



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCION DE ENSEÑANZA E INVESTIGACION EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO DE HIDROCIENCIAS

**ESTUDIO DE LAS SEQUÍAS EN LA CUENCA PACÍFICO
NORTE MEDIANTE DOS INDICADORES: ÍNDICE DE
PRECIPITACIÓN ESTANDARIZADO (SPI) Y EL ÍNDICE DE
PRECIPITACIÓN EVAPOTRANSPIRACIÓN
ESTANDARIZADO (SPEI).**

LILIANA SERRANO BARRIOS

T E S I S

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL

PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRA EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MEXICO

2015

La presente tesis titulada: "ESTUDIO DE LAS SEQUÍAS EN LA CUENCA PACÍFICO NORTE MEDIANTE DOS INDICADORES: ÍNDICE DE PRECIPITACIÓN ESTANDARIZADA (SPI) Y EL ÍNDICE DE PRECIPITACIÓN EVAPOTRANSPIRACIÓN ESTANDARIZADA (SPEI)", realizada por el alumno: **Liliana Serrano Barrios**, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRA EN CIENCIAS

HIDROCIENCIAS

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO



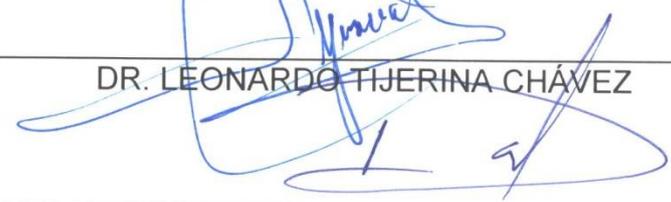
DR. HÉCTOR FLORES MAGDALENO

ASESOR



DR. LEONARDO TIJERINA CHÁVEZ

ASESOR



DR. DAVID VÁSQUEZ SOTO

Montecillo, Texcoco, Estado de México, Octubre de 2015

**Estudio de las sequías en la Cuenca Pacífico Norte mediante dos indicadores:
índice de Precipitación Estandarizado (SPI) y El Índice De Precipitación
Evapotranspiración Estandarizado (SPEI).**

Liliana Serrano Barrios, M. en C.

Colegio de Postgraduados, 2015.

RESUMEN

En este trabajo se analiza la variabilidad espacio-temporal de las sequías en la Cuenca Pacífico Norte de México entre 1961 y 2010, mediante dos índices de sequía: el Índice de Precipitación Estandarizada (SPI) y el Índice de Precipitación Evapotranspiración Estandarizada (SPEI). Para ello se han utilizado 48 estaciones meteorológicas con datos de precipitación, temperatura máxima y mínima mensual, de ellas en 22 estaciones también se dispuso de datos de evaporación media medida mediante tanques evaporímetros. La evapotranspiración de referencia, necesaria para calcular el SPEI, se obtuvo mediante la ecuación de Hargreaves. Los resultados muestran que los principales episodios de sequía ocurrieron en las décadas de 1980 y 2000, aunque existe una notable variabilidad espacial a lo largo de la región. Se discute el posible impacto de la demanda de agua por parte de la atmósfera en la evolución de la sequía observada con dichos índices, y sus implicaciones para una adecuada valoración del riesgo.

PALABRAS CLAVE Sequía, Índice de Precipitación Estandarizada; Índice de Precipitación Evapotranspiración Estandarizada, evolución temporal, diferencias espaciales, tendencias.

**Study of droughts in the North Pacific Basin through two indicators:
Standardized Precipitation Index (SPI) and the Standardized Precipitation
Evapotranspiration Index (SPEI)**

Liliana Serrano Barrios, M. en C.

Colegio de Postgraduados, 2015.

ABSTRACT

This article analyses the spatio-temporal variability of droughts in the North Pacific Basin of México between 1961 and 2010, using two drought indices: the Standardized Precipitation Index (SPI) and the Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI). We used data from 48 weather stations with available data of precipitation and monthly minimum and maximum temperature. In 22 of the weather stations, time series of evaporimeters tanks were also available. The reference evapotranspiration, necessary to obtain the SPEI, was calculated by means of the Hargreaves equation. Results show that major droughts occurred in the 1980s and 2000s, although there is a noticeable spatial variability across the region. Finally, the potential impact of the atmospheric evaporative demand on drought severity observed by the different drought indices is discussed, and the possible implications for an appropriate risk assessment.

KEYWORDS: Drought, Standardized Precipitation Index; Standardized Precipitation Evapotranspiration Index, temporal evolution, spatial differences, trends.

DEDICATORIAS

A Dios.

Por haberme permitido llegar hasta este punto y haberme dado salud para lograr mis objetivos, además de su infinita bondad y amor.

A mis padres:

Con todo mi cariño para Ignacia Barrios y Eduardo Serrano + que hicieron todo en la vida para que yo pudiera lograr mis sueños, por motivarme, a ustedes por siempre mi corazón y mi agradecimiento.

A mis hermanos: Anahí Serrano y Eduardo Serrano por apoyarme siempre, gracias a la confianza que siempre nos hemos tenido; por el apoyo y amistad

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada para cursar la maestría y por apoyo económico para realizar la estancia en el Instituto Pirenaico de Ecología en España.

Al Colegio de postgraduados en especial al postgrado de Hidrociencias por apoyarme en mi formación profesional.

Al Instituto Pirenaico de Ecología en España por permitir utilizar sus instalaciones durante 6 meses.

Al científico titular del Consejo Superior de Investigaciones Científicas y del Instituto Pirenaico de Ecología en España., Dr. Sergio M. Vicente Serrano por darme un poco de su valioso tiempo y asesorarme en la realización de esta investigación, infinitas gracias para ti.

Al Dr. Héctor Flores Magdaleno por ser mi consejero de investigación y por permitirme ser parte de este proyecto.

A los Doctores Leonardo Tijerina Chávez y David Vásquez Soto, por ser parte consejo particular, asesores y gran apoyo.

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	1
2. OBJETIVOS	4
2.1 General.....	4
2.2 Particulares	4
3. ÁREA DE ESTUDIO.....	5
4. MATERIALES Y MÉTODOS	6
4.1 Base de datos	6
4.2 Series Regionales	9
4.3 Índices de sequía.....	9
4.3.1 El Índice de Precipitación Estandarizado (SPI)	9
4.3.2 El Índice estandarizado de Precipitación-Evapotranspiración (SPEI).....	11
4.4 Análisis de tendencias.....	13
4.5 Regionalización del comportamiento de las sequías.....	13
5. RESULTADOS	14
5.1 Evaluación de las sequías.....	14
5.1.1 Índice de Precipitación Estandarizado (SPI).....	21
5.1.2 Índice de Precipitación Evapotranspiración Estandarizada (SPEI) con (Eto).	24
5.1.3 Índice de Precipitación Evapotranspiración Estandarizada (SPEI) con evaporación de tanques evaporímetros.....	27
5.2 Análisis de tendencias.....	29
5.3 Regionalización del comportamiento de las sequías.....	34
6. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES	37
7. LITERATURA CITADA.....	40
8. ANEXOS	47

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.- Localización del área de estudio. Estaciones meteorológicas con datos de T_{max} , T_{min} y P (círculos azules y rojos) y estaciones con T_{max} , T_{min} , P y Evaporación con datos de tanques evaporímetros (círculos rojos)	5
Figura 2. Serie regional con la evolución temporal (1961-2010) del SPI, SPEI (ETo) y SPEI (22 estaciones con datos de tanques evaporímetros) a las escalas temporales de 3, 6, 12 y 48 meses.	17
Figura 3. Diferencias entre SPEI y SPI (serie regional obtenida a partir de 48 estaciones), y entre SPEI obtenido a partir de ETo y evaporímetros Piché (serie regional obtenida a partir de 22 estaciones) a las escalas temporales de 3, 12, 24 y 48 meses (1961-2010).....	18
Figura 4. Relación entre los valores medios regionales observados de ETo y evaporación de tanques evaporímetros y convertidos a anomalías desestacionalizadas.	19
Figura 5. Evolución de las series de anomalías desestacionalizadas de evaporación del tanque (azul) y ETo (rojo)	20
Figura 6. SPI a la escala temporal de 3 meses (Seria regional 1961-2010)	21
Figura 7. SPI a la escala temporal de 12 meses (Seria regional 1961-2010)	22
Figura 8. SPI a la escala temporal de 24 meses (Seria regional 1961-2010)	23
Figura 9. SPI a la escala temporal de 48 meses (Seria regional 1961-2010).	23
Figura 10. SPEI con (Eto) a la escala temporal de 3 meses (Serie regional 1961-2010)	24
Figura 11. SPEI con (Eto) Hargreaves a la escala de 12 meses (Seria regional 1961-2010).	25
Figura 12. SPEI con (Eto) a la escala temporal de 24 meses (Seria regional 1961-2010).	26
Figura 13. SPEI con (Eto) a la escala temporal de 48 meses (Seria regional 1961-2010).	26
Figura 14. SPEI con evaporación de tanques evaporímetros a la escala temporal de 3 meses (Seria regional 1961-2010).....	27
Figura 15. SPEI con evaporación de tanques evaporímetros a la escala temporal de 12 meses (Seria regional 1961-2010).....	28
Figura 16. SPEI con evaporación de tanques evaporímetros a la escala temporal de 24 meses (Seria regional 1961-2010).....	28
Figura 17. SPEI con evaporación de tanques evaporímetros a la escala temporal de 48 meses (Seria regional 1961-2010).....	29
Figura 18. Tendencias estacionales y anuales en la evolución del SPI y SPEI (ETo) (1961-2010).	31
Figura 19. Magnitud de cambio anual y estacional en el SPI y SPEI (ETo) (1961-2010).	32
Figura 20. Relación entre los cambios estacionales y anuales observados en el SPI y SPEI en cada uno de los 48 observatorios meteorológicos.....	33
Figura 21. Evolución temporal de los componentes principales extraídos de las 48 series de SPI y SPEI a la escala temporal de 12 meses. Entre paréntesis se muestra el porcentaje de varianza explicado por cada componente.	35

Figura 22. Distribución espacial de las cargas factoriales obtenidas a partir del análisis de las series de SPI y SPEI correspondientes a una escala temporal de 12 meses. 36

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Nombre, coordenadas y elevación de las estaciones..... 7
Cuadro 2. Clasificación de los valores del SPI..... 10
Cuadro 3. Clasificación de los valores de SPI según Agnew (2000)..... 11

1. INTRODUCCIÓN

La sequía es un fenómeno natural muy complejo debido a sus características (Wilhite, 2000), con problemas de definición y cuantificación muy importantes (Wilhite y Glantz, 1985; Vicente-Serrano et al., 2011; Lloyd-Hughes, 2014), aspecto que dificulta enormemente su estudio. Una sequía está compuesta por tres componentes fundamentales: magnitud (déficit acumulado por debajo de un determinado umbral) duración (número de meses o años consecutivos por debajo de un determinado umbral) e intensidad (déficit medio del periodo que está por debajo del umbral) (Dracup et al., 1980). Mediante la utilización de índices de sequía climáticos (Mishra y Singh, 2010), es posible tener una idea de la severidad de las sequías y cuantificar dichos componentes, su variabilidad en el tiempo y sus tendencias temporales.

En México, la sequía es un riesgo climático de primer orden, con importantes implicaciones ecológicas, económicas y sociales (Mullholand et al., 1997; Laliberte et al., 2004). Las sequías han sido un hecho recurrente en todo el territorio mexicano, existiendo fundadas evidencias de que la elevada recurrencia del fenómeno puede haber afectado el desarrollo histórico de las civilizaciones en la región (Curtis et al., 1996; Hodell et al., 2011). Durante el siglo XX e inicios del siglo XXI se han registrado sequías muy severas en México (Magaña et al., 1999; Mendoza et al., 2006; Méndez y Magaña, 2010; Bhattacharya y Chiang, 2014), fundamentalmente en las décadas de 1930 (extensibles también a amplias zonas de Norteamérica), 1950, 1990 y 2000 (Trenberth y Guillemot, 1996). En la región del Organismo de Cuenca Pacífico Norte la presencia de sequías recurrentes en las últimas décadas ha provocado importantes impactos negativos en los sectores agrícola, ambiental y en todas las actividades socio-económicas en general (Ravelo

et al, 2014). Además, las recientes sequías de gran severidad han aumentado el riesgo de sobreexplotación acuífera permanente y el fenómeno de la intrusión salina, generando tensiones sociales por el agua disponible, manifestadas por robos de agua en canales y en una gran cantidad de perforaciones de pozos clandestinos (Douriet, 2013).

Existen estudios que sugieren que el proceso de calentamiento observado en la región puede estar incrementando notablemente la disponibilidad de recursos hídricos en la región. De hecho, Seager y Vecchi (2010), mediante la utilización de modelos globales, apuntaron hacia un incremento del estrés hídrico en la región, fruto de la aridificación general de las zonas subtropicales y la expansión de las zonas subtropicales secas. Este hecho puede comprometer en gran medida las actividades económica de la región, por lo que resulta necesario contrastar con registros climáticos de calidad si en las últimas décadas se asiste a un incremento de las condiciones de sequía y si el calentamiento observado puede estar aumentando su severidad, vía el aumento de la demanda de agua por parte de la atmósfera. Aunque actualmente existe un debate científico sobre los efectos del calentamiento en la severidad de las sequías a escala global (Sheffield et al., 2012; Dai, 2023; Trenberth et al., 2014), existen múltiples evidencias regionales que apuntan a que el calentamiento global está teniendo un notable impacto en la severidad de las sequías, observada tanto en ecosistemas naturales (Allen et al., 2015), cultivos (Lobell et al., 2013) y recursos hídricos (Vicente-Serrano et al., 2014a).

Dada la importancia de las recurrentes sequías que impactan negativamente a la agricultura y a todas las actividades socio-económicas en la Cuenca Pacífico Norte, el principal objetivo de este estudio es analizar el comportamiento espacio-temporal

de las sequías con dos indicadores a lo largo de cinco décadas. Todo ello, con la finalidad de identificar regiones que han presentado un comportamiento similar, y mejorar el conocimiento de cómo se comporta el fenómeno climático extremo más importante que afecta a esta región. Para ello se han utilizado dos índices: el Índice de Precipitación Estandarizado (Standardized Precipitation Index, SPI) (McKee et al., 1993) y el Índice de Precipitación Evapotranspiración Estandarizado (Standardized Precipitation Evapotranspiration Index, SPEI) (Vicente-Serrano et al., 2010), para comprobar si los actuales procesos de calentamiento en la región están teniendo un cierto impacto en la severidad de las sequías durante el periodo analizado.

2. OBJETIVOS

2.1 General

Analizar el comportamiento de las sequías con dos indicadores: Índice de Precipitación Estandarizado (SPI) y el Índice de Precipitación Evapotranspiración Estandarizado (SPEI)

2.2 Particulares

- Determinar la variabilidad espacio-temporal de la sequía a diferentes escalas temporales en el período de 1961 al 2010.
- Determinar áreas homogéneas (regionalizar) de acuerdo a comportamiento de las sequias.
- Identificar y regionalizar los eventos de sequía más extremos, de su duración y magnitud.

3. ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio se encuentra en la Cuenca Pacífico Norte que comprende la totalidad del estado de Sinaloa y parte de los estados de Chihuahua, Durango, Zacatecas y Nayarit; políticamente está integrada por 51 municipios y comprende dos Regiones Hidrológicas: la RH 10, con una extensión de 104 790 km², y la RH 11 con una extensión de 51 837 km², abarcando una extensión total de 156 627 km², que corresponden el 8 % del territorio nacional.

