

COMPARACIÓN DE SEIS ÍNDICES PARA EL MONITOREO DE SEQUÍAS METEOROLÓGICAS EN EL SUR DE SUDAMÉRICA

Olga C. Penalba^{1,2,3}, Juan A. Rivera^{3,4}

¹Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires, Intendente Güiraldes 2160, Pabellón 2, 2º Piso – Ciudad Universitaria, Buenos Aires, Argentina.

²Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Av. Rivadavia 1917, Buenos Aires, Argentina.

³Unidad Mixta Internacional – Instituto Franco-Argentino para el Estudio del Clima y sus Impactos (UMI-IFAECI), Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires, Intendente Güiraldes 2160, Pabellón 2, 2º Piso – Ciudad Universitaria, Buenos Aires, Argentina.

⁴Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales (IANIGLA), Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET). Av. Ruiz Leal s/n, Parque General San Martín, Mendoza, Argentina.

(Manuscrito recibido el 21 de abril de 2014, en su versión final el 22 de septiembre de 2014)

RESUMEN

Existen numerosos índices de sequía que deben ser monitoreados continuamente a fin de determinar el inicio y fin de los eventos de sequía y sus características espacio-temporales. Este trabajo describe y compara el desempeño de seis índices basados en datos de precipitación para el monitoreo de sequías en el sur de Sudamérica, con el objetivo de obtener el índice más adecuado para el análisis de sequías en la región. Los índices analizados son el índice de precipitación estandarizado, el índice de falta de precipitación, el índice deciles, el índice de sequía efectivo, el porcentaje de la precipitación normal y el Z-Score. Estos índices fueron calculados en múltiples escalas temporales, las cuales permiten evaluar distintos tipos de sequías. Se evaluaron cinco criterios de relevancia para la comparación de los índices, como su sensibilidad, dimensionalidad, transparencia, flexibilidad y tratabilidad. Mediante el análisis de sus propiedades estadísticas y una evaluación del comportamiento espacio-temporal, se obtuvo que el índice de precipitación estandarizado es el índice más adecuado para el estudio y monitoreo de sequías meteorológicas en el sur de Sudamérica. Los resultados de esta comparación permitieron establecer una serie de recomendaciones sobre los índices de sequía analizados, las cuales se centran principalmente en sus categorizaciones y sus aspectos teóricos.

Palabras clave: índices de sequía; sequía meteorológica; monitoreo de sequías; sur de Sudamérica; precipitación.

COMPARISON OF SIX INDICES FOR METEOROLOGICAL DROUGHT MONITORING IN SOUTHERN SOUTHAMERICA

ABSTRACT

There are numerous drought indices that must be continuously monitored to determine the beginning and end of drought events and their spatio-temporal characteristics. This paper describes and compares the performance of six indices for drought monitoring based on rainfall data in southern South America, with the aim of obtaining the most suitable index for the analysis of droughts in the region. The analyzed indices are the standardized precipitation index, the lack of rain index, the deciles index, the effective drought index, the percentage of normal precipitation and the Z-score. These indices were calculated at multiple time scales, which allow evaluating different types of droughts. Five relevant criteria, such as sensitivity, dimensionality, transparency, flexibility, and tractability, were evaluated. Through the analysis of its statistical properties and its evaluation of the spatio-temporal behavior, we found that the standardized precipitation index is the most suitable for the study and monitoring of meteorological droughts in southern South America. The results of this comparison allowed us to establish a set of recommendations about the analyzed drought indices, which mainly focus on their categorizations and theoretical aspects.

Keywords: drought indices; meteorological drought; drought monitoring; Southern South America; precipitation.

1. INTRODUCCIÓN

La identificación y caracterización de eventos de sequía es una tarea compleja, debido a que son un fenómeno natural difícil de detectar (Tsakiris y Pangalou, 2009). Dado que no existe una única definición de sequía que sea apropiada en todas las situaciones, los encargados de la planificación de los recursos hídricos y la agricultura deben basarse en una variedad de datos o índices que se expresan en mapas o gráficos (Wilhite, 2009). Esto se debe a que ningún índice es universalmente adecuado y superior en todas las circunstancias. Sin embargo, la variedad de índices encontrados en la literatura sobre las condiciones hídricas del suelo llegan a confundir en el sentido de cuál expresa con mejor certeza las condiciones extremas de sequía o de humedad de la superficie (Scian, 1997). Por lo tanto, el hecho de determinar que un índice sea más apropiado que otro en una cierta región y bajo ciertas condiciones climáticas ayudará a la toma de decisiones y a la caracterización climática de las sequías.

En las últimas décadas, se desarrollaron numerosos índices para la identificación y

seguimiento de eventos de sequía. La elección de los mismos para el monitoreo de sequías en una región específica debe estar basada en la cantidad y calidad de datos climáticos disponibles y en la habilidad de estos en detectar consistentemente las variaciones espaciales y temporales durante un evento de sequía (Morid y otros, 2006). Estos índices pueden ser utilizados para iniciar planes de acción frente a condiciones de sequía, y para la predicción de las condiciones hídricas a fin de mejorar las alertas tempranas y reducir los tiempos de respuesta ante esta amenaza.

En diversas regiones del sur de Sudamérica (SSA), numerosos índices han sido aplicados para identificar períodos de sequía. Scian y Donnari (1997) realizaron un análisis retrospectivo del índice de severidad de sequía de Palmer (ISSP) (Palmer, 1965) en la región pampeana semi-árida. Minetti y otros (2007) utilizaron el índice mensual de sequía para caracterizar las sequías en Argentina y en particular en la región de la Pampa Húmeda. Alessandro (2008) utilizó el porcentaje de la precipitación normal (PPN) con el fin de evaluar los patrones de circulación asociados a la sequía de los años 2003-04 en Argentina. Serio y otros (2010) utilizaron el índice

de precipitación estandarizado (IPE) (McKee y otros, 1993) a fin de evaluar la predicción estadística de eventos secos y húmedos en la región pampeana.

En cuanto a la comparación de índices de sequía, en la literatura pueden encontrarse diversos intentos por compararlos a fin de encontrar el índice más adecuado para el objetivo específico del monitoreo de sequías (Mishra y Singh, 2010). Ntale y Gan (2003) definieron ocho criterios para la comparación de índices de sequía, los cuales son similares a los propuestos por Keyantash y Dracup (2002). En base a estos criterios, ambos estudios obtuvieron que el IPE resulta un buen indicador para las condiciones hídricas. Morid y otros (2006) encontraron que el IPE y el índice de sequía efectivo (ISE) (Byun y Wilhite, 1999) permiten detectar el comienzo de los eventos de sequía, su variación espacial y temporal de forma consistente, y recomiendan su uso operacional para el monitoreo de sequías en Irán. En la región de estudio se destaca el trabajo de Scian (1997), quien realiza una comparación del IPE con el ISSP, el PPN, el índice deciles y el índice de anomalía de humedad (Z) (Palmer, 1965) en la región Pampeana. Mediante esta comparación, los autores obtuvieron que el IPE en todas sus escalas es práctico para estudiar las características, probabilidades, áreas de extensión y magnitudes de extremos hídricos. Otra comparación de índices de sequía, fue realizada por Krepper y Zucarelli (2012) para la Cuenca del Plata, considerando el IPE, el índice Z-Score y el índice Z de China (Ju y otros, 1997). Los autores encontraron un comportamiento similar para todos los índices, con lo cual seleccionaron el IPE para caracterizar los períodos secos y húmedos dado que es más utilizado que los restantes índices.

En este estudio, seis índices de sequía basados únicamente a partir de datos de precipitación serán calculados y comparados a fin de establecer un orden jerárquico entre los mismos con el propósito de identificar el índice de sequía meteorológica más adecuado para el SSA. Teniendo en cuenta la influencia que posee la

escala temporal a partir de la cual se consideran los acumulados de precipitación, es necesaria una comparación de índices de sequía en múltiples escalas de tiempo. El uso de criterios para la evaluación de los mismos permitirá identificar ventajas y desventajas de los índices a comparar, lo cual permitirá establecer recomendaciones para su uso en el SSA.

2. DATOS

Para llevar a cabo este trabajo, se utilizaron datos diarios de precipitaciones provenientes de 48 estaciones meteorológicas que corresponden al período comprendido entre 1961 y 2008. Estas estaciones pertenecen a la base de datos del proyecto CLARIS LPB y se ubican en la porción de Sudamérica delimitada por las latitudes 20°S y 40°S y las longitudes 48°O y 72°O (Figura 1). De las 48 estaciones meteorológicas, 41 estaciones se ubican en el territorio argentino, 3 en Paraguay y 4 en Brasil. Las series de datos utilizadas poseen menos de 5% de datos faltantes y fueron sometidas a procedimientos de control de calidad, los cuales se detallan en Penalba y otros (2014). Con el propósito de realizar una comparación en múltiples escalas de tiempo, se calcularon los acumulados de precipitación en cada estación meteorológica en escalas de 1, 3, 6, 9 y 12 meses.

3. ÍNDICES DE SEQUÍA

En este trabajo se utilizaron seis índices de sequía: el IPE, el ISE, el índice de falta de precipitación (IFP) (Rivera y Penalba, 2009), el PPN, el índice deciles (ID) y el índice Z-Score. Una característica en común que poseen todos los índices es que fueron calculados únicamente en base a datos de precipitación. Un aspecto relevante para el cálculo e interpretación de los índices de sequía es el uso de escalas de tiempo, las cuales indican la cantidad de meses de precipitación a partir de los cuales se calcula el índice de sequía. Estas escalas de tiempo permiten realizar una separación de los distintos tipos de sequía, dado que un déficit en la precipitación en escala de tiempo corta es importante para la agricultura, mientras que en escala de tiempo larga posee relevancia en el

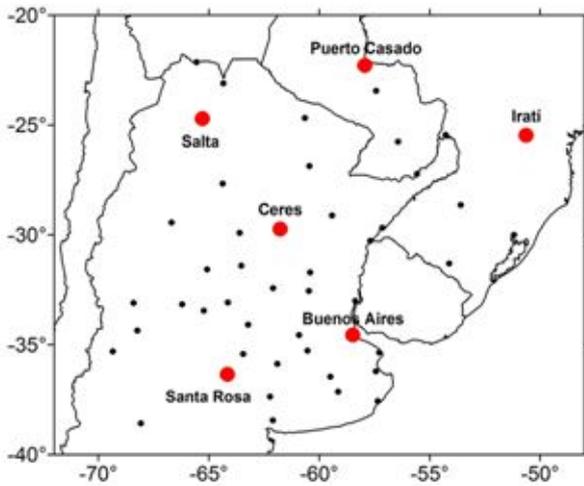


Figura 1: Ubicación de las 48 estaciones seleccionadas para la comparación de los índices de sequía. Los puntos rojos indican las estaciones de referencia.

manejo de los recursos hídricos. En este estudio se consideraron escalas de tiempo de 3 y 12 meses para el análisis de sequías de corto y largo plazo, respectivamente.

El paso de tiempo utilizado para el cálculo de los índices es mensual, dado que es el más adecuado para el monitoreo de los efectos de las sequías en situaciones relativas a la agricultura, el suministro de agua y las extracciones de agua subterránea (Panu y Sharma, 2002). El procedimiento para la obtención de los índices de sequía se detalla en las sub-secciones 3.1 a 3.6.

3.1. Índice de precipitación estandarizado

En la última década, el IPE se convirtió en el índice de sequía más popular, siendo valioso por su desarrollo teórico, su robustez y su versatilidad para el análisis de sequías (Vicente-Serrano y López-Moreno, 2006). McKee y otros (1993) desarrollaron el IPE con el propósito de definir y monitorear sequías. Conceptualmente, el IPE representa la cantidad de desviaciones estándares a partir de la cual un valor de precipitación se encuentra por encima o por debajo del promedio climatológico de una ubicación particular. Este índice es ampliamente aceptado y utilizado en

todo el mundo, tanto en modo operacional como para la investigación, dado que está normalizado en tiempo y escala (Wu y otros, 2007) y por lo tanto puede ser comparado entre regiones con características climáticas distintas.

