



UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA

Departamento de Obras Civiles

EVALUACIÓN DE MÉTODOS PARA ESTIMAR CONDICIONES DE SEQUÍA EN UNA CUENCA EN LA ZONA CENTRO NORTE DE CHILE

Memoria de Título presentada por

Chrystian Andres Caro Gaete

como requisito parcial para optar al título de la carrera de

Ingeniería Civil

Profesor Guía
Álvaro Humberto Ossandón Álvarez

Septiembre de 2025



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): ☒ Memoria o trabajo de título; ☐ Tesis de Postgrado;

Título del trabajo: EVALUACIÓN DE MÉTODOS PARA ESTIMAR CONDICIONES DE SEQUÍA EN UNA CUENCA EN LA ZONA CENTRO NORTE DE CHILE

Nombre del candidato(a): Chrystian Andres Caro Gaete

Carrera / Grado: Ingeniería Civil

Campus: Santiago San Joaquín ; **Departamento:** Obras Civiles

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Álvaro Ossandón, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL

☒ El trabajo **NO contiene información que amerite confidencialidad** y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

☐ El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (embargo) por:

☐ 6 meses; ☐ 12 meses; ☐ 2 años; ☐ 3 años; ☐ 5 años; ☐ 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 29/08/2025

; Firma:

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 29/08/2025

; Firma:

Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.



UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA

TITULO DE LA TESIS:

EVALUACIÓN DE MÉTODOS PARA ESTIMAR CONDICIONES DE SEQUÍA EN UNA CUENCA EN LA ZONA CENTRO NORTE DE CHILE

AUTOR:

Chrystian Andres Caro Gaete

TRABAJO DE MEMORIA, presentado como requisito parcial para optar al título de la carrera de INGENIERIA CIVIL de la Universidad Técnica Federico Santa María.

	<u>Nombre</u>	<u>Firma</u>
Prof. Guía		
Miembro 1 Comisión	Álvaro Ossandón	
Miembro 2 Comisión	Lina Castro	

Santiago, Chile, Septiembre de 2025

Índice

1	Introducción	4
2	Objetivos	6
2.1	Objetivo General	6
2.2	Objetivos Específicos	6
3	Marco Teórico	6
3.1	Sequía	6
3.2	Índices de Sequía	6
3.3	Índice Estandarizado de Precipitación (SPI) e Índice Estandarizado de Escorrentía (SRI) ...	7
3.4	Índice Estandarizado de Precipitación-Evapotranspiración (SPEI)	8
3.5	Evapotranspiración.....	9
3.5.1	Hargreaves	10
3.5.2	Ivanov	10
3.5.3	Thornthwaite.....	10
3.5.4	Turc	11
3.5.5	Jensen-Haise	11
3.5.6	Blaney & Criddle	11
3.5.7	Penman-Monteith	11
3.6	Aplicación del Quantile Mapping empírico (EQM) para la Corrección de Sesgos en Datos Climáticos	12
4	Descripción del Territorio, Clima y Eventos de Sequía Históricos	12
4.1	Zona de estudio:	12
4.2	Base de datos.....	13
4.3	Antecedentes históricos de sequía	14
5	Resultados y Análisis	17
5.1	Evaluación del desempeño del SPI frente a eventos históricos	17
5.2	Evaluación del desempeño del SRI frente a eventos históricos	21
5.3	Evaluación del desempeño del SPEI frente a eventos históricos	23
6	Conclusiones	29
7	Referencias	30
8	Anexos	32

EVALUACIÓN DE MÉTODOS PARA ESTIMAR CONDICIONES DE SEQUÍA EN UNA CUENCA EN LA ZONA CENTRO NORTE DE CHILE

Chrystian Andres Caro Gaete¹, Álvaro Humberto Ossandón Álvarez¹

¹ Departamento de Obras Civiles, Universidad Técnica Federico Santa María, Santiago, Chile.

Resumen

El cambio climático ha intensificado la frecuencia y severidad de los eventos de sequía en Chile, especialmente en la zona centro-norte, donde desde 2010 se ha experimentado un periodo prolongado de déficit hídrico conocido como “Megasequía”. Ante este panorama, es crucial disponer de herramientas que permitan caracterizar y monitorear estos eventos de manera precisa. En este estudio, se evalúa la aplicabilidad de tres índices comúnmente utilizados para estimar las condiciones de sequía (SPI, SRI y SPEI) en la cuenca del Estero Derecho en Alcohuaz, Región de Coquimbo, mediante el análisis de su desempeño en diversas escalas temporales y su comparación con registros históricos de eventos documentados entre 1950 y 2023. Se emplean datos meteorológicos provenientes de estaciones locales y del reanálisis climático ERA5-Land. Los resultados muestran que el SRI presenta la mayor concordancia con los eventos observados, seguido por el SPEI, cuyo desempeño varía según el método de estimación de la evapotranspiración potencial. Por otro lado, el SPI mostró limitaciones en escalas temporales cortas debido a la aridez de la zona. El análisis multiescalar permitió identificar que las escalas largas ofrecen mayor estabilidad en la detección de eventos prolongados, mientras que las escalas cortas son más sensibles a sequías breves. En conjunto, este estudio subraya la importancia de seleccionar adecuadamente el índice y sus parámetros según el contexto climático y la disponibilidad de información, con el objetivo de mejorar las capacidades de monitoreo y gestión de sequías en territorios altamente vulnerables.

Palabras claves: Sequía, Índice Estandarizado de Precipitación (SPI), Índice Estandarizado de Escorrentía (SRI), Índice Estandarizado de Precipitación y Evapotranspiración (SPEI), Escalas temporales, Gestión de sequías.

1 Introducción

El agua cumple un rol esencial y constituye un elemento clave para la existencia de la vida en el planeta, ya que los organismos están compuestos principalmente por este elemento. Por esta razón, la escasez de agua ha sido históricamente uno de los problemas más relevantes a nivel mundial (Camargo González & Mariscal Ureta, 2012). Su ocurrencia modifica en gran escala el ambiente de una región, con efectos dramáticos. Estos se manifiestan en la alteración de las actividades económicas, daños medioambientales al ecosistema y el deterioro de la calidad y condiciones de vida de los habitantes. Esto, a su vez, puede desencadenar problemas de salud, seguridad alimentaria, migración y conflictos políticos (Velasco et al., 2005).

La escasez de agua puede originarse por diversos fenómenos, derivados tanto de condiciones naturales como de actividades humanas, o bien de la interacción entre ambos. El uso sostenible del agua constituye una prioridad en aquellas regiones donde la demanda excede la disponibilidad. Para alcanzar este objetivo, es fundamental comprender e identificar los distintos factores que influyen en la ocurrencia de eventos de escasez (Kabat et al., 2003). Entre las condiciones naturales se encuentran fenómenos como sequías prolongadas o modificaciones en los patrones de precipitación asociados a la variabilidad climática. Por otro lado, las actividades humanas, tales como la sobreexplotación de los recursos hídricos, la deforestación y el manejo inadecuado de los suelos, también contribuyen a agravar esta problemática. La interacción de ambos tipos de factores genera un escenario de alta complejidad, dificultando su pronóstico debido a la variabilidad inherente de los elementos involucrados (Paulo & Pereira, 2006).

El norte de Chile se distingue por ser una de las regiones más áridas del continente, caracterizándose por la limitada disponibilidad de recursos hídricos frente a una demanda en constante crecimiento. Desde mediados de la década de 1970, esta zona ha experimentado un aumento progresivo en las temperaturas, particularmente en las áreas interiores, donde las temperaturas máximas han registrado incrementos significativos durante la última década (CR2, 2015). Estos cambios climáticos son coherentes con los efectos esperados del cambio climático global. Esta situación ha dado lugar a sequías recurrentes que afectan directamente a la población local. Por ello, resulta fundamental fomentar el desarrollo científico orientado a optimizar la eficiencia en la gestión del recurso hídrico y fortalecer los sistemas de alerta temprana, con el fin de permitir respuestas oportunas que mitiguen los impactos sociales y ambientales derivados de estos eventos (Meza, 2013).

Los proyectos de investigación han contribuido de manera significativa a una mejor comprensión científica del fenómeno de la sequía, abarcando sus causas, manifestaciones e impactos en distintos contextos temporales y espaciales. Uno de los avances más relevantes en este campo ha sido el reconocimiento de que la sequía no puede definirse exclusivamente por la escasez de precipitaciones, dado que se trata de un fenómeno complejo, caracterizado por múltiples incertidumbres y vacíos de conocimiento (Van Loon, 2015).

En particular, para analizar los procesos e impactos asociados a la sequía hidrológica, es esencial identificar sus principales características. En este contexto, los índices de sequía se han consolidado como herramientas cuantitativas fundamentales, ya que permiten evaluar su intensidad, duración y extensión a partir de variables como la precipitación y la evapotranspiración. La elección adecuada del índice y su correcta implementación resultan críticas, ya que distintos índices pueden conducir a interpretaciones divergentes, al centrarse en distintas etapas del ciclo hidrológico o utilizar metodologías específicas (Zargar et al., 2011). Además, la mayoría de estos índices han sido desarrollados con fines particulares y en contextos geográficos determinados, por lo que su aplicación fuera de dichos marcos puede introducir incertidumbres adicionales, derivadas de la complejidad del fenómeno y la variabilidad climática. Esta situación pone de manifiesto la necesidad de continuar avanzando en la investigación para mejorar la caracterización y gestión de la sequía (Shamshirband et al., 2020).

Uno de los índices más utilizados para el monitoreo de sequías es el Índice Estandarizado de Precipitación (SPI), desarrollado por McKee et al. (1993) en el Colorado Climate Center, con el objetivo inicial de evaluar condiciones de sequía en el estado de Colorado mediante el análisis de la variabilidad de la precipitación en distintas escalas temporales, de hasta 24 meses. Esta flexibilidad lo hace útil para caracterizar distintos tipos de sequías, incluyendo las meteorológicas, agrícolas e hidrológicas. Además, su metodología ha sido adaptada para aplicarse a otras variables hidrológicas, como la escorrentía, dando origen al Índice Estandarizado de Escorrentía (SRI) (McKee et al., 1993; Shukla & Wood, 2008).

Con el objetivo de considerar los efectos del calentamiento global en el análisis de la sequía, Vicente-Serrano et al. (2010) desarrollaron el Índice Estandarizado de Precipitación-Evapotranspiración (SPEI), el cual integra la evapotranspiración como una variable clave. Este índice permite captar la influencia de la temperatura en la severidad de los eventos de sequía, y ha sido aplicado en diversos contextos climáticos (Finlandia, España, India y Estados Unidos) para el periodo 1910–2007, utilizando escalas temporales de hasta 24 meses (Vicente-Serrano et al., 2010).

Estos índices han sido ampliamente aplicados en diversas regiones del mundo, incluyendo África, Asia, Europa y América, para caracterizar las sequías bajo distintos regímenes climáticos. Mientras que el SPI ha demostrado ser útil en zonas donde la precipitación es el factor predominante, el SPEI ha mostrado un mejor desempeño en regiones con alta variabilidad térmica o bajo condiciones de calentamiento climático, al capturar con mayor sensibilidad el déficit hídrico agravado por el aumento de la demanda evaporativa (Kim et al., 2023). Por su parte, el SRI se ha destacado como un índice hidrológico eficaz para evaluar sequías en regiones donde los caudales están fuertemente influenciados por el deshielo, como se ha evidenciado en estudios realizados en Estados Unidos (Shukla & Wood, 2008).

En este sentido, la presente investigación tiene como objetivo evaluar la aplicabilidad de los índices mencionados para caracterizar condiciones de sequía en una cuenca de la zona centro-norte de Chile, integrando datos meteorológicos in situ con estimaciones del reanálisis climático global ERA5-Land.

Para ello, se realizará un análisis comparativo entre los resultados generados por estos índices y los registros históricos de sequías documentadas durante el período de estudio. Esta comparación permitirá valorar la capacidad de cada índice para reflejar con precisión la ocurrencia y severidad de dichos eventos en regiones áridas con limitada disponibilidad de datos meteorológicos. Finalmente, se busca identificar la herramienta más adecuada para apoyar la generación de pronósticos y la toma de decisiones en contextos de alta vulnerabilidad hídrica y escasa información meteorológica observada.

2 Objetivos

2.1 Objetivo General

Evaluar la aplicabilidad de métodos para estimar condiciones de sequía en la Cuenca del Estero Derecho en Alcohuaz, ubicada en la Región de Coquimbo.

2.2 Objetivos Específicos

1. Investigar y recopilar información sobre los métodos propuestos utilizados actualmente para la estimación de condiciones de sequía.
2. Implementar los métodos seleccionados para la evaluación de sequías en la cuenca.
3. Realizar un análisis comparativo de la sensibilidad de los distintos índices de sequía en la cuenca.

3 Marco Teórico

3.1 Sequía

La sequía es un fenómeno complejo que no cuenta con una definición universal, ya que depende de diversos factores naturales y humanos. En términos generales, se entiende como un déficit de agua respecto a las condiciones normales, pero este concepto plantea preguntas clave: ¿qué se entiende por condiciones normales?, ¿qué componentes del ciclo hidrológico deben considerarse?, y ¿cuál es la duración o magnitud mínima para clasificar un evento como sequía? Estas interrogantes reflejan la dificultad de establecer un criterio único, dado que las sequías pueden variar ampliamente según el contexto geográfico y temporal (Van Loon, 2015).

Además, el carácter progresivo de una sequía dificulta la identificación precisa de su inicio y término. Su severidad también es compleja de determinar, ya que no solo depende de la duración, intensidad y extensión geográfica del fenómeno, sino también de la demanda de agua, tanto por parte de la vegetación como de las actividades humanas. En sus primeras etapas, una sequía puede pasar inadvertida, lo que complica su monitoreo y una gestión oportuna. Asimismo, un mismo evento puede generar impactos muy distintos, dependiendo del grado de exposición y vulnerabilidad de la región afectada (Wilhite et al., 1985).

