Método de cálculo de la variable “Índice de precipitación- evapotranspiración estandarizado” (alias = spei)

El “Índice de precipitación- evapotranspiración estandarizado” $SPEI[X]_{00}^m$ (adimensional) para una ventana temporal $[X]$ (meses), es una extensión del “Índice de Precipitación Estandarizada” ($SPI[X]_{00}^m$) que incluye la evapotranspiración de referencia para cuantificar la magnitud de la sequía como un balance hídrico, captando de esta forma el impacto del aumento de las temperaturas sobre la demanda de agua. Es calculado en el periodo anual ($p=00$) para los diferentes periodos climáticos preestablecidos (m) (1961-1990, 1985-2014, 2015-2040, 2021-2050, 2031-2060, 2041-2070, 2051, 2080, 2061-2090, 2071-2100) con los datos registrados (histórico observado) o proyectados (por cada combinación de Modelo de Circulación General (MCG) y escenario de emisiones (ESN)).

Es un índice ampliamente utilizado para caracterizar la sequía meteorológica en una variedad de escalas de tiempo $[X]$. Al igual que el $SPI[X]_{00}^m$, el $SPEI[X]_{00}^m$ se puede calcular en un rango de escalas de tiempo de 3 a 60 meses. En escalas de tiempo largas ($> \sim 18$ meses), se ha demostrado que el $SPEI[X]_{00}^m$ se correlaciona con el $PDSI$ de autocalibración ($sc-PDSI$).

Si solo se dispone de datos limitados, por ejemplo, temperatura y precipitación, la evapotranspiración de referencia se puede estimar con el método simple de *Thornthwaite* con los valores de la temperatura. En este enfoque simplificado, no se tienen en cuenta las variables que pueden afectar, como la velocidad del viento, la humedad de la superficie y la radiación solar. En los casos de disponer de más datos, a menudo se prefiere un método más sofisticado para calcular la evapotranspiración de referencia a fin de realizar una contabilidad más completa de la variabilidad de la sequía. Sin embargo, estas variables adicionales pueden tener grandes incertidumbres. En esta metodología ha sido utilizado el modelo físico de “*Penman-Monteith FAO98*” adaptado a zonas de montaña (*Ecuación de la Evapotranspiración de Penman-Monteith modificada con la variable fisiográfica “Incidencia Solar”*). Un conjunto de datos $SPEI$ cuadrículados está disponible para 1901-2011 basado en datos de entrada *CRU TS3.2* y el método *Penman-Monteith*. Se publica un $SPEI$ en tiempo real para el monitoreo de la sequía global basado en el método *Thornthwaite*, mientras que existe un paquete en *R* disponible para calcular el $SPEI$ a partir de datos de entrada seleccionados por el usuario utilizando los métodos *Thornthwaite*, *Penman-Monteith* o *Hargreaves*.

PUNTOS FUERTES:

- Combina aspectos de múltiples escalas de tiempo del Índice de precipitación estandarizado ($SPI[X]_{00}^m$) con información sobre la evapotranspiración, lo que lo hace más útil para los estudios de cambio climático.
- Índice basado en estadísticas que solo requiere información climatológica sin suposiciones sobre las características del sistema subyacente.

LIMITACIONES CLAVE:

- Más requisitos de datos que el SPI de precipitación.
- Sensible al método para calcular la evapotranspiración potencial.
- Al igual que con otros índices de sequía, se debe usar un período base largo (30-50+ años) que muestree la variabilidad natural.

(Vicente-Serrano, Sergio M. & Personal del Centro Nacional de Investigaciones Atmosféricas (Eds). Última modificación 18 de julio de 2015. “Guía de datos climáticos: índice estandarizado de precipitación y evapotranspiración ($SPEI$)”. Obtenido de <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/standardized-precipitation-evapotranspiration-index-spei>.)