Para el cálculo del IPE, las series de precipitaciones acumuladas en distintas escalas temporales se dividen en 12 series mensuales, las cuales son ajustadas a una distribución de probabilidades teórica que representa las variaciones de la precipitación en la región de estudio. En esta comparación se utilizó la distribución gamma de dos parámetros, la cual ajusta de manera adecuada los acumulados de precipitación en el SSA tanto en escala mensual como en escalas de tiempo múltiples (Penalba y Rivera, 2012).

La distribución de probabilidad gamma de dos parámetros está dada por (Thom, 1958):

$$g(x) = \frac{x^{\alpha-1} e^{-\frac{x}{\beta}}}{\beta^{\alpha} \Gamma(\alpha)} \quad x, \alpha, \beta > 0 \quad (1)$$

La cantidad $\Gamma(\alpha)$ es la función gamma; y los dos parámetros que definen la distribución son el parámetro de forma (α), que determina el grado del sesgo de la distribución; y un parámetro de escala (β), que determina la dispersión de los valores a lo largo del eje x (Wilks, 2006). El cálculo de los parámetros fue obtenido para cada estación meteorológica, para cada escala de tiempo de interés y para cada mes del año. A fin de estimar los parámetros α y β se utilizó el método de máxima verosimilitud (Thom, 1958).

Mediante la integración de la función de densidad de probabilidades con respecto a x y utilizando las estimaciones de los parámetros α y β , se alcanza una expresión para la probabilidad acumulada $G(x)$ de una dada cantidad de precipitación que ocurre en un determinado mes y para cada escala de tiempo de interés. La probabilidad acumulada se expresa como

$$G(x) = \int_0^x g(x) dx = \frac{\int_0^x x^{\hat{\alpha}-1} e^{-\frac{x}{\hat{\beta}}} dx}{\hat{\beta}^{\hat{\alpha}} \Gamma(\hat{\alpha})} \quad (2)$$

La distribución gamma no está definida para valores de $x = 0$, lo cual es un problema dado que las series de datos de precipitación pueden incluir meses en los cuales no se registraron lluvias. Teniendo esto en cuenta, se utilizó el estadístico $H(x)$ para definir la probabilidad acumulada:

$$H(x) = q + (1 - q)G(x) \quad (3)$$

donde q es la probabilidad de $x = 0$. Si m es la cantidad de ceros en una muestra de tamaño n , q puede estimarse como el cociente entre m y n . Luego, la distribución de probabilidad acumulada se transforma a una distribución normal a fin de obtener el IPE, siguiendo la aproximación sugerida por Abramowitz y Stegun (1965).

3.2. Índice de falta de precipitación

El índice de falta de precipitación (IFP) fue definido por Rivera y Penalba (2009) para analizar los períodos secos y húmedos en Argentina. Su cálculo depende únicamente de la cantidad mensual de días secos en cada estación meteorológica, considerando un día seco como aquel donde el acumulado de precipitación fue nulo. Originalmente, el IFP fue definido en ventana de 12 meses y, con el fin de realizar esta comparación, el mismo fue extendido al resto de las ventanas de tiempo consideradas.

El IFP fue construido de la siguiente forma:

- 1) La cantidad de días secos fue calculada a nivel mensual para todas las estaciones meteorológicas y escalas de tiempo consideradas.
- 2) Un promedio móvil en ventanas de 1, 3, 6, 9 y 12 meses fue aplicado a la serie de días secos, utilizando una ventana no centrada con un esquema de pesos igual a $1/n$, siendo n el ancho de la ventana temporal. De esta forma, el valor del IFP depende del valor presente y de los valores pasados de la serie. Por ejemplo, el valor del IFP en ventana de 3 meses para el mes de agosto corresponde al promedio del valor de agosto, julio y junio.
- 3) Las series de cantidad de días secos fueron estandarizadas respecto a los valores mensuales de media y desviación estándar del período 1961-2008. A esta serie temporal se la multiplicó

por -1 a fin de asignar valores negativos a períodos secos y valores positivos a períodos húmedos.

3.3. Índice de sequía efectivo

El índice de sequía efectivo (ISE) es una medida intensiva que intenta determinar de manera más exacta el inicio y fin de los períodos de sequía. A diferencia de muchos otros índices de sequía, el ISE, en su forma original, fue definido en escala diaria. Un argumento válido para utilizar un índice de sequía en escala diaria es que en una región afectada por sequía, la cantidad de agua necesaria para retornar a condiciones normales puede registrarse con solo un día de lluvia (Byun y Wilhite, 1999). Sin embargo, sus principios pueden ser utilizados similarmente con datos en escala mensual, tal como se describe en Smakhtin y Hughes (2007).

El primer paso para la obtención del ISE consiste en calcular la precipitación efectiva (PE), la cual es obtenida sumando la precipitación con una función de reducción a lo largo del tiempo. Esta función otorga un factor de peso a los datos de precipitación, con mayores pesos a los datos cercanos al mes en cuestión y menores pesos a medida que se consideran datos previos. Algunas de las funciones de peso utilizadas comúnmente pueden encontrarse en Byun y Wilhite(1999) y Byun y Lee (2002). Conceptualmente, este es el término principal en el procedimiento de cálculo del ISE. Esta función de reducción representa la pérdida de precipitación debido a la escorrentía o la evaporación.

$$PE_i = \sum_{n=1}^i \left[\sum_{m=1}^n \frac{P_m}{n} \right] \quad (4)$$

Donde i es la duración de la suma y P_m es la precipitación de los m meses previos. Asumiendo que i es igual a 3, como m varía de 1 a 3, PE_3 se expresa como $[P_1 + (P_1 + P_2)/2 + (P_1 + P_2 + P_3)/3]$, donde P_1 , P_2 y P_3 son los acumulados de precipitación durante el mes actual, el mes anterior y dos meses atrás, respectivamente. Con lo cual, se verifica que PE para cada mes es una función del mes en cuestión y de los meses anteriores, pero con menores pesos.

Luego, se calcula el valor medio del parámetro PE (PEM). Esta cantidad ilustra las características climatológicas de la precipitación. Byun y Kim (2010) recomiendan un promedio de al menos 30 años de datos para cada mes. El siguiente paso consiste en obtener la desviación de PE (DPE) respecto al PEM, lo cual consiste en la obtención de la anomalía de precipitación en una fecha y lugar particulares. El ISE mensual se define como

$$ISE_j = DPE_j / ST(PE_j) \quad (5)$$

donde $ST(PE)$ indica la desviación estándar de cada PE mensual y j es la duración de la suma. Al igual que el IPE, los valores del ISE están estandarizados, lo cual permite la comparación de la severidad de la sequía en dos o más estaciones meteorológicas más allá de las diferencias climáticas entre estas. El ISE posee diferentes umbrales para la clasificación de sequías en función de las estaciones astronómicas y lluviosas en Corea del Sur (Lee y otros, 2008), lo cual hace que muy probablemente sus umbrales deban adaptarse a las condiciones climáticas de las regiones en las cuales será aplicado. Sin embargo, para este análisis se adoptaron los valores de categorización propuestos por Kim y otros (2009), los cuales coinciden con los del IPE.

La mayoría de los estudios que aplican el ISE, utilizan una ventana de tiempo de 12 meses, la cual fue elegida arbitrariamente por Byun y Wilhite (1999) dado que corresponde al ciclo de precipitación dominante a nivel mundial. La publicación de este índice es relativamente reciente y no ha recibido mucha atención en la región del SSA, aunque ha sido evaluado satisfactoriamente en numerosas regiones (Akhtariy otros, 2009; Roudier y Mahe, 2010).

3.4. Porcentaje de la precipitación normal

El porcentaje de la precipitación normal (PPN) es una de las medidas más directas del desvío de la precipitación respecto a su promedio de largo plazo (Morid y otros, 2006). Los estudios que utilizan el PPN son efectivos cuando se

aplican en una región particular o una única estación astronómica, dado que el índice puede malinterpretarse cuando se generaliza a regiones amplias (Hayes, 2000). La obtención del PPN involucra dos pasos. Primero, se obtiene el valor medio (x_{med}) para el mes o los meses considerados. Luego, el valor de precipitación (x_i) se divide por la media y se multiplica por 100 a fin de obtener el PPN.

$$PPN = \frac{x_i}{x_{med}} \cdot 100 \quad (6)$$

Se considera que un valor de precipitación es normal (100%) cuando coincide con el valor medio para una dada ubicación. El PPN puede calcularse para una variedad de escalas temporales, desde un único mes a un conjunto de meses que representen estaciones astronómicas o años hidrológicos. Una de sus principales desventajas es que el promedio de la precipitación suele diferir de la mediana –valor excedido por el 50% de las ocurrencias– dado que la precipitación no posee distribución normal en escalas de tiempo cortas. El uso del PPN implica una distribución normal, donde la media y la mediana poseen el mismo valor (Hayes, 2000).

Debido a su variabilidad espacial, es difícil ligar un valor de desvío de la precipitación con un impacto específico que ocurre como resultado de ese apartamiento. Esto inhibe los intentos de mitigar los riesgos de sequía y formar un plan de respuesta basados en desviaciones respecto de la precipitación normal (Willekey otros, 1994). Sin embargo, debido a su cálculo simple, el PPN es adecuado para la radiodifusión del tiempo y el público en general (Dogán y otros, 2012).

3.5. Índice deciles

El índice deciles (ID) fue sugerido por Gibbs y Maher (1967) a fin de evitar algunas de las debilidades en el enfoque del PPN y ha sido comúnmente utilizado en estudios de sequías. El ID fue ampliamente utilizado en Australia para el monitoreo de condiciones de sequía dado que es un índice simple de calcular y provee la base para alertar sobre el comienzo de sequías y realizar un seguimiento de la evolución de sequías existentes.

El análisis del ID es valioso dado que el índice está normalizado en el tiempo y por lo tanto es comparable espacialmente (Monnik, 2000).

Para calcular el ID, los valores de precipitación para cada mes -o período de meses- son ordenados desde los más altos a los más bajos a fin de construir una distribución de frecuencias acumuladas. Luego, esta distribución es dividida en 10 partes o deciles (10 porciones de 10% cada una). De esta forma, el primer decil es el valor de precipitación que no se supera por el 10% de los datos de precipitación en el registro; el segundo decil es el valor de precipitación no excedido por el 20% de los datos y así sucesivamente. Comparando la cantidad de precipitación en un mes -o un período de varios meses- con la distribución acumulada de precipitación en ese período, puede evaluarse la severidad de la sequía.

3.6. Z-Score

El índice Z-Score es una cantidad adimensional y se calcula para cada escala de tiempo considerada como la diferencia entre la precipitación acumulada (x_i) y el promedio de la precipitación (x_{med}), dividido por la desviación estándar de la población (σ).

Si la escala de tiempo considerada es de 3 meses y se procede a la obtención del Z-Score para el mes de marzo de un año particular, entonces x_i es la precipitación total del mes de marzo del año en cuestión, más la de los meses de febrero y enero, y x_{med} el promedio de la precipitación total para ese período específico de 3 meses (enero-febrero-marzo). El Z-Score indica cuántas desviaciones estándar un valor de precipitación se encuentra por encima o por debajo del promedio. Wu y otros (2001) concluyeron que las principales ventajas del Z-Score por sobre el IPE son su simplicidad en el cálculo y la capacidad de permitir datos faltantes, lo cual lo hace más flexible en regiones donde los datos de precipitación suelen ser incompletos.

En algunos estudios se ha llegado a confundir al índice Z-Score con el IPE (Komuscu, 1999;

Aktariy otros, 2009; Batisani, 2011). El Z-Score no requiere que los datos se ajusten a una distribución de probabilidades teórica. Debido a esto, se especula que el Z-Score podría no representar las escalas de tiempo más cortas tan bien como el IPE (Edwards y McKee, 1997; Dogan y otros, 2012).

4. CRITERIOS DE COMPARACIÓN

La sensibilidad de la investigación de las sequías depende de la ventana de tiempo utilizada para cada índice (Dogan y otros, 2012) y esto permitirá analizar un amplio espectro de sequías. En esta investigación, la comparación de los 6 índices de sequía se realizó en escalas de 1, 3, 6, 9 y 12 meses, las cuales han sido utilizadas ampliamente (Wu y otros, 2001). Debe tenerse en cuenta que el ISE fue calculado una única vez por estación, dado que es un índice independiente de la escala de tiempo considerada y se determina mediante la precipitación pesada durante un año.