Las sequías son eventos recurrentes a nivel global y se clasifican comúnmente en cuatro tipos. La sequía meteorológica se refiere a una falta prolongada de precipitaciones, muchas veces acompañada de un aumento en la evapotranspiración potencial. La sequía de humedad del suelo, también conocida como agrícola, se relaciona con la escasez de agua en la zona de raíces, afectando directamente la vegetación y los cultivos. La sequía hidrológica implica descensos anormales en cuerpos de agua superficiales o subterráneos, como ríos, lagos o acuíferos. Finalmente, la sequía socioeconómica está vinculada a los impactos de los otros tipos de sequía, afectando tanto los sistemas de abastecimiento como el bienestar ecológico y humano (Tallaksen & Van Lanen, 2023).

3.2 Índices de Sequía

Los índices de sequía constituyen herramientas cuantitativas esenciales para la caracterización y monitoreo de eventos de sequía, evaluando parámetros clave como intensidad, duración, severidad y extensión espacial. Estos índices se fundamentan principalmente en variables meteorológicas, predominando el uso de la precipitación, ya sea de manera independiente o combinada con otros elementos climáticos relevantes. Para garantizar la representatividad y robustez en el análisis, es

fundamental contar con series temporales extensas que permitan la evaluación en múltiples escalas temporales. La diversidad de índices desarrollados responde a diferentes enfoques metodológicos, cada uno con ventajas y limitaciones específicas, lo que implica una selección adecuada según el contexto y los objetivos del análisis (Mishra & Singh, 2010).

3.3 Índice Estandarizado de Precipitación (SPI) e Índice Estandarizado de Escorrentía (SRI)

McKee et al. (1993) propuso el Índice Estandarizado de Precipitación (SPI), con el objetivo de establecer un indicador y una definición de sequía que funcionaran como una herramienta versátil para su monitoreo y análisis (McKee et al., 1993). Para su cálculo, se recomienda contar con al menos 30 años de datos continuos de precipitación mensual. A partir de esta serie, se calcula la precipitación acumulada en distintos intervalos de tiempo (por ejemplo, 1, 3, 6 o 12 meses), y los resultados se ajustan a una función de distribución Gamma para modelar la relación entre precipitación y probabilidad. Esta probabilidad se transforma posteriormente mediante la función inversa de la distribución normal estándar, lo que permite obtener un valor con media cero y desviación estándar uno, correspondiente al SPI. El índice se actualiza mensualmente, generando nuevos valores según el periodo de acumulación seleccionado. Este procedimiento se resume en la Figura 1, donde se ilustra cómo la precipitación acumulada se ajusta a una distribución Gamma (izquierda) y luego se transforma a una variable normal estandarizada (derecha), que representa el valor del SPI.

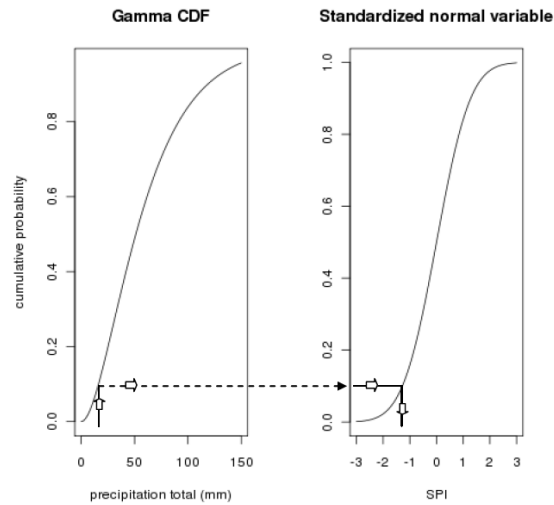


Figura 1: Transformación Gamma-Normal de precipitación acumulada para el cálculo del SPI (Horion et al., 2012).

Sin embargo, en regiones con precipitaciones estacionales extremadamente bajas, es común que la precipitación acumulada sea nula, especialmente en escalas temporales cortas (entre 1 y 3 meses). Para abordar este desafío, una solución consiste en aplicar una probabilidad condicional, donde los periodos con precipitación igual a cero se tratan mediante la asignación de valores SPI basados en la frecuencia histórica de ocurrencia de dichos eventos (Stagge et al., 2015).

$$P(x) = P_0 + (1 - P_0) \cdot F(x_{p>0}, \lambda) \quad (1)$$

Donde $P(x)$ representa la distribución de probabilidad de la precipitación acumulada, P_0 es igual a la razón histórica de los periodos con precipitación cero y $F(x_{p>0}, \lambda)$ representa una función de distribución acumulada (CDF) ajustada únicamente a los datos mayores que cero, utilizando una distribución paramétrica como la Gamma.

A partir del uso del SPI como indicador, es posible definir de manera funcional y cuantitativa los eventos de sequía para cada escala temporal analizada. En este enfoque, se considera que ocurre una sequía cuando el SPI registra valores negativos de forma continua y alcanza un valor igual o inferior a -1.0. El inicio del evento se marca cuando el SPI cae por debajo de cero, y su término ocurre con el primer valor positivo tras haber alcanzado el umbral mencionado. La intensidad de la sequía puede clasificarse en distintas categorías de severidad, las cuales se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1: Categorías de severidad de sequía basadas en el SPI (McKee et al., 1993).

Valor SPI	Categoría
0 a -0.99	Sequía leve
-1.00 a -1.49	Sequía moderada
-1.50 a -1.99	Sequía severa
≤ -2.00	Sequía extrema

McKee et al. (1993) propuso un enfoque que requiere solo una variable de entrada y puede aplicarse de manera análoga a distintas variables hidrológicas, como la precipitación, capa de nieve, caudal, almacenamiento en embalses, humedad del suelo y aguas subterráneas. Este método reconoce múltiples escalas temporales y entrega información relevante sobre el déficit de precipitación, el porcentaje respecto al promedio y su probabilidad de ocurrencia. Basándose en este concepto, se define el Índice de Escorrentía Estandarizado (SRI) como la desviación estándar normal unitaria asociada al percentil de escorrentía hidrológica acumulada durante un periodo específico (Shukla & Wood, 2008).

3.4 Índice Estandarizado de Precipitación-Evapotranspiración (SPEI)

El Índice Estandarizado de Precipitación-Evapotranspiración (SPEI) se calcula a partir de datos de precipitación y temperatura, destacando por su capacidad para integrar el efecto de la temperatura en la evaluación de la sequía. A diferencia del SPI, el SPEI incorpora el balance hídrico climático, lo que permite detectar tanto déficits como excedentes acumulados en distintas escalas temporales. El cálculo comienza con la determinación de la diferencia entre precipitación y evapotranspiración potencial, la cual se acumula según las escalas de tiempo seleccionadas. Posteriormente, la serie resultante se ajusta a una distribución Log-Logística, que, a diferencia de la distribución Gamma utilizada en el SPI, permite representar valores negativos. Matemáticamente, el SPEI mantiene la estructura del SPI, pero añade de manera explícita el impacto de la temperatura sobre la disponibilidad hídrica. (Vicente-Serrano et al., 2010). Este procedimiento se representa esquemáticamente en la Figura 2, donde se observa el ajuste de la distribución log-logística sobre el balance hídrico acumulado y su posterior transformación a valores estandarizados mediante la función normal estándar.

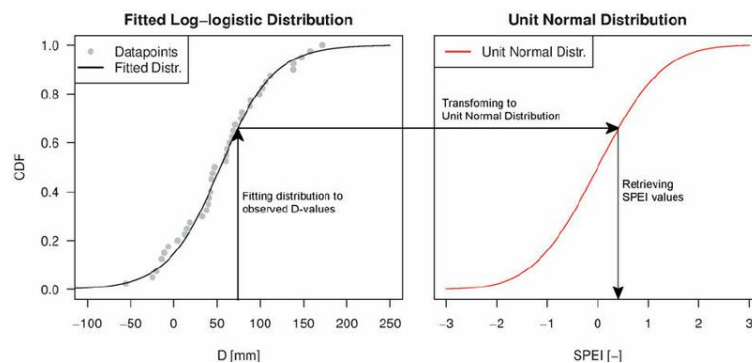


Figura 2: Cálculo mensual del SPEI: Ajuste de distribución y transformación normal (Haslinger et al., 2016).

Para calcular el Índice Estandarizado de Precipitación-Evapotranspiración (SPEI) según Vicente-Serrano et al. (2010), primero se deben recopilar datos mensuales de precipitación y temperatura. A continuación, se estima la evapotranspiración potencial utilizando alguno de los métodos disponibles. Con esta información se calcula un balance hídrico climático para cada periodo i definido como la diferencia entre la precipitación mensual P_i y la evapotranspiración potencial ET_{0i}

$$D_i = P_i - ET_{0i} \quad (2)$$

Los déficits o excedentes se acumulan en diferentes escalas temporales (1 mes, 3 meses, 6 meses, 12 meses, etc.), para posteriormente ser ajustados a la distribución de probabilidad Log-Logística de tres parámetros, recomendada por ser flexible y ajustarse bien a estos datos debido a sus parámetros de forma, escala y localización. La función de densidad de probabilidad de la distribución Log-Logística de tres parámetros se define como:

$$f(x) = \frac{\beta}{\alpha} \cdot \left(\frac{x - \gamma}{\alpha} \right)^{\beta-1} \cdot \left[1 + \left(\frac{x - \gamma}{\alpha} \right)^{\beta} \right]^{-2} \quad (3)$$

Donde α , β y γ son los parámetros de escala, forma y localización, respectivamente, para valores de x en el rango ($\gamma < x < \infty$). Los parámetros de la distribución Log-Logística se pueden obtener mediante diferentes métodos de ajuste, siendo el de los momentos L el método más robusto y sencillo (Ahmad et al., 1988)

La función de distribución de probabilidad del conjunto de datos, según la distribución Log-Logística, corresponde a:

$$F(x) = \left[1 + \left(\frac{\alpha}{x - \gamma} \right)^{\beta} \right]^{-1} \quad (4)$$

Con $F(x)$, el SPEI se puede obtener fácilmente como los valores estandarizados de $F(x)$. Por ejemplo, siguiendo la aproximación clásica de Abramowitz y Stegun (1965):

$$SPEI = W - \frac{C_0 + C_1 \cdot W + C_2 \cdot W^2}{1 + d_1 \cdot W + d_2 \cdot W^2 + d_3 \cdot W^3} \quad (5)$$

Donde $W = \sqrt{-2 \cdot \ln(P)}$ para $P \leq 0.5$, que corresponde a la probabilidad de exceder un valor determinado de x . Si $P > 0.5$, entonces P se reemplaza por $1 - P$ y se invierte el signo del SPEI resultante, las constantes tienen los siguientes valores $C_0 = 2.515517$, $C_1 = 0.802853$, $C_2 = 0.010328$, $d_1 = 1.432788$, $d_2 = 0.189269$ y $d_3 = 0.001308$.

3.5 Evapotranspiración

La evapotranspiración es el proceso mediante el cual el agua retorna a la atmósfera a través de dos mecanismos complementarios: la evaporación, que corresponde a la pérdida de agua en forma de vapor desde superficies como el suelo y cuerpos de agua, y la transpiración, que se produce cuando las plantas liberan vapor de agua a través de sus hojas. Este proceso desempeña un papel clave en el ciclo hidrológico, ya que regula la disponibilidad de agua en los ecosistemas y resulta fundamental para la agricultura, la meteorología y la gestión de los recursos hídricos (Allen et al., 1998).

3.5.1 Hargreaves (Hargreaves & Samani, 1985)

$$ET_0 = 0.0135 \cdot (t_{med} + 17.78) \cdot R_s \quad (6)$$

En la ecuación, ET_0 representa la evapotranspiración potencial diaria [mm día⁻¹], t_{med} es la temperatura media diaria [°C], y R_s corresponde a la radiación solar incidente [mm día⁻¹].

$$R_s = R_0 \cdot KT \cdot (t_{max} - t_{min})^{0.5} \quad (7)$$

Donde R_0 corresponde a la Radiación solar extraterrestre, KT es un coeficiente 0.162 para regiones del interior y 0.19 para regiones costeras, t_{max} y t_{min} corresponde a la temperatura máxima y mínima diaria [°C].

3.5.2 Ivanov (Ivanov, 1954)

$$ET_0 = 0.018 \cdot (25 + t_{med})^2 \cdot (100 - HR) \quad (8)$$

En la ecuación, ET_0 representa la evapotranspiración potencial diaria [mm día⁻¹], t_{med} es la temperatura media diaria [°C], y HR corresponde al porcentaje de humedad relativa.

3.5.3 Thornthwaite (Thornthwaite, 1948)

$$ET_0 = 16 \cdot K \cdot \left(\frac{10 \cdot T}{I} \right)^m \quad (9)$$

En la ecuación, ET_0 corresponde a la evapotranspiración potencial [mm mes⁻¹], T es la temperatura media mensual [°C] e I es un índice de calor calculado como la suma de 12 valores mensuales i , los cuales se obtienen a partir de la temperatura media mensual según la siguiente expresión:

$$i = \left(\frac{T}{5} \right)^{1.514} \quad (10)$$

m es un coeficiente dependiente de I :

$$m = 6.75 \cdot 10^{-7} \cdot I^3 - 7.71 \cdot 10^{-5} \cdot I^2 + 1.79 \cdot 10^{-2} \cdot I + 0.492 \quad (11)$$

K es un coeficiente de corrección basado en la latitud y el mes

$$K = \left(\frac{N}{12} \right) \cdot \left(\frac{NDM}{30} \right) \quad (12)$$

Donde NDM corresponde al número de días en el mes y N el número de horas luz del día dado por la siguiente expresión:

$$N = \frac{24}{\pi} \arccos(-\tan(\varphi) \cdot \tan(\delta)) \quad (13)$$

Donde φ es la latitud del lugar en radianes y δ es la declinación solar en radianes dada por la siguiente expresión:

$$\delta = 23.45 \cdot \sin\left(\frac{360}{365} \cdot (284 + n)\right) \cdot \frac{\pi}{180} \quad (14)$$

Donde n corresponde al día juliano.