(<http://www.conagua.gob.mx/ocpn/Contenido.aspx?n1=1&n2=0>)

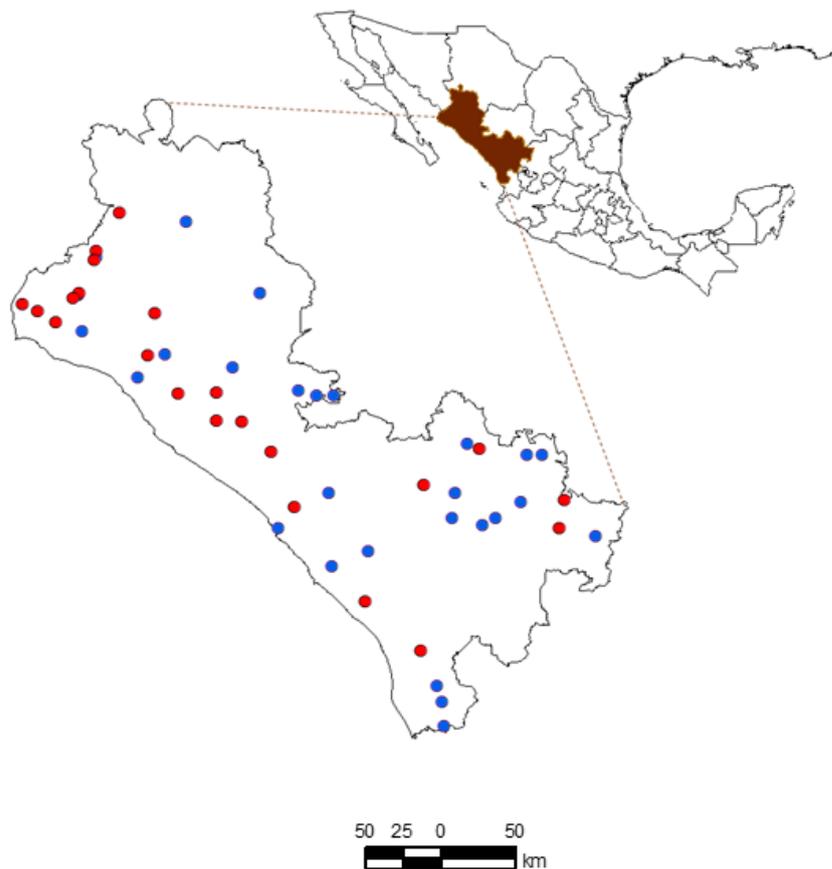


Figura 1.- Localización del área de estudio. Estaciones meteorológicas con datos de T_{max} , T_{min} y P (círculos azules y rojos) y estaciones con T_{max} , T_{min} , P y Evaporación con datos de tanques evaporímetros (círculos rojos)

4. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1 Base de datos

Inicialmente se trabajó con las series mensuales de temperatura máxima (T_{max}), temperatura mínima (T_{min}) y precipitación (P) disponibles en 803 estaciones meteorológicas, además de las series de tanques evaporímetros en 179 estaciones meteorológicas disponibles en el sistema de datos climatológicos CLImate COMputing project (CLICOM), administrado por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) (<http://clicom-mex.cicese.mx>). Muchas de las estaciones carecían de información de calidad, con excesivas lagunas de datos. Por ello, se seleccionaron aquellas series que al menos contuvieran 35 años con información de las tres variables (T_{max} , T_{min} y P), obteniendo 48 estaciones de las 803 iniciales, además de 22 series con registros de tanques evaporímetros, que suponen la disponibilidad de mediciones reales de demanda de agua por parte de la atmósfera en las garitas meteorológicas (Sánchez-Lorenzo et al., 2014). Las series descartadas se utilizaron para el relleno de las series seleccionadas, mediante la aplicación de modelos de regresión simple, utilizando siempre la serie más correlacionada, con al menos diez años de datos comunes. El cuadro 1 muestra las estaciones seleccionadas, sus coordenadas y si cuentan con datos medidos de evaporación. La Figura 1 muestra la distribución espacial de las estaciones, que cubren la práctica totalidad de la cuenca Pacífico Norte. Las series resultantes fueron sometidas a un cuidadoso control de calidad y homogeneización; el control de calidad es un paso fundamental para eliminar los datos incorrectos y comprobar la consistencia de los mismos (Feng et al., 2004). Dicho control estuvo basado en la comparación del rango de cada registro con el rango promedio de los datos registrados en estaciones adyacentes

(Vicente-Serrano et al., 2010b). Para identificar y corregir las inhomogeneidades temporales, se utilizó el sistema HOMER (HOMogenizaton softwarE in R) <http://www.homogenisation.org/> (Mestre et al., 2013). El método lleva a cabo una detección de inhomogeneidades a partir de las series pareadas y un análisis de varianza de dos factores para la corrección de los datos. Este método se identificó como uno de los que aportaban mejores resultados en la acción COST-HOME que testó diferentes métodos de homogeneidad (Venema et al., 2013).

Cuadro 1. Nombre, coordenadas y elevación de las estaciones.

Estación	Latitud	Longitud	Elevación (m)	Evaporación
Guadalupe Victoria (DGE)	-104.7	24.26	1892	NO
Francisco I. Madero (SMN)	-104.2	24.24	1961	NO
El saltito, Nomb. de Dios	-104.22	24	1800	NO
Santa Cruz de Ayala, Cosala	-108.54	25.55	84	SI
Ixpalino, San Ignacio	-106.37	23.57	300	SI
Jaina, Sinaloa (DGE)	-108.1	25.54	200	SI
Guadalupe y Calvo (SMN)	-106.58	26.6	2279	NO
Sanalona, Culiacán	-107.9	24.48	170	SI
Ojito de Camellones	-106.13	25.4	2300	NO
Guacho chic (CFE)	-107.42	26.49	1320	NO
Las Cañas, el Fuerte	-108.36	26.28	84	SI
El Carrizo, Ahome	-109.19	25.58	7	NO
Canelas, Canelas	-106.34	25.7	1360	NO
San José de Acevedo	-104.45	23.46	1750	NO
Vascogil, Canelas	-106.24	25.4	1220	NO
El Tizate, Santiago Ixcuintla	-105.7	21.45	19	NO
Mocorito, Mocorito (DGE)	-107.55	25.28	60	NO
El Cantil, S. Papasquiario	-106.16	24.57	2035	NO
El Pino, Canatlan	-104.54	24.34	2004	NO

Estación	Latitud	Longitud	Elevación (m)	Evaporación
Sombrerete, Sombrerete	-103.38	23.38	2379	NO
Ruiz Cortines, Guasave	-108.43	25.43	15	NO
Navios Viejos, Durango	-105.3	23.49	2492	NO
Canatlan, Canatlan	-104.46	24.31	2000	SI
Higuera de Zaragoza	-109.19	25.58	9	SI
Siqueros, Mazatlán (DGE)	-106.15	23.21	55	NO
Santiago Bayacora	-104.37	23.49	1900	NO
Vicente Guerrero	-103.58	23.43	1913	SI
Ahome, Ahome	-109.1	25.55	80	SI
Huites, Choix	-108.22	26.54	168	SI
Otinapa, Durango	-105.1	24.5	2400	NO
Boca-toma Sufragio (DGE)	-108.46	26.49	152	SI
El Fuerte, El Fuerte	-108.37	26.19	84	NO
El Mahome, el fuerte	-108.36	26.31	12	SI
Narciso Mendoza, Poanas	-103.55	24.1	1910	SI
Peña del Aguila, Durango	-105.19	24.1	1896	SI
Pericos, Mocorito	-107.46	25.49	600	SI
Rosamorada, Rosamorada	-105.12	22.9	44	NO
Guatenipa, Badiraguato	-107.13	25.21	290	NO
Guamuchil,(A.A.R.M.), S.A	-108.49	25.28	43	SI
El Playon, Angostura	-108.1	25.15	5	NO
San Pedro, Ruiz	-105.9	21.58	24	NO
Rosario, Rosario	-105.55	23	27	SI
Acaponeta, Acaponeta DGE	-105.22	22.3	31	SI
El Varejonal, Badiraguato	-107.24	25.6	122	SI
Los Mochis, Ahome	-109	25.48	14	SI
Potrerrillos, Concordia	-105.52	23.3	1470	NO
San Blas, El Fuerte	-108.46	26.6	71	SI
Culiacán, Culiacán	-107.24	24.49	40	SI

4.2 Series Regionales

Además de las series individuales de cada una de las estaciones meteorológicas, se trabajó con una serie regional con la finalidad de recoger el patrón general del comportamiento de las sequías en el conjunto de la región. Para la obtención de la serie regional se utilizó el método desarrollado por Jones y Hulme (1996), a partir de la ponderación espacial de los registros mensuales en las diferentes estaciones disponibles. El factor de ponderación de cada estación fue el índice de la superficie representada por cada estación sobre el área total de la Cuenca Pacífico Norte, basada en el método de polígonos de Thiessen.

4.3 Índices de sequía

4.3.1 El Índice de Precipitación Estandarizado (SPI)

El Índice de Precipitación Estandarizado (SPI) es un índice que permite identificar condiciones de déficit y exceso de precipitación a diferentes escalas temporales. El índice se calcula mediante el ajuste de los datos mensuales de precipitación a una distribución (McKee et. al., 1993). Para calcular el índice se precisa al menos 30 años de datos mensuales, siendo preferible contar con al menos 50 años (Guttman, 1999), tal como se dispone en este trabajo. El SPI es un índice potente, flexible y sencillo de calcular; de hecho, el único parámetro necesario para su cálculo es la precipitación. La principal crítica del SPI es que su cálculo se basa únicamente en datos de precipitación y no considera otras variables que influyen en la severidad de la sequía como pueda ser la temperatura o, principalmente, la demanda de agua por parte de la atmósfera.

El SPI se concibió para cuantificar el déficit de precipitación para varias escalas temporales, las cuales reflejan el impacto de la sequía en la disponibilidad de los diferentes recursos hídricos. Las condiciones de humedad del suelo responden a anomalías de precipitación en una escala relativamente corta. Las anomalías de precipitación a largo plazo quedan reflejadas en las aguas subterráneas, los caudales fluviales y el almacenamiento en reservorios. Por ese motivo, McKee y otros (1993) calcularon originalmente el SPI para escalas temporales de 3, 6, 12, 24 y 48 meses, de igual forma establecen una categorización de valores del SPI con el fin de identificar la severidad de cada uno de los periodos secos identificados en el cuadro 2.

Cuadro 2. Clasificación de los valores del SPI.

SPI	Categoría
>2.00	Extremadamente húmedo
1.50 a 1.99	Muy húmedo
1.00 a 1.49	Moderadamente húmedo
-0.99 a 0.99	Normal
-1.00 a -1.49	Moderadamente seco
-1.5 a -1.99	Muy seco
<-2.00	Extremadamente seco

La clasificación es de enorme utilidad para determinar la intensidad y duración de los periodos secos a distintas escalas temporales. Sin embargo, esta clasificación ha sido revisada por Agnew (2000), ver cuadro 3., sugiriendo que las clases planteadas por Mckee et al. (1993) minusvaloran la existencia de periodos extremadamente secos. Agnew (2000) propone otra clasificación argumentando que, a partir de la misma, un año extremadamente seco ocurre cada 20 años,

mientras que en la clasificación de Mckee ocurría cada 40 años, periodización irreal para algunas regiones de España, donde las severas sequías son un hecho frecuente. Por tal razón en este trabajo se ha optado por la utilización de las clases propuestas por Agnew.

Cuadro 3. Clasificación de los valores de SPI según Agnew (2000)

SPI	Categoría
>1.65	Extremadamente húmedo
1.28 a 1.64	Muy húmedo
0.84 a 1.27	Moderadamente húmedo
-0.84 a 0.84	Normal
-1.28 a -0.83	Moderadamente seco
-1.65 a -1.27	Muy seco
<-1.65	Extremadamente seco

4.3.2 El Índice estandarizado de Precipitación-Evapotranspiración (SPEI)

El SPEI se calcula a partir de datos de precipitación y de demanda evaporativa por parte de la atmosfera, y tiene la ventaja de combinar el carácter multi-escalar del SPI con su capacidad para incluir los efectos de la demanda de agua por parte de la atmosfera en la severidad de la sequía. El procedimiento para el cálculo del índice se detalla en Vicente- Serrano et al. (2010) y Beguería et al. (2014). Se trata de un índice que muestra igual sensibilidad a las variaciones de precipitación y evapotranspiración de referencia (ET_o) (Vicente-Serrano et al., 2015) y que presenta ventajas respecto a otros indicadores para identificar los impactos de la sequía en diferentes sistemas naturales e hidrológicos (Vicente-Serrano et al., 2012)

La ETo se obtuvo mediante el método de Hargreaves y Samani (1985), basado en los datos de temperatura máxima, mínima y la radiación solar extraterrestre:

$$ETo = 0.0023 RaR^{0.5} (T+17.8)$$

Donde R es la diferencia entre la T_{max} y T_{min} (temperaturas mensuales en °C), T es la temperatura media mensual, Ra es la radiación extraterrestre expresada en E equivalente ($mm\ dia^{-1}$) que depende de la latitud y día del año.

Este método es menos preciso que el recomendado por diferentes organismos, basado en el método de combinación de Penman-Monteith; sin embargo, dada la disponibilidad de datos en la zona de estudio, se trata de la aproximación más precisa que se pueda llevar a cabo. Diferentes estudios indican que las estimaciones de ETo basadas en la ecuación de Hargreaves muestran estimaciones muy similares a aquellas derivadas del método FAO-56 Penman-Monteith (Droogers y Allen, 2002).

Se calculó el SPI y el SPEI a las escalas temporales de 3, 12, 24 y 48 meses, en cada una de las estaciones meteorológicas y a partir de las series regionales de las diferentes variables. Del SPEI se calculó una versión diferente obtenida con datos de ETo, utilizando los datos de los evaporímetros como medida de la demanda de agua por parte de la atmósfera. Diferentes estudios señalan la paradójica evolución de la demanda de agua por parte de la atmósfera en diferentes regiones del mundo, donde bajo un escenario de calentamiento global se observan descensos en los valores de ETo (p.ej., Roderick y Farquhar, 2002). Este hecho puede deberse al comportamiento observado por otras variables que controlan la demanda de agua por parte de la atmósfera, como la velocidad del viento, radiación o humedad relativa, y cuya evolución podría compensar la observada por la temperatura (McVicar et al., 2012).

4.4 Análisis de tendencias

Los métodos más utilizados para el análisis de tendencias son las pruebas no paramétricas de correlación por rangos de Mann-Kendall y Spearman (Lanzante, 1996). Estas pruebas estadísticas identifican la presencia de cambios y describen si las tendencias son significativas. En este estudio se utilizó el test de Mann-Kendall para obtener las tendencias estacionales y anuales de los índices de sequía indicados más arriba. El nivel crítico seleccionado para aceptar un cambio como significativo fue de $p < 0.05$. El test indicado permite conocer si existen cambios significativos o no estadísticamente. Sin embargo, no permite determinar la magnitud de dichos cambios. Para ello se utilizaron modelos de regresión simple entre las series estacionales y anuales de los índices de sequía y las series de tiempo. La pendiente de la recta nos indica la magnitud de cambio por cada año. En este trabajo se multiplicó este resultado por los 50 años de datos disponibles, con la finalidad de saber cuánto ha cambiado la sequía, en unidades de media del índice, en el periodo de estudio.

4.5 Regionalización del comportamiento de las sequías

Finalmente, se llevó a cabo un análisis para comprobar las posibles diferencias espaciales en el comportamiento de las sequías dentro de la región Cuenca Pacífico Norte. Para ello se utilizó un Análisis de Componentes Principales (ACP) a partir de las series de los diferentes índices de sequía a la escala temporal de 12 meses. El ACP es el método más utilizado en los estudios de regionalización climática (P. Ej., Huth, 2006). Este análisis permite retener los rangos comunes a todos los

observatorios e identificar, a la vez, las particularidades de carácter más local, mediante un resumen de la información disponible. El primer componente representa la combinación lineal que absorbe el mayor porcentaje de varianza, el segundo el mayor porcentaje de la varianza no correlacionada con el primer componente y así sucesivamente. Se aplicó un PCA en modo S, donde los diferentes observatorios meteorológicos son las variables y los diferentes meses los casos (Serrano et al., 1999). Una vez obtenidos los componentes es recomendable su rotación, ya que la misma tiene el efecto de redistribuir la varianza y eliminar ambigüedades mientras se conserva la varianza entre el número de componente no rotados. Se ha utilizado la rotación varimax (Kaiser, 1958), que es la opción más utilizada debido a su capacidad para obtener patrones más estables y físicamente explicables (Richman, 1986; White et al., 1991).

5. RESULTADOS

5.1 Evaluación de las sequías

En la Figura 2 se muestra un análisis de la evolución del SPI y el SPEI a partir de las series regionales obtenidas para el conjunto de la Cuenca Pacífico Norte en el periodo 1961-2010. Se muestra la evolución de los índices a escalas temporales de 3, 12, 24 y 48 meses. La serie regional de SPI muestra que los principales episodios de sequía se registraron en la década de 1980 y 2000. En 1982 es cuando se registra, en general, el episodio de mayor intensidad, aunque el episodio del 2003 presentó una duración y magnitud superior. Las series de SPEI muestran un comportamiento temporal similar, reconociendo los mismos episodios de sequía que el SPI. Sin embargo, se observan notables diferencias entre la serie de SPEI

obtenida mediante datos calculados de ETo y la serie calculada mediante observaciones de evaporímetros. Esta última muestra una mayor severidad de los episodios de sequía identificados hasta 1980 con relación a las series previas.