Los índices IPE, ISE, IFP y Z-Score poseen el mismo rango de valores numéricos (Tabla I), por lo tanto, pueden ser comparados directamente. Los índices PPN e ID poseen rangos que difieren totalmente de los 4 índices mencionados anteriormente, los cuales fueron obtenidos de los trabajos de Dogan y otros (2012) y Morid y otros (2006) respectivamente.

Dado que estos trabajos realizaron comparaciones de índices de sequía en regiones semi-áridas, se evaluará qué tan adecuadas son las categorizaciones propuestas para el ID y el PPN en la variedad de climas que posee la región de estudio.

En base a los estudios de Keyantash y Dracup (2002), Ntale y Gan (2003) y Tsakiris y Pangalou (2009), se propuso un conjunto de cinco criterios para la evaluación de los índices de sequía, a fin de determinar cuál es el índice más apropiado para el monitoreo de sequías a nivel regional en el SSA. Estos criterios son: (1) sensibilidad; (2) flexibilidad; (3) transparencia; (4) tratabilidad; y (5) dimensionalidad, los cuales se definen a

Categoría	IPE, ISE, IFP, Z-Score	ID	PPN
Húmedo	$\geq 1,00$	≥ 70	> 100
Normal	-0,99 a 0,99	30 a 70	80 a 100
Sequía moderada	-1,49 a -1,00	20 a 30	55 a 80
Sequía severa	-1,99 a -1,50	10 a 20	40 a 55
Sequía extrema	$\leq -2,00$	≤ 10	≤ 40

Tabla I: Categorización de los índices de sequía utilizados en el estudio. Las categorías están de acuerdo a: IPE (McKee y otros, 1993); ISE (Kim y otros, 2009); ID (Morid y otros, 2006); Z-Score (Dogan y otros, 2012); PPN (Dogan y otros, 2012).

continuación.

La sensibilidad mide qué tan susceptible es el índice a los cambios en las precipitaciones tanto a nivel temporal como a nivel espacial, lo cual brinda una medida de la variabilidad del índice. Esta característica es primordial para el desarrollo de sistemas de monitoreo y alerta temprana de sequías. Un análisis detallado de los casos de sequías más importantes permitirá evaluar que tan sensible es el índice en un amplio rango de condiciones físicas.

La flexibilidad representa la variedad de escalas temporales en las cuales puede ser computado el índice. Esto es muy importante dado que la humedad del suelo, la escorrentía superficial, y el almacenamiento en reservorios responden a los déficits de precipitación en diferentes escalas temporales. La flexibilidad permite entonces monitorear distintos tipos de sequías.

La transparencia considera la claridad en el objetivo y la base lógica detrás del índice. Los índices deben ser científicamente válidos y físicamente significativos. Es una medida importante dado que un índice de sequía debe ser entendible no solo por la comunidad científica sino también por el público afectado y los tomadores de decisión. La transparencia puede representar la utilidad general y la simplicidad e interpretabilidad del índice. Los índices deben

ofrecer información mejorada sobre los valores de precipitación.

La tratabilidad representa los aspectos prácticos del índice. Por ejemplo, un índice intratable puede requerir un alto grado de cómputos numéricos, o los pasos de su cálculo pueden ser particularmente complicados. Un índice intratable puede además requerir datos que están escasamente observados, o necesitar una extensa base de datos histórica para su obtención. Se considera que la disponibilidad de un software de cálculo del índice incrementa la tratabilidad del mismo.

En cuanto al criterio de dimensionalidad, la normalización con respecto al clima, en unidades adimensionales, facilita en gran medida las comparaciones espaciales a través de diferentes ámbitos. Además, un buen índice de sequía debe ser capaz de ajustarse a valores sin precedentes si ocurre un comportamiento climático extraordinario en el futuro, y debe poseer un amplio rango de valores.

A fin de determinar la importancia relativa de cada criterio, Keyantash y Dracup (2002) otorgaron un conjunto de pesos a cada uno, cuya importancia relativa se determinó subjetivamente (Tabla II). Si bien la escala de pesos puede resultar subjetiva, el énfasis en los pesos reside en que un índice puede ser

Criterio	Peso asignado	Importancia relativa
Sensibilidad	10	~ 31%
Flexibilidad	8	~ 25%
Transparencia	6	~ 19%
Tratabilidad	5	~ 16%
Dimensionalidad	3	~ 9%

Tabla II: Pesos asignados a los criterios de evaluación seleccionados.

un excelente caracterizador espacio-temporal de las condiciones hídricas, lo cual es altamente deseable, pero sus valores pueden no estar estandarizados y de este modo, puede dificultarse su comparación regional. No obstante, esta última problemática puede solucionarse, mientras que la sensibilidad de cada índice difícilmente pueda ser modificada. Además, este esquema de pesos es consistente con el propuesto por Keyantash y Dracup (2002). A fin de evaluar los índices de sequía en el SSA, a cada uno de los criterios seleccionados se le asignó un rango de valores del 1 al 5, siendo 5 el valor más deseable. De esta forma, la suma de los valores de los 5 criterios multiplicados por cada uno de sus pesos indicará el puntaje total para cada índice, siendo 160 el máximo puntaje posible. Estos valores se otorgaron en función de un análisis cuantitativo y cualitativo de los índices de sequía. Siguiendo el análisis de Barua y otros (2011), los aspectos cualitativos se evaluaron en función de los aspectos teóricos y computacionales; mientras que los aspectos cuantitativos se evaluaron mediante el análisis espacio-temporal de los índices en la región de estudio.

Los 6 índices de sequía fueron comparados en 6 estaciones de referencia: Salta; Ceres; Buenos Aires; Santa Rosa; Iratí (BR) y Puerto Casado (PY), las cuales representan de manera adecuada las variaciones espacio-temporales de la precipitación a nivel regional y poseen una distribución espacial homogénea (Figura 1). En el caso de la comparación del comportamiento espacial de los índices, se utilizaron la totalidad de las 48 estaciones meteorológicas consideradas.

Para los 4 índices que poseen rangos de valores similares, se analizaron los diagramas de dispersión del IPE en función de los índices IFP, ISE y Z-Score, y se utilizó el coeficiente de correlación de Pearson (r^2) como una medida de asociación entre ellos. Este tipo de comparaciones ha sido llevado a cabo por Wu y otros (2001), Morid y otros (2006) y Byun y Kim (2010), entre otros. Con el fin de evaluar el comportamiento espacio-temporal de los índices de sequía, se analizó el evento ocurrido en los años 1988-89, el cual afectó gran parte del SSA.

5. RESULTADOS

5.1. Relación entre los índices de la sequía y comparación de las categorizaciones

El análisis de regresión entre los distintos índices se llevó a cabo para las 5 escalas de tiempo consideradas. Sin embargo, a fin de simplificar los resultados, en este trabajo se presentarán únicamente las figuras obtenidas para las comparaciones en escalas de 3 y 12 meses. Para este análisis se descartaron los índices PPN e ID dado el rango de valores que éstos poseen. Además, se muestran únicamente las comparaciones del IFP, ISE y Z-Score respecto al IPE, dado que este último es uno de los índices más aplicados en la región de estudio. Este enfoque fue utilizado por Dogan y otros (2012) y permitirá ahorrar notoriamente la cantidad de información mostrada. Con lo cual, en el eje x de todos los diagramas de dispersión se ubican los valores de IPE mientras que en el eje y se grafican los valores de los restantes índices.

La Figura 2 muestra la regresión lineal entre los valores del IPE y el IFP en escala de 3 meses, en donde se observa que, en las 6 estaciones, la relación entre los dos índices presenta una gran dispersión, con valores de r^2 que oscilan aproximadamente entre 0,31 y 0,48. Esto puede deberse a que los acumulados de días secos pueden no relacionarse directamente con la ocurrencia de eventos de sequías. La relación entre el IPE en ventana de 3 meses y el ISE es mayor, con valores de r^2 entre 0,46 y 0,72 (Figura

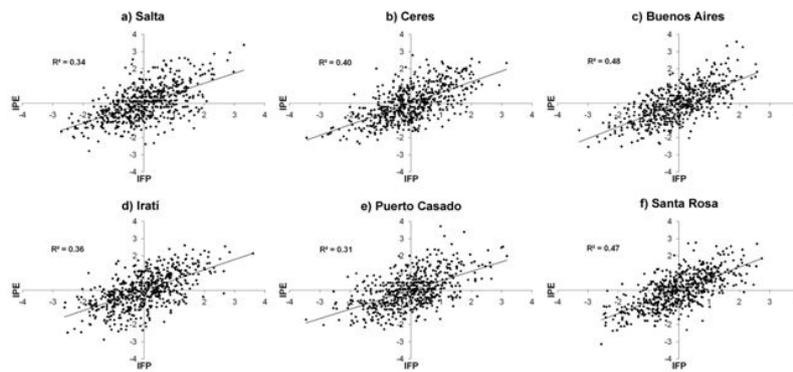


Figura 2: Diagramas de dispersión para el IPE y el IFP en escala de 3 meses para las 6 estaciones seleccionadas. Período: 1961-2008.

3). Las mayores diferencias se observan en la estación Salta, principalmente durante los meses secos (Figura 3a); y en la estación Puerto Casado durante los meses húmedos (Figura 3e). Un factor importante es la discrepancia en los valores que alcanzan ambos índices en condiciones secas y húmedas extremas.

Para condiciones de sequía (tercer cuadrante de los paneles de la Figura 3), se observa que el ISE tiende a estar acotado y sólo en unos pocos meses logra alcanzar condiciones de sequía extrema ($ISE \leq -2,0$), mientras que el IPE puede presentar valores inferiores a $-3,0$. Sin embargo, cuando se analizan las condiciones húmedas (primer cuadrante de los paneles de la Figura 3), ambos índices presentan valores similares. Esto podría indicar la presencia de un sesgo hacia condiciones húmedas por parte del ISE, que puede afectar la identificación de sequías en la región de estudio. Ese hecho es evidente en el caso de la estación Puerto Casado (Figura 3e) si se consideran condiciones húmedas extremas ($ISE \geq 3,0$).

En cuanto a la comparación del IPE con el Z-Score, se observa un comportamiento heterogéneo en las regresiones, con valores de r^2 que van desde aproximadamente 0,1 para la estación Salta a aproximadamente 0,83 para la estación Iratí (Figura 4). En todos los casos, las mayores discrepancias se observan durante los

meses húmedos.

Esto podría estar asociado al hecho que las series de precipitación en escala de 3 meses no se ajusten a una distribución normal, lo cual estaría afectando los valores del índice Z-Score. A fin de obtener una mejor inspección de las relaciones entre los índices de sequía en escala de 3 meses, para cada una de las 6 estaciones de referencia se calculó la cantidad de meses que cada índice presentaba en las distintas categorías de sequías (Figura 5). Las categorías del eje x de los histogramas son: SE –sequía extrema-; SS –sequía severa-; SM –sequía moderada-; N –normal-; H –húmedo- (Tabla I). Para este análisis se descartó el ID dado que por su definición, otorga la misma cantidad de casos a cada decil, con lo cual, todas las categorías tendrán la misma frecuencia absoluta. Esto resulta válido en las escalas de tiempo de 3, 6, 9 y 12 meses. Sin embargo, en escala de 1 mes en regiones semi-áridas, se observa que el ID tiende a sobreestimar la frecuencia de meses correspondientes a sequía extrema y a subestimar la frecuencia de meses correspondientes a sequía severa (resultado no mostrado).

En todas las estaciones se observa que las frecuencias son similares en todas las categorías en el caso del IFP, IPE e ISE, con un histograma de tipo campana. El IPE tiende a presentar mayor sensibilidad a los cambios en

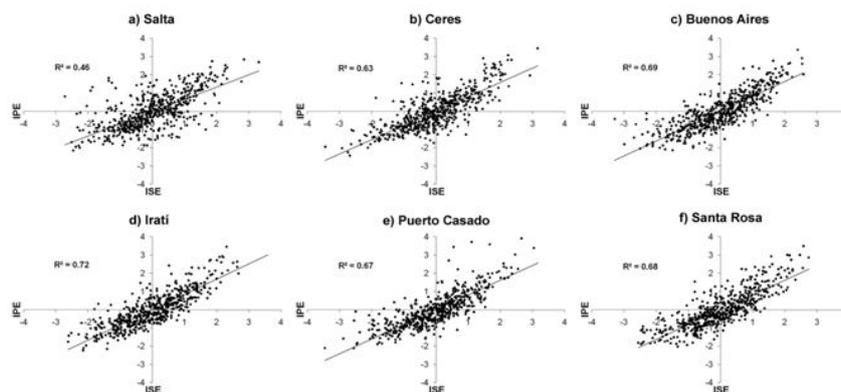


Figura 3: Ídem Figura 2 para el IPE y el ISE.

