

Relación entre la sequía meteorológica e hidrológica en la subcuenca Chancos, Ancash

Relation between the meteorological and hydrological sequence in the subcuenca Chancos, Ancash

Relação entre a sequia meteorológica e hidrológica na subcuenca Chancos, Ancash

Henri Salvador Macedo García
Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo, Perú

RESUMEN

El monitoreo de la sequía, incluida su gravedad, espacio y duración, se convierte en un instrumento esencial para establecer un plan de gestión y mitigación del riesgo de sequía. Este documento tiene como objetivo comparar el índice de precipitación estandarizado (SPI) con el índice de caudal estandarizado (SSI) en la subcuenca Chancos, Ancash. La evaluación estadística se realizará mediante el análisis de homogeneidad y tendencias del conjunto de datos, posteriormente para el análisis de la asociación estadística se incluye el coeficiente de correlación de Pearson (PCC), raíz del error cuadrático medio (RMSE), sesgo relativo (BIAS) y el coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE) para determinar el grado de consistencia entre los índices de sequías. El estudio reveló que las características de la sequía meteorológica e hidrológica en el período de estudio muestran una similitud de patrones que se indica por el buen coeficiente de correlación entre ellos. Además, el mejor análisis comparativo fue del SSI3 con el SPI3 y el menor fue del SSI12 con el SPI12 obteniéndose una correlación de Pearson de 0.82 y 0.41 respectivamente. En general, el SPI y el SSI muestran un buen rendimiento para la estimación de características de la sequía meteorológica e hidrológica a nivel mensual.

Palabras clave: Indices de sequías, índice de precipitación estandarizado, índice de caudal estandarizado.

ABSTRACT

Drought monitoring, including its severity, spacing and duration, becomes an essential tool to establish a drought risk management and mitigation plan. This paper aims to compare the Standardized Precipitation Index (SPI) with the Standardized Streamflow Index (SSI) in the Chancos sub-basin, Ancash. The statistical evaluation will be done through the analysis of homogeneity and trends of the data set, then for the analysis of the statistical association is included the Pearson correlation coefficient (PCC), root mean square error (RMSE), relative bias (BIAS) and the Nash-Sutcliffe coefficient (NSE) to determine the degree of consistency between the drought indices. The study revealed that the characteristics of meteorological and hydrological drought in the study period show similarity of patterns which is indicated by the good correlation coefficient between them. In addition, the best comparative analysis was of SSI3 with SPI3 and the least was of SSI12 with SPI12 obtaining a Pearson correlation of 0.82 and 0.41 respectively. In general, SPI and SSI show a good performance for the estimation of meteorological and hydrological drought characteristics at monthly level.

Keywords: drought index, standardized precipitation rate, standardized flow rate.

RESUMO

O monitoramento da seca, incluindo sua gravidade, espaçamento e duração, torna-se uma ferramenta essencial para estabelecer um plano de gestão e mitigação do risco de seca. Este artigo tem como objetivo comparar o Índice de Precipitação Padronizado (SPI) com o Índice de Vazão de Corrente Padronizado (SSI) na sub-bacia de Chancos, Ancash. A avaliação estatística será feita através da análise de homogeneidade e tendências do conjunto de dados, então para a análise da associação estatística são incluídos o coeficiente de correlação de Pearson (PCC), raiz quadrada do erro quadrático médio (RMSE), viés relativo (BIAS) e o coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE) para determinar o grau de consistência entre os índices de seca. O estudo revelou que as características da seca meteorológica e hidrológica no período estudado apresentam similaridade de padrões o que é indicado pelo bom coeficiente de correlação entre elas. Além disso, a melhor análise comparativa foi de SSI3 com SPI3 e a menor foi de SSI12 com SPI12 obtendo uma correlação de Pearson de 0,82 e 0,41 respectivamente. Em geral, SPI e SSI apresentam um bom desempenho para a estimativa das características meteorológicas e hidrológicas da seca em nível mensal.

Palavras-chave: índice de seca, taxa de precipitação padronizada, taxa de fluxo padronizada.

INTRODUCCIÓN

La sequía se considera una amenaza natural importante, que afecta a varios sectores de la economía y al medio ambiente en todo el mundo y afecta a casi todos los determinantes del ciclo hidrológico a partir de la precipitación y termina con el escurrimiento en los sistemas de aguas superficiales o la recarga y almacenamiento en los acuíferos subterráneos (Tigkas et al., 2014). Diferente a otros peligros naturales, la sequía se desarrolla lentamente haciendo complejo determinar su inicio y el término del evento. (Endara, 2019). La sequía se origina por deficiencias en la precipitación durante un período extendido, es una anomalía temporal que puede ocurrir en casi todas las zonas climáticas incluyendo las que tengan normalmente precipitaciones elevadas (Morales et al., 2000).