3.5.4 Turc (Turc, 1961)

$$ET_0 = 0.0133 \cdot \left(\frac{t_{med}}{t_{med} + 15}\right) \cdot (R_s + 50) \quad (15)$$

En la ecuación, ET_0 representa la evapotranspiración potencial diaria [mm día⁻¹], t_{med} es la temperatura media diaria [°C], y R_s corresponde a la radiación solar incidente [mm día⁻¹], estimada según lo indicado en la ecuación 7.

3.5.5 Jensen-Haise (Jensen & Haise, 1963)

$$ET_0 = R_s \cdot (0.0252 \cdot t_{med} + 0.078) \quad (16)$$

En la ecuación, ET_0 representa la evapotranspiración potencial diaria [mm día⁻¹], t_{med} es la temperatura media diaria [°C], y R_s corresponde a la radiación solar incidente [mm día⁻¹], la cual fue determinada mediante la ecuación 7.

3.5.6 Blaney & Criddle (Blaney & Criddle, 1950)

$$ET_0 = p \cdot (0.46 \cdot t_{med} + 8.13) \quad (17)$$

En la ecuación, ET_0 representa la evapotranspiración potencial diaria [mm mes⁻¹], t_{med} es la temperatura media diaria [°C], y p corresponde al porcentaje de insolación solar diaria, cuyo valor fue obtenido a partir de tablas según la latitud y el mes del año (Monsalve, 1995).

3.5.7 Penman-Monteith (Allen et al., 1998)

$$ET_0 = \frac{0.408 \cdot \Delta \cdot (R_n - G) + \gamma \cdot \frac{900}{T+273} \cdot u_2 \cdot (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma \cdot (1 - 0.34 \cdot u_2)} \quad (18)$$

La evapotranspiración de referencia (ET_0), expresada en [mm día⁻¹], depende de varios factores climáticos y físicos. Entre ellos, se incluye la radiación neta en la superficie del cultivo (R_n) y la radiación extraterrestre (R_a), ambas medidas en [MJ m⁻² día⁻¹], así como el flujo de calor del suelo (G). La temperatura media del aire (T) medida a 2 m de altura, se expresa en [°C], al igual que la velocidad del

viento (u_2), expresada en $[m\ s^{-1}]$. Los parámetros de humedad incluyen la presión de vapor de saturación (e_s), la presión real de vapor (e_a) y su diferencia, el déficit de presión de vapor ($e_s - e_a$), todos en $[kPa]$. Además, intervienen la pendiente de la curva de presión de vapor (Δ) y la constante psicrométrica (γ), ambos en $[kPa\ ^\circ C^{-1}]$.

3.6 Aplicación del Quantile Mapping empírico (EQM) para la Corrección de Sesgos en Datos Climáticos

El Quantile Mapping empírico (EQM), propuesto por Gudmundsson et al. (2012), es un método estadístico no paramétrico utilizado para corregir sesgos en variables climáticas simuladas por modelos numéricos, productos satelitales o reanálisis climáticos. Esta técnica busca ajustar la distribución de las variables simuladas con respecto a la de los datos observados, empleando funciones de distribución acumulada (CDF) empíricas. A diferencia de los enfoques paramétricos, el EQM no requiere asumir una distribución teórica específica, lo que le otorga mayor flexibilidad y aplicabilidad a distintos tipos de variables climáticas, como la precipitación o la temperatura.

El procedimiento consiste en determinar, para cada valor generado por el modelo, su posición dentro de la distribución empírica (cuantil) del conjunto simulado y asignarle el valor observado correspondiente al mismo cuantil. Este mapeo cuantil a cuantil permite ajustar no solo los valores promedio y su variabilidad, sino también otras características más complejas, como la asimetría, la concentración de los datos en el centro o en los extremos, y el comportamiento de los valores más extremos, como lluvias intensas o temperaturas inusuales. Como resultado, el EQM mejora sustancialmente la representatividad estadística de las proyecciones climáticas al compararlas con series históricas observadas, siendo una herramienta clave en estudios de impacto y en la evaluación de escenarios climáticos futuros (Gudmundsson et al., 2012).

4 Descripción del Territorio, Clima y Eventos de Sequía Históricos

4.1 Zona de estudio:

En la Figura 3 se presenta la subcuenca del Estero Derecho en Alcohuaz, ubicada en la Región de Coquimbo, Chile, entre las coordenadas $29.76^\circ S - 30.08^\circ S$ de latitud sur, y $70.00^\circ W - 70.45^\circ W$ de longitud oeste. Esta subcuenca tiene una superficie aproximada de $1523.88\ km^2$ y se encuentra emplazada en la comuna de Paihuano, específicamente en el sector alto del Valle de Elqui, abarcando territorios de la precordillera y la cordillera de Los Andes. El relieve del área es mayoritariamente montañoso, con altitudes que superan los 4500 metros sobre el nivel del mar en su porción oriental. Se trata de una zona escasamente urbanizada, donde las principales actividades productivas corresponden a la agricultura y la ganadería.

En esta subcuenca destacan los ríos Claro y Cochiguaz, los cuales conforman parte importante de la red hídrica local. El clima predominante es semiárido de tipo mediterráneo, caracterizado por precipitaciones concentradas principalmente en los meses de invierno y una marcada estacionalidad hídrica. Estas condiciones, sumadas a la acumulación de nieve en las zonas altas, configuran un régimen de escurrimiento de tipo nival, con caudales que aumentan significativamente durante la temporada de deshielo (Montecinos et al., 2016).

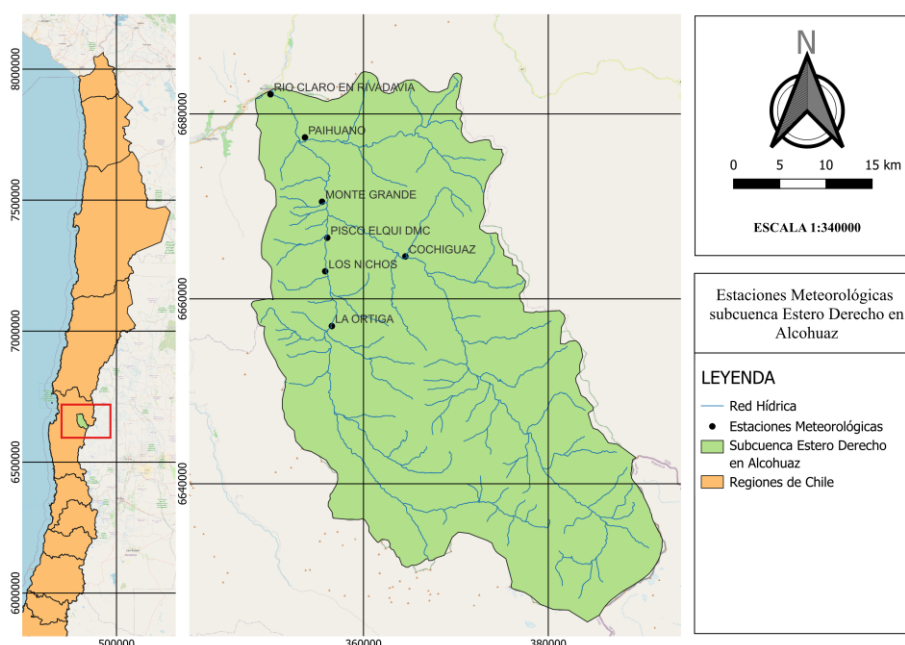


Figura 3: Subcuenca del Estero Derecho en Alcohuz: Localización y Estaciones Meteorológicas.

4.2 Base de datos

Para el desarrollo de la investigación, fue fundamental identificar las estaciones meteorológicas ubicadas dentro de la cuenca en estudio. Para ello, se utilizó la información geográfica disponible en la Mapoteca Digital de la Dirección General de Aguas (DGA), la cual permitió localizar espacialmente las estaciones dentro de la subcuenca. Posteriormente, a partir de la base de datos de la Dirección General de Aguas (DGA) (Dirección General de Aguas (DGA) Ministerio de Obras Públicas, 2024) se realizó un análisis detallado de las estaciones meteorológicas ubicadas en la cuenca, con el fin de seleccionar aquellas que cumplen con los criterios de representatividad y continuidad temporal requeridos para el estudio. Este proceso también permitió dimensionar la necesidad de complementar la información con datos provenientes del reanálisis climático global ERA5-Land, que ofrece series continuas y de alta resolución en áreas con escasa cobertura de estaciones. La Tabla 2 resume las principales características de la información disponible.

Tabla 2: Información de Estaciones Meteorológicas de la subcuenca.

Nombre Estación	Código	Institución	Altura [m s.n.m]	UTM Norte [m]	UTM Este [m]	Tipo	Periodo de Registro
La Ortiga	04311005-5	DGA	1560	6657051	356572	Precipitación y Temperatura	Enero 1979 - Julio 2019
Los Nichos	04311004-7	DMC	1330	6662977	355854	Precipitación	Enero 1980 - Septiembre 2019
Cochiguaz	04313003-K	DGA	1560	6664585	364531	Precipitación	Abril 1989 - Septiembre 2019
Monte Grande	04314003-5	DGA	1120	6670498	355511	Precipitación	Enero 1980 -

							Septiembre 2019
Pisco Elqui DMC	04311003-9	DMC	1250	6666608	356078	Precipitación	Enero 1980 - Septiembre 2019
Rio Claro en Rivadavia	04314002-7	DGA	820	6682121	349931	Precipitación	Abril 2015 – Julio 2022
Paihuano	04314008-6	FDF	914	6677457	353662	Precipitación	Junio 2017 - Noviembre 2020

Con base en la información disponible, se optó por excluir la estación meteorológica de Paihuano del análisis debido a su escasa cobertura temporal y baja representatividad espacial en el contexto de la cuenca. Para las demás estaciones, se complementó la información observacional mediante el uso de la base de datos ERA5-Land (Muñoz-Sabater et al., 2021), obtenida a partir de un reanálisis climático global, que ofrece registros continuos para el periodo 1950 - 2023 de todas las variables necesarias para estimar los métodos de evapotranspiración considerados en este estudio, incluyendo la precipitación. Con el objetivo de mejorar la representatividad de estos datos y ampliar la base de información disponible para el análisis, se realizó un ajuste de la serie de precipitación mediante el método empírico de Quantile Mapping, utilizando como referencia los registros observados en las estaciones meteorológicas.

Para el análisis de la escorrentía se utilizó la base de datos generada por Araya et al. (2023), el cual incluye en su análisis la cuenca objeto de este estudio y registros de escorrentía correspondientes al período comprendido entre noviembre de 1983 y septiembre de 2018.

4.3 Antecedentes históricos de sequía

La Tabla 3 presenta el registro histórico de los eventos, impactos y daños en la población asociados a las sequías ocurridas en la Región de Coquimbo, correspondiente a la cuenca en estudio. Se incluye información detallada sobre la fecha de ocurrencia, las zonas más afectadas y una breve descripción de las principales características y daños, junto con sus respectivas fuentes de información.

Tabla 3: Registro histórico de las Sequías en la Región de Coquimbo 1950 – 2023.

Año	Descripción
1955	Una severa sequía impactó la zona agrícola entre Malleco y Coquimbo, provocando pérdidas significativas en la producción frutícola (70% en limones y 30% en naranjas) y una reducción estimada de tres millones de quintales de trigo. La escasez hídrica y de forraje afectó gravemente al sector ganadero, especialmente en Coquimbo y Atacama. Como medidas de mitigación, el Estado consideró la importación de alimentos mediante convenios internacionales y la implementación de técnicas de inducción de precipitaciones. Se realizaron además acciones simbólicas y religiosas en busca de precipitación (Urrutia & Lanza, 1993).
1960-1962	Una prolongada sequía afectó severamente al Norte Chico, reduciendo significativamente la superficie agrícola bajo riego y provocando pérdidas críticas en la producción de cultivos como trigo y maíz, con disminuciones superiores al 60% y 70%, respectivamente. La ganadería, especialmente la caprina, sufrió una mortalidad masiva y evacuaciones, impactando directamente a las comunidades campesinas dedicadas a la agricultura de secano y la crianza de ganado menor. Esta situación generó una crisis socioeconómica caracterizada por la migración forzada, escasez de recursos hídricos y alimentarios, y la pérdida de infraestructura productiva.

