Las sequías históricas de México: desastres y sociedad. *Revista semestral de la Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina*, 1(1), p.18.

Gobena, A. K., & Gan, T. Y. (2013). Assessment of Trends and Possible Climate Change Impacts on Summer Moisture Availability in Western Canada based on Metrics of the Palmer Drought Severity Index, *Journal of Climate*, 26(13), 4583-4595.

Guijarro, JA (2016). <https://cran.r-project.org/web/packages/climatol/index.html>

Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC). (2015). Compromisos de Mitigación y Adaptación ante el Cambio Climático para el Periodo 2020-2030. México.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2021). Censo de Población y Vivienda 2020.

Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC). (2007). *Climate Change 2007: Synthesis Report*. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC. Geneva, Switzerland, 104 pp.



- Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC). (2012). *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation*. Cambridge University Press. The Edinburgh Building, Shaftesbury Road, Cambridge CB2 8RU ENGLAND. 582 p.
- Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC). (2014) *Cambio climático 2014: Impactos, adaptación y vulnerabilidad – Resumen para responsables de políticas*. Contribución del Grupo de trabajo II al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Organización Meteorológica Mundial, Ginebra, Suiza, 34 p.
- Ma, M., Ren, L., Yuan, F., Jiang, S., Liu, Y., Kong, H., & Gong, L. (2014). A new standardized Palmer drought index for hydro– meteorological use. *Hydrological Processes*, 28(23), 5645-5661.
- Machiwal, D., & Jha, M. K. (2008). Comparative evaluation of statistical tests for time series analysis: Applications to hydrological time series. *Hydrological Sciences Journal*. 53(2). 353-366.
- Martínez, B. (2021). *Sequía 2020-2021: La segunda más severa del registro reciente*. Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático. Sitio web: <https://www.atmosfera.unam.mx/sequia-2020-2021-la-segunda-mas-severa-del-registro-reciente/>
- Organización de las Naciones Unidas (ONU). (2015). *Plan de acción para la implementación de la Agenda 2030. Hacia una estrategia española de desarrollo sostenible*. Gobierno de España. 170 p. España. Recuperado de: [https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/20119Spain\\_Annex\\_1\\_PLA\\_N\\_DE\\_ACCION\\_AGENDA\\_2030\\_002.pdf](https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/20119Spain_Annex_1_PLA_N_DE_ACCION_AGENDA_2030_002.pdf)
- ORNL DAAC. (2017). *Spatial Data Access Tool (SDAT)*. ORNL DAAC, Oak Ridge, Tennessee, USA. Recuperado 16-Marzo-2022.
- Palmer, W. C. (1965). *Meteorological Drought*. Research Paper No. 45. *US Weather Bureau*: Washington, DC. 58.
- Pohlert, T. (2020). *Non-Parametric Trend Tests and Change-Point Detection*. <https://creativecommons.org/licenses/by-nd/4.0/>
- Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (ONU-PNUD). (2019) *El enfoque de la Agenda 2030 en planes y programas públicos. Una propuesta metodológica de implementación centrada en la Gestión por Resultados para el Desarrollo*. PNUD México. 92 p. Recuperado de:

[https://www.transparenciapresupuestaria.gob.mx/work/models/PTP/Capacitacion/enfoques transversales/PNUD\\_1.pdf](https://www.transparenciapresupuestaria.gob.mx/work/models/PTP/Capacitacion/enfoques transversales/PNUD_1.pdf)