El Perú es el tercer país más vulnerable a los efectos del cambio climático que varía según su exposición, sensibilidad y capacidad adaptativa a este efecto (Autoridad Nacional del Agua, 2015). La comunidad andina en el 2009 desarrollo un atlas de sequías en los países andinos en el cual menciona, cerca del 47% del total de áreas agropecuarias del Perú están expuestas a las sequías (Endara, 2019); los impactos negativos son más evidentes en zonas propensas y en sistemas de cultivos con mayor vulnerabilidad a este tipo de eventos como es la agricultura en secano (Tigkas et al., 2018), tenemos el caso de la papa, trigo, quinua, entre otros. Algunos impactos suscitados en el departamento de Ancash ocurrieron en los años 1985, 1990, 1992, 2004 y 2005 (Endara et al., 2019).

La cuenca del río Santa está considerada entre las cinco más vulnerables del Perú frente a los impactos del cambio climático (MINAM, 2010). En las últimas décadas, en algunos puntos de referencia (Mollepata y Recuay) ubicados en la cuenca media y alta del río Santa se han reportado incrementos súbitos de los riachuelos de origen glaciario y donde se ha observado mayor recurrencia de años secos. Según el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (2008) manifiesta que la temperatura máxima promedio anual en el extremo sur de la cuenca del río Santa se ha incrementado por encima de los 6 °C en los últimos 42 años. En contraste con otras zonas de Perú, como el altiplano, donde los impactos del evento El Niño se manifiestan con grandes sequías, u otras zonas donde se presenta como un problema importante que afecta la actividad agropecuaria, por otra parte, la cuenca del río Santa no se presenta muy vulnerable frente a la sequía, siendo los efectos de este tipo moderado (ANA, 2015).

De acuerdo con el ANA (2015), señala que la subcuenca Chancos regionalmente es la más representativa de la cuenca del río Santa de la zona sur en cuanto a la climatología y precipitación para realizar el estudio de sequías ya que abarca casi todos los climas preponderantes.

En este aspecto para una adecuada planificación y gestión del recurso hídrico es clave conocer su comportamiento en el tiempo y el espacio, ya que las sequías son fenómenos de relativa complejidad que afectan el desarrollo y aprovechamiento del recurso hídrico en una misma región (Fernández, 1997).

Las sequías han sido clasificadas tradicionalmente en cuatro categorías dependiendo de la variable o sistema afectado (Wilhite y Glantz, 1985; Organización Meteorológica Mundial, 2006): a) sequía meteorológica: se define como una falta de precipitación en una región durante un período determinado de tiempo, b) sequía agrícola: hace referencia a los períodos en los que disminuye la humedad del suelo que requiere las plantas, provocando la pérdida de productividad de los cultivos, c) sequía hidrológica: es un período durante el cual los recursos hídricos superficiales y sub superficiales son insuficientes para satisfacer la demanda hídrica de un determinado sistema o cuenca hidrológica, d) sequía socioeconómica: es consecuencia de las anteriores y hace referencia a la insuficiencia del recurso respecto a la demanda generada por los distintos sectores productivos.

Todos estos tipos de sequías están interrelacionados entre sí, de manera que los déficits de precipitaciones que caracterizan a las sequías meteorológicas producen un descenso en la humedad del suelo y de la escorrentía superficial, lo que a su vez genera el descenso de los caudales de los ríos y por tanto genera las sequías hidrológicas (Lorenzo, 2012). En el caso de la cuenca del río Santa las sequías meteorológicas (escala mensual) presentan alta variabilidad interanual, además en la escala hidrológica se observan patrones semejantes que en la escala meteorológica. También los eventos de sequías en escalas interanual y anual son más intensos y prolongados que los observados a escala mensual (SENAMHI, 2008).