	En respuesta, se implementaron medidas de emergencia que incluyeron la entrega de alimentos, generación de empleo mediante obras públicas, y asistencia técnica y financiera a los agricultores afectados. Paralelamente, se impulsaron proyectos hidráulicos de gran escala, como la construcción de tranques y embalses, con el fin de incrementar la capacidad de almacenamiento y asegurar la disponibilidad de agua para riego, buscando mitigar los efectos de futuras sequías y garantizar la sustentabilidad de los sistemas productivos regionales (Urrutia & Lanza, 1993).
1964	Una severa sequía impactó desde La Serena hasta Valparaíso y Quillota, afectando gravemente el riego y las cosechas en la provincia de Coquimbo, donde la producción de trigo y maíz cayó un 60% y 65%, respectivamente. Las reservas de agua en tranques fundamentales como Recoleta y Cogotí se redujeron drásticamente, y el río Limarí perdió un 30% de su caudal, restringiendo aún más el riego. Las comunidades rurales sufrieron grandes pérdidas de cultivos y ganado, mientras que la mortalidad infantil alcanzó el 22%. La crisis se profundizó tras la ausencia de lluvias después de un inicio prometedor, lo que llevó a declarar la zona en emergencia y a implementar ayuda gubernamental (Urrutia & Lanza, 1993).
1967	La sequía y fuertes heladas afectaron gravemente la agricultura en el Norte Chico y en la zona central, causando pérdidas significativas en cultivos como apios, lechugas, ajos y coliflores, además de retrasar la germinación y dañar las siembras. La falta de agua motivó la declaración de zona de emergencia, con medidas para controlar precios y vedas sobre el ganado, generando controversias con asociaciones agrícolas que reclamaron por el impacto en el ganado y solicitaron apoyo financiero para superar la crisis (Urrutia & Lanza, 1993).
1968-1969	En julio de 1968, la prensa chilena calificó la situación como "la peor sequía en cien años", un "terremoto seco" que afectó gravemente a todos los sectores del país. Esta crisis se originó tras un 1967 ya seco y se agravó al año siguiente, cuando no cayó prácticamente nada de lluvia ni nieve en vastas zonas del país. La catástrofe tuvo consecuencias devastadoras en la agricultura, ganadería, minería, energía y empleo, obligando al gobierno a implementar medidas de emergencia sin precedentes, con asistencia alimentaria, obras públicas y programas de riego y crédito para mitigar sus efectos. En la Región de Coquimbo, el impacto fue particularmente severo. Los embalses como La Paloma, Recoleta y Cogotí quedaron casi vacíos, afectando el riego y abastecimiento humano. De las 650 mil cabras que había, sólo 250 mil sobrevivían en 1969, y más de 9.000 personas estaban cesantes. Comunidades agrícolas completas quedaron sin agua incluso para beber, y miles de campesinos se vieron forzados a subsistir con ayuda alimentaria y trabajos temporales en obras sanitarias y camineras (Urrutia & Lanza, 1993).
1970-1971	En 1970, la Región de Coquimbo vivió una de las peores sequías del siglo XX, con efectos devastadores sobre el medio rural y los ecosistemas. Embalses clave como Cogotí, Lautaro, Rungue y Culimo estaban completamente secos, mientras que La Paloma y Recoleta apenas alcanzaban un 20 % de su capacidad. Los ríos Elqui, Limarí, Choapa, Huasco y Copiapó fluían con caudales mínimos, lo que paralizó las actividades agrícolas y ganaderas. La crisis redujo el número de cabezas de ganado caprino a menos de 200 mil, y generó una fuerte pérdida de empleos: la CORFO estimó al menos seis mil cesantes, especialmente en comunas como Combarbalá e Illapel, que sufrieron un fuerte éxodo rural. En respuesta, el Estado, a través de la Comisión Sequía, asistió a unos 10 mil campesinos (50 mil personas incluyendo sus familias) mediante programas de emergencia que incluyeron perforación de pozos en Atacama, Coquimbo y Petorca, traslado de pobladores a otras zonas agrícolas, instalación de bombas elevadoras de agua y construcción de postas sanitarias. A comienzos de 1971, la situación no mejoró: los ríos llevaban solo el 15 % de su caudal normal, los embalses seguían secos, salvo La Paloma, y los incendios forestales se intensificaron por la aridez, mientras se mantenía la incertidumbre sobre una posible recuperación climática (Urrutia & Lanza, 1993).
1972-1974	En el sexto año consecutivo de sequía, la Región de Coquimbo seguía siendo una de las más golpeadas, con severos efectos en la producción agrícola, especialmente en los cultivos de uva, lo que generó altos niveles de cesantía. En 1973 no se registraron cambios significativos, pero en 1974 la sequía provocó una maduración anormal de los pastos, afectando la ganadería y la producción de leche, además de reducir el rendimiento de cultivos como el trigo (Aldunce & González, 2009).

1975	En enero de 1975, fueron declaradas “zona de catástrofe” las provincias de Atacama y Coquimbo, junto al departamento de Petorca y las comunas de Putaendo y Santa María, debido a la persistencia de una sequía prolongada que afectaba a la región desde varios años atrás, generando graves impactos socioeconómicos y ambientales (Urrutia & Lanza, 1993).
1985	En la Cuarta Región, la sequía afectó directamente a los criaderos caprinos de Elqui, Limarí y Choapa, generando una fuerte escasez de forraje que complicó la alimentación del ganado. Esto provocó una disminución en la producción de queso, así como un aumento en los abortos en hembras y la muerte de crías antes o poco después del nacimiento. La situación impactó negativamente la actividad caprina, que representa una fuente importante de ingresos para muchas familias de la zona (Aldunce & González, 2009).
1986	En octubre de 1986, los medios reportaron la muerte de al menos cuatrocientas mil cabras en la IV región debido a la sequía que afectaba extensamente al país, causando los mayores daños en la provincia de Limarí, donde se estimaba una población de un millón de cabezas de ganado menor, que fue severamente diezmada por el fenómeno climático (Urrutia & Lanza, 1993).
1990-1991	En 1990, una sequía severa afectó principalmente las regiones III, IV y V, motivando la declaración de varias comunas en estado de zona de catástrofe por la pérdida significativa de ganado y la destrucción casi total de cultivos, lo que derivó en inseguridad alimentaria para miles de familias y una profunda crisis socioeconómica asociada a la escasez hídrica. En la región de Coquimbo, la reducción de la disponibilidad de agua provocó la mortandad de hasta un 80% del ganado caprino y la pérdida casi total de huertos, incrementando el desempleo rural y la vulnerabilidad socioeconómica. Para mitigar los impactos, se implementaron programas de asistencia alimentaria, generación de empleo temporal y obras hidráulicas de regadío, aunque la situación continuó siendo crítica durante varios meses (Urrutia & Lanza, 1993).
1994-1995	En la región de Coquimbo, la sequía prolongada causó graves daños al sector agropecuario, especialmente al ganado caprino, que murió masivamente debido a la falta de alimento provocada por la escasez hídrica. Esta situación impactó también en la producción lechera y quesera, así como en otros cultivos agrícolas, generando pérdidas económicas significativas para los agricultores locales. La gravedad de la crisis llevó a que las autoridades declararan la zona como Emergencia Agrícola, implementando medidas para mitigar el impacto en los productores y garantizar el abastecimiento de alimentos (Aldunce & González, 2009).
1996-1998	La sequía en la región provocó un fuerte impacto en la agricultura, con una reducción en el desarrollo y calibre de las frutas, lo que afectó la producción del año siguiente y causó pérdidas económicas importantes. Cultivos como trigo, cebada, papas y hortalizas de alta demanda hídrica fueron especialmente dañados. En la ganadería, la escasez de forraje debilitó a los animales, aumentando su vulnerabilidad a enfermedades y afectando la reproducción, lo que también repercutió en los ingresos del sector. Además, la baja humedad elevó el riesgo de incendios forestales y ralentizó el crecimiento de las plantaciones a largo plazo. En el ámbito social, los pequeños productores y trabajadores agrícolas enfrentaron desempleo y pérdidas significativas, agravando la pobreza local. La crisis hídrica fue tan grave que se declaró estado de emergencia, evidenciando el profundo déficit de agua y sus consecuencias en la economía y el bienestar de la zona (Aldunce & González, 2009).
2007-2008	El fenómeno afectó desde la Región de Atacama hasta Los Lagos, con un déficit pluviométrico promedio nacional cercano al 49%, alcanzando un 90% en Atacama y entre 30% y 50% en O'Higgins, Maule y Biobío. Esta condición hidrológica adversa impactó fuertemente la agricultura, principal actividad económica de la zona, afectando a aproximadamente 80 mil agricultores. Se implementaron medidas como la baja preventiva de voltaje hasta octubre de 2008 para reducir la demanda energética. La magnitud del fenómeno generó conflictos por el uso del recurso hídrico entre minería, agricultura, agroindustria y servicios básicos, evidenciando la complejidad en la gestión del agua a nivel nacional durante periodos críticos (Piuzzi et al., 2013).
2010-2023	Chile ha estado históricamente expuesto a la sequía debido a su geografía y clima, pero desde 2010 enfrenta una situación crítica con la llamada megasequía, el periodo más seco registrado desde 1915. Este fenómeno, intensificado por altas temperaturas, ha provocado una grave

	disminución en las precipitaciones y un deterioro generalizado de los recursos hídricos a lo largo del país, con proyecciones alarmantes para las próximas décadas. En la Región de Coquimbo, los efectos han sido especialmente severos. La escasez de agua ha reducido caudales, mermado el almacenamiento en embalses y afectado profundamente a la actividad agropecuaria. La falta de agua disponible para animales de pastoreo ha provocado la muerte de miles de ejemplares, lo que llevó al Ministerio de Agricultura a declarar emergencia agrícola en 2019 (Arias Rodríguez, 2021).
--	---

5 Resultados y Análisis

5.1 Evaluación del desempeño del SPI frente a eventos históricos

Con el propósito de evaluar la capacidad del Índice Estandarizado de Precipitación (SPI) para detectar eventos de sequía en la cuenca analizada, se efectuó una comparación sistemática entre sus resultados y quince eventos históricos documentados durante el periodo con registros disponibles. Este análisis permitió determinar el grado de concordancia entre el comportamiento del SPI y la ocurrencia de sequías registradas en la zona.

En primer lugar, se evalúa el índice sin aplicar la probabilidad condicional, en la Figura 4, se muestra la evolución temporal del SPI en distintas escalas. Las zonas en rojo representan los eventos observados de sequía. Se puede apreciar que, en las escalas temporales más cortas, el SPI exhibe periodos con discontinuidades atribuibles a la frecuente ausencia de precipitación en los registros mensuales del periodo analizado. Esta condición imposibilita un ajuste adecuado a la distribución Gamma (modelo estadístico empleado para estimar la probabilidad acumulada de la precipitación) debido a que esta distribución no admite valores iguales a cero en su dominio.



Figura 4: Serie SPI sin probabilidad condicional en cinco escalas temporales, con eventos de sequía observados en rojo. Estación La Ortiga.

En la Figura 5 se presentan los porcentajes de aciertos, falsos positivos y falsos negativos obtenidos para la estación analizada, considerando en el análisis los meses con discontinuidades en el SPI (indeterminación del valor del índice) producto de la ausencia de precipitaciones. La evaluación se realiza en cinco escalas temporales distintas. Los resultados evidencian que, particularmente en las escalas de 3 y 6 meses, se vuelve necesaria la aplicación de una probabilidad condicional para garantizar la aplicabilidad y consistencia del índice en la cuenca.

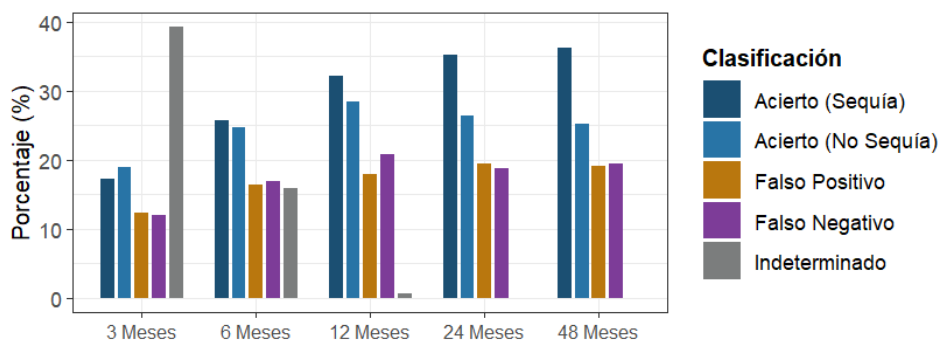


Figura 5: Rendimiento general del SPI sin probabilidad condicional en la detección de sequías y periodos no secos en la estación La Ortiga.

Los resultados obtenidos tras aplicar la probabilidad condicional al índice SPI evidenciaron una elevada consistencia espacial en la evolución del índice entre las distintas estaciones de la cuenca, observándose patrones similares en la identificación de eventos históricos. En la Figura 6 se analiza esta evolución para tres estaciones representativas, lo que confirma dicha homogeneidad. Esta consistencia justificó la elección de la estación La Ortiga como punto de referencia para la presentación de los siguientes resultados en esta sección, optimizando la claridad del análisis y evitando reiteraciones innecesarias. Las series de tiempo correspondientes al resto de las estaciones se encuentran disponibles en el Anexo.

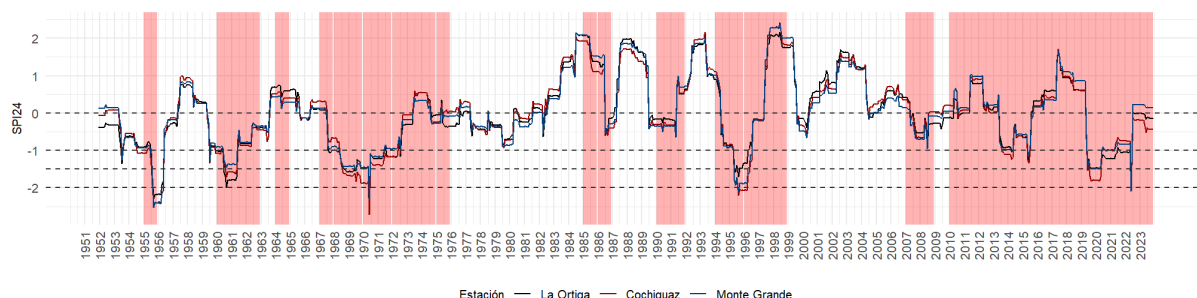


Figura 6: Evolución temporal del SPI a escala 24 meses con probabilidad condicional en tres estaciones de la cuenca.