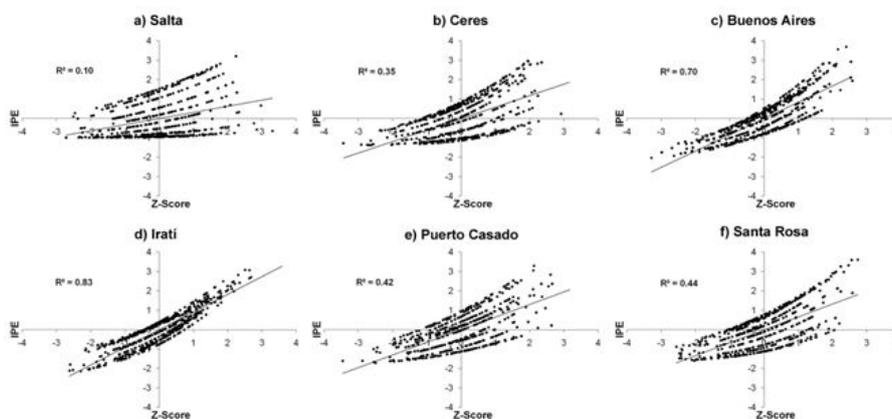


Figura 4: Ídem Figura 2 para el IPE y el Z-Score.

la precipitación que el ISE, dado que clasifica mayores frecuencias en las categorías de sequía extrema y severa (Figura 5). En ese sentido, el ISE tiende a clasificar muy pocos meses en la categoría de sequía extrema. Lo mismo sucede con el índice Z-Score, que además en las estaciones Salta y Ceres no presenta meses con sequías severas (Figura 5a y 5b). El índice PPN tiende a sobreestimar las frecuencias de sequías en gran parte de las estaciones, en particular, en la categoría de sequías extremas. Lo mismo sucede para las categorías húmedas, en tanto que clasifica muy pocos meses en la categoría normal. Este comportamiento fue evidenciado en Irán por Morid y otros (2006).

En el caso de la escala de 12 meses, la relación entre los valores del IPE y el IFP durante el

período 1961-2008 presenta una gran dispersión (Figura 6). Con excepción de la estación Santa Rosa (Figura 6g), en todos los casos se observaron disminuciones en los valores del coeficiente r^2 respecto a la escala de 3 meses (Figura 2). Esto indica que la relación entre los acumulados de días secos y los déficits en las precipitaciones disminuye a medida que se incrementa la escala temporal. En esta escala de tiempo, las regresiones lineales entre el IPE y el ISE indican que ambos índices tienen una buena relación, con valores de r^2 entre 0,58 y 0,70 (Figura 7).

Las mayores discrepancias se observan durante los meses con condiciones húmedas, donde la dispersión se incrementa. Al igual que para la escala de tiempo de 3 meses, se observa que el ISE tiende a presentar pocos meses con condiciones

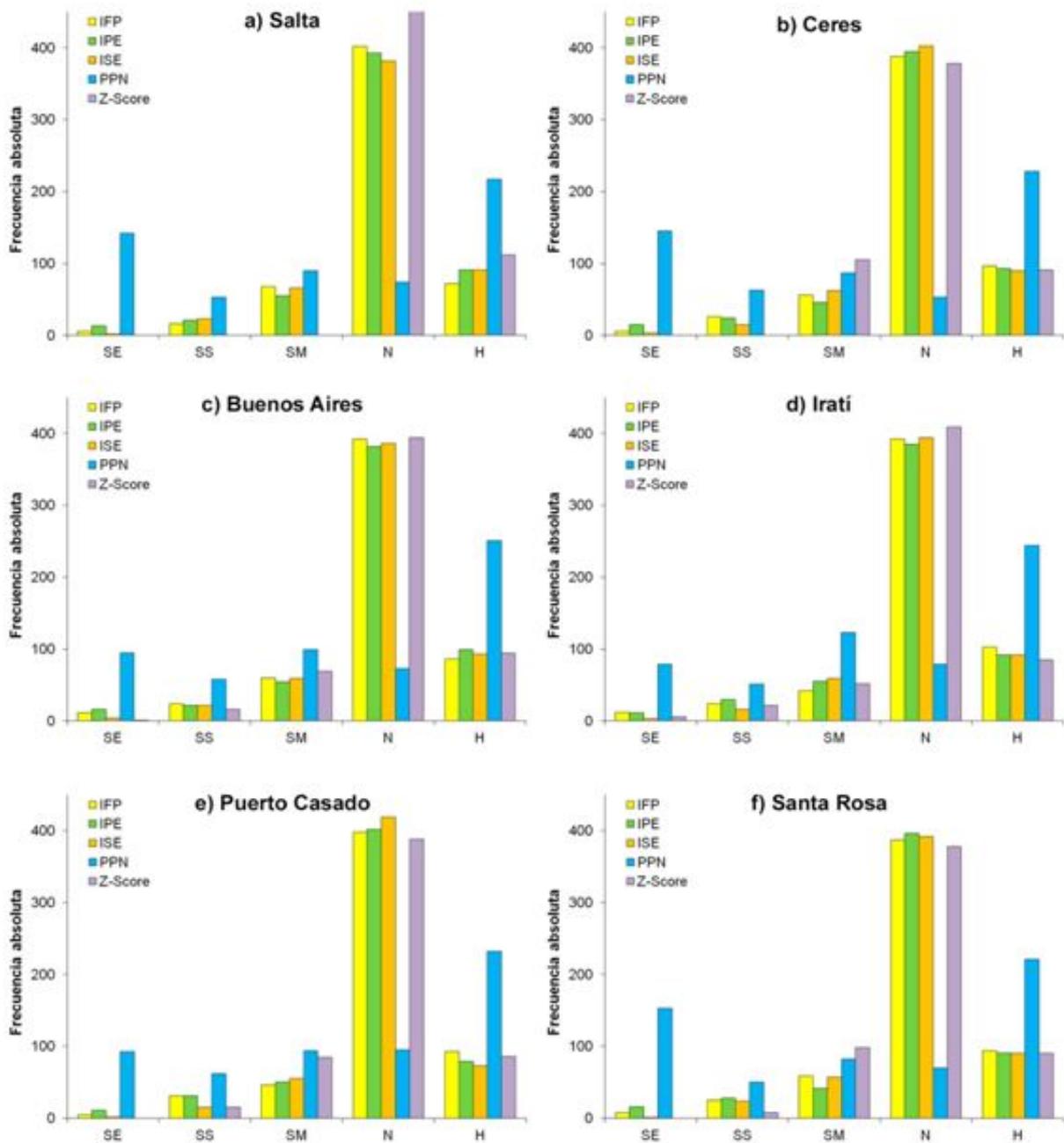


Figura 5: Histogramas de frecuencias de las categorías de sequía en escala de 3 meses para los índices IFP, IPE, ISE, PPN y Z-Score en las estaciones seleccionadas. Período: 1961-2008.

de sequía extrema ($ISE \leq -2, 0$); y se evidencia un sesgo hacia condiciones húmedas respecto al IPE.

La relación entre el IPE y el Z-Score en escala de 12 meses presenta una gran mejoría respecto a lo obtenido para la escala de 3 meses (Figura 8). Los

valores de r^2 para las 6 estaciones superan el valor de 0,98. Esta relación es particularmente buena durante los meses normales y de sequía moderada. El índice Z-Score generalmente presenta una mayor cantidad de valores positivos que el IPE, principalmente en condiciones de sequía, lo cual fue identificado por Wu y otros (2001). Esta

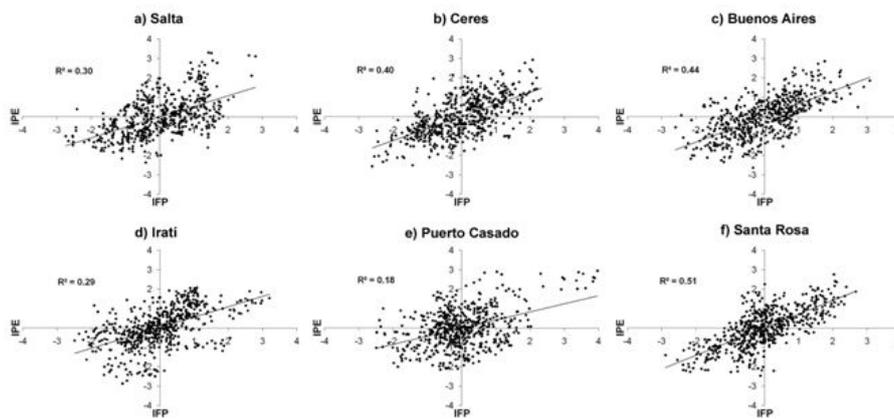


Figura 6: Diagramas de dispersión para el IPE y el IFP en escala de 12 meses para las 6 estaciones seleccionadas. Período: 1961-2008.

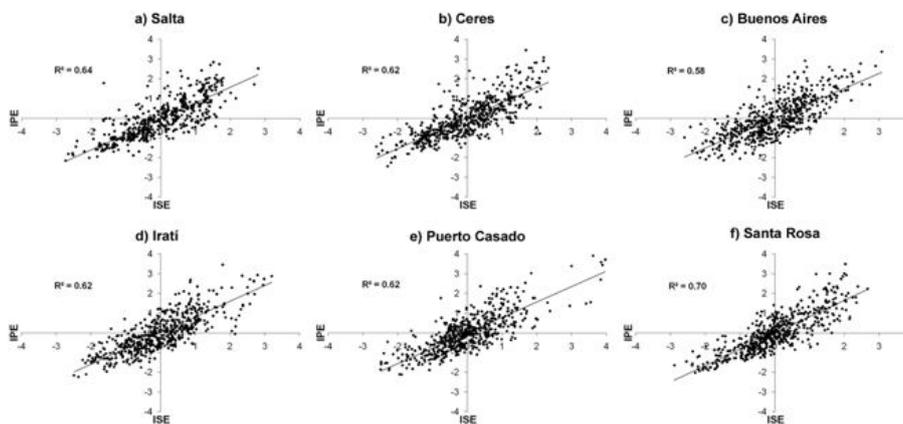


Figura 7: Ídem Figura 6 para el IPE y el ISE.

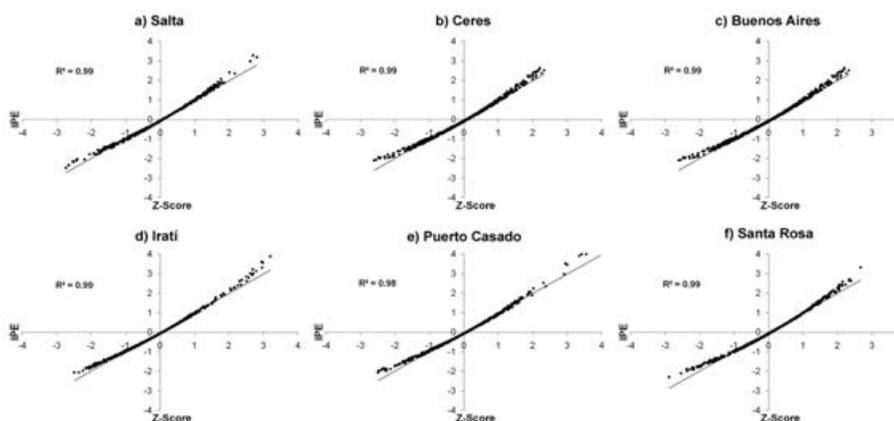


Figura 8: Ídem Figura 6 para el IPE y el Z-Score.

similitud entre el IPE y el Z-Score se da debido a que, de acuerdo al teorema central del límite, a medida que la escala de tiempo se incrementa

y excede los 6 meses, la distribución gamma tiende a la distribución normal (Lloyd-Hughes y Saunders, 2002).