Los indicadores meteorológicos son herramientas fundamentales para la caracterización y el seguimiento de las sequías (World Meteorological Organization y Global Water Partnership, 2016); el índice de precipitación estandarizado (SPI por sus siglas en inglés) se concibió para cuantificar el déficit hídrico para varias escalas temporales, las cuales reflejan el impacto de la sequía en la disponibilidad del recurso hídrico (McKee et al., 1993). También es considerado como el índice más robusto y eficaz debido a que es posible calcularlo y analizarlo por categorías de sequía (Capra et al., 2013), y se basa únicamente en la información de la precipitación (Vicente-Serrano, 2006); se ajusta a una función de probabilidad gamma que posteriormente se transforma en una distribución de probabilidad normal estandarizada, y su principal ventaja radica en que puede calcularse para una gran

variedad de series de tiempo, es uno de los métodos más sencillos de efectuar y se encuentra entre los índices más usados para el pronóstico de sequías (Avilés et al., 2015). Curi (2017) indica que el índice de caudal estandarizado (SSI por sus siglas en inglés), permite evaluar y comparar una gran variedad de regímenes hidrológicos muy diferentes entre sí, en características físicas y magnitudes de caudal. El método para su cálculo es similar a la del índice de precipitación estandarizado, por lo que permite realizar el cálculo para varias series de tiempo, su desventaja radica en el uso exclusivo de los datos de caudal (Vicente-Serrano et al., 2012).

Se analiza el SPI y el SSI en la subcuenca Chancos principalmente porque requiere un mínimo de datos (solamente precipitación y caudales) y su flexibilidad permite la aplicación de este método en diferentes escalas temporales, además de ser compatible con otras cuencas y subcuencas del Perú.

En este contexto, el propósito de la presente investigación es relacionar el rendimiento y evaluar la aplicabilidad del índice de precipitación estandarizado (SPI) y el índice de caudal estandarizado (SSI) sobre la subcuenca Chancos para categorizar los tipos de sequías meteorológicas e hidrológicas basados en su intensidad para el período de 1965 – 2013. La evaluación estadística incluye el análisis de consistencia y tendencias del conjunto de datos, así mismo los resultados obtenidos de sequías se compararán para toda la serie de datos correspondientes al período de estudio.

METODOLOGÍA

Área de estudio

El Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento (2002) describe que la cuenca del río Santa, tiene una altitud máxima de 6768 m.s.n.m. (Caraz) y mínima en la desembocadura del mar. El río Santa tiene una longitud aproximada de 294 km. La cuenca del río Santa está ubicada en el Norte del país y forma parte de la Cordillera Blanca y Negra de la Vertiente Occidental del Pacífico.

La subcuenca Chancos tiene una extensión de 265.61 km² la cual corresponde a la parte húmeda, denominada así por encontrarse encima de los 2000 m.s.n.m., fijada como límite del área de escurrimiento superficial (Díaz, 2017).



Figura 1. Ubicación de la subcuenca Chancos.

Datos

Para realizar el análisis de los eventos de sequía se ha empleado datos de precipitación y caudales de la Autoridad Nacional del Agua (ANA). Consiste en 6 estaciones pluviométricas (Mollepata, Recuay, Chancos, Querococha, Milpo y Cullicocha) y 1 hidrométrica (Chancos). En este trabajo se han empleado las medias mensuales de las variables de precipitaciones y caudales para el período de 1965 – 2013.

Metodología

En la figura (1) se muestra la estación hidrométrica Chancos, por lo que se supone que los datos de esta estación se relacionan con las precipitaciones en la parte superior de la subcuenca Chancos, según el concepto de la relación lluvia-escurrimiento. De manera que es adecuado para el análisis de

comparación entre los índices de sequías meteorológicas e hidrológicas. En este trabajo se han utilizado las series de caudales mensuales para el período 1965 – 2013.

Se seleccionaron los registros de precipitaciones mensuales de 49 años en el período de 1965 a 2013 de 6 estaciones pluviométricas. Los datos de las precipitaciones registradas se utilizaron para generar una serie de precipitaciones medias para el área de la subcuenca Chancos con la finalidad de representar mejor el comportamiento de las sequías. Para la obtención de la precipitación media para la subcuenca Chancos se realizó a través del método de interpolación de la Distancia Inversa al conjunto de precipitaciones mensuales de las diferentes estaciones seleccionadas, este método asume que cada punto posee una influencia local que disminuye con la distancia, de esta manera el método pondera con mayor fuerza a los puntos con datos cercanos al punto de valor desconocido y con menor intensidad sobre aquellos ubicados a mayor distancia. (Tveito & Schöner, 2002).

Para asegurar la calidad de los datos en el análisis de sequías, se realizaron algunas pruebas estadísticas en toda la serie de datos de precipitaciones y caudales mensuales empleando las pruebas “T” de Student y “F” de Fisher buscando la homogeneidad y consistencia ($p > 0.05$), y el test de Mann-Kendall ($p > 0.05$) para el ajuste o eliminación de la tendencia, según corresponda.