La Figura 7 muestra la evolución temporal del SPI en distintas escalas temporales, esta vez considerando el ajuste por probabilidad condicional. Las zonas en rojo indican los eventos de sequía observados. A escalas más cortas, se observa una mayor variabilidad del índice, manifestada en fluctuaciones abruptas y una menor persistencia de los eventos detectados.



Figura 7: Serie SPI con probabilidad condicional en cinco escalas temporales, con eventos de sequía observados en rojo. Estación La Ortiga.

En la escala de 3 meses, la alta proporción de registros sin precipitación acumulada (cercana al 40%) genera un efecto de truncamiento en los valores mínimos del SPI. Esto da lugar a valores relativamente altos que, si bien permiten identificar la presencia de sequía, dificultan su análisis en términos de severidad. Además, cuando los periodos sin precipitación acumulada superan el 50%, se incrementa la incertidumbre asociada a la representación de eventos secos, dado que el SPI asume una distribución normal simétrica, lo que impone una proporción equivalente de eventos húmedos y secos.

A medida que aumenta la escala temporal, este efecto se atenúa debido a la mayor acumulación de datos, lo que reduce la proporción de periodos sin precipitación acumulada y permite un ajuste más representativo de la distribución estadística. En consecuencia, el SPI presenta un comportamiento más suavizado, lo que facilita la identificación de eventos de sequía con mayor continuidad y duración en el tiempo. Sin embargo, este mismo efecto puede ir limitando la detección de eventos de corta duración, ya que la variabilidad del índice disminuye y tiende a diluir señales de cambios abruptos en la precipitación.

La Figura 8 presenta la extensión temporal de los eventos de sequía simulados mediante el índice SPI ajustado con probabilidad condicional, evaluados en cinco escalas temporales. Se consideró que un evento fue efectivamente detectado cuando el SPI registró valores negativos durante meses que coinciden con periodos históricamente reconocidos como secos, sin que estos deban ser necesariamente consecutivos. En cada fila se muestran eventos de sequía documentados previamente en la literatura, y los valores indican la cantidad total de meses con condiciones de sequía detectados por el índice para cada evento y escala. El color de cada celda refleja la duración relativa, normalizada respecto al período máximo esperado de cada evento según lo señalado en las referencias históricas (generalmente definido por los años de ocurrencia), lo que se representa en la barra de colores. Esta representación permite comparar la persistencia temporal simulada con la duración esperada según los antecedentes bibliográficos, proporcionando un marco para evaluar la coherencia del índice frente a eventos reales.

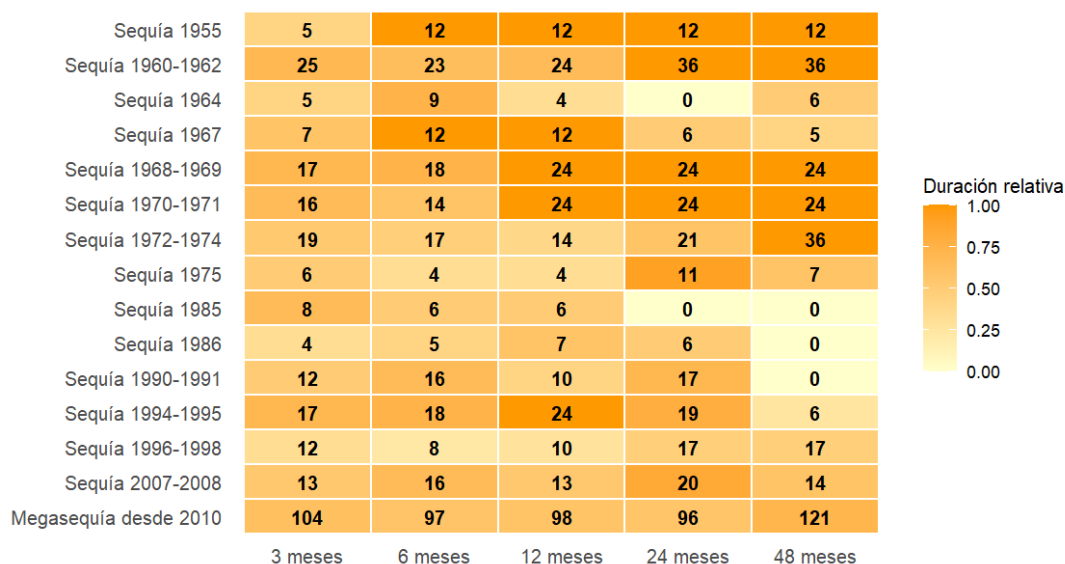


Figura 8: Extensión temporal de los eventos históricos de sequía simulados mediante el SPI con probabilidad condicional en la estación La Ortiga. La escala cromática indica la duración relativa de cada evento respecto a su período máximo esperado.

Se observa que, a escalas temporales más cortas, el índice SPI con probabilidad condicional tiende a representar los eventos de sequía como fenómenos más breves y fragmentados. Esto se relaciona con la alta sensibilidad del índice frente a variaciones puntuales en la precipitación, especialmente en meses con registros nulos o muy bajos, lo cual puede generar interrupciones o fluctuaciones abruptas en la identificación de eventos. A medida que se incrementa la escala temporal, el comportamiento del índice se suaviza y permite identificar sequías más prolongadas y continuas en el tiempo, capturando con mayor fidelidad la extensión de fenómenos de larga duración.

Sin embargo, esta tendencia no es uniforme en todos los casos. Por ejemplo, eventos como la sequía de 1985 tienden a ser poco reflejados o incluso omitidos a escalas más amplias (24 y 48 meses), lo que sugiere que la prolongación de la ventana temporal también puede diluir señales relevantes cuando los eventos son de duración intermedia o se encuentran entre periodos húmedos.

En la Figura 9 se presentan los porcentajes de aciertos, falsos positivos y falsos negativos obtenidos para la estación analizada, considerando la aplicación del enfoque de probabilidad condicional en el cálculo del SPI. La evaluación se realiza en cinco escalas temporales. Los resultados evidencian una mejora significativa en el comportamiento del índice respecto a los presentados en la Figura 5, especialmente para las escalas de 3 y 6 meses, donde se producían discontinuidades debido a la falta de precipitación acumulada en determinados periodos, una condición frecuente en cuencas con clima semiárido.

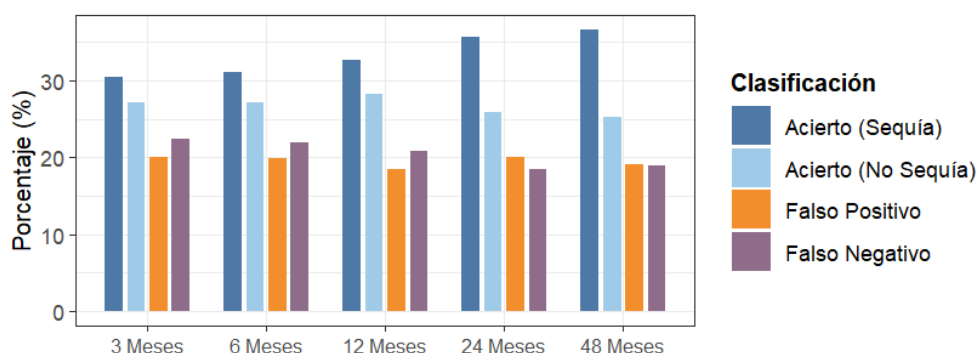


Figura 9: Rendimiento general del SPI con probabilidad condicional en la detección de sequías y periodos no secos en la estación La Ortiga.

5.2 Evaluación del desempeño del SRI frente a eventos históricos

Para evaluar la capacidad del Índice Estandarizado de Escorrentía (SRI) en la identificación de eventos de sequía en la cuenca en estudio, se contrastaron sus valores con siete eventos documentados históricamente entre noviembre de 1983 y septiembre de 2018, periodo para el cual se dispone de registros continuos de escorrentía. La Figura 10 muestra la evolución temporal del SRI para cinco escalas analizadas, destacando en color rojo los eventos de sequía observados. Se aprecia que, al aumentar la escala temporal, el índice suaviza las oscilaciones mensuales, lo que permite una mejor representación de las tendencias de largo plazo. Sin embargo, este efecto también conlleva una menor sensibilidad ante eventos abruptos o de corta duración, lo que puede limitar su capacidad de detección en dichos casos.

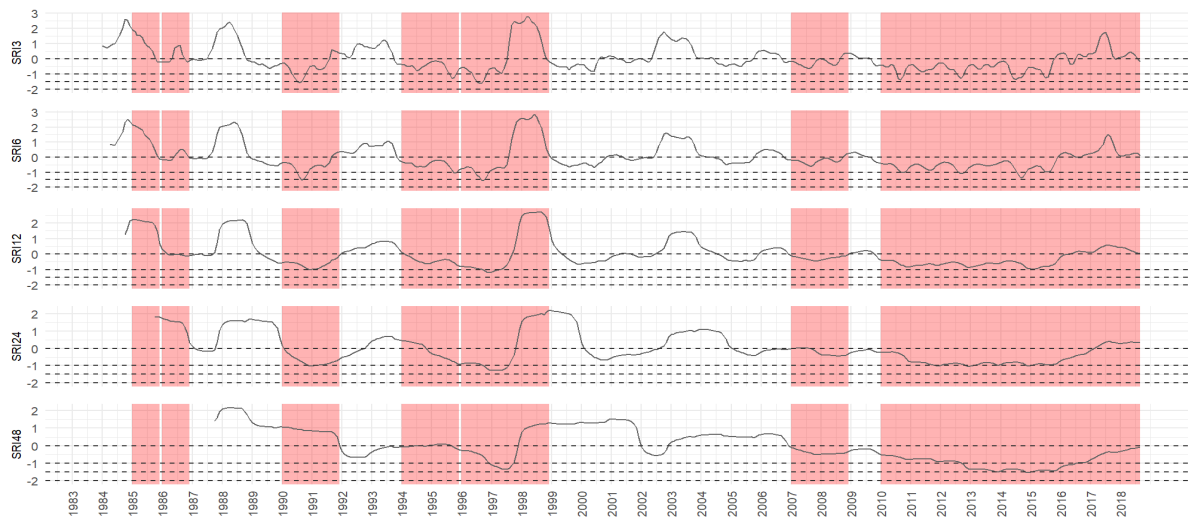


Figura 10: Serie temporal del SRI para cinco escalas, con eventos de sequía observados destacados en color rojo.

La Figura 11 muestra la cantidad de meses con condiciones de sequía simuladas mediante el SRI para cada uno de los siete eventos históricos documentados durante el período con registros de escorrentía. Se consideró que un evento fue efectivamente detectado cuando el SRI presentó valores negativos en los meses que coinciden con los periodos históricamente reconocidos como secos, sin requerir que dichos meses sean consecutivos. Esta representación permite comparar la persistencia temporal estimada por el índice con la duración esperada según los antecedentes bibliográficos. Se analizaron distintas escalas temporales, excluyendo aquellos eventos en los que no fue posible aplicar el análisis en alguna escala por falta de datos.

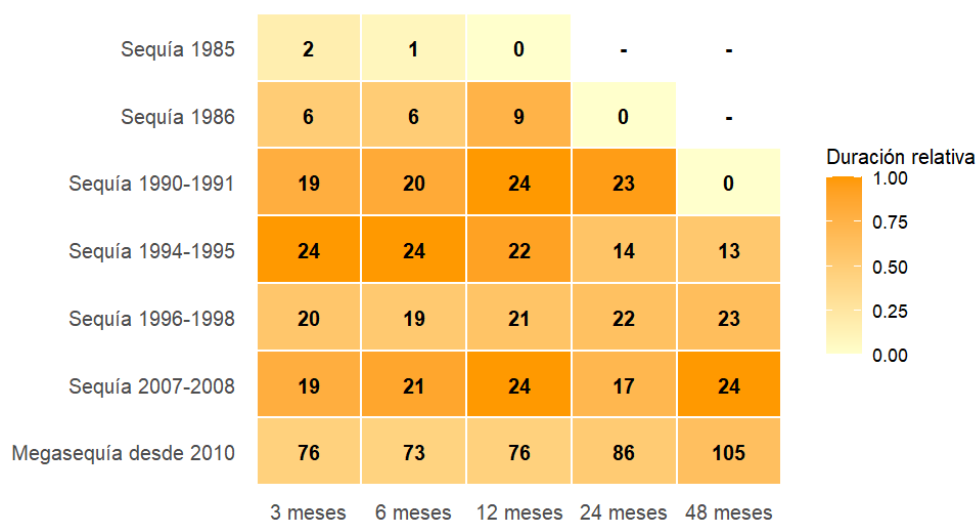


Figura 11: Extensión temporal de los eventos históricos de sequía simulados mediante el SRI. La escala cromática representa la duración relativa de cada evento respecto a su período máximo esperado.

Se observa que, en las escalas de 24 y 48 meses, eventos prolongados como la Megasequía iniciada en 2010 fueron detectados con mayor precisión. En contraste, el desempeño del índice fue menos consistente frente a eventos de corta duración, como las sequías de 1994 y 1995, los cuales fueron mejor representados en escalas más breves. Esta limitación se atribuye a la baja variabilidad del índice en escalas largas, producto del elevado número de meses acumulados, lo que suaviza las fluctuaciones y dificulta la detección de eventos breves.

Un caso particular fue la sequía de 1985, la cual no fue detectada de manera satisfactoria por el SRI en ninguna de las escalas evaluadas. Esta omisión podría explicarse por dos factores principales: por un lado, la corta duración del evento pudo haber impedido su identificación al quedar diluido en la agregación temporal del índice; por otro lado, es posible que este evento no haya generado una reducción significativa en la escurritía, lo que sugiere que podría no haber correspondido a una sequía de tipo hidrológico.