La Figura 3 muestra las diferencias entre la evolución de las series regionales de SPI y SPEI, y entre las series de SPEI obtenidas mediante ETo y aquellas obtenidas mediante tanques evaporímetros (para una adecuada comparación, dichas series regionales se han creado con los 22 observatorios comunes; los resultados utilizando la serie regional a partir de los 48 observatorios son similares –no mostrado-). Las diferencias muestran un incremento de las diferencias negativas entre SPEI basada en ETo y SPI, en las dos últimas décadas, que se refuerza considerablemente conforme aumenta la escala temporal del índice. Esto hace que durante los principales episodios de sequía observados en las últimas dos décadas (2003 y 2008-09), la severidad de las sequías haya sido mayor utilizando el SPEI que el SPI. No obstante, este comportamiento también se observa calculando las diferencias entre el SPEI obtenido mediante datos de ETo y los datos de los evaporímetros. De hecho, la evolución hacia una mayor severidad de las sequías ha sido muy superior utilizando las series de ETo que las de los evaporímetros para calcular el SPEI, aunque el ajuste de las series de tanques evaporímetros y ETo es muy buena a escala regional (Figura 4), ya que aunque en los meses de mayor evaporación el método de Hargreaves sobreestima los valores observados en los tanques evaporímetros, las series de anomalías desestacionalizadas muestran una alta correlación ($r = 0.8$). De hecho, las series de los tanques evaporímetros tienden a registrar valores anómalamente altos hasta 1975, con relación a las estimaciones de ETo (Figura 5), lo que sugiere que o bien algunas variables que afectan en la variabilidad de la AED (p.ej., velocidad del viento, humedad relativa o radiación),

presentaron un comportamiento diferente al observado a partir de 1975, o bien pudieron existir problemas generalizados en la medición de esta variable. De hecho, el buen ajuste existente entre ETo y evaporación de tanques evaporímetros desde 1980 ($r = 0.85$) confiere una gran robustez a los cálculos de SPEI obtenidos mediante datos de ETo obtenidos mediante la ecuación de Hargreaves, y hace sospechar que las series de evaporímetros pueden contener algunos problemas en las primeras décadas de medición. En los siguientes análisis únicamente se presentan los resultados de los índices obtenidos a partir de las series de ETo

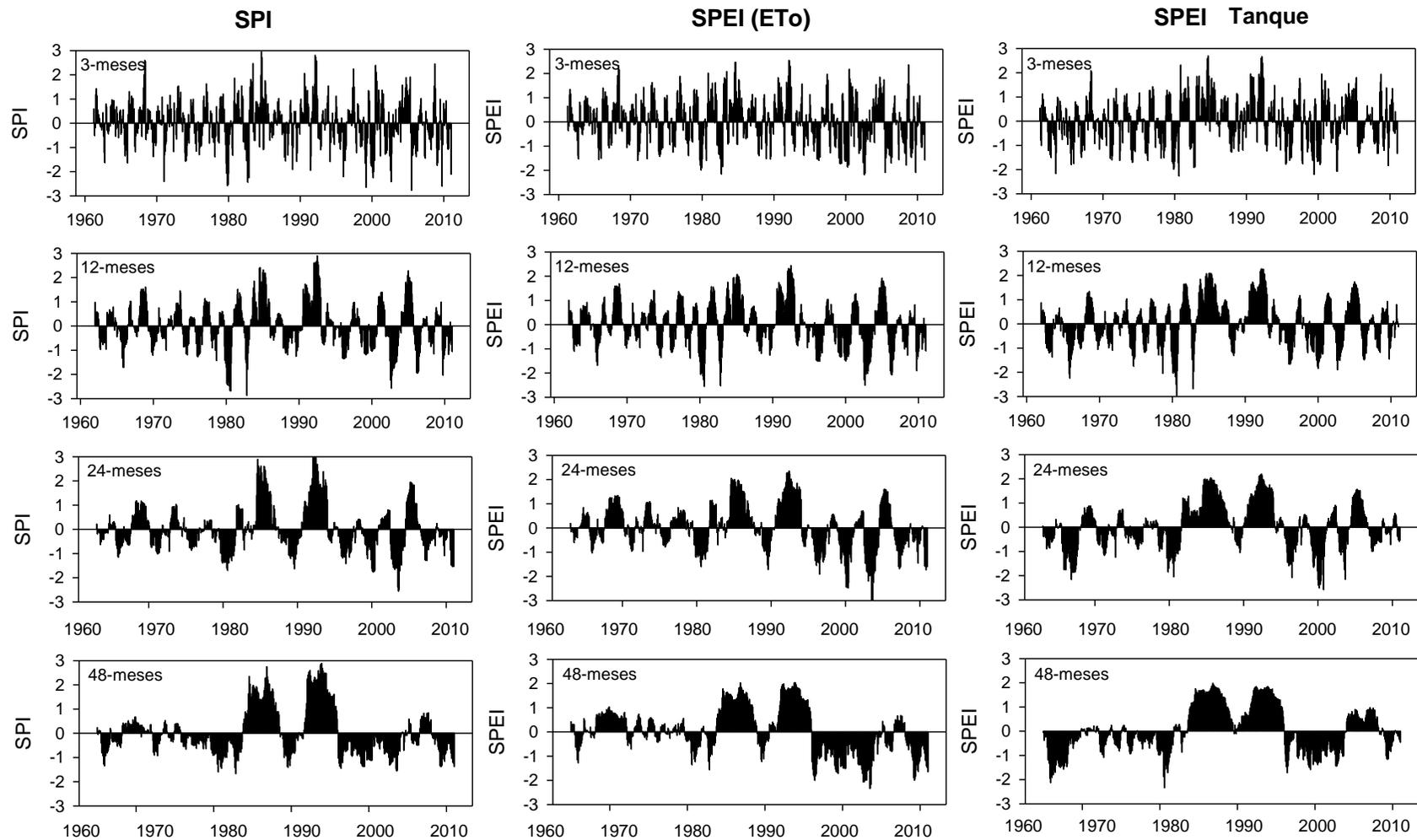


Figura 2. Serie regional con la evolución temporal (1961-2010) del SPI, SPEI (ETo) y SPEI (22 estaciones con datos de tanques evaporímetros) a las escala temporales de 3, 6, 12 y 48 meses.

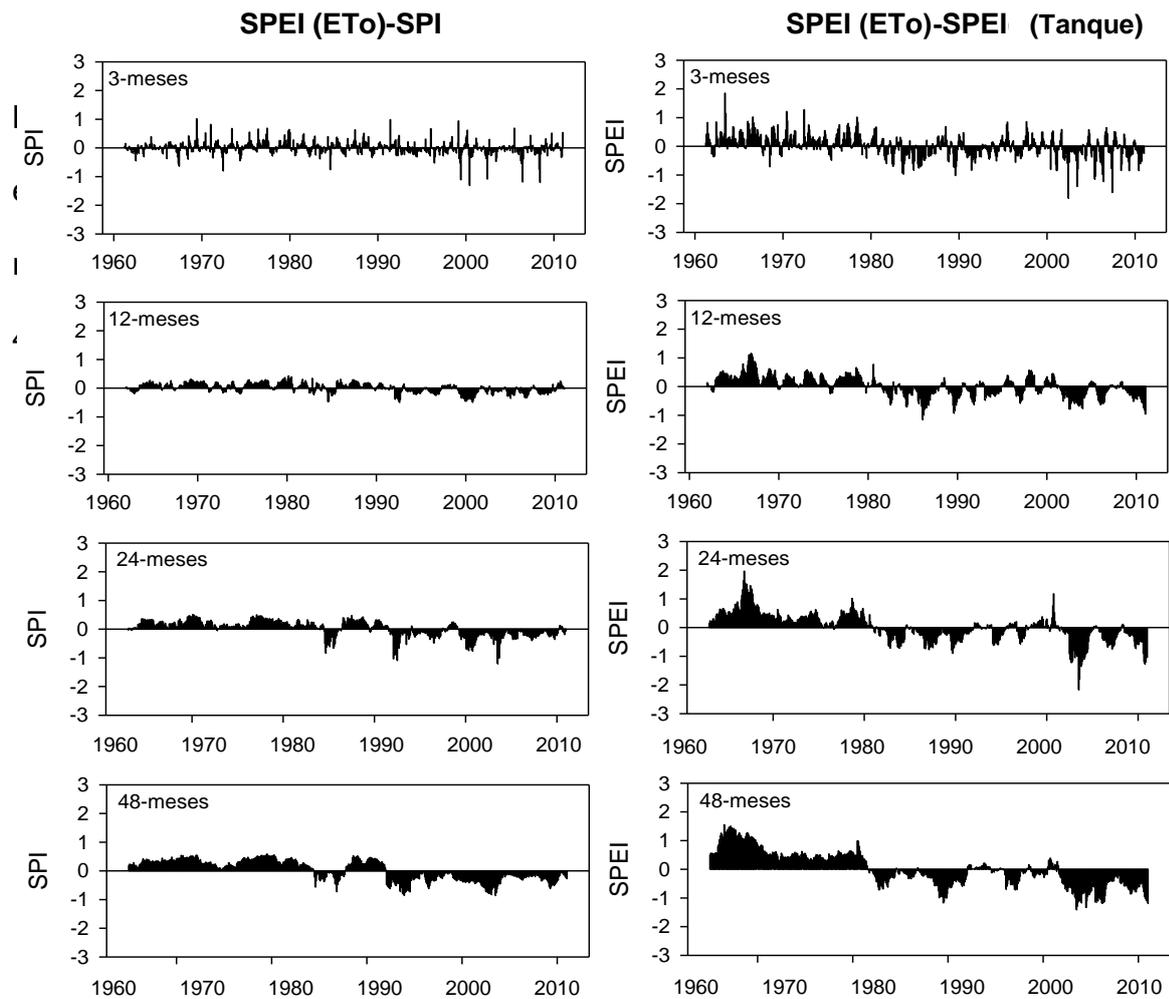


Figura 3. Diferencias entre SPEI y SPI (serie regional obtenida a partir de 48 estaciones), y entre SPEI obtenido a partir de ETo y evaporímetros Piché (serie regional obtenida a partir de 22 estaciones) a las escalas temporales de 3, 12, 24 y 48 meses (1961-2010)

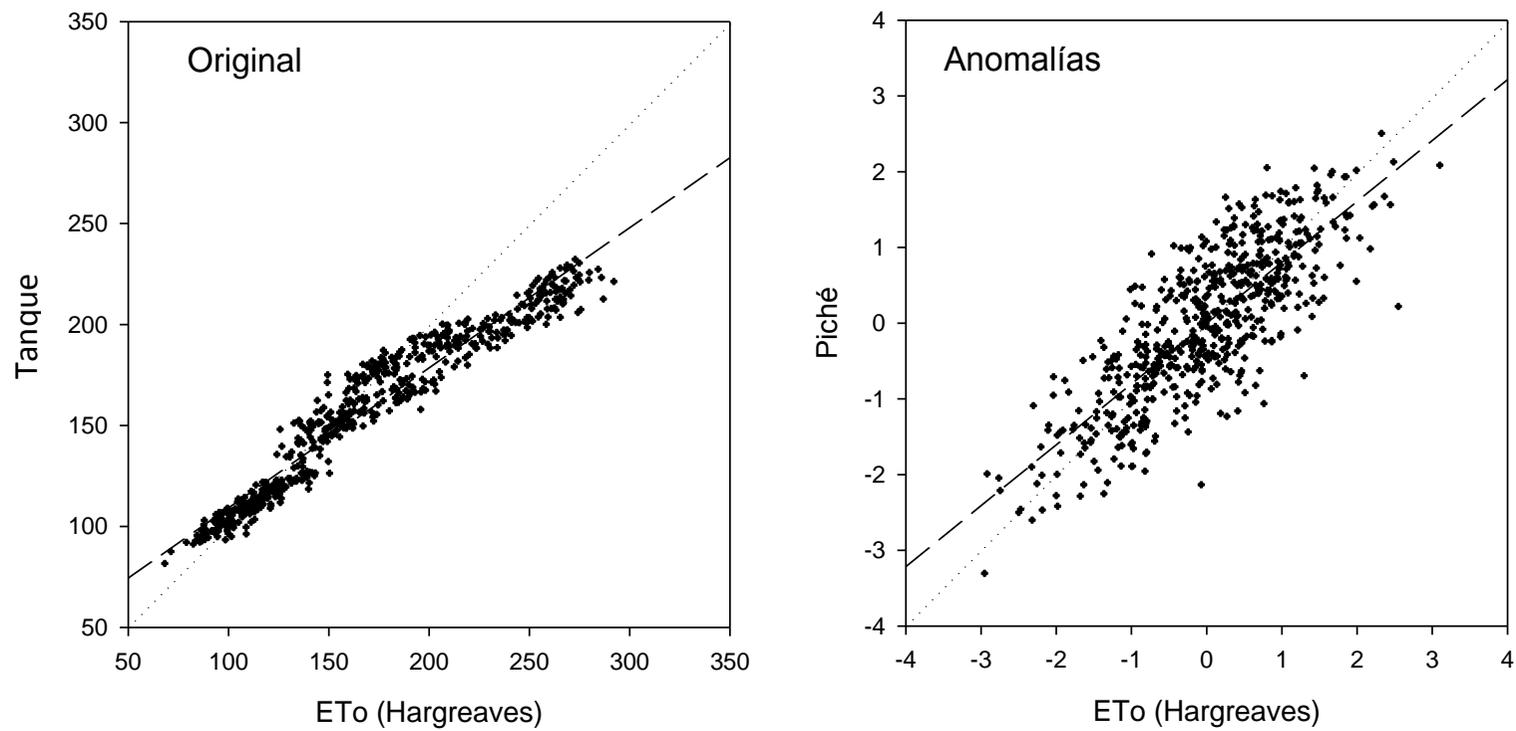


Figura 4. Relación entre los valores medios regionales observados de ETo y evaporación de tanques evaporímetros y convertidos a anomalías desestacionalizadas.

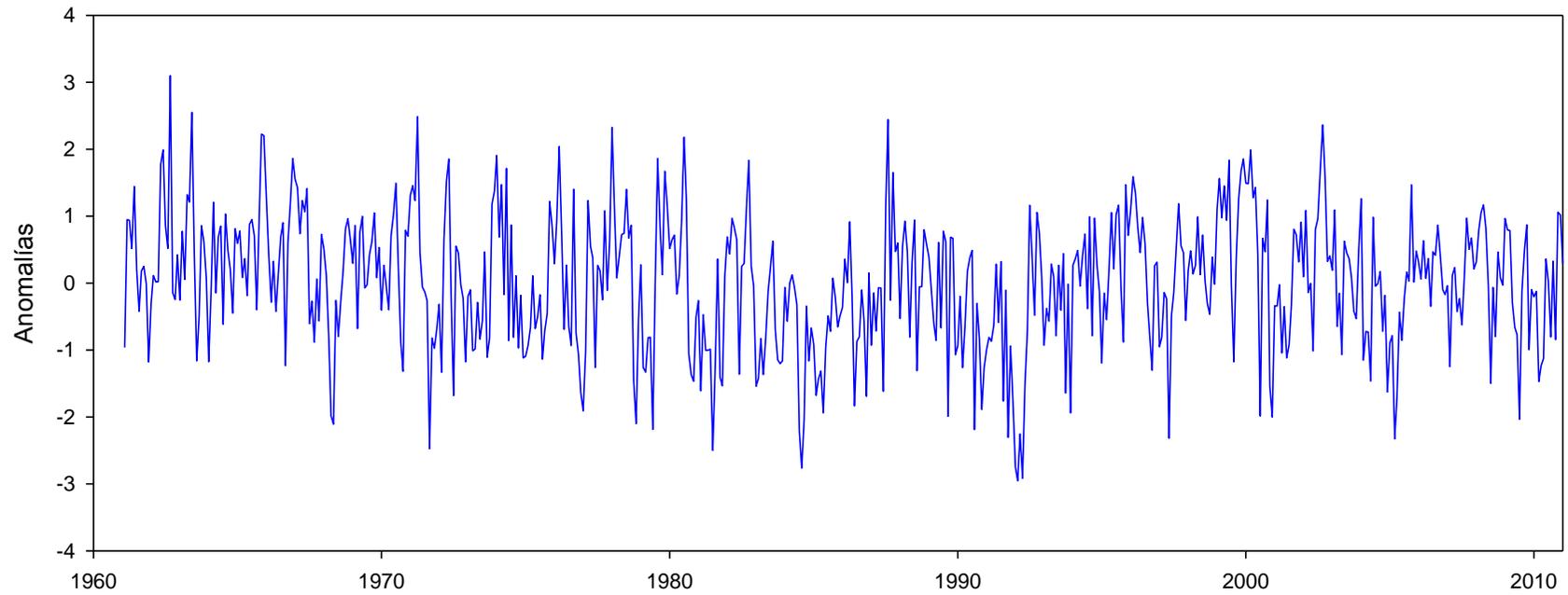


Figura 5. Evolución de las series de anomalías desestacionalizadas de evaporación del tanque (azul) y ETo (rojo)

5.1.1 Índice de Precipitación Estandarizado (SPI)

Considerando la escala temporal de 3 meses (Figura 6), tenemos que para el año de 1970 específicamente en el mes de diciembre se tuvo la primera sequía extrema con un valor de -2.40 todo esto tomando en cuenta la clasificación de Agnew (2000) para determinar la intensidad y duración de los periodos secos a distintas escalas temporales. Posteriormente en el año de 1979 se registraron valores extremos durante cinco meses consecutivos (Agosto, Septiembre, Octubre, Noviembre y Diciembre) donde el valor extremo fue de -2.58 en el mes de Octubre, lo mismo para el año de 1999 (Enero, Febrero, octubre, noviembre y diciembre) con -2.65 para el mes de febrero como valor extremo, ambos años presentaron los dos periodos más extensos en la serie a escala de 3 meses. Para el año de 1982 tenemos tres meses consecutivos con sequías extremas (Agosto, Septiembre, octubre) siendo el mes de agosto el más negativo de este año con -2.44, lo mismo sucedió en el año 2000 con tres meses consecutivos de sequías (Enero, febrero y marzo) siendo enero el más crítico con -2.05. Para los años de 1988, 1991 y 1995 se tuvo únicamente un mes por año con sequias por debajo del umbral -1.65. En el 2002 tenemos dos meses con -1.96 y -2.41, en junio del 2005 se detectó el pico negativo más extremo de toda la serie con un valor de -2.77.