El siguiente texto fue aportado por el Dr. Sergio M. Vicente-Serrano (Instituto Pirenaico de Ecología, Consejo Superior de Investigaciones Científicas), marzo de 2014:

La Organización Meteorológica Mundial (OMM) ha adoptado el índice de precipitación estandarizado ($SPI[X]_{00}^m$) para que lo utilicen los servicios meteorológicos e hidrológicos nacionales de todo el mundo para caracterizar las sequías meteorológicas (Hayes et al., 2011). La OMM proporciona directrices estándar y software para calcular el SPI (OMM, 2012). Sin embargo, el este índice se basa únicamente en datos de

precipitación, sin considerar otras variables que también determinan las condiciones de sequía como la temperatura, la humedad relativa, la evapotranspiración, la velocidad del viento, etc. Así, el *SPI* se basa en dos supuestos: (i) la variabilidad de la precipitación es mucho mayor que el de otras variables (por ejemplo, la demanda evaporativa de la atmósfera); y (ii) las demás variables son estacionarias (es decir, no tienen tendencia temporal).

Dado el aumento de la temperatura global durante los últimos 150 años y que los modelos de cambio climático predicen un marcado aumento durante el siglo XXI, se puede esperar que el aumento de la temperatura tenga consecuencias dramáticas para las condiciones de sequía. Por lo tanto, el uso de índices de sequía que incluyen datos de temperatura en su formulación, como el índice de severidad de sequía de Palmer (*PDSI*), parece ser preferible al uso de índices sin información de temperatura para identificar los impactos de la sequía relacionados con el calentamiento en diferentes aspectos ecológicos, hidrológicos y sociales. sistemas agrícolas. Sin embargo, el *PDSI* carece del carácter multiescalar del *SPI*, esencial para evaluar la sequía en relación con diferentes sistemas hidrológicos y también para diferenciar entre diferentes tipos de sequía.

Se acepta comúnmente que la sequía es un fenómeno multiescalar, ya que el período de tiempo desde la llegada de los aportes de agua hasta la disponibilidad de un determinado recurso utilizable difiere considerablemente. Por lo tanto, la escala de tiempo en la que se acumulan los déficits de agua se vuelve extremadamente importante y separa funcionalmente las sequías hidrológicas, ambientales, agrícolas y de otro tipo. Por esta razón, los índices de sequía deben estar asociados a una escala temporal específica para que sean útiles para el seguimiento y la gestión de los diferentes recursos hídricos utilizables.

Para superar estas limitaciones, se ha desarrollado el índice estandarizado de precipitación-evapotranspiración (*SPEI*), que combina la sensibilidad del *PDSI* a los cambios en la demanda de evaporación causados por la temperatura con la naturaleza multitemporal del *SPI*. El índice de precipitación evapotranspiración estandarizado *SPEI* fue propuesto por primera vez por *Vicente-Serrano et al. (2010a)* como un índice de sequía mejorado que es especialmente adecuado para estudios del efecto del calentamiento global en la severidad de la sequía. Al igual que el *PDSI*, el *SPEI* considera el efecto de la evapotranspiración de referencia sobre la severidad de la sequía, pero su naturaleza le permite identificar diferentes tipos de sequía e impactos de sequía en diversos sistemas (*Vicente-Serrano et al., 2012, 2013*). De este modo, el *SPEI* tiene la sensibilidad del *PDSI* en la medición de la demanda evaporativa de la atmósfera (causada por fluctuaciones y tendencias en variables climáticas distintas a la precipitación), es simple de calcular y es multiescalar, como el índice de precipitación estandarizado *SPI*. *Vicente-Serrano et al. (2010a, 2010b, 2011, 2012)* y *Beguería et al. (2014)* han proporcionado descripciones completas de la teoría detrás del *SPEI*, detalles computacionales y comparaciones con otros indicadores de sequía populares como el *PDSI* y el *SPI*.

El procedimiento para calcular el *SPEI* es similar al del *SPI*. Sin embargo, el *SPEI* utiliza la diferencia entre la precipitación y la evapotranspiración de referencia ($P - ET_o$), en lugar de la precipitación (P) como entrada. El balance hídrico climático compara el agua disponible (P) con la demanda evaporativa atmosférica (ET_o), y por lo tanto proporciona una medida más confiable de la severidad de la sequía que considerando solo la precipitación. La ET_o es la tasa de evapotranspiración de una superficie de referencia (un hipotético cultivo de referencia de pasto bien regado con características específicas). En el manual de la *Organización para la Alimentación y la Agricultura (FAO)* para calcular la ET_o , *Allen et al. (1998)* destacó que ET_o representa "la demanda de evaporación de la atmósfera independientemente del tipo de cultivo, el desarrollo del cultivo y las prácticas de manejo. Los únicos factores que afectan la ET_o son los parámetros climáticos. En consecuencia, ET_o es un parámetro climático, se puede calcular a partir de datos meteorológicos y expresa el poder de evaporación de la atmósfera en un lugar y una época específicos del año". Como consecuencia, las ET_o calculadas en diferentes lugares o en diferentes estaciones son totalmente comparables. Esto es diferente al concepto de evaporación real (ET_r), que es el agua perdida en condiciones reales (es decir, considerando el agua disponible en los suelos, el tipo y estado de la vegetación o cultivo, los mecanismos fisiológicos, el clima, etc.).