Mediante el análisis de las frecuencias absolutas de las categorías de sequías identificadas por los índices en ventana de 12 meses (Figura 9), se observa en todas las estaciones que los índices Z-Score, PPN e ISE identifican muy pocos casos en la categoría de sequía extrema. En el caso del PPN, se da una progresión desde una sobreestimación de meses de sequía extrema en escalas de 1 y 3 meses hacia una subestimación en la misma categoría en escalas de 9 y 12 meses. Al igual que para la ventana de tiempo de 3 meses, se observa que el IPE tiende a presentar mayor sensibilidad a los cambios en la precipitación que el ISE, dado que clasifica mayores frecuencias en las categorías de sequía extrema y severa. El índice Z-Score mejora respecto a los resultados en escala de 3 meses, dado que logra identificar meses de sequía severa en todas las estaciones, sin embargo los valores de frecuencia siguen siendo inferiores al resto de los índices. Se observa que el índice PPN posee un sesgo hacia condiciones húmedas dada la gran cantidad de meses que son clasificados en la categoría húmedo. En comparación con el IPE, el ISE y el Z-Score, el IFP tiende a sobreestimar la frecuencia de eventos de sequía extrema en las estaciones Iratí y Puerto Casado (Figura 9d y 9e), y subestima los meses correspondientes a la categoría normal.

5.2. Análisis Espacio-Temporal de los índices de sequía

A fin de evaluar la sensibilidad de los diferentes índices de sequía, es necesario examinar sus patrones espacio-temporales, con el fin de establecer cómo reflejan los cambios en las condiciones de sequía. Inicialmente, se comparó el comportamiento espacio-temporal de los índices durante la sequía que afectó gran parte del SSA entre los años 1988 y 1989. Con el fin de evaluar la respuesta de los distintos índices, el análisis se llevará a cabo en escalas de 3 y 12 meses. La Figura 10 muestra la evolución de los índices de sequía en escala de 3 meses y la precipitación acumulada en la misma escala temporal para la estación Ceres. El hecho de mostrar únicamente las variaciones en la estación Ceres responde a la excepcionalidad que tuvo este evento de

sequía en esa región. Por otro lado, las variaciones temporales del evento de los años 1988-89 fueron similares a las registradas durante el comienzo de la sequía de 2007-09 (resultado no mostrado).

Durante el período 1988-89 se observan 3 pulsos secos en el IPE, ISE, IFP, ID y PPN, mientras que el índice Z-Score presenta solamente dos. El IPE y el ID muestran condiciones de sequía extrema en dos de los tres pulsos secos, mientras que el PPN lo hace en los tres pulsos y el IFP únicamente durante diciembre de 1988. De esta forma, se obtiene que los índices Z-Score e ISE son los que presentan menos sensibilidad a las condiciones meteorológicas en escala de 3 meses, lo cual es coherente con la categorización de la Figura 5. La principal falencia del ISE pasa por la escala temporal, puesto que, dada su falta de flexibilidad, solo puede ser calculado en escala de 12 meses. Los índices PPN e IPE son los más sensibles a las condiciones de sequía durante el período 1988-89 en escala de 3 meses. El ID es el único índice que presenta condiciones de sequía durante los meses de julio y agosto de 1988, lo cual indica su falta de sensibilidad ante los acumulados de precipitación durante el invierno de 1988. El acumulado de precipitación durante los meses de abril, mayo y junio de 1988 es de 9,7 mm., siendo el segundo mayor déficit de precipitación en ese trimestre en la serie 1961-2008. Esto se evidencia a través de condiciones de sequía extrema en los índices PPN, IPE e ID. Durante el trimestre septiembre-octubre-noviembre de 1989 se dio el menor acumulado de precipitación de toda la serie temporal durante ese trimestre, con 68 mm. Tanto el IPE como el PPN captan este déficit, indicando condiciones de sequía extrema durante el mes de noviembre de 1989.

En función de las series temporales de la estación Ceres, a fin de comparar los patrones espaciales de sequía en escala de 3 meses, se muestran los mapas con las categorizaciones para los meses de mayo, junio y julio de 1988. Este período se seleccionó dado que durante el mes de junio todos los índices presentaron un máximo negativo (Figura 10). La Figura 11 muestra

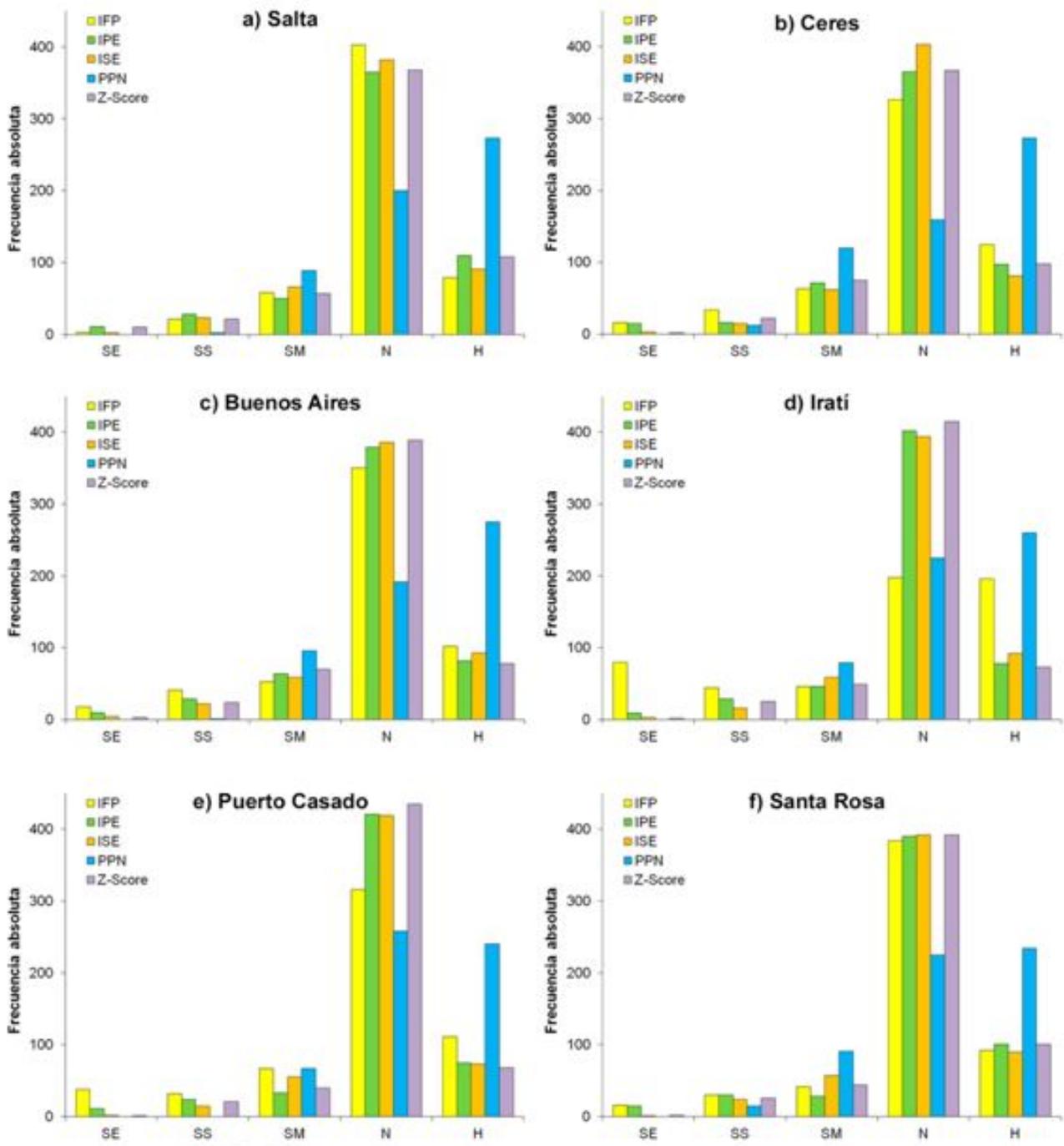


Figura 9: Histogramas de frecuencias de las categorías de sequía en escala de 12 meses para los índices IFP, IPE, ISE, PPN y Z-Score en las estaciones seleccionadas. Período: 1961-2008.

los patrones espaciales del IPE, el PPN y el ID durante los 3 meses antes mencionados. El análisis de estas figuras revela que los tres índices detectan un cambio de condiciones relativamente normales durante mayo a condiciones de sequía

generalizadas durante junio. El índice PPN presenta un patrón espacial de sequía extrema en gran parte del territorio de Argentina durante el mes de junio de 1988 (Figura 11b). El IPE restringe las condiciones más severas a la porción

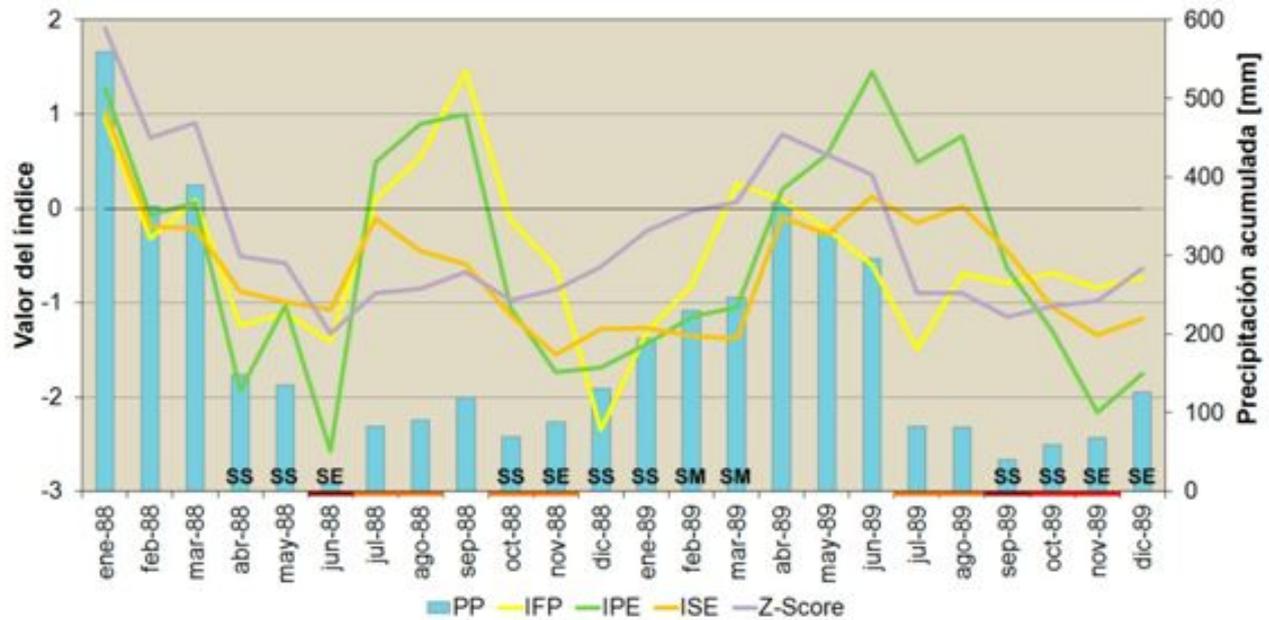


Figura 10: Series temporales de los índices de sequía Z-Score, IFP, IPE e ISE y la precipitación acumulada en escala de 3 meses para la estación Ceres durante el período 1988-89. Los meses resaltados en naranja, rojo y bordó corresponden a meses con sequía moderada, severa y extrema, respectivamente, según el ID. Los meses con las leyendas SM, SS y SE corresponden a meses con sequía moderada, severa y extrema, respectivamente, según el PPN.

centro-este de Argentina y Uruguay (Figura 11a), en tanto que el ID posiciona las condiciones más secas en el centro de Argentina (Figura 11c). Durante julio de 1988, de acuerdo al IPE, condiciones de sequía extrema afectaron gran parte de la provincia de Buenos Aires, y el núcleo de condiciones severas se desplazó hacia el este en comparación con el mes de junio (Figura 11a). El PPN en cambio, continuó con el patrón de sequía extrema generalizada, lo cual obedece al sesgo que se observó en su categorización (Figura 5).