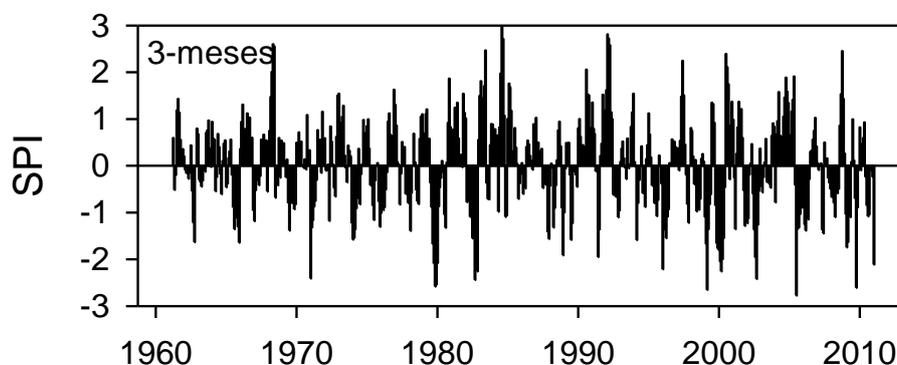


Figura 6. SPI a la escala temporal de 3 meses (Seria regional 1961-2010)

A la escala temporal de 12 meses (Figura 7), tenemos que para el año de 1965 en los meses de octubre y noviembre se dieron las primeras sequías extremas (-1.70 y -1.72) Para diciembre de 1979 (-1.71), en el año de 1980 fue el periodo más extensos en la serie a escala de 12 meses (enero, febrero, marzo, abril, mayo, junio y julio) siendo el mes de julio el más negativo con -2.70. En octubre de 1982 se detectó el pico negativo más extremo de toda la serie con un valor de -2.87. En el año 2000 se identificaron 6 meses con sequías extremas (julio, agosto, septiembre, octubre, noviembre, diciembre). En el año 2003 y 2006 se registraron picos negativos pero no más de -1.70 y no mayor a -1.95. En septiembre del 2009 tenemos -2.04. Para esta escala las sequias se presentaron pocas veces pero fue aumentando su duración.

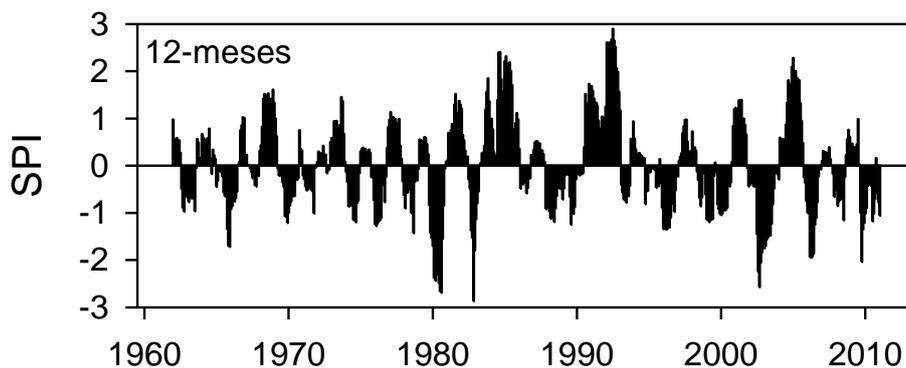


Figura 7. SPI a la escala temporal de 12 meses (Seria regional 1961-2010)

Considerando la escala temporal de 24 meses (Figura 8), tenemos que para el año de 1980 en el mes de julio se tuvo la primera sequía extrema con un valor de -1.70. Posteriormente en el año 2000 se registraron valores extremos durante cinco meses consecutivos (enero, febrero, marzo, abril y mayo) donde el valor extremo fue de -1.77 en el mes de febrero, lo mismo para el año 2003 (Enero, junio, julio, agosto y septiembre) en este año es donde se registró un valor de -2.56) siendo el pico negativo más extremo de toda la serie.

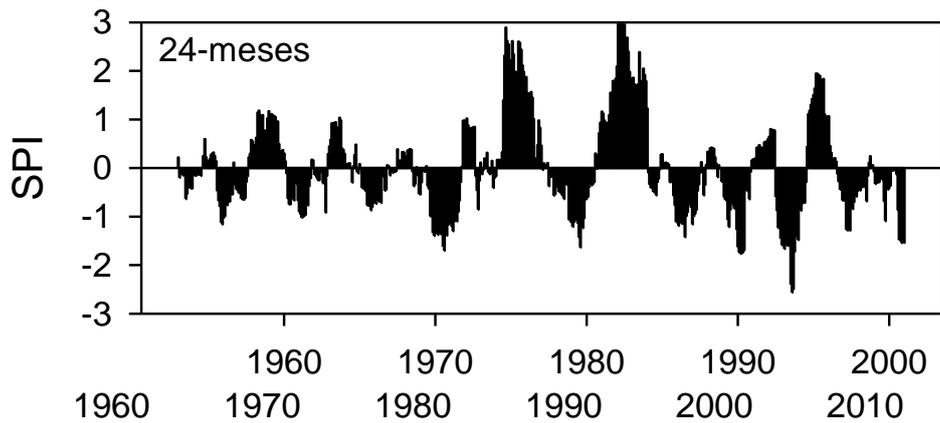


Figura 8. SPI a la escala temporal de 24 meses (Seria regional 1961-2010)

Los periodos más secos y húmedos se aprecian mejor en la escala de 48 meses (Figura 9), donde los periodos húmedos son notablemente altos y con una gran duración que comprenden la década de 1980 y 1990 por otra parte los periodos más secos se presentaron en la década de 1980 y 2000. Pero también podemos ver que la frecuencia de los periodos secos se reduce a esta escala.

La utilidad del SPI a una escala de 48 meses es menos evidente, aunque da una excelente idea de la evolución general de las condiciones de humedad, y puede ser muy útil para el seguimiento de los recursos hídricos subterráneos, cuya recarga suele producirse a escalas temporales más largas.

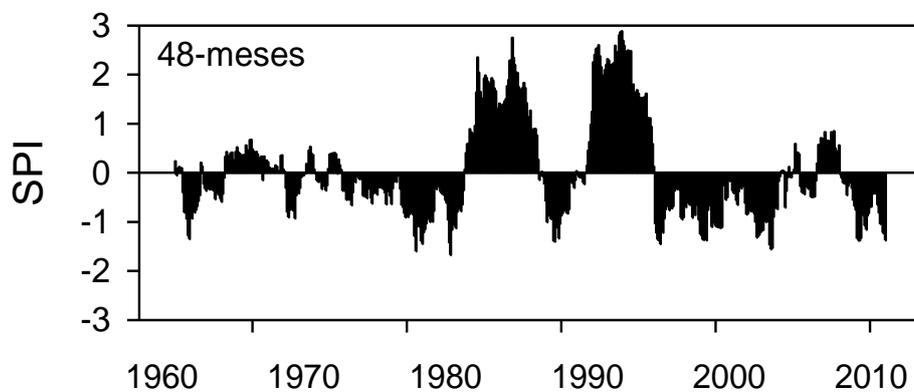


Figura 9. SPI a la escala temporal de 48 meses (Seria regional 1961-2010).

5.1.2 Índice de Precipitación Evapotranspiración Estandarizada (SPEI) con (Eto).

La evolución temporal del SPEI a 3 meses (Figura 10), considerando las fases secas de acuerdo a su duración e intensidad y también de acuerdo a la clasificación de sequía por Mckee y Angew se observa que se presentaron las sequías más extremas en el mes de julio del 2002 con -2.18, agosto de 1982 con -2.16, agosto del 2002 con -2.12, septiembre del 2009 con -2.09, junio del 2005 con -2.08 y al igual que en el SPI se identificaron cinco periodos muy secos tomando en cuenta su duración e intensidad, las décadas donde se presentó más sequías fue en 1980 y 2000 pero también se pueden observar cuatro picos de humedad en 1964, 1992, 1984, 2008.

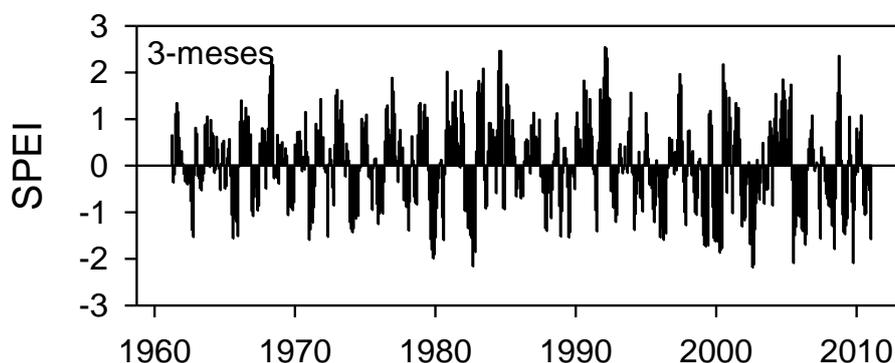


Figura 10. SPEI con (Eto) a la escala temporal de 3 meses (Serie regional 1961-2010)

A la escala temporal de 12 meses (Figura 11), se tiene que para el año de 1980 se registró 7 meses de sequía extrema o, junio y julio) siendo el mes de julio el más crítico con -2.55, lo mismo sucedió en el año 2002 (julio, agosto, septiembre, octubre, noviembre y diciembre) con -2.50 presentándose en el mes agosto del mismo año, 1980 y 2002 fueron los años donde se presentaron los dos periodos más extensos y por lo tanto podemos decir que en la década de 1980 y 2000 se

dieron las sequías más extremas para la serie a una escala de 12 meses, sin embargo considerando la magnitud tenemos que en la década de 1990 y 2000 se presentaron sequías considerables por su magnitud. Para la misma escala tenemos que para los años de 1965 (noviembre) y 2003 (febrero) se presentaron las primeras sequías extremas de -1.68 ambas. En julio de 1980 se detectó el pico negativo más extremo de toda la serie con un valor de -2.55.

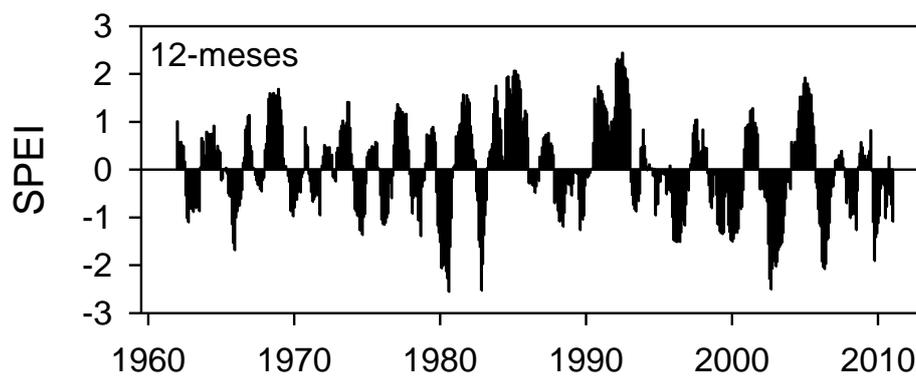


Figura 11. SPEI con (Eto) Hargreaves a la escala de 12 meses (Serie regional 1961-2010).

Considerando la escala temporal de 24 meses (Figura 12), se empiezan a notar los periodos más marcados en cuanto a magnitud, en el mes de julio del año 2003 se registró un valor de sequía extrema de -3.61, al igual julio (-3.56) y agosto del mismo año con -3.49 cifras considerablemente altas. Las décadas donde se presentaron más sequías extremas fueron: la de 1990 y 2000. Se dieron dos periodos muy marcados en cuando a humedad en la década de 1980 y 1990. El año de 2007 en el mes de marzo se tuvo la primera sequía extrema con un valor de -1.68. En todo el año del 2003 se presentaron sequías extremas siendo un año extremadamente seco para la Cuenca Pacífico Norte.

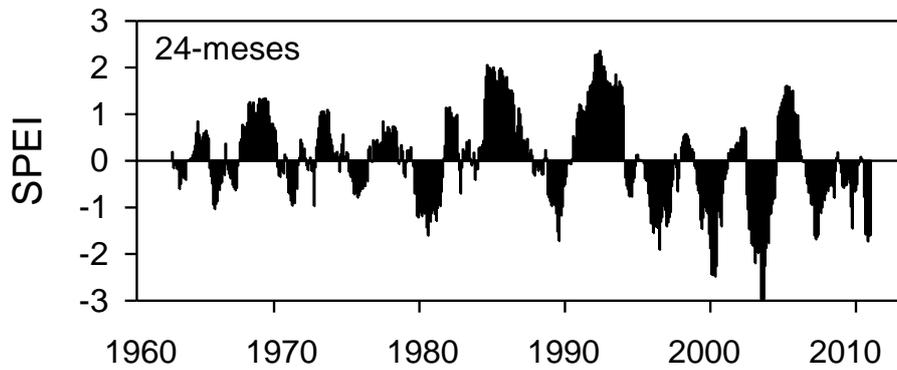


Figura 12. SPEI con (Eto) a la escala temporal de 24 meses (Seria regional 1961-2010).

Considerando la escala temporal de 48 meses (Figura 13), podemos observar que en el año de 1993 se tiene un mes extremadamente húmedo específicamente en el mes de octubre al igual que en el mismo mes pero para el año de 1986. En la década de 1980 y 1990 se tienen los periodos más húmedos en toda la escala. En esta escala los periodos húmedos se pueden identificar más fácilmente al igual que los periodos secos. Entre el año 1996 y 1997 se presentaron sequias moderadamente secas y entre el año 1999 y 2000 se presentaron las sequías muy secas, las sequías extremas fueron notables en el años de 2002 (julio, agosto, septiembre, noviembre y diciembre) donde la más intensa fue de -2.07 pero la sequía más extrema la escala de 48 meses fue de -2.33 para el mes de junio del 2003.

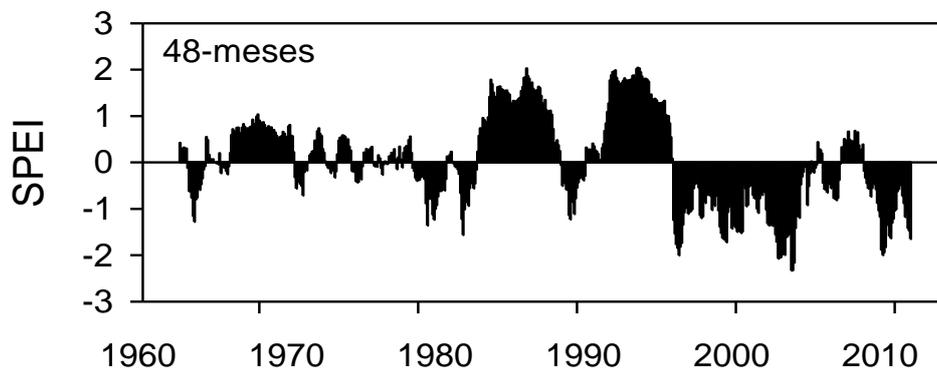


Figura 13. SPEI con (Eto) a la escala temporal de 48 meses (Seria regional 1961-2010).

5.1.3 Índice de Precipitación Evapotranspiración Estandarizada (SPEI) con evaporación de tanques evaporímetros.

En la evolución temporal del SPEI a 3 meses se presentaron las sequías más extremas en el mes de julio del 1989 con -2.26, mayo de 1999 con -2.20, mayo del 1963 con -2.17, julio 2002 con -2.07, agosto del 2002 con -2.06, al igual que en el SPEI (Eto) se observaron dos décadas con mayor sequía 1980 y 2000.