La idea detrás del *SPEI* es comparar la mayor evapotranspiración posible (lo que llamamos la demanda

evaporativa de la atmósfera) con la disponibilidad actual de agua. Así, la precipitación (acumulada en un período de tiempo) en el *SPEI* representa la disponibilidad de agua, mientras que *ETo* representa la demanda atmosférica de agua. *ETr* sería un mal estimador de esta demanda, ya que depende a su vez de la disponibilidad actual de agua. Por otro lado, la propia definición de *ETo* indica que se refiere a la cantidad máxima de agua que sería transferida a la atmósfera por los suelos y la vegetación si no hubiera déficit de suministro de agua. Usar *ETo* como un estimador de la verdadera demanda evaporativa parece, por lo tanto, una opción más conveniente. *ETr* es un mal indicador del estrés por sequía, a pesar de la diferencia entre la Precipitación de entrada (*P*) y la demanda (*ETo*). De hecho, usar la *ETr* en el *SPEI* tendría sentido como reemplazo de *P*. De hecho, la *ETr* podría ser un mejor estimador que *P* de la cantidad de agua realmente utilizada por la vegetación, por lo que el balance $ETr - ETo$ proporcionaría una mejor estimación. *ETr* no se usa en el *SPEI*, y en su lugar se usa *P* como un estimador del agua disponible para el sistema debido a las dificultades involucradas en la estimación de *ETr*. La *ETr* no solo está determinada por la entrada de precipitación y la demanda de evapotranspiración, sino también por el balance hídrico del suelo y las plantas, que depende de parámetros del suelo y de la vegetación que son difíciles de estimar y no son estacionarios en el tiempo. Normalmente se requieren modelos físicos complejos para estimar la *ETr* para un sistema dado, y luego hay modelos específicos para cada sistema en consideración (modelos de crecimiento de árboles y bosques, modelos de cultivos, modelos de hidrología del suelo, modelos de hidrología de cuencas, etc.). El *SPEI* se desarrolló como un índice de sequía generalista susceptible de ser aplicado a una gran variedad de sistemas, por lo que depender de un modelo en particular no era una opción. Así, la precipitación acumulada durante un período de tiempo arbitrario podría adaptarse al comportamiento mostrado por un sistema dado, puede considerarse una aproximación conveniente a la cantidad de agua disponible para un sistema en un momento dado (ver discusión adicional sobre *ETo* y cuestiones de *ETr* en Vicente-Serrano et al., 2011 y Beguería et al., 2014).

El *SPEI* utiliza un balance hídrico climático ($D_i = P_i - ETo$) obtenido en varias escalas de tiempo. Por ejemplo, para obtener el *SPEI* de 6 meses, primero se construye una serie de tiempo mediante la suma de los valores *D* desde cinco meses antes hasta el mes actual. Dadas las fuertes diferencias estacionales en la magnitud de *P* y *ETo* los regímenes climáticos de cada sitio, para obtener series *SPEI* comparables en espacio y tiempo, es necesario transformar la serie *D* usando igual probabilidad a una distribución normal con media cero y desviación estándar de uno por lo que los valores del *SPEI* están realmente en desviaciones estándar y carecen de efectos estacionales.