El ID presenta un patrón de sequía moderada y severa en gran parte de la región de análisis (Figura 11c) lo cual podría corresponder a una sobreestimación de las estaciones con condiciones de sequía. Por otro lado, en la Figura 11b se observa que el área correspondiente a estaciones con categoría normal representa una pequeña porción de la región de análisis, lo cual indica que, para el análisis del PPN en el SSA, deben modificarse sus categorías, en particular la

categoría normal.

El análisis del patrón temporal de los índices de sequía en escala de 12 meses presenta un comportamiento más suavizado respecto a la escala de 3 meses, lo que indica que los índices responden más lentamente a los cambios en las precipitaciones (Figura 12). Las variabilidades del Z-Score y el IPE son similares, sin embargo el único índice que categoriza condiciones de sequía extrema en esta ventana de tiempo es el IPE. Esto refleja lo observado anteriormente en la Figura 8. El valor de precipitación acumulada en escala de 12 meses durante el mes de enero de 1989 en la estación Ceres corresponde al quinto acumulado más bajo para un mes de enero en esta escala de tiempo, considerando el período 1961-2008. En concordancia con el IPE, el ID clasifica como sequía extrema el período de diciembre de 1988 a marzo de 1989. Tanto el IFP como el ISE sólo indican condiciones de sequía moderada, a excepción del mes de noviembre de 1988, en el cual el ISE presenta condiciones de sequía severa

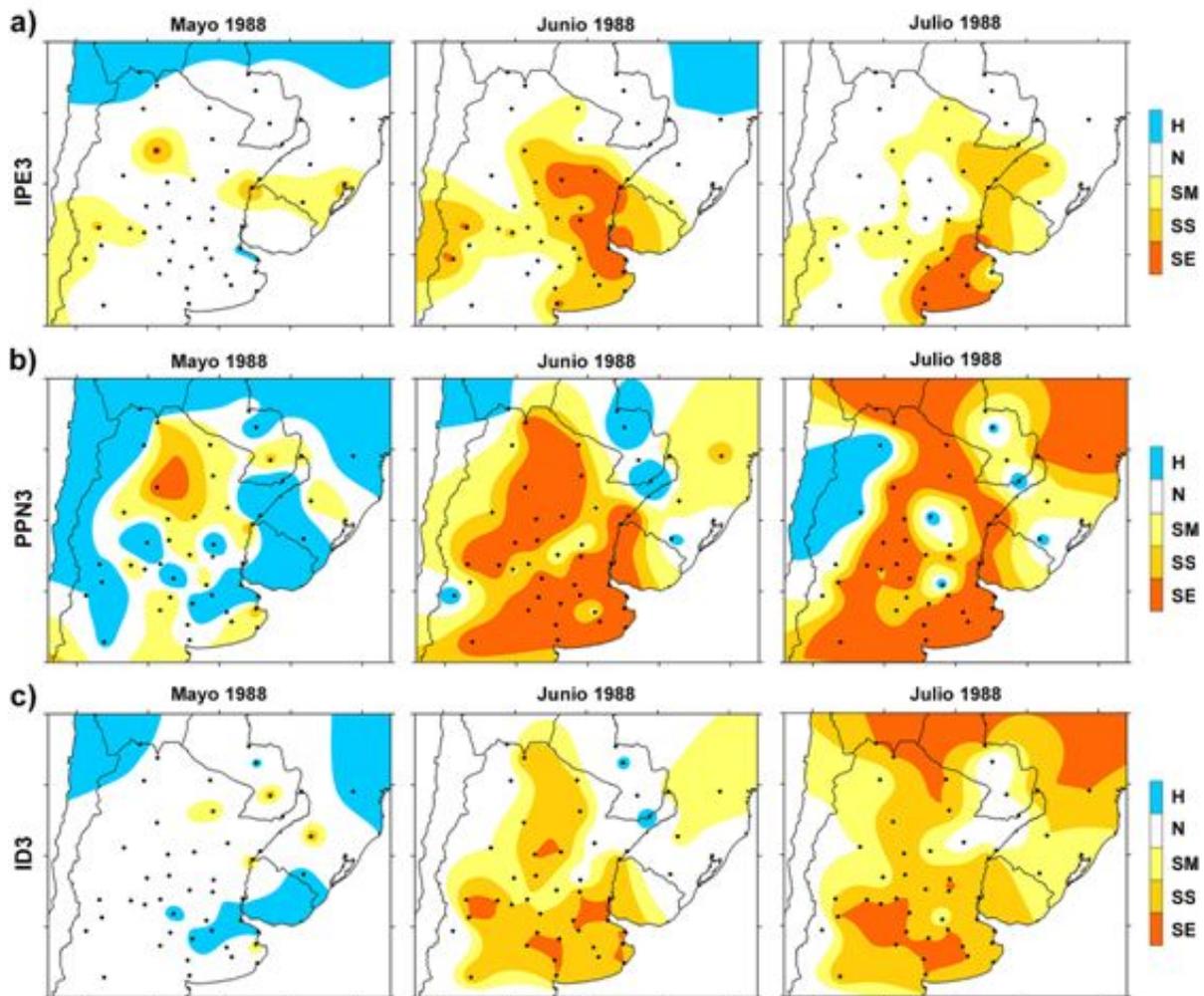


Figura 11: Patrones espaciales de los índices de sequía durante el período mayo-junio-julio de 1988. a) IPE3, b) PPN3, c) ID3.

(ISE = -1,55). La mayoría de los índices presentan condiciones normales durante el final del otoño de 1989, a excepción del ID, que cuantifica 14 meses consecutivos con condiciones de sequía moderada, algunos de ellos en categoría severa y extrema. El PPN posee un comportamiento similar al ID, aunque no llega a condiciones de sequía extrema y separa la sequía en dos pulsos de 7 y 6 meses cada uno. Los índices Z-Score, IFP, IPE e ISE reaccionan fuertemente ante el acumulado de precipitación en 12 meses durante el mes de abril de 1989. No obstante, el ISE se mantiene durante 6 meses con valores cercanos a 0, mientras que el resto de los índices retornan a condiciones de sequía moderada. Los resultados de la Figura 12 son análogos a los obtenidos en las estaciones

Buenos Aires y Santa Rosa, aunque en estas estaciones no se alcanzaron condiciones de sequía extrema durante el evento 1988-89 (resultado no mostrado).

Del mismo modo que en el caso de la escala temporal de 3 meses, se analizaron los patrones espaciales en tres meses seleccionados en función de las variaciones temporales de los índices en la estación Ceres. Las categorizaciones obtenidas a través de los índices IPE e ISE para los meses de noviembre y diciembre de 1988 y enero de 1989 se muestran en la Figura 13.

La evolución mensual de los patrones espaciales de la Figura 13a muestra una intensificación

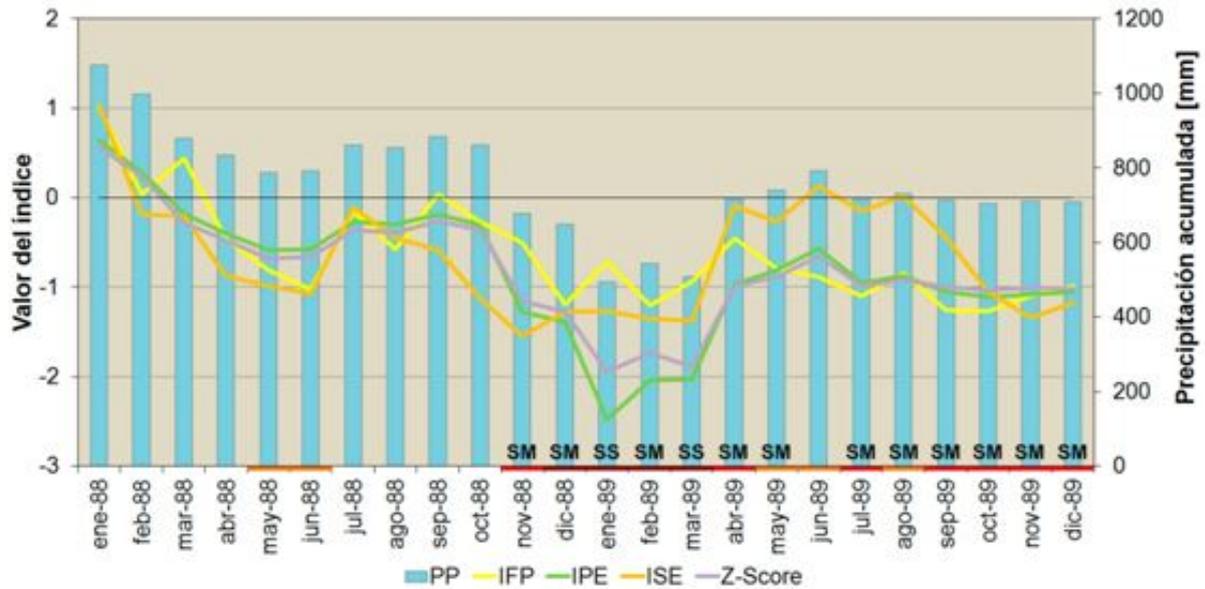


Figura 12: Ídem Figura 10 en escala de 12 meses.

en el área afectada por condiciones de sequía severa y extrema identificadas a través del IPE, principalmente en la región centro-este de Argentina. Lo mismo se observa mediante el ISE, aunque el patrón espacial presenta una menor área asociada a condiciones de sequía extrema (Figura 13b). Ambos índices mostraron un patrón transicional suave durante los meses analizados, lo cual está influenciado por la escala de tiempo considerada.

5.3. Evaluación de los índices a partir de los criterios propuestos

A fin de evaluar los índices, se consideraron los criterios de la Tabla II, a los cuales se les otorgó un puntaje del 1 al 5, siendo 5 un valor que indica que el índice es óptimo teniendo en cuenta cada criterio de evaluación. A continuación se detalla la justificación de los puntajes otorgados a cada índice según cada criterio, cuyos puntajes finales se presentan a modo de resumen en la Tabla III.

Sensibilidad: En función del análisis de los histogramas de las frecuencias absolutas de meses en las distintas categorías de sequías; de la identificación de los períodos secos históricos; y del análisis espacio-temporal de la sequía de los

años 1988-89, se obtuvo que el IPE resultó ser el índice más sensible, por lo cual se le otorgaron 5 puntos en esta categoría. El ISE identificó correctamente los períodos secos históricos, aunque tiende a reaccionar rápidamente ante los acumulados de precipitación, lo cual podría generar el sesgo hacia condiciones húmedas que presentó tanto en los diagramas de dispersión como en los histogramas de categorización. Esto se verificó también en el caso de la sequía de 1988-89, aunque el patrón espacial de los 3 meses analizados resultó similar al del IPE y se corresponde con las regiones afectadas por esta sequía según los trabajos de Seiler y otros (1998) y Minetti y otros (2007). No obstante, el ISE representa las variaciones de la precipitación en escala de entre 6 y 8 meses (Rivera, 2014). En función de estos resultados, en el criterio de sensibilidad se le otorgaron 4 puntos. Tanto el ID como el Z-Score y el IFP recibieron 3 puntos. En el caso del IFP, si bien logró detectar satisfactoriamente los períodos secos históricos en escala de 12 meses en la estación Ceres y alguno de los pulsos secos durante el evento de 1988-89, los diagramas de dispersión mostraron una pobre relación con el IPE, en particular en las estaciones Puerto Casado (PY) e Iratí (BR) (Figura 6). En estas estaciones,