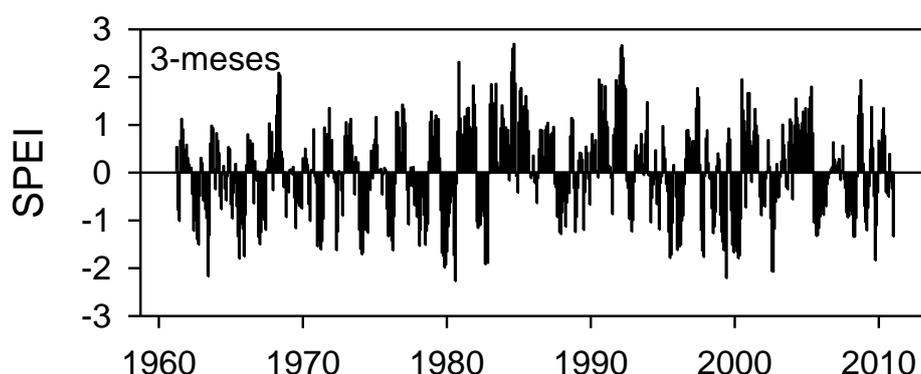


Figura 14. SPEI con evaporación de tanques evaporímetros a la escala temporal de 3 meses (Seria regional 1961-2010).

En la escala temporal de 12 meses, al igual que el SPE (Eto) en julio de 1980 se detectó el pico negativo más extremo de toda la serie con un valor de -3.32., también se registrando 8 meses de sequía extrema (enero, febrero, marzo, abril, mayo, junio y julio y agosto) para el mismo año. La década de 1980 fue la más seca de toda la serie. Si se toma en cuenta la magnitud tenemos que en la década de 1990 y 2000 se presentaron sequías considerables por su magnitud como se registró también en el SPEI (Eto). Las primera sequía extrema se presentó en 1979 (diciembre) con -1.66 y en los años de 1985 y 1995 comienza intenso período humedad.

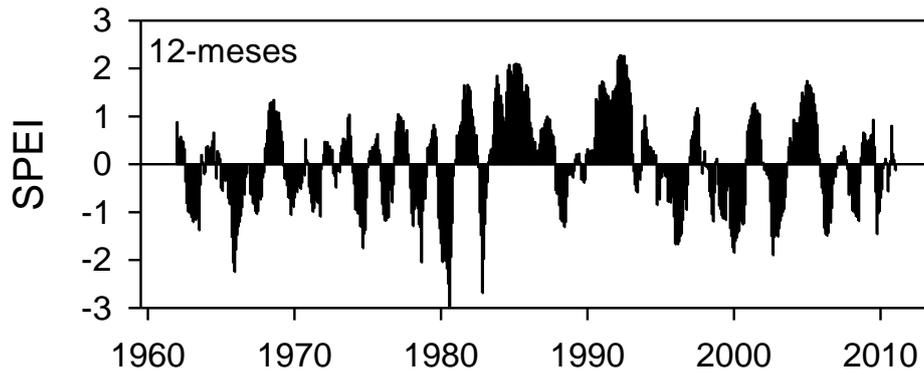


Figura 15. SPEI con evaporación de tanques evaporímetros a la escala temporal de 12 meses (Seria regional 1961-2010).

A la escala de 24 meses las sequías se hacen menos frecuentes, pero aumenta su duración. Se detectaron periodos secos concentrados en la década de 1960 y 2000, destacando los meses de enero (-2.41), febrero (-2.51), marzo (-2.38), abril (-2.35), mayo y septiembre (-2.58) todos del año 2000 como los de mayor sequedad en toda la serie, teniendo el SPEI extremo de -2.58 para el mismo año.

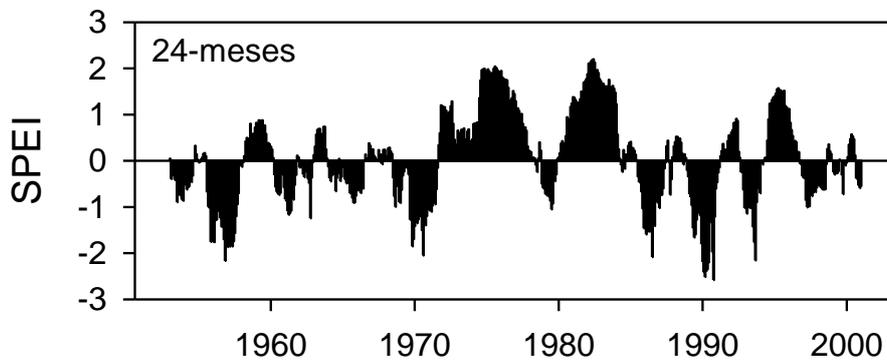


Figura 16. SPEI con evaporación de tanques evaporímetros a la escala temporal de 24 meses (Seria regional 1961-2010).

Para la escala de 48 meses la duración de periodos secos es mayor registrados en la década de 1960, 1980, 1990 y 2000, el máximo negativo fue en junio de 1980 (-2.33), también destaca la presencia de los periodos húmedos que abarcan las

décadas de 1980 y 1990, mientras que a partir de mayo de 1996 comienza un nuevo periodo seco, para terminar en diciembre del 2003

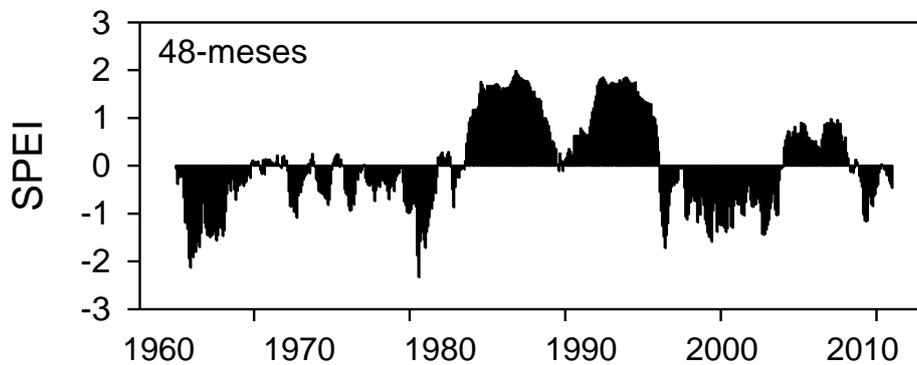


Figura 17. SPEI con evaporación de tanques evaporímetros a la escala temporal de 48 meses (Seria regional 1961-2010).

5.2 Análisis de tendencias

En la Figura 18 se muestran los resultados del análisis de tendencias en las series anuales (escala de 12 meses en diciembre) y estacionales (escala de 3 meses). A escala anual, tanto en el caso del SPI como del SPEI dominan los signos negativos, principalmente en el caso del SPEI, aunque son pocos los observatorios que muestran una tendencia estadísticamente significativa (4 en el caso de SPI y SPEI, respectivamente). No existen patrones espaciales generales en la tendencia de las sequías.

A escala estacional se aprecian patrones más nítidos. En invierno se produce un dominante agravamiento de las condiciones de sequía en toda la región, particularmente en la zona central y oriental. En el caso del SPEI, todas las estaciones muestran una tendencia negativa durante el invierno. En primavera, aunque aparezcan observatorios con tendencias positivas, son las tendencias negativas las dominantes en el conjunto de la región. El 25% de los observatorios muestran una tendencia negativa con el SPEI. En verano y otoño los patrones

espaciales se hacen menos nítidos con ambos índices, aunque se comprueba que el SPEI refuerza las tendencias negativas en un buen número de estaciones meteorológicas.

La Figura 19 muestra la distribución espacial de los cambios en magnitud observados entre 1961 y 2010. Se muestran los valores interpolados espacialmente para facilitar la comparación. A escala anual (escala de 12 meses en diciembre) se observan diferencias importantes, con una clara tendencia hacia valores más negativos del SPEI de forma generalizada en toda el área de estudio. A nivel estacional, las diferencias entre los dos índices son más importantes en primavera y otoño. El SPEI muestra una tendencia a registrar cambio negativos de mayor magnitud que el SPI a escala anual y, sobre todo, en primavera, pero en el resto de estaciones del año el ajuste espacial entre los cambios observados con las series de SPEI y SPI resulta muy bueno (Figura 20), indicando que los cambios experimentados por la ETo no han sido muy relevantes para producir un notable aumento de la severidad de las sequías durante el invierno, el verano y el otoño.

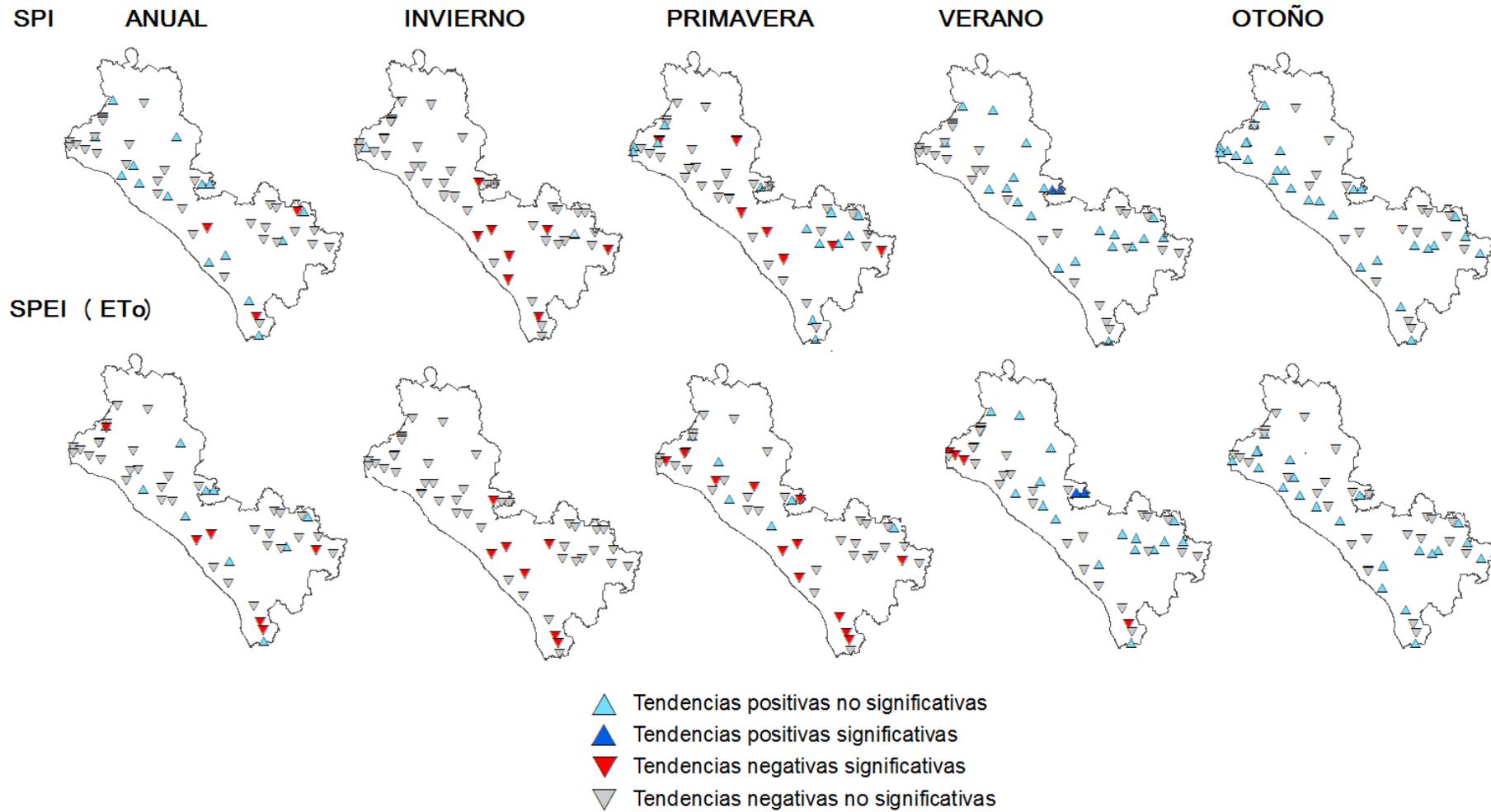


Figura 18. Tendencias estacionales y anuales en la evolución del SPI y SPEI (ETo) (1961-2010).

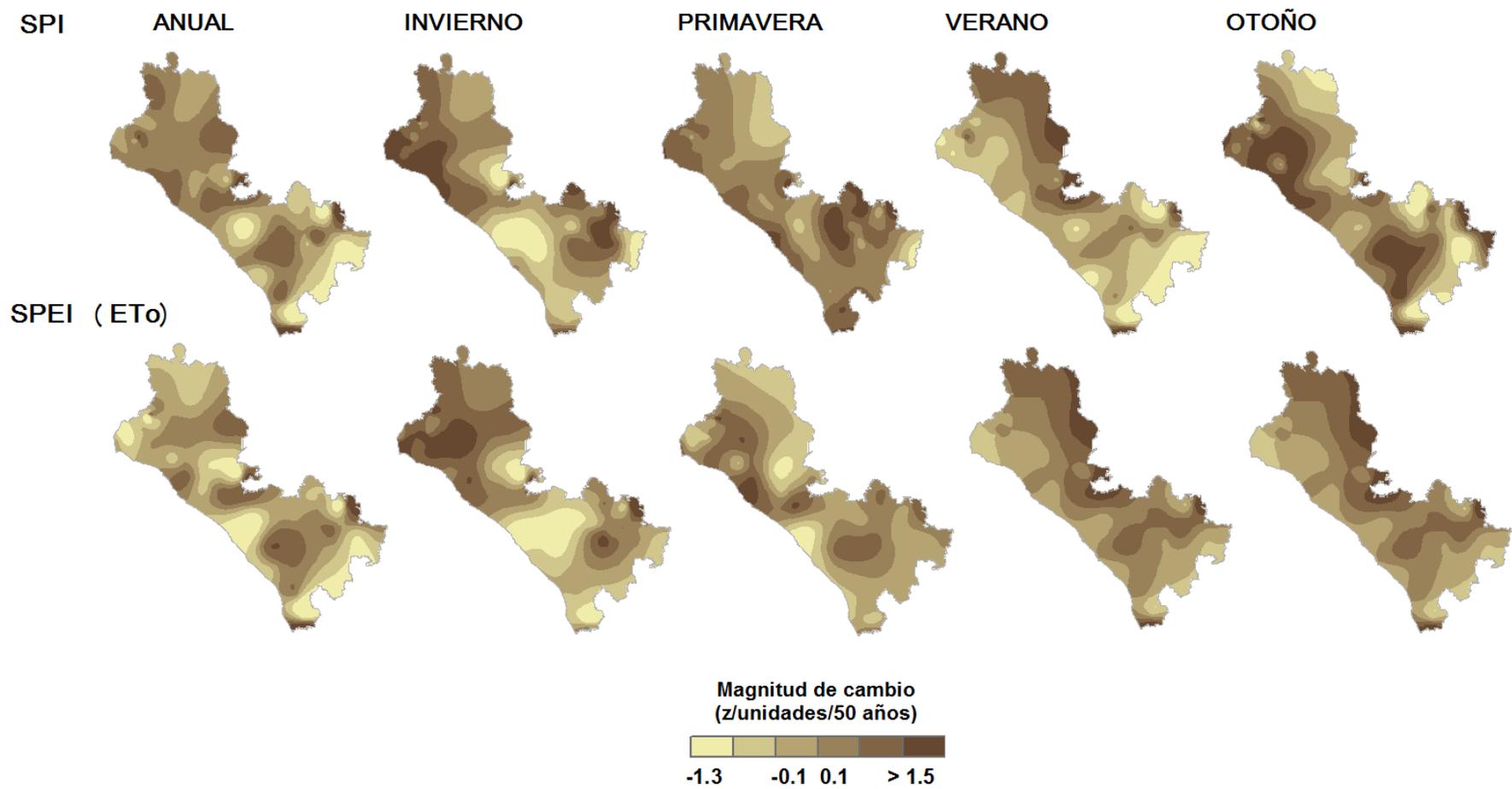


Figura 19. Magnitud de cambio anual y estacional en el SPI y SPEI (ETo) (1961-2010).