El análisis del índice de sequía meteorológica se realizó mensualmente durante 49 años (1965-2013). El índice de precipitación estandarizado (SPI) se seleccionó para evaluar la sequía meteorológica teniendo en cuenta su flexibilidad y simplicidad en la evaluación de la sequía bajo diversas condiciones climáticas. El índice de precipitación estandarizado está establecido por la Organización Meteorológica Mundial (2006) como método estándar recomendado para el análisis de la sequía también en el Perú.

Se eligió el índice de caudal estandarizado (SSI) para evaluar la sequía hidrológica sobre la base de datos de caudal en el período 1965 – 2013, teniendo en cuenta su capacidad para ser implementado fácilmente en cualquier escala de tiempo.

Posteriormente los índices de sequías resultantes se evaluaron y compararon entre sí mediante indicadores estadísticos, como la correlación de Pearson (r), la raíz

del error cuadrático medio (RMSE), el sesgo relativo (BIAS) y el coeficiente de Nash-Sutcliffe los cuales nos indicaran la relación entre la sequía meteorológica e hidrológica.

Cálculo del índice de precipitación estandarizado (SPI) e índice de caudal estandarizado (SSI)

Los índices se calculan mediante el ajuste de los datos mensuales de precipitación y/o caudal a una distribución de probabilidad Gamma (McKee et al., 1993). Así mismo los índices deben precisar al menos 30 años de datos mensuales, siendo preferible contar con al menos 50 años (Guttman, 1999).

La sequía meteorológica se calcula a partir de la conversión de datos de precipitación de una serie suficientemente larga a probabilidades basadas en registros de precipitación acumulada en 1, 3, 6, 12 y 24 meses (Peña-Gallardo et al., 2016), es decir, si se desea obtener el índice SPI12, implica que debe calcularse para cada punto de medida el valor acumulado anual (Pacheco et al., 2017).

La sequía hidrológica se mide a partir del nivel de agua de los ríos, embalses, lagos y aguas subterráneas. En este estudio, el análisis de la sequía hidrológica se llevó a cabo mediante el índice de caudal estandarizado (SSI), que adopta un concepto similar al del índice de precipitación estandarizado (SPI).

En este trabajo se ha usado la distribución de probabilidad Gamma para transformar las series de precipitaciones y caudales mensuales a unidades estandarizadas mediante el método de máxima verosimilitud, tal como se planteó en la formulación de McKee et al. (1993). La escala temporal analizada fue de 1, 3, 6 y 12 meses

RESULTADOS

Comprobación de la calidad de datos pluviométricos e hidrométricos

En la tabla (1) se muestra el análisis de la homogenización y consistencia ($p > 0,05$) tanto en la media como en la desviación estándar, así mismo se realizó el ajuste o eliminación de la tendencia ($p > 0,05$), de esta manera se obtuvo una información confiable y disponible. Se sugiere realizar este paso muy importante para tener una base de datos confiable y de calidad para su aplicación (Porto, 2021).

Tabla 1. Análisis estadístico de los datos pluviométricos.

ESTACIÓN	Prueba "T"		Prueba "F"		Prueba "MK"
	Tcal	Ttab	Fcal	Ftab	Z
Chancos	1.12	1.96	1.00	1.21	1.37
Cullicocha	1.43	1.96	1.00	1.21	0.02
Milpo	0.38	1.96	1.20	1.22	1.65
Mollepata	0.30	1.96	1.05	1.21	1.40
Querococha	0.99	1.96	1.09	1.44	1.43
Recuay	1.63	1.96	1.00	1.35	1.04

En la figura (2) se observa que los meses de estiaje ocurren de abril a setiembre y los meses húmedos ocurren de octubre a marzo en la comparación de los datos pluviométricos en la zona de estudio.

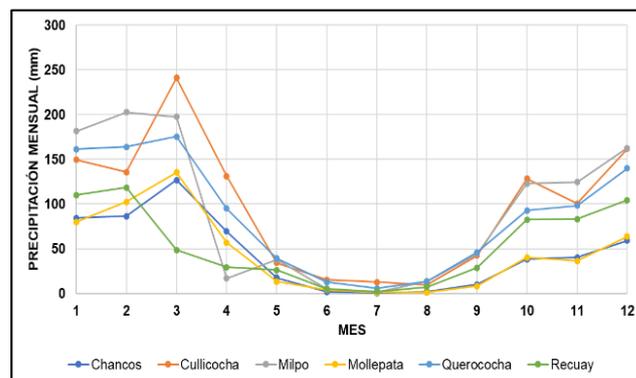


Figura 2. Precipitaciones históricas medias para cada estación en el período 1965-2013.

Posteriormente en la figura (3) se muestra las precipitaciones medias mensuales de la generación de datos de interpolación para la subcuenca Chancos para el período 1965 – 2013.