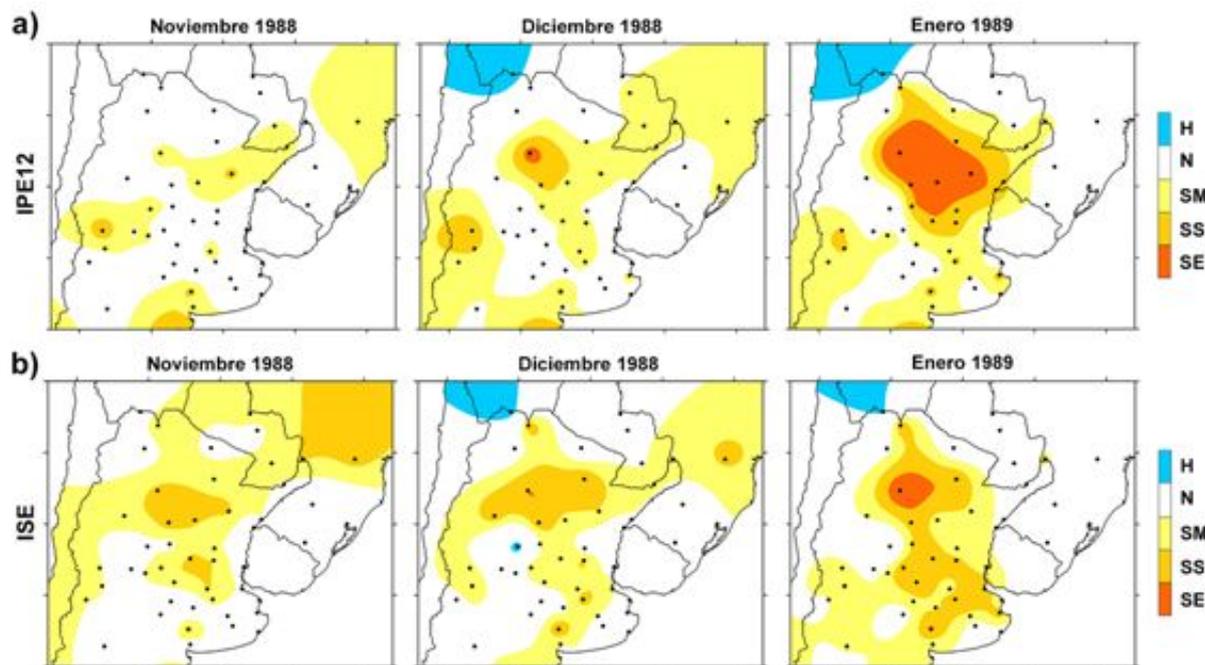


Figura 13: Patrones espaciales de los índices de sequía durante el período noviembre-diciembre-enero de 1988/89. a) IPE12, b) ISE.

Índice	Sensibilidad	Flexibilidad	Transparencia	Tratabilidad	Dimensionalidad	Total
IPE	5	5	4	3	5	144
ID	3	5	4	5	4	131
Z-Score	3	5	4	4	5	129
PPN	2	5	5	5	4	127
IFP	3	5	2	3	5	112
ISE	4	2	3	3	5	104

Tabla III: Comparación de los puntajes de los índices de sequía en función de los criterios de evaluación propuestos.

el IFP sobreestimó la cantidad de meses con sequías extremas (Figura 9). Tanto el ID como el Z-Score presentaron comportamientos temporales similares a los del IPE en escala de 12 meses. No obstante, en escala de 3 meses el ID tiende a sobreestimar el porcentaje de área afectado por sequías (Figura 11c), el cual es superior al 85% durante el mes de julio de 1988. El Z-Score no es consistente con las variaciones temporales del IPE (Figura 10) y tiende a subestimar la

cantidad de meses con sequía (Figura 5). Estas diferencias pueden asociarse a que la precipitación en escalas de 1 y 3 meses no suelen ajustar a una distribución normal, dado el sesgo de sus valores hacia valores cercanos a cero, con lo cual, la estimación del índice Z-Score en estas escalas de tiempo podría ser incorrecta. Por otro lado, el ID tiende a sobreestimar la cantidad de meses con sequía extrema en regiones semi-áridas en escala de tiempo de 1 mes

(resultado no mostrado). El índice PPN resultó ser el menos sensible, dado que sobreestimó notoriamente el área con condiciones de sequía severa y extrema en escala de 3 meses en el caso de la sequía de 1988-89 (Figura 11b), lo cual puede asociarse a los umbrales propuestos para la categorización de sequías. En escala de 12 meses posee un comportamiento similar a la serie temporal del IPE (Figura 10), sin embargo, es evidente el sesgo hacia condiciones húmedas, con una subestimación de los meses en categorías de sequía (Figura 9). Este último resultado también es consecuencia de los umbrales utilizados para la definición de condiciones de sequía.

Flexibilidad: La evaluación del criterio de flexibilidad resultó más simple, dado que en cierta forma todos los índices, a excepción del ISE, pueden adaptarse para el monitoreo de sequías en distintas escalas temporales. Al ISE se le otorgaron 2 puntos dado que puede calcularse únicamente en ventanas de 365 días o 12 meses, aunque diversos estudios realizan promedios de los valores del ISE a fin de llevarlos a escala mensual (Morid y otros, 2006) u otra escala temporal (Roudier y Mahe, 2010). Al resto de los índices se les otorgó el puntaje máximo -5 puntos-.

Transparencia: En cuanto a la transparencia, el PPN es el índice más entendible tanto por la comunidad científica como por el público en general, por lo cual recibió 5 puntos. Con 4 puntos aparecen los índices Z-Score, ID e IPE, los cuales fueron ampliamente utilizados a nivel mundial para la identificación de condiciones de sequía y poseen un objetivo claro. El IPE es utilizado para el monitoreo y análisis de sequías en cerca de 60 países (Wu y otros, 2005), lo cual confirma su utilidad general. El ISE recibió 3 puntos debido a su complejidad teórica. Este índice resulta menos entendible que el IPE, algo ya mencionado por Roudier y Mahe (2010). El IFP es el índice menos transparente, dado que el nexo entre la cantidad de días secos y las condiciones de sequía no es tan directo.

Tratabilidad: Los índices PPN e ID fueron los que

presentaron los valores más altos en el criterio de tratabilidad, dado que sólo necesitan como datos de entrada valores mensuales de precipitación y sus requerimientos computacionales son simples. Asimismo, el Z-Score y el IPE requieren únicamente datos mensuales de precipitación para su obtención, aunque los requerimientos computacionales del Z-Score son mínimos en comparación con los del IPE. Por lo tanto, estos índices reciben 4 y 3 puntos, respectivamente. El ISE también requiere únicamente datos mensuales de precipitación, aunque su versión original utiliza datos en escala diaria y su obtención es un tanto compleja, por lo cual recibe un total de 3 puntos. Por último, el IFP recibió 3 puntos dado que requiere datos diarios de precipitación a fin de estimar la cantidad de días secos por mes, aunque su cálculo es simple.

Dimensionalidad: En el criterio de dimensionalidad los índices Z-Score, ISE, IFP e IPE recibieron 5 puntos dado que son índices adimensionales que están estandarizados y permiten comparar sus valores entre diferentes estaciones y períodos. El ID y el PPN recibieron 4 puntos dado que no están estandarizados, aunque sus valores pueden ajustarse a datos de precipitación extremos.

En función del análisis realizado, los puntajes totales para los 6 índices utilizados se muestran en la Tabla III. Finalmente, el ranking de los índices de sequía quedó conformado de la siguiente forma: IPE, ID, Z-Score, PPN, IFP e ISE. Por lo tanto, se muestra que el índice de precipitación estandarizado es la mejor opción para la cuantificación de condiciones de sequía en el SSA. Cabe destacar que el hecho de no considerar diferentes pesos a los criterios utilizados no cambia que el IPE resulte el índice más adecuado. Barua y otros (2011) demostraron que la subjetividad natural asociada a la asignación de pesos a los criterios no tiene un impacto en el ranking de los índices de sequía. Es destacable el comportamiento de los índices Z-Score e ID en la región, sobre todo en escalas de tiempo de 6 a 12 meses.

6. RECOMENDACIONES Y CONCLUSIONES

En este trabajo se realizó una comparación de seis índices de sequía basados en datos de precipitaciones mensuales en diversas escalas temporales. Los criterios de comparación incluyeron un análisis de su sensibilidad, flexibilidad, transparencia, tratabilidad y dimensionalidad. La comparación incluyó una componente meramente estadística, basada en el análisis de los histogramas de frecuencias de meses en las distintas categorías de sequía en 6 estaciones de referencia ubicadas en el Sur de Sudamérica (SSA) y una comparación entre los diagramas de dispersión de los distintos índices respecto al índice de precipitación estandarizado (IPE). El otro aspecto a analizar fue cómo los índices representaron espacial y temporalmente los eventos de sequías históricas y, en particular, el evento que afectó la región de estudio durante los años 1988-89. Esta investigación mostró que los índices de sequía poseen ciertas similitudes tanto para la identificación de sequías históricas como en el análisis espacio-temporal durante el evento de 1988-89, lo cual está asociado a que los 6 índices poseen como variable de entrada únicamente datos de precipitación.

En función de ciertos pesos otorgados a cada criterio de forma subjetiva, pero en línea con lo propuesto por Keyantash y Dracup (2002), se establecieron los puntajes para cada índice de sequía. El hecho de analizar eventos de sequía extremos en una cantidad limitada de estaciones puede aportar cierta subjetividad a los resultados. No obstante, se considera que esta limitación no influye en el resultado final, dado que existen características intrínsecas a cada índice que son independientes del período elegido y el evento presentado en este estudio abarcó un amplio rango de categorías de sequía.

Las respuestas espaciales y temporales de los diferentes índices apuntan a la necesidad de utilizar varios índices de seguimiento de sequías en el área de estudio, que sirvan al momento de la toma de decisiones. Además, esto se soporta en el

hecho de que ningún índice de sequía es superior en todas las circunstancias, y a la creciente necesidad de sinergia entre los distintos índices a fin de lograr unanimidad en las decisiones (Mizzell y Lakshmi, 2003).

Además de las escalas de tiempo evaluadas -3 y 12 meses-, se recomienda el monitoreo en otras escalas de tiempo, lo que permitirá evaluar los efectos de los déficits de precipitación sobre los distintos componentes de los recursos hídricos. El National Drought Mitigation Center (Estados Unidos) realiza un monitoreo continuo en escalas de 1, 3, 6, 9 y 12 meses, las cuales deben ser adoptadas también en el SSA.

A fin de mejorar la aplicabilidad de algunos de los índices analizados, se consideran algunas recomendaciones:

- a) Con respecto al porcentaje de la precipitación normal (PPN) se aconsejan cambios en su categorización, a fin de aumentar su potencial para la detección de sequías en el SSA. En el caso de la escala de 3 meses, se observó que el índice clasifica una gran cantidad de meses como sequías extremas (Figura 5), lo cual podría mejorarse desplazando el umbral de esta categoría de 40 a 30. En el caso de las escalas de 3 y 12 meses, el índice clasifica pocos meses dentro de la categoría normal (Figuras 5 y 9), lo cual puede mejorarse si se amplía el rango de valores de 80 a 120. Esto a su vez tendrá efecto en la reducción de las frecuencias asociadas a condiciones húmedas. Ambas correcciones deben ser evaluadas a fin de determinar la mejora en el desempeño del PPN.
- b) En el caso del índice Z-Score, el mismo debe utilizarse en escalas de tiempo superiores a los 6 meses, y particularmente en regiones que no sean semi-áridas. Esto se debe a que las diferencias obtenidas entre el Z-Score y el IPE están asociadas a que los acumulados de precipitación en escalas de 1 y 3 meses pueden no ajustar satisfactoriamente a la distribución normal. La transformación equi-probable llevada a cabo para la obtención del IPE brinda la robustez necesaria para el análisis de un amplio

rango de escalas temporales.

c) El índice de sequía efectivo (ISE) posee una única escala de tiempo para su cálculo (12 meses o 365 días) lo cual dificulta su comparación en otras escalas de tiempo y puede limitar su capacidad de monitoreo. Sin embargo, debido a la distribución de pesos que se aplican a los acumulados de precipitación, indirectamente se reduce la escala de tiempo considerada. En función de la correlación entre el ISE y el IPE en ventanas de 1 a 12 meses, se obtuvo que los mayores coeficientes de correlación se dieron en ventanas de 6 a 8 meses (Rivera, 2014). Esto podría indicar que el ISE resulta útil para el monitoreo en ventana de 6 a 8 meses, y su habilidad debe compararse con el resto de los índices en esas ventanas de tiempo. Se considera que una modificación del esquema de pesos propuesto por Byun y Wilhite (1999) podría solucionar esta problemática. El ISE es un índice sumamente prometedor, principalmente cuando es calculado en su formato original –basado en datos de precipitación diarios–, dado que puede revelar deficiencias hídricas en escalas que otros índices no captan. Esto es importante para la detección de sequías agro-meteorológicas, dado que para algunos cultivos la ausencia de precipitación en un lapso de unos pocos días durante ciertas etapas fenológicas puede ser crítica. Este es el caso del estudio realizado por Roudier y Mahe (2010) quienes consideran períodos de 10 días para el análisis de condiciones de estrés hídrico. La principal desventaja que el ISE diario posee en la región de estudio es la falta de registros de precipitación diarios completos. Si bien se ha hecho un esfuerzo importante para obtener una base de datos de precipitación diarios para el SSA, a través del proyecto CLARIS LPB (Penalba y otros, 2014), la cantidad de estaciones meteorológicas con un porcentaje de datos diarios faltantes menores al 1% -umbral utilizado por Byun y Wilhite (1999)- es extremadamente baja.

d) El índice de falta de precipitación (IFP) debe ser analizado desde el punto de vista de la relación entre las cantidades de días secos en distintas escalas temporales y los

acumulados de precipitación. Esto permitirá lograr un conocimiento acabado entre estas dos variables a fin de aprovechar de mejor manera los resultados que brinda el IFP, dado que originalmente fue calculado en ventana de 12 meses.