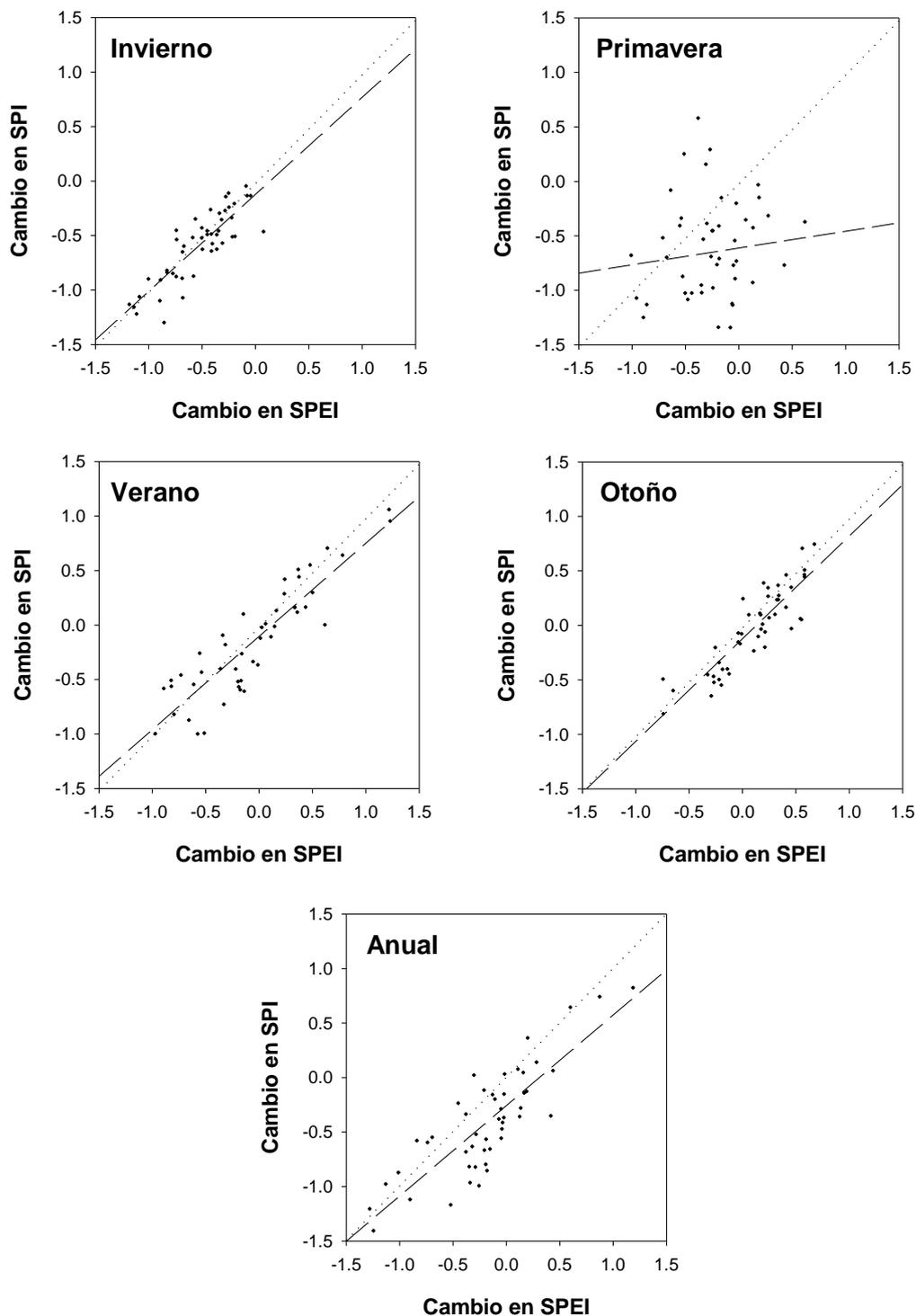


Figura 20. Relación entre los cambios estacionales y anuales observados en el SPI y SPEI en cada uno de los 48 observatorios meteorológicos.

5.3 Regionalización del comportamiento de las sequías.

Se ha comprobado que la evolución de las sequías presenta cierta variabilidad espacial en la región. La variabilidad es mayor considerando las series de SPEI que las de SPI, ya que se obtiene un mayor número de componentes principales (Figura 21). No obstante, la mayor parte de regiones identificadas son coincidentes en el caso de los dos índices. El componente 1 obtenido de las series de SPI representa gran parte del estado de Durango y una pequeña parte del estado de Zacatecas (Figura 22). La distribución de dicho componente se corresponde con el componente 3 extraído de las series de SPEI. La evolución temporal de las series de ambos componentes es similar, aunque la intensidad de los episodios secos es algo superior en los últimos años considerando la serie del SPEI. El componente 2 representa la parte septentrional de la Cuenca pacífico Norte, con los principales episodios secos identificados en las décadas de 1970 y 2000. El patrón espacial corresponde al componente 4 obtenido a partir del SPEI, aunque en este caso se observa una más clara tendencia hacia valores más bajos de SPEI en las últimas dos décadas analizadas. Finalmente, el componente 3 representa la región noroccidental de la cuenca, que registra un episodio muy agudo en 1980 y otros menos extremos en la década de 2000. El componente 2 de las series de SPEI coincide espacialmente, aunque el episodio de 1980 fue de menor intensidad que el observado con la serie de SPI, mientras que los identificados en las décadas de 1990 y 2000 han presentado, en general, valores más negativos y una mayor duración.

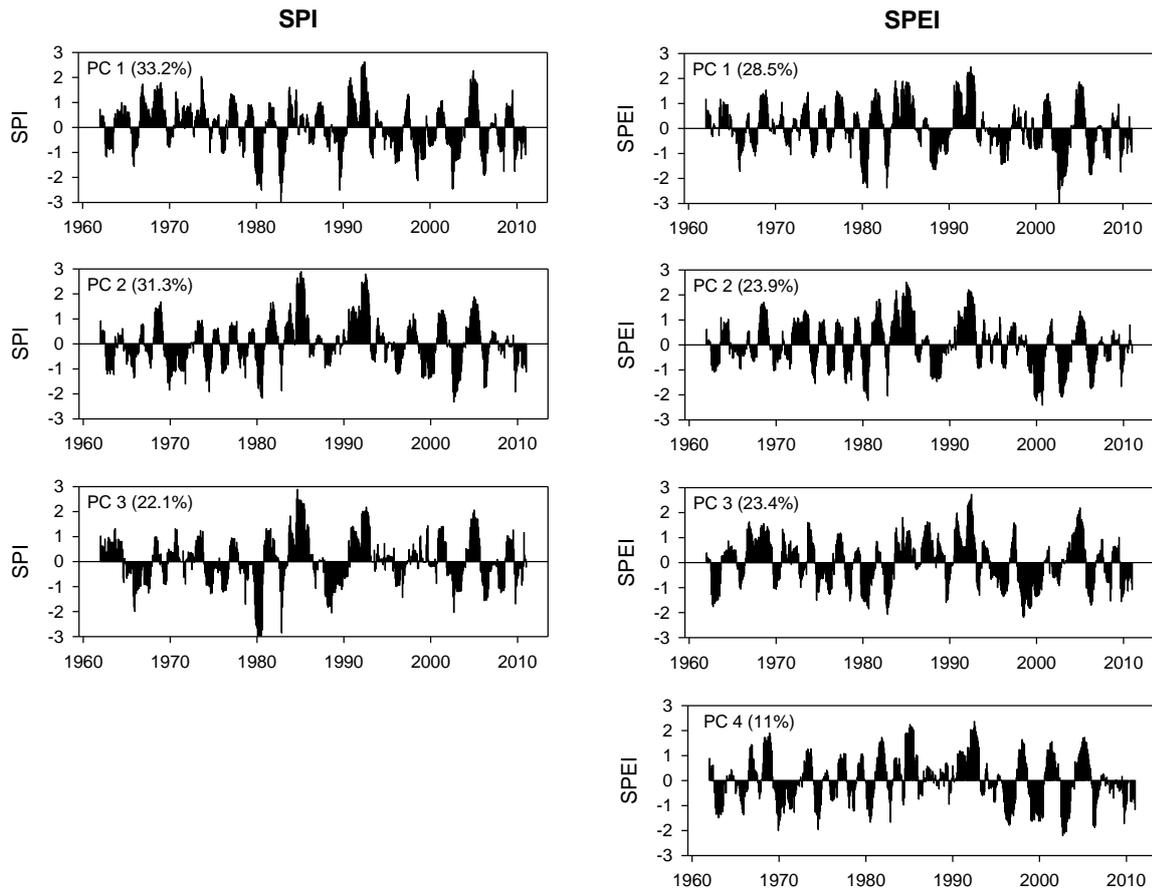


Figura 21. Evolución temporal de los componentes principales extraídos de las 48 series de SPI y SPEI a la escala temporal de 12 meses. Entre paréntesis se muestra el porcentaje de varianza explicado por cada componente.

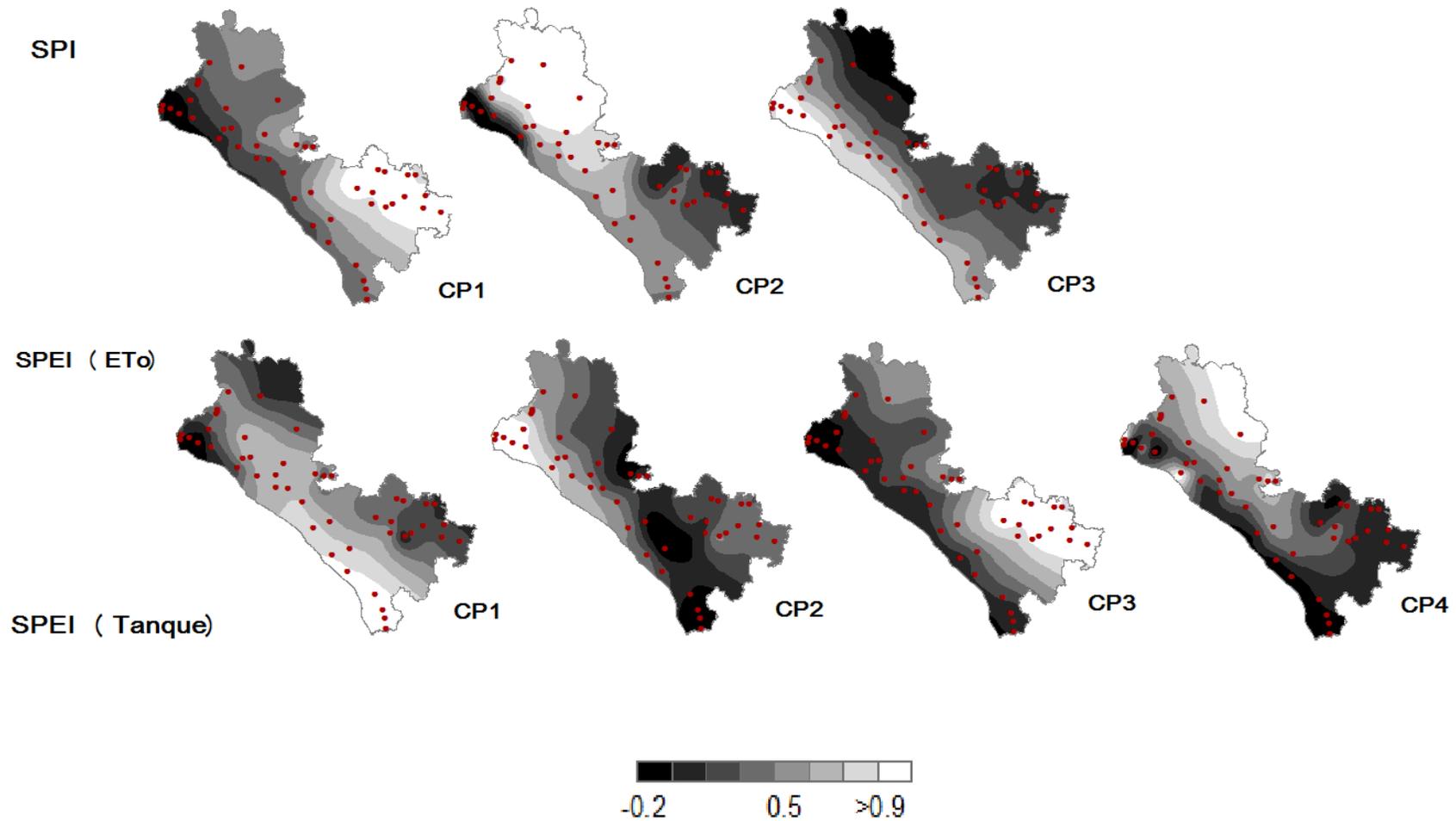


Figura 22. Distribución espacial de las cargas factoriales obtenidas a partir del análisis de las series de SPI y SPEI correspondientes a una escala temporal de 12 meses.

6. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Este trabajo ha analizado la variabilidad espacio-temporal de las sequías en la Cuenca Pacífico Norte de México entre 1961 y 2010. Se trata de la primera evaluación detallada de la variabilidad de las sequías en esta Cuenca, a partir de dos índices climáticos: El Índice de Precipitación Estandarizada (SPI) y el Índice de Precipitación Evapotranspiración Estandarizada (SPEI). Para ello se ha trabajado con un conjunto de estaciones meteorológicas en las que se testó su calidad y homogeneidad temporal. Se ha comprobado que las principales sequías afectaron a la región en las décadas de 1980 y 2000. Esta evolución coincide con la observada en otras regiones del norte de México, e incluso a nivel nacional, por parte de otros autores (Méndez et al, 2010; Bhattacharya et al, 2014).

Sin embargo, en este estudio hemos comprobado que existen algunas diferencias en función de los índices de sequía utilizados. Se ha comprobado que el SPEI presenta una tendencia dominante hacia unas condiciones de mayor sequía entre 1961 y 2010 en comparación a lo observado exclusivamente mediante las precipitaciones. Este patrón ha sido observado en otras regiones del mundo como la Península Ibérica (Vicente-Serrano et al., 2014), China (Yu et al., 2014; Wang et al., 2014); Korea (Nam et al., 2015), centro-Europa (Potop et al., 2014; Brázdil et al., 2015) o Bolivia (Vicente-Serrano et al., 2015b), entre otras. Este comportamiento se debe a la inclusión de la demanda de agua por parte de la atmósfera en el cálculo del SPEI, la cual se ha incrementado de forma dominante en las últimas tres décadas a consecuencia del incremento de la temperatura (Dai, 2013; Azorín-Molina et al., 2015).

Sin embargo, el proceso de evolución de las sequías no está exento de incertidumbres, pues diferentes autores han sugerido que a escala global no está claro que se esté produciendo un aumento de la demanda de agua por parte de la atmósfera (Sheffield et al., 2012), ya que el proceso no solamente depende de la temperatura, sino de otros factores que determinan los componentes aerodinámico y radioactivos (McVicar et al., 2012). En este estudio hemos utilizado series de tanques evaporímetros disponibles en la Cuenca del Pacífico norte de México para comprobar si la utilización de observaciones de evaporación puede complementar el cálculo de los índices de sequía. En general, se ha comprobado que el SPEI calculado mediante los datos de tanques evaporímetros muestra un descenso inferior al observado con estimaciones de evapotranspiración de referencia (ET_o) mediante el método de Hargreaves. No obstante, las divergencias se deben principalmente al comportamiento observado por la evaporación de tanques evaporímetros durante los primeros 15 años disponibles, pues desde 1975 a 2010 existe un muy buen ajuste en las anomalías de la evaporación observada y la ET_o. La razón de dicha divergencia en los primeros años puede deberse al comportamiento de otras variables que intervienen en la demanda de agua por parte de la atmósfera, como es el caso de la velocidad del viento, la humedad relativa o la radiación, o bien a problemas en la medición durante dicho periodo. Actualmente, es imposible aventurar la causa de dicho fenómeno, ya que no se dispone de series de dichas variables. No obstante, otros estudios ya han apuntado a la posible divergencia existente entre las tendencias temporales en las estimaciones y observaciones de la demanda de agua por parte de la atmósfera (Johnson y Sharma, 2007), como consecuencia de la perturbación introducida por los procesos de calentamiento global (Azorín-Molina et al., 2015).

En cualquier caso, se ha comprobado que la sequía es un fenómeno frecuente en la Cuenca del pacífico Norte y que independientemente del impacto del posible estrés relacionado con la evapotranspiración, se registran episodios numerosos, algunos de ellos de gran intensidad, asociados a anomalías de precipitación durante largos periodos. Diferentes autores han señalado que los episodios más severos de sequía en el norte de México se ven favorecidos por la ocurrencia de fenómenos de la Niña (Méndez y Magaña, 2010). En este sentido los modelos climáticos predicen un recrudecimiento de los episodios de sequía en la región asociados a este tipo de fenómenos, que se acentuarían en un escenario de calentamiento global (Seager et al., 2009).

Los resultados de este estudio destacan que la sequía es un fenómeno complejo en la Cuenca Pacífico Norte de México, con algunas diferencias espaciales y una notable variabilidad temporal, lo que dificulta su monitorización y mitigación de sus impactos. Dados los negativos impactos que dicho fenómeno produce en la Cuenca Pacífico Norte, los resultados de este estudio pueden contribuir a una mejor valoración de los riesgos asociados, y a facilitar una mejor comprensión del fenómeno que permita determinar las posibles consecuencias futuras en un escenario de cambio climático.