Para ello, los valores de *D* se ajustan a una distribución de probabilidad para transformar los valores originales en unidades estandarizadas, comparables en espacio y tiempo ya diferentes escalas de tiempo del *SPEI*, siguiendo el mismo procedimiento que para el *SPI*. Diferentes análisis sugirieron la selección de la distribución *Log-logística* para estandarizar la serie *D* para obtener el *SPEI* (Vicente-Serrano et al., 2010a) ya que la distribución *Log-logística* se adaptó muy bien a las series de *D* para todas las escalas de tiempo y regiones climáticas. Con muy pocas excepciones, para la mayoría de las regiones del mundo se encontró un buen ajuste entre la distribución *Log-logística* y la serie D_k , independientemente de la escala de tiempo (*k*) y el mes del año (Vicente-Serrano et al., 2010b). Esto garantiza la robustez de los cálculos del *SPEI* basados en dicha distribución de probabilidad.

La función de densidad de probabilidad de una variable distribuida Log-logística de tres parámetros se expresa como:

$$f(x) = \frac{\beta}{\alpha} \cdot \left(\frac{x-\gamma}{\alpha}\right)^{\beta-1} \cdot \left[1 + \left(\frac{x-\gamma}{\alpha}\right)^{\beta}\right]^{-2}$$

donde α , β y γ son parámetros de escala, forma y origen, respectivamente, para valores de *D* en el rango ($\gamma > D > \infty$).

Los parámetros de la distribución *Log-logística* se pueden obtener siguiendo diferentes procedimientos. Entre ellos, el procedimiento de momentos ponderados por probabilidad (*PWM*) es un enfoque robusto y fácil. Los *PWM* de orden *s* se calculan como:

$$w_s = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (1 - F_i)^s \cdot D_i$$

donde F_i es un estimador de posición de trazado calculado de la siguiente manera:

$$F_i = \frac{i - 0.35}{N}$$

donde i es el rango de observaciones dispuestas en orden creciente y N es el número de puntos de datos.

Cuando se calculan los *PWM*, los parámetros de la distribución *Log-logística* se pueden obtener de la siguiente manera:

$$\beta = \frac{2 \cdot w_1 - w_0}{6 \cdot w_1 - w_0 - 6 \cdot w_2}$$

$$\alpha = \frac{(w_0 - 2 \cdot w_1) \cdot \beta}{\Gamma(1 + 1/\beta) \cdot \Gamma(1 - 1/\alpha)}$$

$$\gamma = w_0 - \alpha \cdot \Gamma(1 + 1/\beta) \cdot \Gamma(1 - 1/\beta)$$

donde $\Gamma(B)$ es la función gamma de B .

La función de distribución de probabilidad de la serie D según la distribución *log-logística* viene dada por:

$$F(x) = \left[1 + \left(\frac{\alpha}{x - \gamma} \right)^\beta \right]^{-1}$$

Con $F(x)$ el *SPEI* se puede obtener fácilmente como los valores estandarizados de $F(x)$:

$$SPEI = W - \frac{C_0 + C_1 \cdot W + C_2 \cdot W^2}{1 + d_1 \cdot W + d_2 \cdot W^2 + d_3 \cdot W^3}$$

donde:

$$W = \sqrt{-2 \cdot \ln(P)} \Rightarrow P \leq 0.5$$

P es la probabilidad de superar un determinado valor D , $P = 1 - F(x)$. Si $P > 0.5$, P se sustituye por $1 - P$ y se invierte el signo del *SPEI* resultante. Las constantes son: $C_0 = 2.515517$, $C_1 = 0.802853$, $C_2 = 0.010328$, $d_1 = 1.432788$, $d_2 = 0.189269$ y $d_3 = 0.001308$. El valor promedio de *SPEI* es 0 y la desviación estándar es 1. El *SPEI* es una variable estandarizada y, por lo tanto, se puede comparar con otros valores de *SPEI* en el tiempo y el espacio. Un *SPEI* de 0 indica un valor correspondiente al 50% de la probabilidad acumulada de D , según una distribución *Log-logística*.