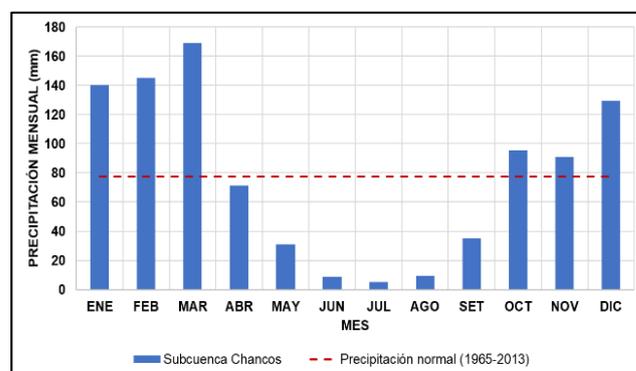


Figura 3. Precipitaciones medias para la subcuenca Chancos para el período 1965-2013.

Así mismo en la figura (4) se muestra los caudales medios mensuales para la subcuenca Chancos para el período 1965 – 2013.

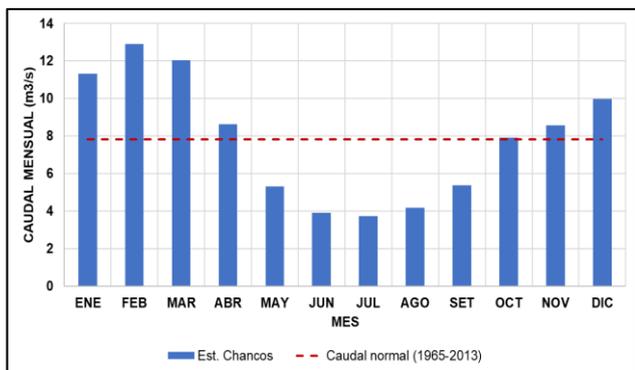


Figura 4. Caudales medios para la subcuenca Chancos para el período 1965-2013.

Finalmente, en la figura (5) y (6) se observa el rango y evolución de las sequías meteorológicas e hidrológicas ocurridas para el período de estudio en una escala temporal de 3 meses respectivamente.

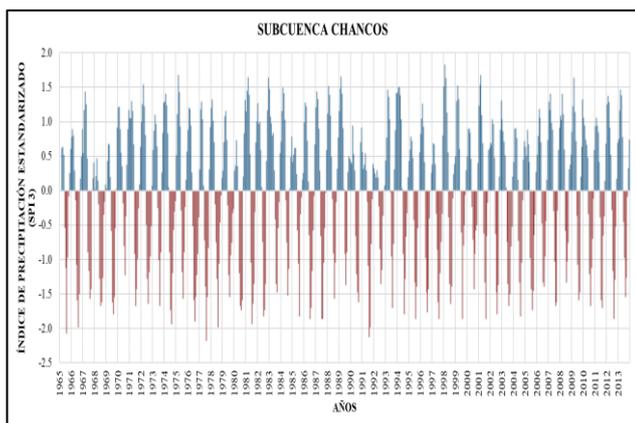


Figura 5. Índices de precipitación estandarizado en una escala temporal de 3 meses.

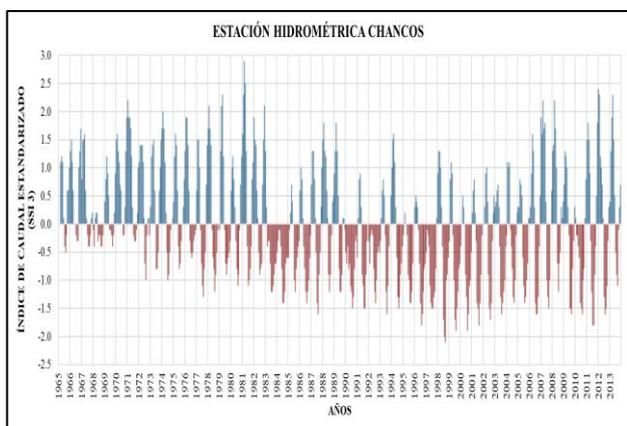


Figura 6. Índices de caudal estandarizado en una escala temporal de 3 meses.

Así mismo en la figura (7) se muestra la comparación entre el SSI y el SPI basado en su intensidad durante el período 1965-2013. Tanto el SPI como el SSI mostraron un patrón similar al del SSI, lo que implica una buena concordancia entre los dos índices de sequías.