7. LITERATURA CITADA

- Allen, C.D., Breshears, D.D., McDowell, N.G. 2015. On underestimation of global vulnerability to tree mortality and forest die-off from hotter drought in the Anthropocene. *Ecosphere* 6, 129.
- Azorin-Molina, C. Vicente-Serrano, S.M. et al. 2015. Atmospheric evaporative demand observations, estimates and driving factors in Spain (1961-2011). *Journal of Hydrology* 523: 262-277.
- Beguiría, S., Vicente-Serrano, S.M., Reig, F., Latorre, B. 2014. Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI) revisited: parameter fitting, evapotranspiration models, kernel weighting, tools, datasets and drought monitoring. *International Journal of Climatology* 34, 3001–3023.
- Bhattacharya, T., Chiang, J.C.H. 2014. Spatial variability and mechanisms underlying El Niño-induced droughts in Mexico. *Climate Dynamics* 43, 3309-3326.
- Brázdil, R., Trnka, M., Mikšovský, J., Řezníčková, L., Dobrovolný, P. 2015. Spring-summer droughts in the Czech Land in 1805-2012 and their forcings. *International Journal of Climatology* 35, 1405-1421.
- Curtis, J.H., Hodell, D.A., Brenner, M. 1996. Climate variability on the Yucatan Peninsula (Mexico) during the past 3500 years, and implications for Maya cultural evolution. *Quaternary Research* 46, 37-47.
- Dai, A., 2013. Increasing drought under global warming in observations and models. *Nature Climate Change* 3, 52–58.
- Douriet J.C., 2013. Pronóstico de Sequías en la Cuenca del río Culiacán, Sinaloa, México. V Convención Cubana de Ciencias de la Tierra (Geociencias 2013), Palacio de Convenciones, La Habana, Cuba.

- Dracup, J.A., Lee, K., Paulson, E.G. 1980. On the definition of droughts. *Water Resources Research* 16, 297-302.
- Droogers, P., Allen, R.G. 2002. Estimating reference evapotranspiration under inaccurate data conditions. *Irrigation and Drainage Systems* 16, 33–45.
- Feng, S., Hu, Q., Qian, W. 2004. Quality control of daily meteorological data in China, 1951-2000: A new dataset. *International Journal of Climatology* 24, 853-870.
- Guttman, N.B. 1999: Accepting the standardized precipitation index: A calculation algorithm. *J. Amer. Water Resour. Assoc.* 35, 311–322.
- Hargreaves, G.L., Samani, Z.A. 1985. Reference crop evapotranspiration from temperature. *Appl. Eng. Agric.* 1, 96–99.
- Hodell, D.A., Brenner, M., Curtis, J.H., Guilderson, T. 2001. Solar forcing of drought frequency in the Maya lowlands. *Science* 292, 1367-1370.
- Huth, R. 2006. The effect of various methodological options on the detection of leading modes of sea level pressure variability, *Tellus, Ser. A* 58, 121–130.
- Johnson, F., Sharma, A. 2007. Estimating evaporation – issues and challenges. In: MODSIM07 – Land, Water and Environmental Management: Integrated Systems for Sustainability, Proceedings, pp. 589–595.
- Jones PD, Hulme M. 1996. Calculating regional climatic time series for temperature and precipitation: methods and illustrations. *Int. J. Climatol* 16, 361–377.
- Laliberte, A.S., Rango, A., Havstad, K.M. et al. 2004. Object-oriented image analysis for mapping shrub encroachment from 1937 to 2003 in southern New Mexico. *Remote Sensing of Environment* 93, 198-210.

- Lanzante, J.R. 1996. Resistant, robust and non-parametric techniques for the analysis of climate data: theory and examples, including applications to historical radiosonde station data. *International Journal of Climatology* 16, 1197–1226.
- Lloyd-Hughes, B. 2014. The impracticality of a universal drought definition. *Theoretical and Applied Climatology* 117, 607-611.
- Lobell, D.B., Hammer, G.L., McLean, G. et al. 2013. The critical role of extreme heat for maize production in the United States. *Nature Climate Change* 3, 497-501.
- Kaiser, H.E. 1958. The varimax criterion for analytic rotation in factor analysis. *Psikometria* 23, 187-200.
- Magaña, V., Amador, J.A., Medina, S. 1999. The midsummer drought over Mexico and Central America. *Journal of Climate* 12, 1577-1588.
- McKee, T.B.N., Doesken, J., Kleist, J., 1993. The relationship of drought frequency and duration to time scales. Eight Conf. On Applied Climatology. Anaheim, CA, Amer. Meteor. Soc. pp. 179–184.
- McVicar, T.R., Roderick, M.L., Donohue, R.J., Van Niel, T.G. 2012. Less bluster ahead? ecohydrological implications of global trends of terrestrial near-surface wind speeds. *Ecohydrology* 5, 381–388.
- Méndez, M., Magaña, V. 2010. Regional aspects of prolonged meteorological droughts over Mexico and central America. *Journal of Climate* 23, 1175-1188.
- Mendoza, B., Velasco, V., Jáuregui, E. 2006. A study of historical droughts in southeastern Mexico. *Journal of Climate* 19, 2916-2934.
- Mestre, O., Domokos, P., Picard, F. et al. 2013. HOMER: a homogenization software – methods and applications. *Quart. Jour. of the Hungarian Meteorological Service* 117, 47-67.

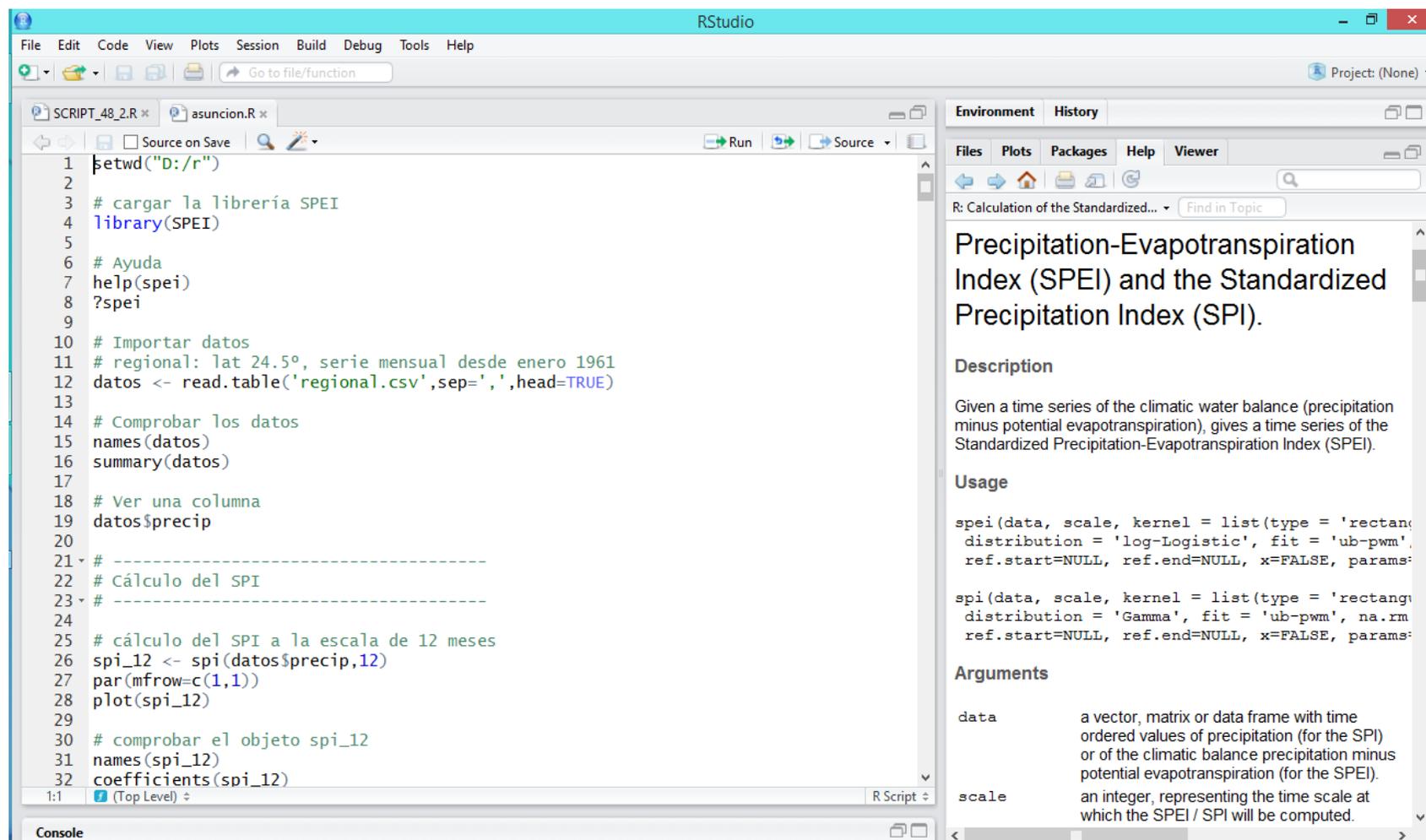
- Mishra, A.K., Singh, V.P. 2010. A review of drought concepts. *Journal of Hydrology* 391, 202–216.
- Mulholland, P.J., Best, G.R., Coutant, C.C. et al. 1997. Effects of climate change on freshwater ecosystems of the south-eastern United States and the Gulf Coast of Mexico. *Hydrological Processes* 11, 949-970.
- Nam, W.-H., Hayes, M.J., Svoboda, M.D., Tadesse, T., Wilhite, D.A. 2015. Drought hazard assessment in the context of climate change for South Korea 160, 106-117.
- Potop, V., Boroneanț, C., Možný, M., Štěpánek, P., Skalák, P. 2014. Observed spatiotemporal characteristics of drought on various time scales over the Czech Republic. *Theoretical and Applied Climatology* 115, 563-581.
- Ravelo, A.C., Sanz, R., Douriet, J.C. 2014. Detección, evaluación y pronóstico de las sequías en la región del Organismo de Cuenca Pacífico Norte, México. *Agriscientia* 31, 11-24.
- Richman, M.B. 1986. Rotation of Principal Components. *Journal of Climatology* 6, 29-35.
- Roderick, M.L., Farquhar, G.D. 2002. The cause of decreased pan evaporation over the past 50 years. *Science* 298, 1410–1411.
- Sanchez-Lorenzo, A., Vicente-Serrano, S.M., Wild, M., Calbó, J., Azorin-Molina, C., Peñuelas, J. 2014. Evaporation trends in Spain: a comparison of Class A pan and Piché atmometer measurements. *Climate Research* 61, 269–280.
- Seager, R., Ting, M., Davis, M., Cane, M., Naik, N., Nakamura, J., Li, C., Cook, E., Stahle, D.W. 2009. Mexican drought: An observational modeling and tree ring study of variability and climate change. *Atmosfera* 22: 1-31.

- Seager, R., Vecchi, G.A. 2010. Greenhouse warming and the 21st century hydroclimate of southwestern North America. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 107, 21277-21282.
- Serrano, A., Garcíacute, J., Mateos, V., Cancillo, M.L., Garrido, J. 1999. Monthly modes of variation of precipitation over the Iberian Peninsula, *J. Clim.* 12, 2894–2919.
- Sheffield, J., Wood, E.J., Roderick, M.L. 2012. Little change in global drought over the past 60 years. *Nature* 491, 435–438.
- Trenberth, K.E., Guillemot, C.J. 1996. Physical processes involved in the 1988 drought and 1993 floods in north America. *Journal of Climate* 9, 1288-1298.
- Trenberth, K.E., Dai, A., van der Schrier, G., et al. 2014. Global warming and changes in drought. *Nature Climate Change* 4, 17–22.
- Venema, V.K.C., Mestre, O., Aguilar, E. et al. 2012. Benchmarking homogenization algorithms for monthly data. *Climate of the Past* 8, 89-115.
- Vicente-Serrano, S.M., Beguería, S., López-Moreno, J.I.. 2010. A multi-scalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index – SPEI. *Journal of Climate* 23, 1696-1718.
- Vicente-Serrano, S.M., Beguería, S., López-Moreno, J.I., García-Vera, M.A., Stepanek, P. 2010b. A complete daily precipitation database for North-East Spain: reconstruction, quality control and homogeneity. *International Journal of Climatology* 30, 1146-1163.
- Vicente-Serrano, S.M., Beguería, S., López-Moreno, J.I. 2011. Comment on “Characteristics and trends in various forms of the Palmer Drought Severity Index (PDSI) during 1900-2008” by A. Dai. *Journal of Geophysical Research-Atmosphere*. 116, D19112, doi:10.1029/2011JD016410.

- Vicente-Serrano, S.M., Beguería, S., Lorenzo-Lacruz, J. 2012. Performance of drought indices for ecological, agricultural and hydrological applications. *Earth Interactions* 16, 1–27.
- Vicente-Serrano, S.M., Lopez–Moreno, J.I., Beguería, S. et al. 2014. Evidence of increasing drought severity caused by temperature rise in southern Europe. *Environmental Research Letters* 9, 044001. doi:10.1088/1748-9326/9/4/044001.
- Vicente-Serrano, S.M., Van der Schrier, G., Beguería, S., Azorin–Molina, C., Lopez–Moreno, J.I. 2015. Contribution of precipitation and reference evapotranspiration to drought indices under different climates. *Journal of Hydrology* 426, 42-54.
- Vicente-Serrano, S.M., Chura, O., López-Moreno, J.I., Azorin-Molina, C., Sanchez-Lorenzo, A., Aguilar, E., Moran-Tejeda, E., Trujillo, F., Martínez, R., Nieto, J.J. 2015b. Spatio-temporal variability of droughts in Bolivia: 1955-2012. *International Journal of Climatology* 35, 3024-3040.
- Wang, W., Zhu, Y., Xu, R., Liu, J. 2014. Drought severity change in China during 1961–2012 indicated by SPI and SPEI. *Natural Hazards* 75, 2437-2451.
- White, D., Richman, H., Yarnal, B. 1991. Climate regionalization and rotation of principal components. *International Journal of Climatology* 11, 1-25
- Wilhite, D.A., Glantz. M.H. 1985. Understanding the Drought Phenomenon: the role or definitions. *Water International* 10, 111-120.
- Wilhite. D.A. 2000. Drought as Natural Hazard: Concepts and Definitions. In: Wilhite , D.A. (Ed). *Drought: a Assessment*. Volume I. Routledge. New York, N.Y. pp 3-18
- Yu, M., Li, Q., Hayes, M.J., Svoboda, M.D., Heim, R.R. 2014. Are droughts becoming more frequent or severe in China based on the standardized

precipitation evapotranspiration index: 1951-2010? *International Journal of Climatology* 34, 545–558.

8. ANEXOS



The image shows the RStudio interface. The main editor window displays an R script with the following code:

```
1 setwd("D:/r")
2
3 # cargar la librería SPEI
4 library(SPEI)
5
6 # Ayuda
7 help(spei)
8 ?spei
9
10 # Importar datos
11 # regional: lat 24.5°, serie mensual desde enero 1961
12 datos <- read.table('regional.csv', sep=',', head=TRUE)
13
14 # Comprobar los datos
15 names(datos)
16 summary(datos)
17
18 # Ver una columna
19 datos$precip
20
21 # -----
22 # Cálculo del SPI
23 # -----
24
25 # cálculo del SPI a la escala de 12 meses
26 spi_12 <- spi(datos$precip, 12)
27 par(mfrow=c(1,1))
28 plot(spi_12)
29
30 # comprobar el objeto spi_12
31 names(spi_12)
32 coefficients(spi_12)
```

The right-hand pane shows the help window for the 'spei' function. The title is "Precipitation-Evapotranspiration Index (SPEI) and the Standardized Precipitation Index (SPI)".

Description

Given a time series of the climatic water balance (precipitation minus potential evapotranspiration), gives a time series of the Standardized Precipitation-Evapotranspiration Index (SPEI).

Usage

```
spei(data, scale, kernel = list(type = 'rectang
distribution = 'log-Logistic', fit = 'ub-pwm',
ref.start=NULL, ref.end=NULL, x=FALSE, params=
```

```
spi(data, scale, kernel = list(type = 'rectang
distribution = 'Gamma', fit = 'ub-pwm', na.rm
ref.start=NULL, ref.end=NULL, x=FALSE, params=
```

Arguments

data	a vector, matrix or data frame with time ordered values of precipitation (for the SPI) or of the climatic balance precipitation minus potential evapotranspiration (for the SPEI).
scale	an integer, representing the time scale at which the SPEI / SPI will be computed.

Figura A1. Script para calcular índices de sequía SPI y SPEI en el programa R.