La estimación de los parámetros *log-logísticos* es importante porque la comparabilidad espacial y temporal de los índices de sequía es importante para un análisis y monitoreo precisos de la sequía. Es necesario que las series *SPEI* en diferentes sitios tengan el mismo promedio ($x=0$) y *Desviación Estándar* ($SD=1$); lo mismo es aplicable a las series del *SPEI* registradas en el mismo lugar pero en diferentes escalas temporales. La estimación de parámetros puede generar sesgos y errores en la varianza, por lo que el método utilizado para la estimación es muy importante. Originalmente, los momentos ponderados de probabilidad (*PWM*) basados en la fórmula de posición de trazado (F_i) para calcular el *SPEI* (Vicente-Serrano et al., 2010a), pero Beguería et al. (2014) demostraron que el estimador de posición de trazado no era un método óptimo para el cálculo de *SPEI*, ya que conducía a *SD* sesgadas. Además, la *SD* aumentó con el aumento de la escala de tiempo del *SPEI*, por lo que las series del *SPEI* en diferentes escalas de tiempo no pueden compararse para un sitio determinado. Además, el método de posición de trazado condujo a muchos casos sin solución (más del 2% en algunas áreas del mundo), y el número de tales casos aumentó a medida que disminuía la escala de tiempo. Por estas razones, se propuso un estimador *PWM* imparcial para el cálculo de *SPEI*. El estimador *PWM* insesgado se obtiene de acuerdo con:

$$W_s = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N \frac{(N-i) \cdot D_i}{\binom{N-i}{s}}$$

El método *PWM* imparcial no condujo a ajustes fallidos a una distribución *log-logística*, proporcionó *SD* estacionarias entre el espacio y las escalas de tiempo *SPEI* y proporcionó una solución para cualquier valor *D* (con algunas excepciones).

La formulación original del *SPEI* sugería el uso de la ecuación de *Thornthwaite* para la estimación de *ETo* (*Thornthwaite, 1948*). Esta ecuación solo requiere la temperatura media diaria y la latitud del sitio, y se utilizó debido a la limitada disponibilidad de datos. Sin embargo, el uso de una ecuación particular para la estimación de *ETo* no es central para el cálculo de *SPEI*, y también se pueden usar otras ecuaciones. Se recomienda la ecuación más sólida *FAO-56 Penman-Monteith* (*Allen et al., 1998*) si se dispone de datos (humedad relativa, temperatura, velocidad del viento y radiación solar). Si los datos necesarios para esta ecuación no están disponibles, se recomienda la ecuación de *Hargreaves* (primera) o la ecuación de *Thornthwaite* (segunda). Las diferencias entre las series *SPEI* calculadas utilizando las diferentes ecuaciones *ETo* pueden ser significativas en algunas regiones del mundo.

En general, los bajos requerimientos de datos del *SPEI*, la facilidad y flexibilidad de su cálculo, y la consideración de los dos elementos principales que determinan la severidad de la sequía (precipitación y demanda evaporativa atmosférica) son razones sólidas para recomendar su uso sobre otros índices de sequía. El *SPEI* puede dar cuenta de los posibles efectos de la variabilidad de la temperatura y las temperaturas extremas más allá del contexto del calentamiento global. Por lo tanto, dados los menores requerimientos de datos adicionales del *SPEI* en relación con el *SPI*, el uso del primero es preferible para la identificación, análisis y monitoreo de sequías en cualquier región climática del mundo. El *SPEI* cumple con los requisitos de un índice de sequía, ya que su carácter multiescalar le permite ser utilizado por diferentes disciplinas científicas para detectar, monitorear y analizar sequías. Al igual que el *PDSI* y el *SPI*, el *SPEI* puede medir la severidad de la sequía según su intensidad y duración, y puede identificar el inicio y el final de los episodios de sequía. El *SPEI* permite comparar la severidad de la sequía a través del tiempo y el espacio, ya que se puede calcular sobre una amplia gama de climas. *Keyantash y Dracup (2002)* indicaron que los índices de sequía deben ser estadísticamente robustos y fáciles de calcular, y tener un procedimiento de cálculo claro y comprensible. Todos estos requisitos son cumplidos por el *SPEI*. Sin embargo, una ventaja crucial del *SPEI* sobre los índices de sequía más utilizados que consideran el efecto de *ETo* en la severidad de la sequía es que sus características multiescales permiten identificar diferentes tipos de sequía e impactos en el contexto del calentamiento global, y puede identificar el inicio y el final de los episodios de sequía.