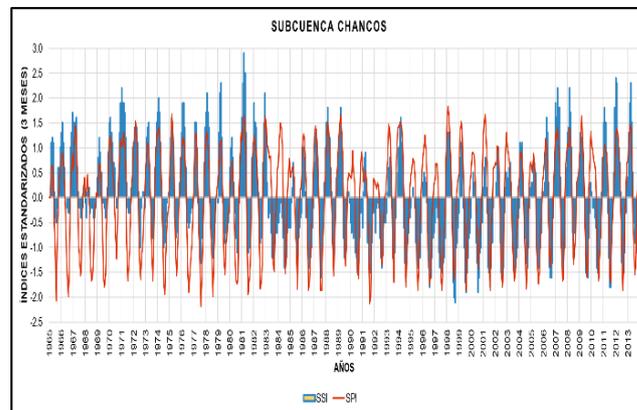


Figura 7. Comparación entre el SPI-3 y el SSI-3 para el período de estudio.

El aumento del índice de sequía del SSI va acompañado del aumento del SPI, y a la inversa, cuando el SSI disminuye, el índice de sequía SPI tienden a disminuir también, pero no diferentes en algunos años.

La tabla (2) muestra el resumen de los análisis de la relación estadística entre el SPI y el SSI. A partir de esta tabla se pudo encontrar pruebas de correlación superiores a 0.6 lo que confirma que existe una buena concordancia entre el índice de sequía del SPI con el SSI. Por lo tanto, se puede afirmar que el SPI está muy bien correlacionado con el SSI para la escala temporal de 3 meses, lo que significa que los dos métodos de índice podrían aplicarse bien en la evaluación de la sequía para la zona de estudio.

Tabla 2. Análisis de los indicadores estadísticos entre el índice de precipitación estandarizado (SPI) y el índice de caudal estandarizado (SSI)

Índices	Indicadores Estadísticos			
	PCC	RMSE	BIAS	NASH
SSI1 - SPI1	0.79	0.65	-0.83	-0.58
SSI3 - SPI3	0.82	0.61	-4.81	0.63
SSI6 - SPI6	0.76	0.69	3.42	0.52
SSI12 - SPI12	0.41	1.08	-0.71	-0.18

En la figura (8) se muestra la comparación de los tipos de sequías ocurridos para la subcuenca Chancos entre el SPI y el SSI. Todos los tipos de sequías muestran frecuencias similares.

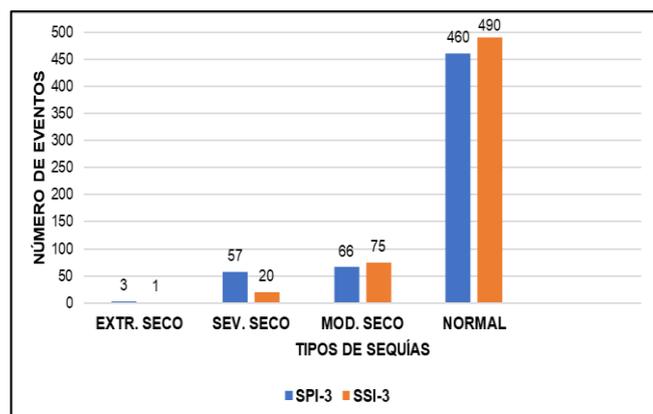


Figura 8. Comparación entre la cantidad de eventos de sequía entre el SSI-3 y el SPI-3.

DISCUSIÓN

Se identificó que para los años 1985, 1990, 1992 y 2004 ocurrieron los eventos de sequías con diferentes intensidades tal como lo identificó Endara et al. (2019), esto puede deberse a la interpolación de la precipitación media para la subcuenca Chancos ya que eleva las precipitaciones y esto puede ocasionar que algunos períodos secos no puedan identificarse correctamente, se sugiere realizar el análisis entre estaciones individuales ya que identifica mejor los períodos secos ocurridos.

El análisis de sequías comprueba que los fenómenos hidrometeorológicos están incrementando (1997 – 2006) debido al cambio climático y la ausencia de lluvias, algunos eventos tal como lo señala el ANA (2015).

Es importante disponer de datos de calidad para la generación de mapas y tomar en cuenta cuestiones topográficas, en particular en zonas montañosas ya que las superficies interpoladas para un mapa de sequía meteorológica puede que no tengan correspondencias reales con la variabilidad natural (OMM, 2012), se sugiere utilizar la geoestadística para poder caracterizar espacialmente la variabilidad de las sequías.