- Secretaría de Desarrollo Sustentable del Poder Ejecutivo del Estado de Querétaro (SEDESU). (2020). *Programa Estatal de Acción ante el Cambio Climático para el Estado de Querétaro 2019-2040*. Querétaro, México. p.52. Recuperado de: [https://www.queretaro.gob.mx/generalimagen.aspx?ServerUploads=&p=/ContenidosSEDESU/200\\_3962\\_101\\_1138666977\\_PROGRAMA-ESTATAL-ACCION-ANTE-EL-CAMBIO-CLIMATICO-2020.pdf](https://www.queretaro.gob.mx/generalimagen.aspx?ServerUploads=&p=/ContenidosSEDESU/200_3962_101_1138666977_PROGRAMA-ESTATAL-ACCION-ANTE-EL-CAMBIO-CLIMATICO-2020.pdf)
- Swain, S., Hayhoe, K. (2015). CMIP5 Projected changes in spring and summer drought and wet conditions over North America. *Climate Dynamics*. 44. pp. 2737–2750.
- Thornthwaite C. W. (1948). An approach toward a rational classification of climate. *Geographical Review*. 38(1): 55–94. DOI: 10.2307/210739
- Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S., & López-Moreno, J. I. (2010). A multiscalar Drought Index sensitive to Global Warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index. *Journal of Climate*, 23(7), 1696-1718.
- Villers, L., & Trejo, I. (2004). Evaluación de la vulnerabilidad en los ecosistemas forestales. En J. Martínez, & A. Fernández. *Cambio climático: Una visión desde México*. pp. 239-254. México: SEMARNAT/INE.
- Wang, G (2005). Agricultural drought in a future climate: results from 15 global climate models participating in the IPCC 4th assessment. *Climate Dynamics*. 25. pp.739–753
- Webb, R., C.E. Rosenzweig, and E.R. Levine. (2000). Global Soil Texture and Derived Water-Holding Capacities (Webb et al.). *ORNL DAAC*, Oak Ridge, Tennessee, USA.
- Wells N., Goddard S., Hayes M. J. (2004). A Self-Calibrating Palmer Drought Severity Index. *Journal of Climate*, 17(12):2335-2351.

## 10. Anexos

**Cuadro 3.** Test de Mann-Kendall para el scPDSI mensual de las estaciones.

Sitio	scPDSI	Conglomerado	S	Z	P	Tendencia
8	-0.32676768	1	-55420	8.8143	2.74E-16	-
9	-0.36929962	1	-52096	7.6935	1.43E-14	-
10	-0.26112069	1	-52038	7.6848	1.53E-14	-
11	-0.31863496	1	-42446	6.2683	3.65E-10	-
17	-0.25174049	1	-51214	7.5632	3.93E-14	-
24	-0.34553241	1	-61380	9.0645	1.25E-19	-
29	-0.2749865	1	-48452	7.1553	8.35E-13	-
32	-0.31760003	1	-56448	8.3362	7.67E-17	-
33	-0.38391385	1	-60864	8.9883	2.51E-19	-
34	-0.40712595	1	-67700	9.9979	1.56E-23	-
41	-0.28914848	1	-49996	7.3833	1.54E-13	-
42	-0.39609361	1	-58684	8.6664	4.46E-18	-
43	-0.41147285	1	-67980	10.039	1.02E-23	-
44	-0.54512337	1	-60398	8.9195	4.68E-19	-
51	-0.39166527	1	-52642	7.7741	7.60E-15	-
52	-0.4027495	1	-61762	9.1209	7.45E-20	-
53	-0.50128361	1	-58216	8.5973	8.16E-18	-
54	-0.5163845	1	-56992	8.4165	3.88E-17	-
55	-0.42016329	1	-51262	7.5703	3.72E-14	-
56	-0.54646099	1	-50100	7.3987	1.38E-13	-
57	-0.49742717	1	-46570	6.8774	6.10E-12	-
58	-0.31174156	1	-47314	6.9872	2.80E-12	-
59	-0.31074417	1	-45020	6.6485	2.96E-11	-
62	-0.31309569	1	-47106	6.9565	3.49E-12	-
63	-0.41319483	1	-50396	7.4424	9.89E-14	-
64	-0.4108415	1	-56702	8.3737	5.58E-17	-
65	-0.40556078	1	-55416	8.1838	2.75E-16	-
66	-0.40274397	1	-53932	7.9646	1.66E-15	-
67	-0.32225737	1	-54354	8.0269	9.99E-16	-
68	-0.34932533	1	-49056	7.2445	4.34E-13	-
69	-0.40263771	1	-50030	7.3883	1.49E-13	-
72	-0.43093754	1	-52044	7.6858	1.52E-14	-
73	-0.37907699	1	-53404	7.8866	3.10E-15	-
74	-0.3529923	1	-51510	7.6069	2.81E-14	-
75	-0.43898551	1	-57800	8.5358	1.39E-17	-
76	-0.40676045	1	-56000	8.27	1.34E-16	-
77	-0.35189836	1	-52052	7.687	1.51E-14	-
78	-0.29491291	1	-46250	6.8301	8.48E-12	-
79	-0.2615099	1	-47594	7.0286	2.09E-12	-
83	-0.36895361	1	-63914	9.4388	3.77E-21	-
84	-0.36970644	1	-57226	8.4511	2.89E-17	-