Además, el *SPEI* es puramente estadístico; no pretende reproducir el balance de agua de ningún sistema en particular. Desde este punto de vista, las ventajas del *SPEI* (y también del *SPI*) con respecto a otros índices son que: i) su cálculo solo requiere información climatológica, muchas veces disponible y de calidad razonable; ii) no requieren ningún supuesto sobre el sistema que se está modelando; y iii) calculan las anomalías climatológicas para períodos de duración exacta (denominada la escala de tiempo del índice). El hecho de que *SPEI* no tenga una base física es más liberador que restrictivo. El *SPI* y el *SPEI* mantienen unidades con un significado estadístico robusto, y las series de las distintas escalas temporales son comparables entre ellos. Es más, *SPEI* y *SPI* tienen la ventaja de determinar exactamente el período (escala de tiempo) en el que las condiciones antecedentes están afectando el valor del índice. Además, el *SPI* y el *SPEI* no se obtienen utilizando enfoques de suavizado, sino por condiciones climáticas antecedentes acumulativas. Así, el cálculo de la serie temporal de un índice de sequía obtenido en una escala temporal determinada es completamente independiente de la serie temporal del índice obtenido en una escala temporal diferente. Además, la magnitud del índice tiene un claro significado estadístico, ya que se expresa como una anomalía estandarizada. Al igual que el *SPI*, el *SPEI* es perfectamente comparable en el tiempo y el espacio, ya través de diferentes escalas de tiempo, ya que corresponde a una variable normal estándar. Así, los mismos valores *SPEI* ocurren con la misma frecuencia en todas las regiones del mundo.

El cálculo del *SPEI* se implementa en el paquete *R SPEI* (<http://cran.r-project.org/web/packages/SPEI>). Este

paquete es preferible a la implementación anterior en lenguaje C (<http://digital.csic.es/handle/10261/10002>). Esta última implementación solo permite el cálculo de la formulación original del *SPEI* (basado en la ecuación *ETo* de *Thornthwaite*). El paquete *SPEI R* permite tres ecuaciones *ETo* (*Thornthwaite*, *Hargreaves* y *FAO-56 Penman-Monteith*). Además, existen diferentes opciones para la ecuación *FAO-56 Penman-Monteith*, dependiendo de la disponibilidad de datos. Por ejemplo, si los datos sobre la radiación solar rara vez están disponibles, el código puede estimarlos a partir de la duración de la luz solar brillante o del porcentaje de cobertura de nubes. De manera similar, si los datos sobre la presión de saturación del agua no están disponibles, el código puede estimarlos a partir de la temperatura del punto de rocío, la humedad relativa o la temperatura mínima, ordenados del método menos incierto al más incierto.

Un conjunto de datos *SPEI* cuadrículado está disponible en escalas de tiempo de 1 a 48 meses, resolución espacial de 0.5° lat/lon y cobertura temporal desde enero de 1901 hasta diciembre de 2011 mediante el uso de la *Unidad de Investigación del Clima (CRU TS3.2)* (<http://sac.csic.es/spei/database.html>). El *SPEIbase v.2.2* está disponible en <http://digital.csic.es/handle/10261/72264> en formato *netCDF*, y los archivos individuales correspondientes a cada cuadrícula de 0.5° están disponibles en [http://sac.csic.es/spei /base de datos.html](http://sac.csic.es/spei/base%20de%20datos.html).

Un sistema global de seguimiento de sequías en tiempo real basado en el *SPEI* también está disponible en <http://sac.csic.es/spei/map/maps.html>. Este sistema proporciona mapas *SPEI* globales para toda la tierra con una resolución espacial de 0.5°. Los productos *SPEI* se obtienen utilizando la ecuación de *Thornthwaite* para el cálculo de *ETo* porque no se dispone de la información global necesaria para el cálculo de *ETo* mediante las ecuaciones *FAO-56 Penman-Monteith* o *Hargreaves* en tiempo real. El monitor de sequía global de *SPEI* proporciona escalas de tiempo de *SPEI* de 1 a 48 meses, permite la visualización gráfica del cambio en *SPEI* a lo largo del tiempo en sitios definidos por el usuario y permite descargar series de tiempo de *SPEI* en puntos específicos, áreas o el completo. conjunto de datos en formato *netCDF*. Este conjunto de datos es diferente al conjunto de datos *SPEIbase v.2.2* y puede ser menos preciso porque las entradas climáticas del conjunto de datos *CRU TS3.2* (a partir del cual se calcula el *SPEIbase v.2.2*) se someten a un cuidadoso control de calidad, se homogeneizan, cubren un período de tiempo más largo (1901-2011) y permiten el cálculo de *ETo* mediante la ecuación *FAO-56 Penman-Monteith* más robusta. La principal ventaja del sistema de seguimiento de sequías es la disponibilidad de datos casi en tiempo real, lo que puede ser importante para determinados usos.