La principal crítica del SPI es que su cálculo se basa únicamente en datos de precipitación y no considera otras variables que influyen en la severidad de la

sequía como puede ser la temperatura, o principalmente, la demanda de agua por parte de la atmósfera (Serrano-Barrios et al., 2016). A pesar de esta limitación los índices de sequías coinciden con las épocas señaladas, pero en cuanto a su magnitud no tienen coincidencia debido a que se analizó en escalas temporales de 1, 3, 6 y 12 meses.

CONCLUSIONES

El presente estudio reveló que las características de los índices de sequía mensual entre el SPI y el SSI exhiben una similitud de patrones que se indica por el buen coeficiente de correlación de Pearson (PCC), raíz del error cuadrático medio (RMSE), sesgo relativo (BIAS) y buen coeficiente Nash respectivamente.

La sequía hidrológica depende directamente de la sequía meteorológica ya que al disminuir las precipitaciones también disminuye el caudal de la subcuenca en estudio.

En consecuencia, el índice de precipitación estandarizado podría aplicarse bien en la determinación de la sequía en la zona de estudio. También se demostró que el SSI podría utilizarse en la evaluación de la sequía basándose en el registro de datos de los caudales en la zona de estudio en lugar del SPI. Además, la superposición de la sequía mensual del SSI y el SPI demostró que estos métodos están correlacionados debido a la magnitud obtenida por el coeficiente de correlación de Pearson (PCC), raíz del error cuadrático medio (RMSE), sesgo relativo (BIAS) y coeficiente Nash en una escala temporal de 3 meses son superiores a valores medios.

Los episodios ocurridos de sequía fueron de 24, 66, 145 eventos de categoría extremadamente seco, severamente seco y moderadamente seco para la subcuenca Chancos para los índices estandarizados.

Los resultados de este estudio destacan que la sequía es un fenómeno complejo en la subcuenca Chancos, con una notable variabilidad espacio temporal debido a que en la región Sierra, la altitud, latitud, presencia de vientos locales dan lugar a diferentes condiciones climáticas. Es necesario considerar que los resultados están basados para categorizar sequías meteorológicas e hidrológicas en términos de déficit de precipitación por lo que sus impactos en cada región dependerán de diferentes condiciones.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Autoridad Nacional del Agua. (2015). Evaluación de recursos hídricos en la Cuenca Santa. In Repositorio Institucional - ANA (pp. 1–56). <http://repositorio.ana.gob.pe/handle/20.500.12543/4644>
- [2] Avilés, A., Céleri, R., Paredes, J., & Solera, A. (2015). Evaluation of Markov Chain Based Drought Forecasts in an Andean Regulated River Basin Using the Skill Scores RPS and GMSS. *Water Resources Management*, 1–15. <https://doi.org/10.1007/s11269-015-0921-2>
- [3] Capra, A., Consoli, S., & Scicolone, B. (2013). Long-Term Climatic Variability in Calabria and Effects on Drought and Agrometeorological Parameters. *Water Resources Management*, 1–17. <https://doi.org/10.1007/s11269-012-0204-0>
- [4] Curi Tapahuasco, S. (2017). Caracterización de las Sequías Hidrológicas en la Vertiente Peruana del Océano Pacífico (Tesis para grado de Magister Scientiae en Recursos Hídricos). Universidad Nacional Agraria La Molina.
- [5] Díaz Salas, A. M. (2017). Modelación Estocástica de los Caudales en la Cuenca del Río Santa (Tesis para grado de Doctoris Philosophiae en Recursos Hídricos). Universidad Nacional Agraria La Molina.
- [6] Endara, Sofía. (2019). Monitoreos de Sequías para Sistemas de Alerta Temprana. Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología Del Perú, 1–44.
- [7] Endara, Sofia, Acuña, J., Vega, F., Febre, C., Correa, K., & Ávalos, G. (2019). Caracterización Espacio Temporal de la Sequía en los Departamentos Altoandinos del Perú (1981 - 2018) (pp. 1–31).
- [8] Fernández Larrañaga, B. (1997). Identificación y caracterización de sequías hidrológicas en Chile central. *Ingeniería Del Agua*, 4(4). <https://doi.org/10.4995/ia.1997.2734>
- [9] Guttman, N. B. (1999). Accepting The Standardized Precipitation Index: A Calculation Algorithm. *Journal of the American Water Resources Association*, 35(2), 1–12.
- [10] Lorenzo Lacruz, J. (2012). Las Sequías Hidrológicas en la Península Ibérica: Análisis y Caracterización Espacio Temporal, Influencias Climáticas y el Efecto de la Gestión Hidrológica en un Contexto de Cambio Global (Tesis para grado de Doctor). Universidad de Zaragoza.
- [11] McKee, T. B., Doesken, N. J., & Kleist, J. (1993). The Relationship of Drought Frequency and Duration to Time Scales. *Journal of Surgical Oncology*, 1–6.
- [12] Ministerio del Ambiente. (2010). Segunda Comunicación Nacional del Perú a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático. Lima - Perú: MINAM.
- [13] Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. (2002). Plan de Gestión de Oferta de Agua en la Cuenca de Gestión Santa. Lima, PE, S.e. 2 volúmenes.
- [14] Morales Gil, A., Olcina Cantos, J., & Rico Amorós, A. (2000). Diferentes Percepciones de la Sequía en España: Adaptación, Catastrofismo e Intentos de Corrección. *Anales de La Universidad de Alicante*, 1–43.
- [15] Organización Meteorológica Mundial. (2006). Vigilancia y Alerta Temprana de la Sequía: Conceptos, Progresos y Desafíos Futuros. Información Meteorológica y Climática Para El Desarrollo Agrícola Sostenible., 1–28.
- [16] Organización Meteorológica Mundial (2012). Guía del Usuario sobre el Índice Normalizado de Precipitación (OMM-Nº1090) (M.Svoboda, M. Hayes y D. Wood), Ginebra.
- [17] Pacheco, J., Parra, N., & Avilés, A. (2017). Análisis de la Sequía en la Cuenca del Paute mediante el Índice de Precipitación Estandarizado (SPI). *Memorias Universidad Del Azuay*, 1–9.
- [18] Peña-Gallardo, M., Gámiz-Fortis, S. R., Castro-Díez, Y., & Esteban-Parra, M. J. (2016). Análisis comparativo de índices de sequía en andalucía para el periodo 1901-2012. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 42(1), 67–88. <https://doi.org/10.18172/cig.2946>
- [19] Porto Lopez, A. L. (2021). Validación del Producto Grillado PISCO de Precipitación v2.1 con la Data Observada de las Estaciones Pluviométricas del SENAMHI en la Cuenca de la Vertiente del Lago Titicaca - Lado Peruano (Tesis para grado de Ingeniero Agrícola). Universidad Nacional del Altiplano de Puno.
- [20] Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (2008). Escenarios Climáticos en la cuenca del río Santa para el año 2030.
- [21] Serrano-Barrios, L., Vicente-Serrano, S. M., Flores-Magdaleno, H., Tijerina-Chávez, L., & Vázquez-Soto, D. (2016). Variabilidad espacio-temporal de las sequías en la cuenca pacífico