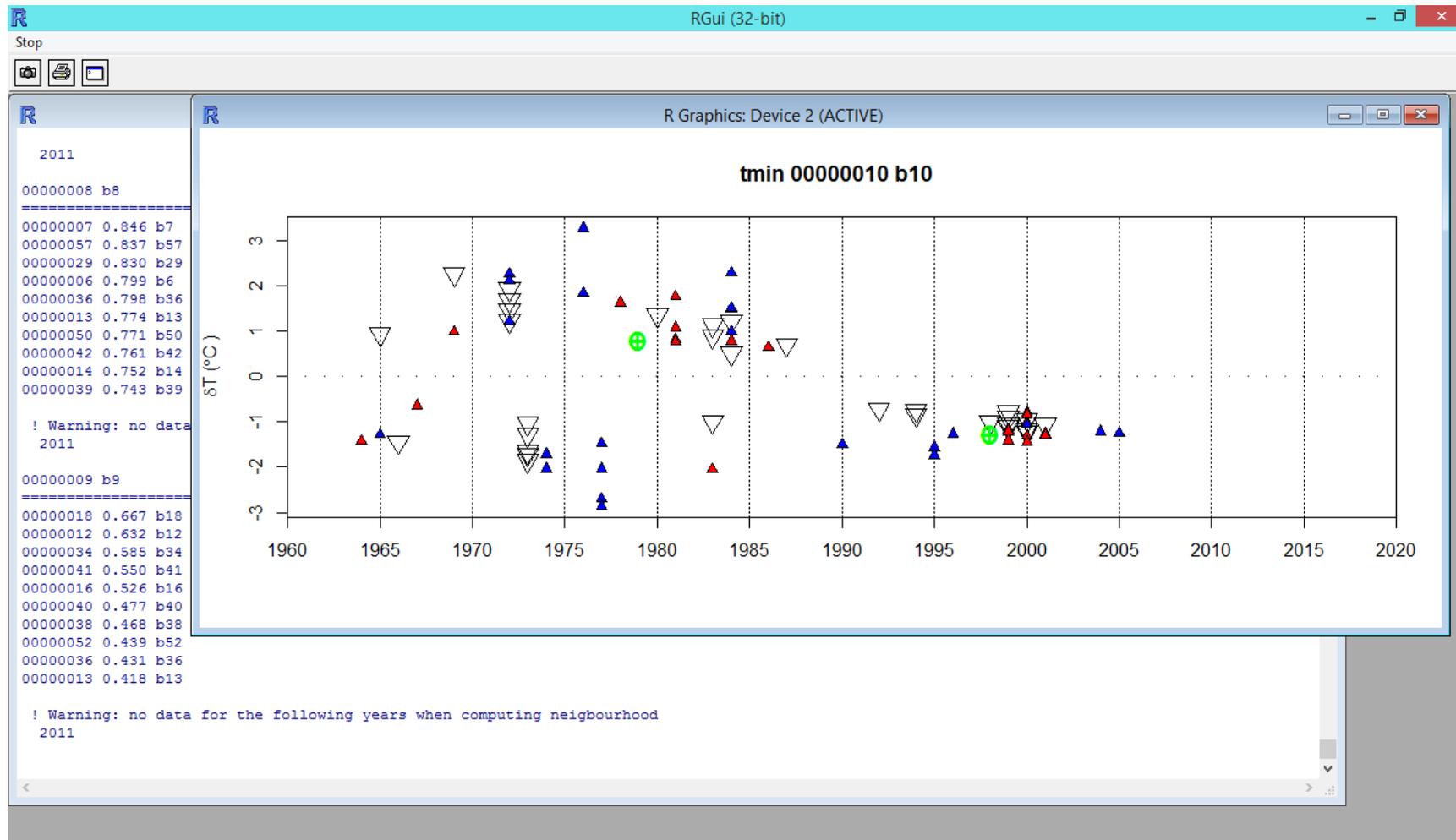


Figura A4. Sistema HOMER (HOMogenizaton softwarE in R) Para identificar y corregir las inhomogeneidades temporales.

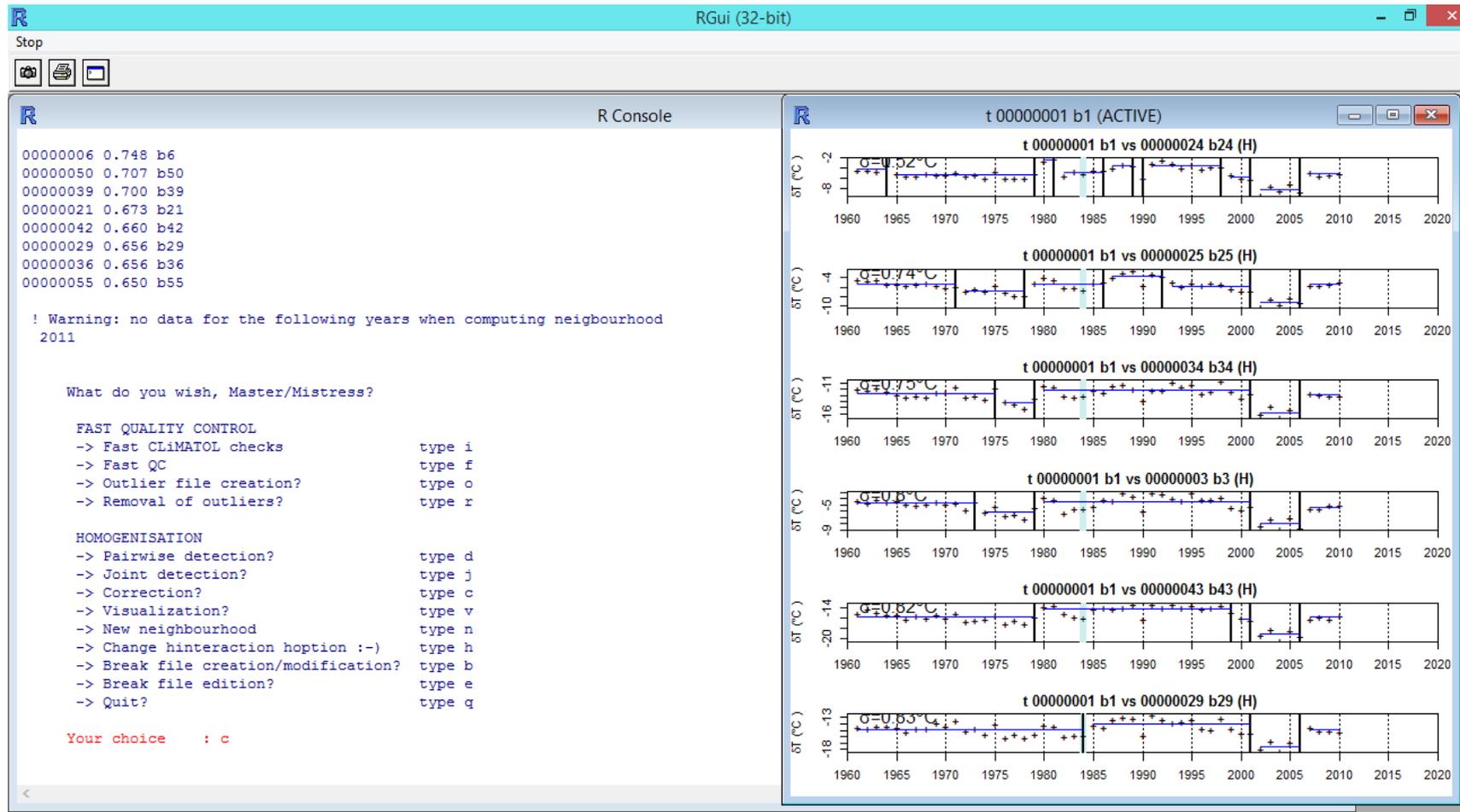


Figura A5. Sistema HOMER (HOMogenizaton softwarE in R) Para identificar y corregir las inhomogeneidades temporales.

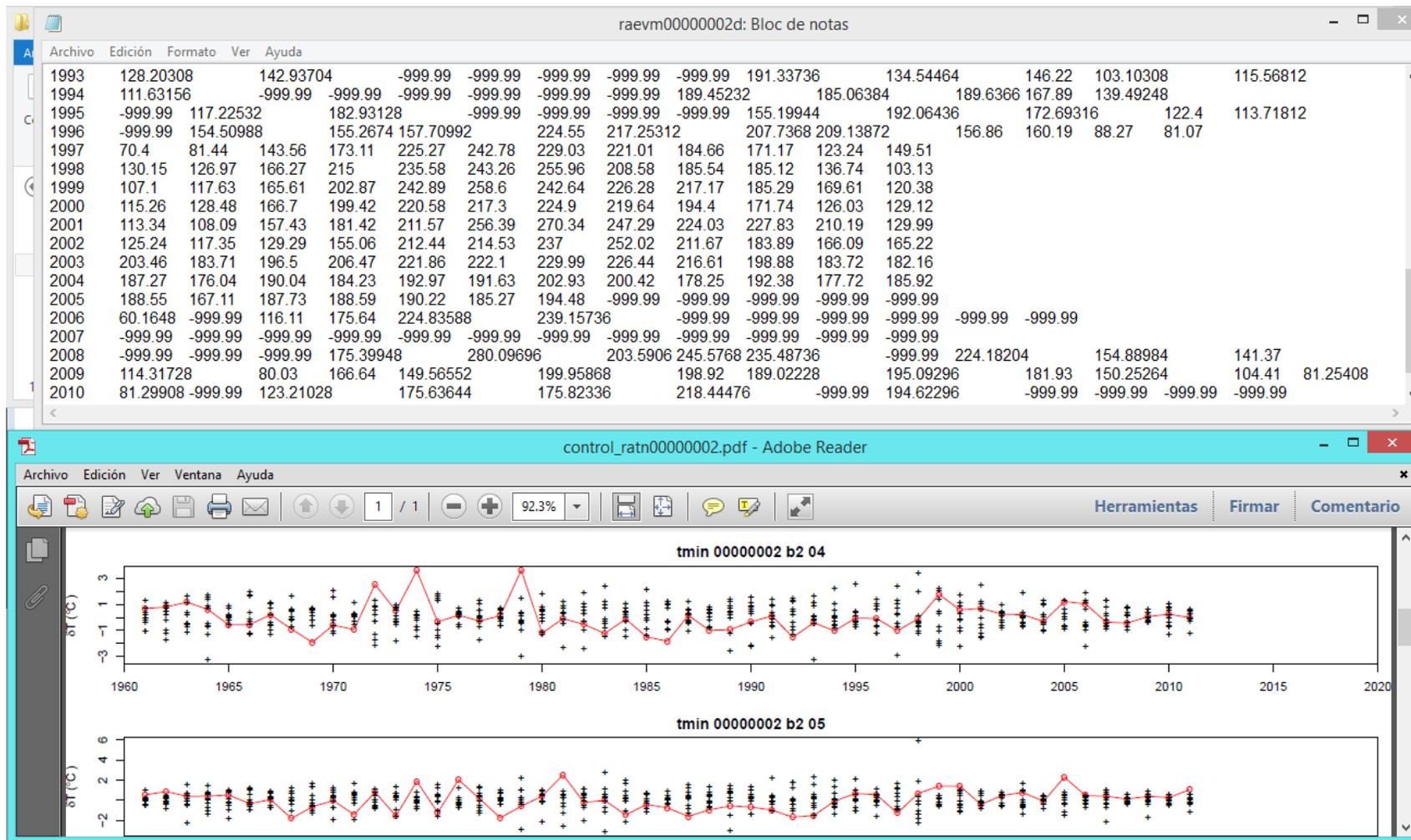


Figura A6. Sistema HOMER (HOMogenizaton softwARE in R) Para identificar y corregir las inhomogeneidades temporales.

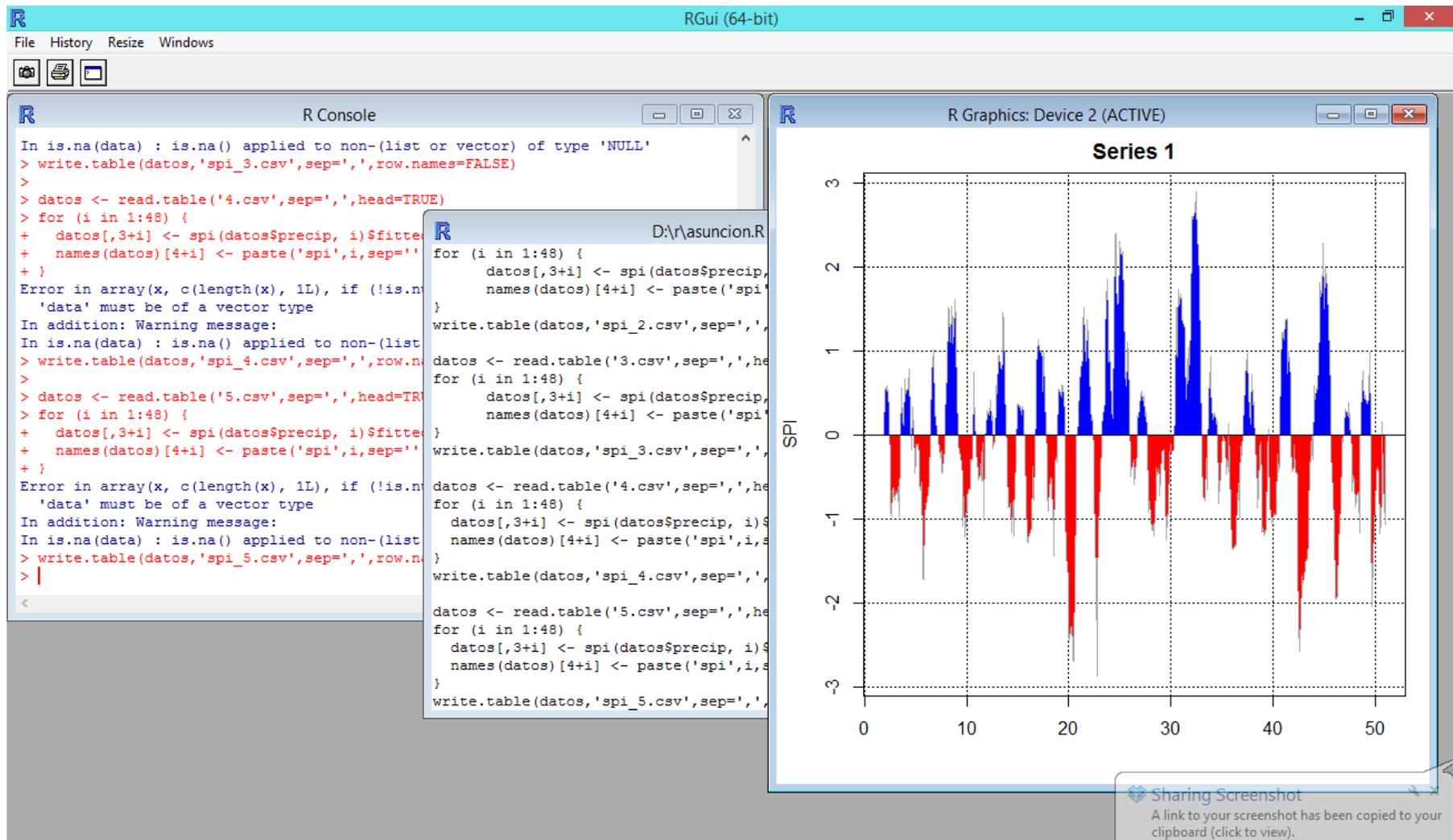


Figura A7. Sistema HOMER (HOMogenizaton softwarE in R) Para identificar y corregir las inhomogeneidades temporales.

	VAR00001	VAR00002	VAR00003	VAR00004	VAR00005	VAR00006	VAR00007	VAR00008	VAR00009	VAR00010
1	1961.00	.	.	.	.	.	.	.	.	.
2	1962.00	-1.16	-.44	.	.	.	.	.	.	.
3	1963.00	.30	.68	.	.	.	.	.	.	.
4	1964.00	.44	.45	.	.	.	.	.	.	.
5	1965.00	.31	.18	.	.	.	.	.	.	.
6	1966.00	.40	1.06	.	.	.	.	.	.	.
7	1967.00	.36	-.38	.	.	.	.	.	.	.
8	1968.00	.26	.37	.	.	.	.	.	.	.
9	1969.00	.15	.77	.	.	.	.	.	.	.
10	1970.00	.95	1.08	.	.	.	.	.	.	.
11	1971.00	-1.16	-1.39	.	.	.	.	.	.	.
12	1972.00	-.88	-.63	.	.	.	.	.	.	.
13	1973.00	.22	.63	.	.	.	.	.	.	.
14	1974.00	-.99	-1.20	.	.	.	.	.	.	.
15	1975.00	.09	.58	.	.	.	.	.	.	.
16	1976.00	.01	-.08	.	.	.	.	.	.	.
17	1977.00	.90	.86	.	.	.	.	.	.	.
18	1978.00	-1.16	-1.20	.	.	.	.	.	.	.
19	1979.00	-1.16	-.23	.	.	.	.	.	.	.
20	1980.00	-.29	.90	.	.	.	.	.	.	.
21	1981.00	.12	.68	.	.	.	.	.	.	.
22	1982.00	.12	-.11	.31	-.83	-1.01	-1.26	.02	-.56	-.94

Análisis factorial

Variables:
 VAR00044
 VAR00045

Análisis factorial: Rotación

Método

Ninguno Quartimax
 Varimax Equamax
 Oblimin directo Promax

Delta: 0 Kappa: 4

Mostrar

Solución rotada Gráficos de saturaciones

Nº máximo de iteraciones para convergencia: 25

Análisis factorial: Puntuaciones factorial...

Guardar como variables

Método

Regresión
 Bartlett
 Anderson-Rubin

Mostrar matriz de coeficientes de las punt. factoriales

Figura A8. Análisis de Componentes Principales mediante el programa SPSS.