Sitio	scPDSI	Conglomerado	S	Z	P	Tendencia
86	-0.26809418	1	-59490	8.7854	1.56E-18	-
87	-0.38366812	1	-52776	7.7939	6.50E-15	-
88	-0.28824914	1	-46144	6.8145	9.46E-12	-
95	-0.26539505	1	-62584	9.2423	2.41E-20	-
98	-0.28448137	1	-48510	7.1639	7.84E-13	-
105	-0.28997925	1	-57018	8.4203	3.75E-17	-
112	-0.25818655	1	-52868	7.8075	5.83E-15	-
113	-0.28149013	1	-52724	7.7862	6.91E-15	-
1	-0.09210764	2	-44412	6.5587	-5.4288E-11	=
2	-0.21743468	2	-54248	8.0113	1.14E-15	-
3	-0.11541423	2	-48216	7.1205	1.08E-12	-
4	-0.09833767	2	-46446	6.8591	6.93E-12	-
5	-0.18484767	2	-48956	7.2297	4.84E-13	-
6	-0.08556044	2	-44772	6.6118	3.80E-11	-
7	-0.11288277	2	-50158	7.4073	1.29E-13	-
12	-0.18652263	2	-49378	7.2921	3.05E-13	-
14	-0.14603765	2	-49582	7.3222	2.44E-13	-
15	-0.23719395	2	-53518	7.9035	2.71E-15	-
16	-0.20151236	2	-49636	7.3302	2.30E-13	-
18	-0.0659701	2	-44312	6.5439	5.99E-11	-
19	-0.14668595	2	-46216	6.8251	8.79E-12	-
20	-0.14831881	2	-43930	6.4875	8.73E-11	-
21	-0.10425511	2	-43768	6.4636	1.02E-10	-
22	-0.08833539	2	-43846	6.4751	9.48E-11	-
23	-0.23004969	2	-54896	8.107	5.19E-16	-
25	-0.13786306	2	-45186	6.673	2.51E-11	-
26	-0.09930111	2	-39344	5.8102	6.24E-09	-
28	-0.18324135	2	-45094	6.6594	2.75E-11	-
31	-0.06844823	2	-41634	6.1484	7.83E-10	-
35	-0.05958291	2	-37628	5.5568	2.75E-08	-
38	-0.09879135	2	-46626	6.8856	5.75E-12	-
40	-0.11641074	2	-40920	6.043	1.51E-09	-
45	-0.16733083	2	-41824	6.1768	6.55E-10	-
49	-0.1736974	2	-45034	6.6505	2.92E-11	-
50	-0.23823763	2	-46012	6.795	1.08E-11	-
80	-0.0718209	2	-42110	6.2187	5.01E-10	-
81	-0.08730279	2	-52674	7.7788	7.32E-15	-
82	-0.1161602	2	-48490	7.1609	8.01E-13	-
85	-0.14959749	2	-43440	6.4151	1.41E-10	-
90	-0.08802183	2	-41600	6.1434	8.08E-10	-
91	-0.11276377	2	-53424	7.8896	3.03E-15	-
93	-0.11616582	2	-48490	7.1609	8.01E-13	-
94	-0.20006169	2	-63266	9.3431	9.36E-21	-
97	-0.13240583	2	-40892	6.0388	1.55E-09	-
100	-0.16665427	2	-46026	6.797	1.07E-11	-