En conclusión, el IPE, uno de los índices de sequía más utilizados a nivel mundial, es la mejor opción para la detección de los eventos de sequía y para evaluar sus variaciones espacio-temporales en el SSA. Este índice demostró poseer la mayor sensibilidad a los cambios de la precipitación en escalas de 3 y 12 meses, es flexible y adimensional por definición, y sus fundamentos teóricos son claros y entendibles por un amplio rango de usuarios, tanto científicos como tomadores de decisión y expertos en aspectos de sequías a nivel mundial. Aunque el IPE es más adecuado para el monitoreo de sequías meteorológicas e hidrológicas frente a las sequías agronómicas, su flexibilidad en la selección de escalas de tiempo que corresponden con diversas fases fenológicas de los cultivos lo hace útil para informar algunos aspectos de las sequías agronómicas (White y Walcott, 2009).

Agradecimientos: Los autores desean agradecer a los proyectos de investigación CONICET PIP 11220100100227 y UBA 20020130100263BA por la financiación de este trabajo, y al proyecto de la Comunidad Europea CLARIS LPB por la provisión de los datos meteorológicos utilizados.

REFERENCIAS

- Abramowitz, M. y Stegun, I.A., 1965. Handbook of Mathematical Functions, Courier Dover Publications, New York, 1046 págs.
- Akhtari, R., Morid, S., Mahdian, M.H. y Smakhtin, V., 2009. Assessment of areal interpolation methods for spatial analysis of SPI and EDI drought indices. *Int. J. Climatol.*, 29, 135-145.
- Alessandro, A.P., 2008. Anomalías de circulación atmosférica en 500 y 1000 hPa asociada a la sequía producida en la Argentina durante

- enero de 2003 a marzo de 2004. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 23, 12-29.
- Barua, S., Ng, A.W.M. y Perera, B.J.C., 2011. Comparative evaluation of drought indexes: case study on the Yarra river catchment in Australia. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 137, 215-226.
- Batisani, N., 2011. The spatio-temporal-severity dynamics of drought in Botswana. *Journal of Environmental Protection*, 2, 803-816.
- Byun, H.-R. y Kim, D.W., 2010. Comparing the Effective Drought Index and the Standardized Precipitation Index. *Options méditerranéennes, Serie A, n°95 - Economics of Drought and Drought Preparedness in a climate change context*, págs. 27-33. ISBN: 2-85352-441-8.
- Byun, H.-R. y Lee, D.-K., 2002. Defining three rainy seasons and the hydrological summer monsoon in Korea using available water resources index. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 80, 1, 33-44.
- Byun, H.-R. y Wilhite, D.A., 1999. Objective quantification of drought severity and duration. *Journal of Climate*, 12, 2747-2756.
- Dogan, S., Berktaş, A. y Singh, V.P., 2012. Comparison of multi-monthly rainfall-based drought severity indices, with application to semi-arid Konya closed basin, Turkey. *Journal of Hydrology*, 470-471, 255-268.
- Gibbs, W.J. y Maher, J.V., 1967. Rainfall deciles as drought indicators. *Bureau of Meteorology Bulletin No. 48*. Commonwealth of Australia, Melbourne, Australia.
- Hayes, M.J., 2000. Drought indices. National Drought Mitigation Center, University of Nebraska, Lincoln, Nebraska, Estados Unidos. <http://drought.unl.edu>.
- Ju, X.S., Yang, X.W., Chen, L.J. y Wang, Y.M., 1997. Research on determination of indices and division of regional flood/drought grades in China. *Quarterly Journal of Applied Meteorology*, 8, 1, 26-33.
- Keyantash, J. y Dracup, J., 2002. The quantification of drought: an evaluation of drought indices. *Bull. Am. Meteor. Soc.*, 83, 1167-1180.
- Kim, D.-W., Byun, H.-R. y Choi, K.-S., 2009. Evaluation, modification, and application of the Effective Drought Index to 200-Year drought climatology of Seoul, Korea. *Journal of Hydrology*, 378, 1-12.
- Komuscu, A.U., 1999. Using the SPI to analyze spatial and temporal patterns of drought in Turkey. *Drought Netw. News*, 11, 1, 7-13.
- Krepper, C.M. y Zucarelli, V., 2012. Climatology of Water Excess and Shortages in the La Plata Basin. *Theoretical and Applied Climatology*, 102, 13-27.
- Lee, S.-M., Byun, H.-R. y Kim, D.-W., 2008. Introduction of a drought monitoring system in Korea. En: *Drought Management: scientific and technological innovations*. López-Francos, A. (ed.), Zaragoza: CIHEAM, págs. 353-358.
- Lloyd-Hughes, B. y Saunders, M.A., 2002. A drought climatology for Europe. *Int. J. Climatol.*, 22, 13, 1571-1592.
- McKee, T.B., Doesken, N.J. y Kleist, J., 1993. The relationship of drought frequency and duration to time scales. *Proceedings of the Eight Conference on Applied Climatology*, Anaheim, CA, American Meteorological Society, págs. 179-184.
- Minetti, J.L., Vargas, W.M., Vega, B. y Costa, M.C., 2007. Las sequías en la Pampa Húmeda: impacto en la productividad del maíz. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 22, 218-232.
- Mishra, A.K. y Singh, V.P., 2010. A review of drought concepts. *Journal of Hydrology*, 391, 202-216.
- Mizzell, H.P. y Lakshmi, V., 2003. Integration of science and policy during the evolution of South Carolina's drought program. En: *Water: Science, Policy and Management: Challenges and Opportunities*. Lawford, R.G., Fort, D.D., Hartmann, H.C., Eden, S. (eds.). American Geophysical Union, Washington, D.C., Estados Unidos. págs. 311-339.
- Monnik, K. 2000. Role of drought early warning systems in South Africa's evolving drought policy. En: *Proceedings of an expert group meeting in Early Warning Systems for drought preparedness and drought management*. Wilhite, D.A, Sivakumar, W., Wood, D.A (eds.). Lisboa, Portugal, 5-7 de septiembre. Geneva, Switzerland: WMO.

- Morid, S., Smakhtin, V. y Moghaddasi, M., 2006. Comparison of seven meteorological indices for drought monitoring in Iran. *Int. J. Climatol.*, 26, 971–985.
- Ntale, H.K. y Gan, T.Y., 2003. Drought indices and their application to East Africa. *Int. J. Climatol.*, 23, 1335-1357.
- Palmer, W.C., 1965. Meteorological drought. Research Paper N° 45, US Weather Bureau, Washington DC, 58 págs.
- Panu, U.S. y Sharma, T.C., 2002. Challenges in drought research: some perspectives and future directions. *J. Hydrol. Sci.*, 47, 19-30.
- Penalba, O.C. y Rivera, J.A., 2012. Uso de la distribución de probabilidades gamma para la representación de la precipitación mensual en el Sudeste de Sudamérica. Cambios espacio-temporales en sus parámetros. XI Congreso Argentino de Meteorología (CONGREGMET), Mendoza, Argentina, 28 de mayo al 1 de junio de 2012.
- Penalba, O.C., Rivera, J.A. y Pántano, V.C., 2014. The CLARIS LPB database: constructing a long-term daily hydro-meteorological dataset for La Plata Basin, Southern South America. *Geoscience Data Journal*, 1, 20-29.
- Rivera, J.A., 2014. Aspectos climatológicos de las sequías meteorológicas en el sur de Sudamérica. Análisis regional y proyecciones futuras. Tesis doctoral. Universidad de Buenos Aires, 351 págs.
- Rivera, J.A. y Penalba, O.C., 2009. Evaluación de los períodos secos ocurridos entre 1960 y 2008 en Argentina. En: Estrategias Integradas de Mitigación y Adaptación a Cambios Globales. Fernández Reyes, L., Volpedo, A.V., Pérez Carrera, A. (eds), Universidad de Buenos Aires, págs. 341-350. ISBN: 978-987-96413-9-2.
- Roudier, P. y Mahe, G., 2010. Study of water stress and droughts with indicators using daily data on the Bani River (Niger basin, Mali). *Int. J. Climatol.*, 30, 1689-1705.
- Scian, B., 1997. Comparación entre el índice de precipitación estandarizado y otros índices hidrológicos para la región pampeana. *Meteorológica*, 22, 2, 37-47.
- Scian, B. y Donnari, M., 1997. Retrospective analysis of the Palmer Drought Severity Index in the semi-arid Pampas region, Argentina. *Int. J. Clim.*, 17, 3, 313-322.
- Seiler, R.A., Kogan, F. y Sullivan, J., 1998. AVHRR-based vegetation and temperature condition indices for drought detection in Argentina. *Adv. Space Res.*, 21, 3, 481-484.
- Serio, L., Martin, P. y Murphy, G., 2010. Evaluación de una metodología de pronóstico estadístico para la condición hídrica del suelo en la región pampeana argentina. *Agriscientia*, 27, 11-17.
- Smakhtin, V.U. y Hughes, D.A., 2007. Automated estimation and analyses of meteorological drought characteristics from monthly rainfall data. *Environmental Modelling & Software*, 22, 6, 880-890.
- Thom, H., 1958. A note on the Gamma distribution. *Mon. Wea. Rev.*, 86, 117-122.
- Tsakiris, G. y Pangalou, D., 2009. Drought characterisation in the Mediterranean. En: Coping with drought risk in agriculture and water supply systems. Iglesias, A., Garrote, L., Cancelliere, A., Cubillo, F., Wilhite, D. (eds.), Springer, págs. 69-80.
- Vicente-Serrano, S.M. y López-Moreno, J.I., 2006. The influence of atmospheric circulation at different time scales on winter drought variability through a semi-arid climatic gradient in Northeast Spain. *Int. J. Climatol.*, 26, 11, 1427-1453.
- White, D.H. y Walcott, J.J., 2009. The role of seasonal indices in monitoring and assessing agricultural and other droughts: a review. *Crop & Pasture Science*, 60, 599-616.
- Wilhite, D.A., 2009. Drought monitoring as a component of drought preparedness planning. En: Coping with drought risk in agriculture and water supply systems. Iglesias, A., Garrote, L., Cancelliere, A., Cubillo, F., Wilhite, D. (eds.), Springer, págs. 3-19.
- Wilks, D.F., 2006. *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences (Second Edition)*. Academic Press, 627 págs.
- Willeke, G., Hosking, J.R.M., Wallis, J. y Guttman, N.B., 1994. *The National Drought Atlas*. Institute for Water Resources Report

94-NDS-4, US Army Corps of Engineers.

Wu, H., Hayes, M.J., Weiss, A. y Hu, Q., 2001. An evaluation of the standardized precipitation index, the China-Z index and the statistical Z-score. *Int. J. Climatol.*, 21, 745-758.

Wu, H., Hayes, M.J., Wilhite, D.A. y Svoboda, M.D., 2005. The effect of the length of record on the standardized precipitation index calculation. *Int. J. Climatol.*, 25, 505-520.

Wu, H., Svoboda, M.D., Hayes, M.J., Wilhite, D.A. y Wen, F., 2007. Appropriate application of the Standardized Precipitation Index in arid locations and dry seasons. *Int. J. Climatol.*, 27, 65-79.

Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo la licencia Creative Commons, que permite el uso ilimitado, distribución y reproducción en cualquier medio, siempre que la obra original sea debidamente citada.