La Figura 12 expone los porcentajes relativos a la tasa de aciertos, falsos positivos y falsos negativos del índice bajo estudio, evaluados mediante un análisis cuantitativo en cinco escalas temporales distintas. Este desglose permite examinar la precisión y confiabilidad del índice en la detección de eventos, así como la variabilidad de su desempeño en función de las diferentes ventanas temporales consideradas para el cálculo y validación del índice.

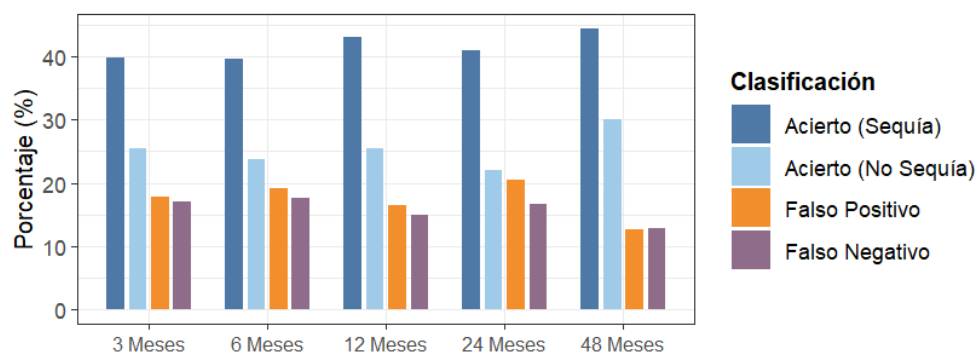


Figura 12: Desempeño global del SRI en la predicción de sequías y no sequías.

El desempeño del índice mejora de manera progresiva con el aumento de la escala temporal, evidenciando una mayor capacidad para identificar eventos de sequía en períodos más extensos. La

escala de 48 meses registra el mejor rendimiento, alcanzando cerca de un 75% de aciertos, seguida por la escala de 12 meses con un 70%. Sin embargo, se detecta una disminución en la eficacia para las escalas intermedias de 6 y 24 meses. Esta reducción puede explicarse porque dichas escalas se encuentran en un rango intermedio donde la sensibilidad del índice se ve afectada, disminuyendo su capacidad para detectar tanto eventos de corta duración como eventos prolongados. Adicionalmente, la imprecisión en la delimitación temporal de ciertos eventos puede favorecer una mejor adaptación del índice a escalas específicas, en función de la variabilidad temporal de cada evento.

5.3 Evaluación del desempeño del SPEI frente a eventos históricos

Con el objetivo de evaluar la capacidad del Índice Estandarizado de Precipitación y Evapotranspiración (SPEI) para identificar eventos de sequía en la cuenca estudiada, se compararon los valores del índice con quince eventos históricos documentados. El SPEI se calculó a partir de datos obtenidos del reanálisis climático global ERA5-Land, utilizando precipitaciones corregidas con información observada. Para ello, se emplearon siete métodos de estimación de la evapotranspiración potencial y cinco escalas temporales.

La Figura 13 muestra la evolución del SPEI calculado mediante el método de Penman-Monteith, el cual considera un mayor número de variables meteorológicas en la estimación de la evapotranspiración potencial. Se presentan tres estaciones seleccionadas de manera que representen de mejor forma la extensión de la cuenca, permitiendo visualizar la coherencia espacial en la evolución del índice. Las series obtenidas a partir de los otros métodos de estimación de la evapotranspiración potencial se incluyen en el Anexo.

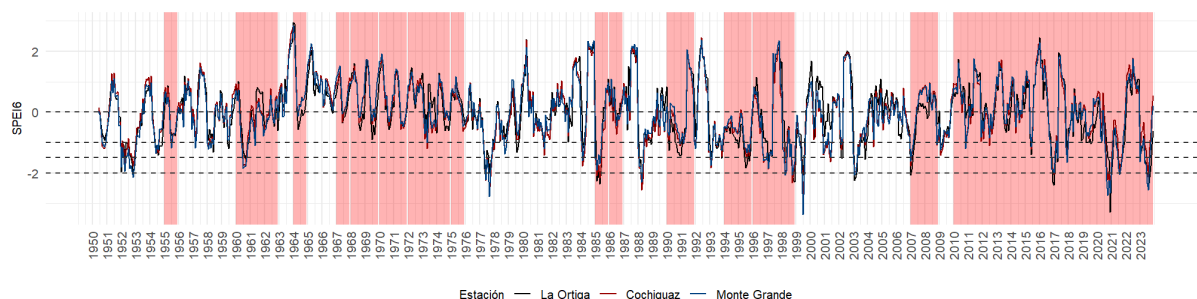


Figura 13: Evolución temporal del SPEI-6 estimado con Penman-Monteith en tres estaciones de la cuenca.

Se observó una marcada coherencia espacial en la evolución del SPEI entre las estaciones analizadas, lo que indica que los distintos puntos de la cuenca responden de manera similar frente a las condiciones de sequía. Esta consistencia quedó demostrada mediante el método de Penman-Monteith, que incorpora un mayor número de variables meteorológicas en la estimación de la evapotranspiración, lo cual respalda que un comportamiento similar se mantenga también en los métodos de menor complejidad. En consecuencia, se seleccionó la estación La Ortiga como caso representativo para la exposición principal de los resultados, facilitando una presentación más clara y evitando la reiteración de patrones que se repiten en las demás estaciones.

La Figura 14 ilustra la evolución temporal del SPEI calculado mediante el método de Thornthwaite para cinco escalas diferentes, destacando en color rojo los eventos de sequía identificados. Este gráfico permite visualizar la variación de las condiciones de humedad relativa a lo largo del tiempo y comparar la respuesta del índice en distintas escalas temporales.

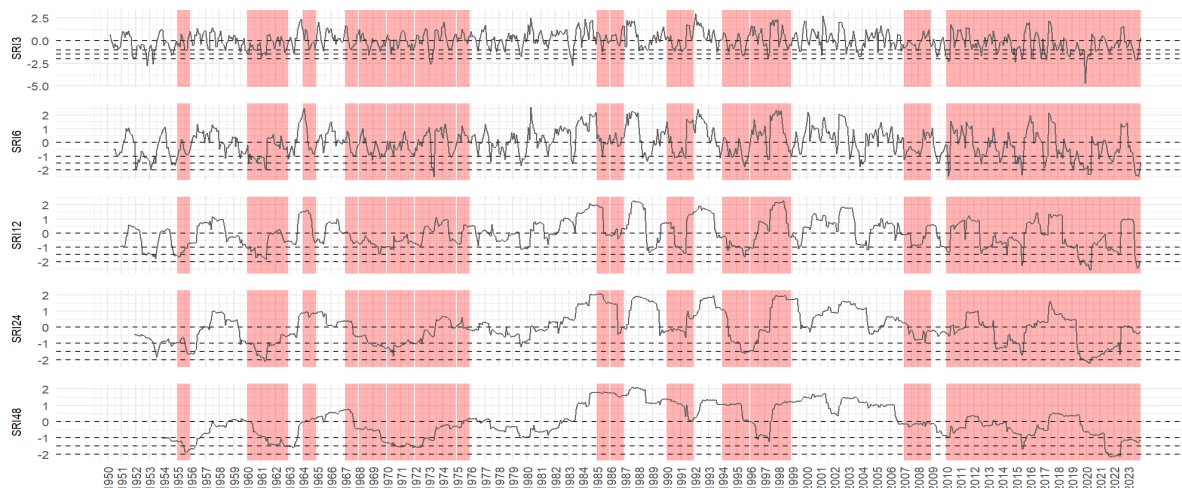


Figura 14: Serie SPEI utilizando Thornthwaite en cinco escalas con eventos de sequía observados en rojo, estación La Ortiga.

El método de Thornthwaite, al basarse únicamente en la temperatura media, tiende a sobreestimar la evapotranspiración potencial en zonas áridas y semiáridas. Esta limitación puede explicar algunas desviaciones en la magnitud de las anomalías del SPEI, especialmente en escalas temporales cortas, donde el índice presenta mayor variabilidad y puede detectar eventos poco representativos. Estas oscilaciones reflejan la sensibilidad del método a anomalías térmicas de corto plazo, así como posibles errores sistemáticos en los datos de temperatura del reanálisis ERA5-Land. A pesar de ello, incluso en escalas breves, el SPEI identifica eventos relevantes, como la sequía de 1960–1962 y la megasequía iniciada en 2010. En escalas más largas, la capacidad de detección mejora considerablemente, mostrando mayor estabilidad y coherencia en la caracterización de déficits hídricos prolongados. La concordancia entre los periodos con valores negativos persistentes del SPEI y los eventos históricos de sequía resaltados en rojo respalda la capacidad del método para representar la evolución temporal de estos eventos.

La Figura 15 muestra la evolución temporal del SPEI calculado mediante el método de Hargreaves para las escalas analizadas, destacando en rojo los eventos de sequía históricos. En el gráfico se aprecia claramente la estabilidad del índice, como se evidencia en el evento entre 2007 y 2008, representado de manera consistente en casi todas las escalas.

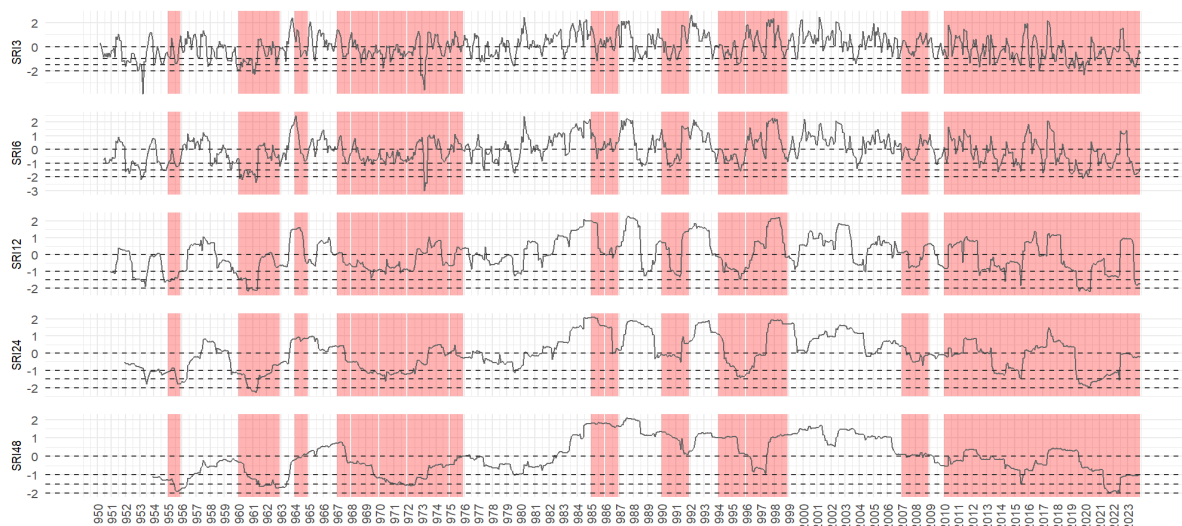


Figura 15: Serie SPEI utilizando Hargreaves en cinco escalas con eventos de sequía observados en rojo, estación La Ortiga.

El SPEI estimado mediante el método de Hargreaves muestra una buena correspondencia con los eventos históricos de sequía en casi todas las escalas analizadas. Destaca especialmente por su consistencia entre 6 y 24 meses, ofreciendo detecciones oportunas y una menor sensibilidad a las fluctuaciones temporales de corto plazo. En comparación con Thornthwaite, genera menos señales falsas o erráticas y capta con mayor precisión la duración real de las sequías. Esto se explica por su formulación, ya que este método considera tanto la temperatura máxima como la mínima, lo que permite una mejor representación de la variabilidad térmica que influye en la evapotranspiración real.

La Figura 16 muestra la evolución temporal del SPEI calculado mediante el método de Penman-Monteith para las escalas analizadas. En escalas cortas, se observan oscilaciones marcadas en la serie temporal y detecciones que no coinciden completamente con los eventos históricos de sequía, evidenciando ciertas limitaciones en la representación del déficit hídrico en periodos breves.



Figura 16: Serie SPEI utilizando Penman-Monteith en cinco escalas con eventos de sequía observados en rojo, estación La Ortiga.

A pesar de ser considerado un método físicamente más robusto, Penman-Monteith muestra limitaciones en escalas cortas, donde la respuesta del SPEI resulta más inestable y menos consistente con los eventos históricos de sequía. Esta discrepancia podría explicarse por la dependencia del método a múltiples variables meteorológicas, todas ellas obtenidas de reanálisis climáticos globales, las cuales incorporan incertidumbres inherentes asociadas a su calidad, resolución y representatividad. Aunque en escalas más largas se aprecia una mayor coherencia del índice, persisten deficiencias en la sincronización temporal, reflejadas en una alta frecuencia de falsos negativos que limitan su capacidad para representar adecuadamente la evolución de eventos de sequía.

A continuación, se presenta la cantidad de meses en que se registraron condiciones de sequía simuladas mediante el SPEI, considerando los distintos métodos de estimación de la evapotranspiración empleados en este estudio. Se definió como detección válida la coincidencia de valores negativos del índice con periodos secos documentados, sin requerir continuidad mensual. La comparación entre la duración simulada y la reportada en la literatura, expresada como una duración relativa, permite evaluar la coherencia del índice frente a los eventos históricos.

La Figura 17 presenta el análisis del SPEI a una escala temporal de 3 meses, caracterizada por una alta variabilidad y una limitada capacidad para acumular el déficit hídrico. Al ser una escala de respuesta rápida, restringe la efectividad del SPEI para detectar eventos de sequía prolongados, pero resulta útil para observar su comportamiento frente a fluctuaciones de corto plazo.