Sitio	scPDSI	Conglomerado	S	Z	P	Tendencia
101	-0.10213166	2	-47106	6.9565	3.49E-12	-
103	-0.08152	2	-49162	7.2602	3.87E-13	-
104	-0.12177059	2	-65910	9.7335	2.17E-22	-
107	-0.23858442	2	-53990	7.9732	1.55E-15	-
108	-0.15561722	2	-50112	7.4005	1.36E-13	-
109	-0.15618872	2	-52344	7.7301	1.07E-14	-
114	-0.13087571	2	-49514	7.3121	2.63E-13	-
115	-0.09827493	2	-55586	8.2089	2.23E-16	-
116	-0.07551485	2	-51510	7.6069	2.81E-14	-
13	-0.02893985	3	-42404	6.2621	3.80E-10	-
27	0.06052792	3	-44144	6.5191	7.07E-11	-
30	-0.03292693	3	-39192	5.7878	7.13E-09	-
36	0.13201824	3	-42490	6.2748	3.50E-10	-
37	0.08241474	3	-42054	6.2104	5.28E-10	-
39	-0.02525324	3	-41584	6.141	8.20E-10	-
46	0.06341575	3	-41452	6.1215	9.27E-10	-
47	-0.00591384	3	-42406	6.2624	3.79E-10	-
48	0.00920211	3	-41250	6.0919	1.12E-09	-
60	0.03761709	3	-39090	5.7727	7.80E-09	-
61	0.05530829	3	-37602	5.553	2.81E-08	-
70	0.07284976	3	-37326	5.5122	3.54E-08	-
71	0.03686631	3	-35812	5.2886	1.23E-07	-
89	0.02794261	3	-40580	5.9928	2.06E-09	-
92	-0.01470052	3	-46964	6.9356	4.05E-12	-
96	0.12362403	3	-38152	5.6342	1.76E-08	-
99	-0.00289052	3	-42740	6.3118	2.76E-10	-
102	0.03791098	3	-44346	6.5489	5.80E-11	-
106	0.05458226	3	-41694	6.1573	7.40E-10	-
110	-0.03532993	3	-48448	7.1547	8.38E-13	-
111	-0.04094827	3	-50586	7.4705	7.99E-14	-
117	0.06861201	3	-50724	7.4908	6.84E-14	-
120	-0.02685131	3	-52044	7.6858	1.52E-14	-
121	0.07604124	3	-54770	8.0884	6.05E-16	-
126	0.07540049	3	-50940	7.5227	5.36E-14	-
118	0.30375595	4	-51252	7.5688	3.77E-15	-
119	0.34866566	4	-55106	8.138	4.02E-16	-
122	0.22890647	4	-52850	7.8048	5.96E-15	-
123	0.31696155	4	-51102	7.5467	4.47E-14	-
124	0.34492914	4	-50894	7.5159	5.65E-14	-
125	0.39404069	4	-57490	8.49	2.07E-17	-
127	0.24820725	4	-51690	7.6335	2.28E-14	-
128	0.47655397	4	-48926	7.2253	5.00E-13	-
129	0.45185118	4	-50192	7.4123	1.24E-13	-
130	0.4443025	4	-56024	8.2735	1.30E-16	-
131	0.43624156	4	-55684	8.2233	1.98E-16	-

Sitio	scPDSI	Conglomerado	S	Z	P	Tendencia
132	0.38898094	4	-55254	8.1598	3.35E-16	-
133	0.48938793	4	-53128	7.8459	4.30E-15	-
134	0.50058142	4	-53888	7.9581	1.75E-15	-
135	0.49838121	4	-50106	7.3996	1.37E-13	-
136	0.495676	4	-49302	7.2808	3.32E-13	-
137	0.50746172	4	-53136	7.847	4.26E-15	-
138	0.4302744	4	-59156	8.7361	2.41E-18	-
139	0.45612604	4	-57142	8.4387	3.21E-17	-

El valor de Z indica la magnitud de la tendencia, siendo los valores mayores reflejo de una mayor tendencia al aumento o decremento de los valores scPDSI.