Referencias:

Beguería, S., Vicente-Serrano, SM, Reig, F. y Latorre, B. (2013), Revisión del índice estandarizado de precipitación y evapotranspiración (*SPEI*): ajuste de parámetros, modelos de evapotranspiración, herramientas, conjuntos de datos y seguimiento de la sequía. En t. J. Climatol.

Hayes, M., Svoboda, M., Wall, N., Widhalm M., (2011) La declaración de Lincoln sobre los índices de sequía: se recomienda el índice universal de sequía meteorológica. *Toro. Soy. Meteorol. Soc.* 92: 485–488.

McEvoy, Daniel J., Justin L. Huntington, John T. Abatzoglou, Laura M. Edwards, 2012: Evaluación de los índices de sequía multiescalares en Nevada y el este de California. *Earth Interact.*, 16, 1–18.

Thornthwaite, CW, (1948) Un enfoque hacia una clasificación racional del clima. *Revista Geográfica*, 38, 55-94. [pdf]

Vicente-Serrano, Sergio M., Santiago Beguería, Juan I. López-Moreno, 2010: Un índice de sequía multiescalar sensible al calentamiento global: el índice estandarizado de precipitación y evapotranspiración. *J. Clima*, 23, 1696–1718.

Vicente-Serrano, SM, Beguería, S., López-Moreno, JI, Angulo, M., El Kenawy, A. (2010b). Un nuevo conjunto de datos global cuadrículado de 0,5° (1901–2006) de un índice de sequía multiescalar: comparación con conjuntos de datos de índices de sequía actuales basados en Palmer Drought Severity I

Vicente-Serrano, SM, Beguería, S., López-Moreno, JI (2011). Comente sobre “Características y tendencias en varias formas del Índice de Severidad de Sequía de Palmer (PDSI) durante 1900-2008” por A Dai. *J. Geophys. Res.* 116: D19112, DOI: 10.1029/2011JD016410.

Vicente-Serrano, Sergio M. y coautores, 2012: Desempeño de los índices de sequía para aplicaciones ecológicas, agrícolas e hidrológicas. *Earth Interact.*, 16, 1–27.

Vicente-Serrano, SM y coautores (2013). La respuesta de la vegetación a las escalas de tiempo de sequía en los biomas terrestres globales. *Actas de la Academia Nacional de Ciencias de los Estados Unidos de América* 110: 52-57.

Organización Meteorológica Mundial, (2012) Guía del usuario del índice de precipitación estandarizada (M. Svoboda, M. Hayes y D. Wood). (OMM-Nº 1090), Ginebra. [PDF]

Keyantash, J. y Dracup. J., (2002) La cuantificación de la sequía: una evaluación de los índices de sequía. *Boletín de la Sociedad Meteorológica Americana*, 83, 1167-1180.

Trenberth, KE, A. Dai, G. van der Schrier, PD Jones, J. Barichivich, KR Briffa y J. Sheffield^, 2014: Calentamiento global y cambios en la sequía. *Naturaleza Cambio Climático*, 4, 17-22

Richard R. Heim Jr., 2002: Una revisión de los índices de sequía del siglo XX utilizados en los Estados Unidos. *Toro. Amer. Meteorito. Soc.*, 83, 1149–1165.

Brutsaert, W. (2006), Indicaciones del aumento de la evaporación de la superficie terrestre durante la segunda mitad del siglo XX, *Geophys. Res. Lett.*, 33, L20403

La nomenclatura del nombre del fichero que almacena los datos de la variable “Índice de precipitación-evapotranspiración estandarizado para la ventana x” es la siguiente:

spei[x]_<MCG>_<ESN>_d<m>_<p>_COG.tif

spei[x] = alias de “Índice de precipitación-evapotranspiración estandarizado para la ventana x”

MCG = nombre del Modelo de Circulación General

ESN = nombre del Escenario de Emisiones de GEI

m = periodo interanual

p = periodo intranual