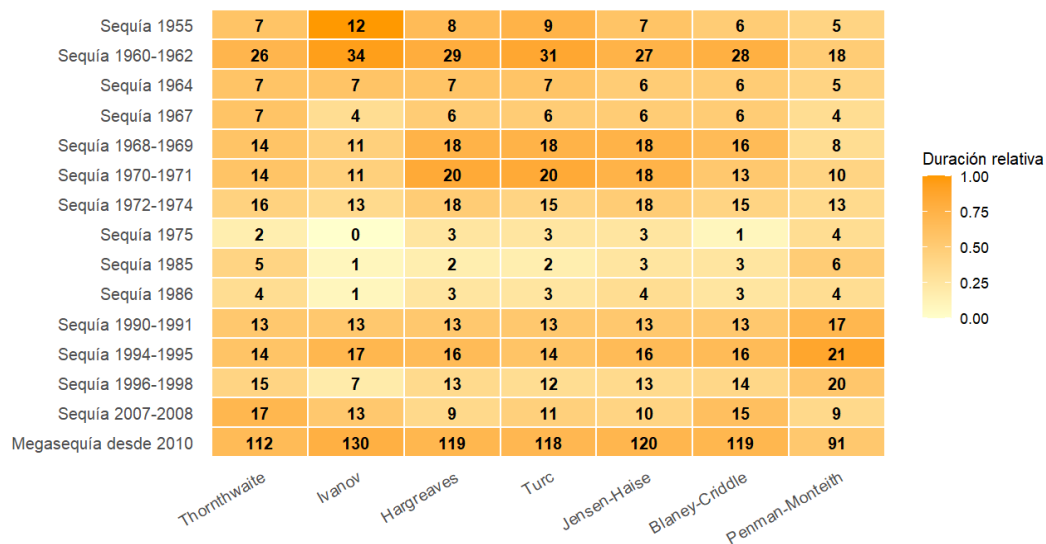


Figura 17: Extensión temporal de los eventos históricos de sequía simulados mediante el SPEI-3 en la estación La Ortiga. La escala cromática indica la duración relativa de cada evento respecto a su período máximo esperado.

En esta escala, los métodos Thornthwaite, Hargreaves y Turc muestran una adecuada detección temporal por evento. En contraste, métodos como Ivanov y Blaney & Criddle exhiben un desempeño intermedio, identificando de manera leve eventos como los de 1975, 1985 y 1986. Por su parte, el método de Penman-Monteith presenta el rendimiento más bajo, detectando una menor cantidad de meses de sequía por evento en comparación con los otros métodos. Esto sugiere que su desempeño se ve afectado por la alta variabilidad en la estimación de la evapotranspiración derivada del reanálisis climático global ERA5-Land.

La evaluación del SPEI en la escala temporal de 12 meses, tal como se muestra en la figura 18, revela una mejora significativa en la capacidad del índice para detectar eventos de sequía, en comparación con escalas más cortas. Este comportamiento es esperable, ya que al ampliarse la ventana temporal se reducen los efectos de la variabilidad meteorológica de corto plazo, permitiendo resaltar con mayor claridad las tendencias hidrológicas de fondo, más representativas de condiciones de sequía sostenida.

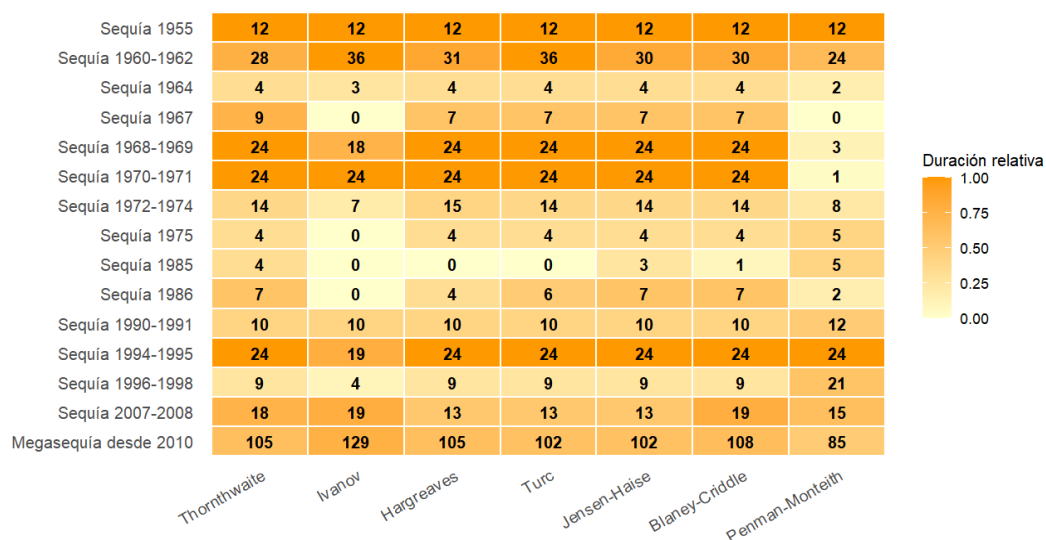


Figura 18: Extensión temporal de los eventos históricos de sequía simulados mediante el SPEI-12 en la estación La Ortiga. La escala cromática indica la duración relativa de cada evento respecto a su período máximo esperado.

Dentro de este contexto, los métodos empíricos basados principalmente en la temperatura del aire (como Thornthwaite, Hargreaves, Turc, Jensen-Haise y Blaney & Criddle) evidencian un buen desempeño general. En la mayoría de los casos, logran una adecuada correspondencia con los principales eventos históricos de sequía registrados en la cuenca, con la excepción del evento de 1985, que no es capturado de forma consistente. Este comportamiento sugiere que estos métodos se adaptan relativamente bien al uso con datos obtenidos del reanálisis climático global ERA5-Land, en particular porque la temperatura del aire (variable clave en su formulación) suele estar estimada con mayor precisión en este tipo de productos reanalizados.

Sin embargo, se observan inconsistencias en los resultados obtenidos con los métodos de Ivanov y Penman-Monteith, los cuales muestran un comportamiento menos uniforme frente a distintos eventos y, en algunos casos, una incapacidad para detectar de manera coherente las condiciones de sequía documentadas. En esta escala, el método de Ivanov no logra un desempeño destacado, presentando dificultades reiteradas para identificar varios eventos relevantes. Por su parte, el método de Penman-Monteith exhibe una mejora marginal respecto a su rendimiento en la escala de tres meses, aunque mantiene un desempeño general bajo, con una marcada tendencia a la subdetección de eventos. Asimismo, presenta una alta variabilidad en su capacidad para capturar sequías, probablemente asociada a su sensibilidad frente a errores en la estimación de las múltiples variables meteorológicas que requiere.

La Figura 19 presenta el análisis del SPEI a una escala temporal de 48 meses, orientada a la detección de sequías prolongadas y persistentes. Al ampliar la ventana de acumulación, se logra resaltar con mayor claridad la señal hidrológica de fondo, lo que permite una mejor representación de eventos estructurales de larga duración, aunque con menor sensibilidad para capturar déficits de carácter transitorio.

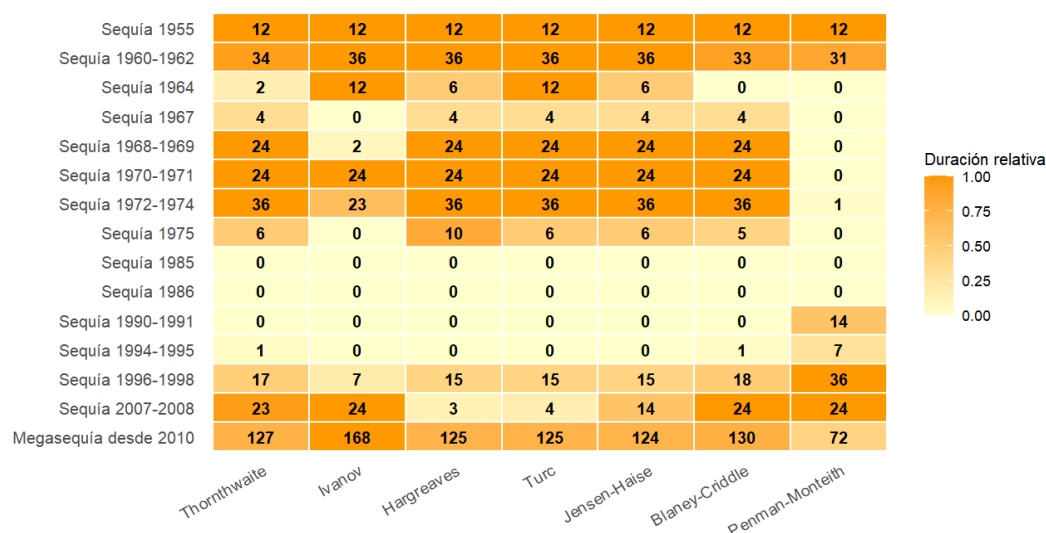


Figura 19: Extensión temporal de los eventos históricos de sequía simulados mediante el SPEI-48 en la estación La Ortiga. La escala cromática indica la duración relativa de cada evento respecto a su período máximo esperado.

En cuanto al desempeño de los métodos de estimación de la evapotranspiración, los enfoques empíricos Thornthwaite, Hargreaves, Turc y Jensen-Haise muestran una notable coherencia, identificando de manera consistente los principales eventos históricos, incluida la megasequía en curso desde 2010. En contraste, Blaney & Criddle omite puntualmente la sequía de 1964, evidenciando un menor grado de robustez, mientras que el método de Ivanov subestima la duración de cuatro eventos detectados por los métodos más confiables, como el de 1968–1969. Finalmente, Penman-Monteith refleja con menor precisión la extensión de sequías prolongadas, probablemente debido a la mayor incertidumbre asociada al uso de múltiples variables meteorológicas de reanálisis.

La Figura 20 presenta los porcentajes de aciertos, falsos positivos y falsos negativos obtenidos por el índice SPEI para cada escala temporal evaluada, según el método de estimación de la evapotranspiración potencial utilizado en su cálculo.



Figura 20: Comparación del desempeño del SPEI en la detección de sequías en La Ortiga con distintos métodos de evapotranspiración.

Los resultados obtenidos evidencian una relación significativa entre la escala temporal utilizada en el cálculo del SPEI y su capacidad para identificar eventos de sequía previamente documentados. En escalas cortas, se aprecia una mayor incertidumbre en la detección, con tasas de acierto cercanas al 30%, lo que se asocia a la elevada variabilidad de los periodos reducidos y a la sensibilidad del índice frente a fluctuaciones de corto plazo. En cambio, al aumentar la escala temporal, se fortalece la correspondencia con los registros históricos: en 12 meses los aciertos se sitúan en torno al 32%, mientras que en 48 meses algunos métodos superan el 36%. Esto sugiere una mayor estabilidad del índice y una mejor capacidad para integrar señales climáticas persistentes.

En cuanto a los métodos utilizados para estimar la evapotranspiración potencial, se observó un mejor desempeño en aquellos de naturaleza empírica que requieren un número reducido de variables meteorológicas, destacando los métodos de Ivanov, Hargreaves, Blaney & Criddle y Thornthwaite. Este comportamiento se explica por su dependencia principal de la temperatura del aire, lo que les confiere una estructura más sencilla y, por ende, menor susceptibilidad a errores derivados de la representación inexacta de variables atmosféricas complejas. En este contexto, y considerando que los datos climáticos utilizados provienen del producto ERA5-Land, dicha simplicidad representa una ventaja, especialmente en regiones donde las condiciones locales pueden no ser adecuadamente captadas por productos de reanálisis climático global. Por el contrario, métodos más complejos como el de Penman-Monteith, que integran múltiples variables meteorológicas, presentaron un desempeño comparativamente inferior, probablemente debido a la acumulación de incertidumbres asociadas a la calidad, resolución y representatividad de dichos insumos climáticos.

6 Conclusiones

El presente estudio permitió evaluar la aplicabilidad de los índices estandarizados SPI, SRI y SPEI en la detección de sequías en una cuenca del norte de Chile, mediante el análisis en distintas escalas temporales y considerando diversos métodos de estimación de la evapotranspiración. Al contrastar los resultados con registros históricos de eventos documentados, se evidenció que los criterios de severidad, duración y localización utilizados en las fuentes históricas responden a impactos observables más que a umbrales técnicos, lo que dificulta una comparación directa y plantea desafíos en la evaluación cuantitativa de la severidad de los eventos.

De los tres índices analizados, el SRI demostró ser el más confiable, con una tasa de acierto cercana al 65% en la escala de tres meses, la cual aumenta progresivamente en escalas más prolongadas, mostrando una adecuada adaptación a las características hidrológicas de la cuenca. En contraste, el SPI presentó limitaciones significativas en su desempeño, asociadas a la baja pluviometría de la zona y a su alta sensibilidad frente a la ausencia de precipitaciones. Esta condición restringe su aplicabilidad en escalas temporales cortas, dado que el método requiere datos distintos de cero para ajustar correctamente su distribución estadística. Si bien la incorporación de la probabilidad condicional permite extender su uso en contextos con registros nulos, esta opción limita el análisis de la severidad de los eventos y solo es efectiva cuando la proporción de periodos sin precipitación acumulada no supera el 50% del total, debido a la naturaleza simétrica de la distribución normal utilizada para estandarizar el índice. En este contexto, se recomienda aplicar el SPI únicamente en escalas temporales más amplias, y siempre que se cuente con series de datos representativas del período analizado.