- norte de México (1961-2010). Cuadernos de Investigacion Geografica, 42(1), 185–204. <https://doi.org/10.18172/cig.2857>
- [22] Tigkas, D., Vangelis, H., & Tsakiris, G. (2014). DrinC: a Software for Drought Analysis Based on Drought Indices. *Earth Science Informatics*, 8(3), 697–709. <https://doi.org/10.1007/s12145-014-0178-y>
- [23] Tigkas, D., Vangelis, H., & Tsakiris, G. (2018). Drought Characterisation Based on an Agriculture-Oriented Standardised Precipitation Index. *Theoretical and Applied Climatology*, 1–13. <https://doi.org/10.1007/s00704-018-2451-3>
- [24] Tveito, O., & Schöner, W. (2002). Application of spatial interpolation of climatological and meteorological elements by the use of geographical information systems (GIS). *Klima Report*, 28(2).
- [25] Vicente-Serrano, S. M. (2006). Differences in Spatial Patterns of Drought on Different Time Scales: An Analysis of the Iberian Peninsula. *Water Resources Management*, 20, 1–24. <https://doi.org/10.1007/s11269-006-2974-8>
- [26] Vicente-Serrano, S. M., López-Moreno, J. I., Beguería, S., Lorenzo-Lacruz, J., Azorin-Molina, C., & Morán-Tejeda, E. (2012). Accurate Computation of a Streamflow Drought Index. *Journal of Hydrologic Engineering*, 17, 1–15. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)he.1943-5584.0000433](https://doi.org/10.1061/(asce)he.1943-5584.0000433)
- [27] Wilhite, D. A., & Glantz, M. H. (1985). Understanding The Drought Phenomenon: The Role of Definitions. Drought Mitigation Center Faculty Publications, 1–17. <https://doi.org/10.4324/9780429301735-2>
- [28] World Meteorological Organization and Global water Partnership. (2016). In *Drought Indicators and Indices Integrated Drought Management Programme (IDMP), Integrated Drought Management Tools and Guidelines Series 2*. Geneva. (Issue 1173). internal-pdf://217.130.39.189/GWP_Handbook_of_Drought_Indicators_and_Indices.pdf LB - TISS