En cuanto al SPEI, se confirmó su robustez para el análisis de sequías, aunque su desempeño depende en gran medida del método utilizado para estimar la evapotranspiración potencial, especialmente cuando se emplean datos de productos satelitales o reanálisis climáticos. Se observó que algunos métodos entregan resultados más estables y consistentes, resaltando la importancia de una selección adecuada para mejorar la precisión del índice.

En este sentido, se constató que los métodos físicamente más complejos, como Penman-Monteith, no garantizan una mejor detección de eventos debido a las incertidumbres asociadas al uso de datos de ERA5-Land, los cuales requieren múltiples variables meteorológicas susceptibles de acumular errores. De manera similar, métodos simplificados como Ivanov tampoco logran representar adecuadamente las condiciones locales, ya que, si bien presenta un alto porcentaje de aciertos, tiende a subestimar la duración de ciertos eventos históricos a medida que aumenta la escala temporal del índice. Un ejemplo de ello es la sequía de 1968–1969 en la escala de 48 meses, la cual sí es identificada por otros métodos que presentan un porcentaje de aciertos similar. Por el contrario, en contextos con estaciones incompletas o de calidad limitada, los métodos empíricos como Hargreaves, Thornthwaite y Blaney & Criddle ofrecen un equilibrio adecuado entre simplicidad, estabilidad y capacidad predictiva. En cambio, los métodos físicamente más complejos requieren una validación local de los datos climáticos, lo que implica contar con información más precisa y confiable para evaluar correctamente su desempeño en la detección de sequías.

Las escalas temporales también resultaron determinantes: las cortas permiten identificar eventos breves y abruptos, mientras que las más largas capturan mejor procesos prolongados y persistentes. Este comportamiento es esperable, ya que al ampliar la ventana temporal disminuye la influencia de la variabilidad meteorológica de corto plazo, resaltando las tendencias hidrológicas de fondo. Esto confirma la utilidad del análisis multiescalar como herramienta complementaria en la caracterización de sequías.

En conjunto, los resultados refuerzan la necesidad de avanzar hacia el desarrollo de herramientas más precisas y adaptativas, capaces de integrar coherentemente las múltiples variables que inciden en el fenómeno de la sequía, y que reduzcan las limitaciones asociadas a la disponibilidad y calidad de la información meteorológica.

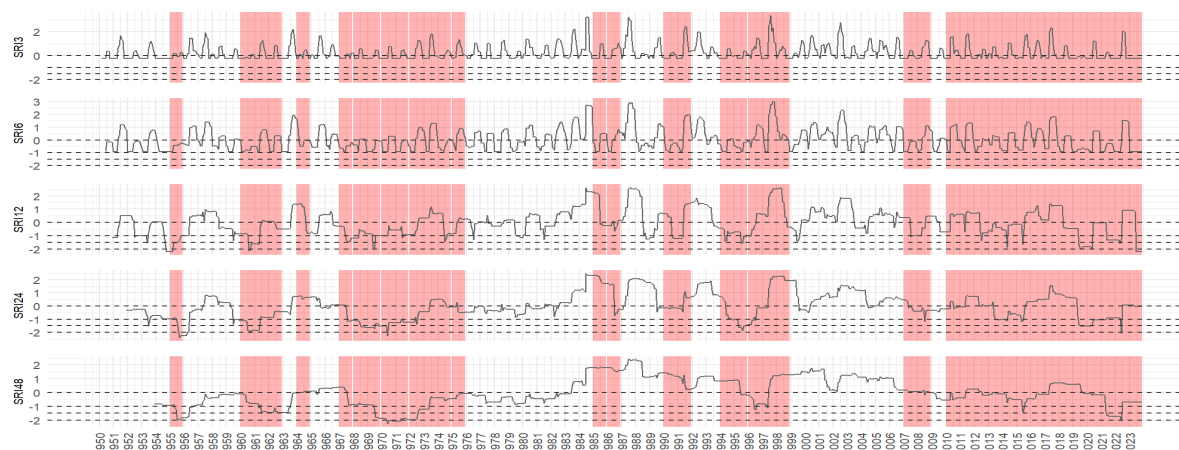
7 Referencias

- Ahmad, M. I., Sinclair, C. D., & Werritty, A. (1988). Log-logistic flood frequency analysis. *Journal of Hydrology*, 98(3–4), 205–224. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(88\)90015-7](https://doi.org/10.1016/0022-1694(88)90015-7)
- Aldunce, P., & González, M. (2009). *Desastres asociados al clima en la agricultura y medio rural en Chile*. Universidad de Chile.
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). *Crop evapotranspiration – Guidelines for computing crop water requirements* (FAO Irrigation and Drainage Paper 56). <https://www.fao.org/3/x0490e/x0490e00.htm>
- Arias Rodriguez, O. (2021). La Mega Sequía en Chile (2010-2020): Una revisión general de la catástrofe. In *Revista de Indagación Científica Nothofagus* (Vol. 6).
- Blaney, H. F., & Criddle, W. D. (1950). *Determining water requirements in irrigated areas from climatological and irrigation data*. USDA Soil Conservation Service.
- Camargo González, I., & Mariscal Ureta, K. E. (2012). Escasez de agua: en busca de soluciones normativas. *Economía Informa*, 374, 53–74.
- CR2. (2015). *Informe a la Nación*. www.cr2.cl/megasequia
- Dirección General de Aguas (DGA) Ministerio de Obras Públicas. (2024). *Banco Nacional de Aguas - Reportes de Estaciones*. <https://snia.mop.gob.cl/BNAConsultas/reportes>
- Gudmundsson, L., Bremnes, J. B., Haugen, J. E., & Engen Skaugen, T. (2012). *Technical Note: Downscaling RCM precipitation to the station scale using quantile mapping – a comparison of methods*. <https://doi.org/10.5194/hessd-9-6185-2012>
- Hargreaves, G. H., & Samani, Z. A. (1985). Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied Engineering in Agriculture*, 1(2), 96–99.
- Haslinger, K., Schöner, W., & Anders, I. (2016). Future drought probabilities in the Greater Alpine Region based on COSMO-CLM experiments - Spatial patterns and driving forces. *Meteorologische Zeitschrift*, 25(2), 137–148. <https://doi.org/10.1127/metz/2015/0604>
- Horion, S., Carrão, H., Singleton, A., Barbosa, P., & Vogt, J. (2012). *JRC experience on the development of Drought Information Systems: Europe, Africa and Latin America*. OPOCE.
- Ivanov, N. N. (1954). On the theory of evaporation from the surface of the land. *Transactions of the Main Geophysical Observatory*, 24, 104–122.
- Jensen, M. E., & Haise, H. R. (1963). Estimating evapotranspiration from solar radiation. *Journal of the Irrigation and Drainage Division*, 89(4), 15–41.
- Kabat, P., Schulze, R. E., Hellmuth, M. E., & Veraart, J. A. (2003). *Coping with Impacts of Climate Variability and Climate Change in Water Management: A Scoping Paper*. www.waterandclimate.org
- Kim, W., Park, E., Jo, H. W., Roh, M., Kim, J., Song, C., & Lee, W. K. (2023). A meta-analytic review on the spatial and climatic distribution of meteorological drought indices. In *Environmental Reviews* (Vol. 31, Issue 1, pp. 95–110). Canadian Science Publishing. <https://doi.org/10.1139/er-2021-0098>
- Mckee, T. B., Doesken, N. J., & Kleist, J. (1993). The Relationship of Drought Frequency and Duration to Time Scales. In *Eighth Conference on Applied Climatology*.
- Meza, F. J. (2013). Recent trends and ENSO influence on droughts in Northern Chile: An application of the Standardized Precipitation Evapotranspiration Index. *Weather and Climate Extremes*, 1, 51–58. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2013.07.002>

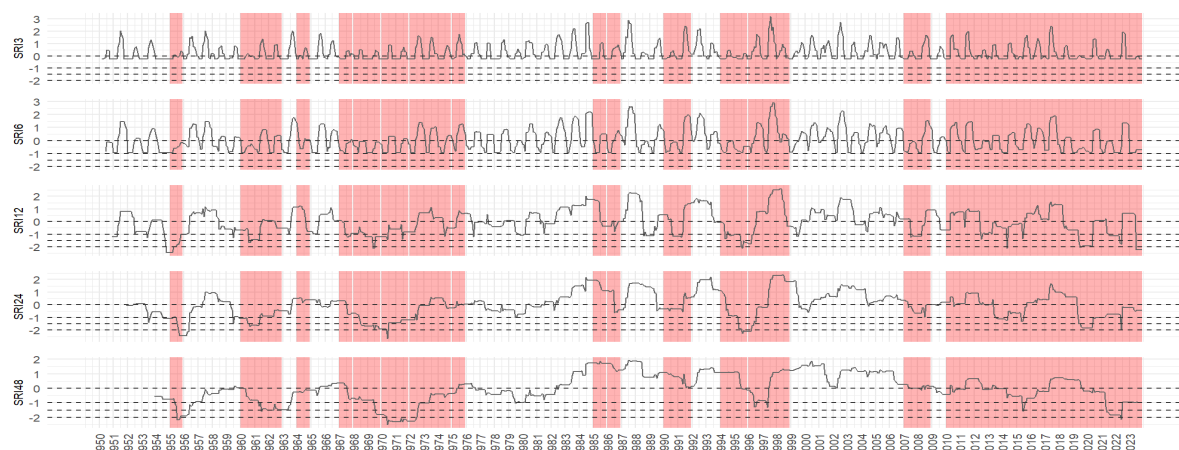
- Mishra, A. K., & Singh, V. P. (2010). A review of drought concepts. In *Journal of Hydrology* (Vol. 391, Issues 1–2, pp. 202–216). <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.07.012>
- Monsalve, G. (1995). *Hidrología en la Ingeniería, 2da Edición*. Alfaomega Grupo Editor.
- Montecinos, S., Guti Errez, J. R., L Opez-Cort Es, F., & Opez, D. L. (2016). Climatic characteristics of the semi-arid Coquimbo Region in Chile. *Journal of Arid Environments*, 126, 7–11. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2015.09.018>
- Muñoz-Sabater, J., Dutra, E., Agustí-Panareda, A., Albergel, C., Arduini, G., Balsamo, G., Boussetta, S., Choulga, M., Harrigan, S., Hersbach, H., Martens, B., Miralles, D. G., Piles, M., Rodríguez-Fernández, N. J., Zsoter, E., Buontempo, C., & Thépaut, J. N. (2021). ERA5-Land: A state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications. *Earth System Science Data*, 13(9), 4349–4383. <https://doi.org/10.5194/ESSD-13-4349-2021>
- Paulo, A. A., & Pereira, L. S. (2006). Drought concepts and characterization: Comparing drought indices applied at local and regional scales. *Water International*, 31(1), 37–49. <https://doi.org/10.1080/02508060608691913>
- Piuzzi, B., Alvear, N., & Oyarzo, M. (2013). *Las condiciones de sequía y estrategias de gestión en Chile*.
- Shamshirband, S., Hashemi, S., Salimi, H., Samadianfard, S., Asadi, E., Shadkani, S., Kargar, K., Mosavi, A., Nabipour, N., & Chau, K. W. (2020). Predicting Standardized Streamflow index for hydrological drought using machine learning models. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 14(1), 339–350. <https://doi.org/10.1080/19942060.2020.1715844>
- Shukla, S., & Wood, A. W. (2008a). Use of a standardized runoff index for characterizing hydrologic drought. *Geophysical Research Letters*, 35(2). <https://doi.org/10.1029/2007GL032487>
- Shukla, S., & Wood, A. W. (2008b). Use of a standardized runoff index for characterizing hydrologic drought. *Geophysical Research Letters*, 35(2). <https://doi.org/10.1029/2007GL032487>
- Stagge, J. H., Tallaksen, L. M., Gudmundsson, L., Van Loon, A. F., & Stahl, K. (2015). Candidate Distributions for Climatological Drought Indices (SPI and SPEI). *International Journal of Climatology*, 35(13), 4027–4040. <https://doi.org/10.1002/joc.4267>
- Tallaksen, L. M., & van Lanen, H. A. J. (2023). Hydrological Drought: Processes and Estimation Methods for Streamflow and Groundwater, Second Edition. In *Hydrological Drought: Processes and Estimation Methods for Streamflow and Groundwater, Second Edition*. <https://doi.org/10.1016/C2017-0-03464-X>
- Thornthwaite, C. W. (1948). An approach toward a rational classification of climate. *Geographical Review*, 38(1), 55–94.
- Turc, L. (1961). Estimation of irrigation water requirements, potential evapotranspiration: A simple climatic formula evolved up to date. *Annales Agronomiques*, 12(1), 13–49.
- Urrutia, R., & Lanza, C. (1993). *Catastrofes en Chile 1541-1992*. Editorial La Noria.
- Van Loon, A. F. (2015). Hydrological drought explained. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 2(4), 359–392. <https://doi.org/10.1002/WAT2.1085>
- Velasco, I., Ochoa, L., & Gutiérrez, C. (2005). *Sequía, un problema de perspectiva y gestión Derechos reservados de El Colegio de Sonora*.
- Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S., & López-Moreno, J. I. (2010). A multiscalar drought index sensitive to global warming: The standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of Climate*, 23(7), 1696–1718. <https://doi.org/10.1175/2009JCLI2909.1>
- Wilhite, D. A., Glantz, M. H., & And Glantz, M. H. (1985). *Understanding the Drought Phenomenon: The Role of Definitions*. <http://digitalcommons.unl.edu/droughtfacpubhttp://digitalcommons.unl.edu/droughtfacpub/20>

Zargar, A., Sadiq, R., Naser, B., & Khan, F. I. (2011). A review of drought indices. In *Environmental Reviews* (Vol. 19, Issue 1, pp. 333–349). National Research Council of Canada. <https://doi.org/10.1139/a11-013>

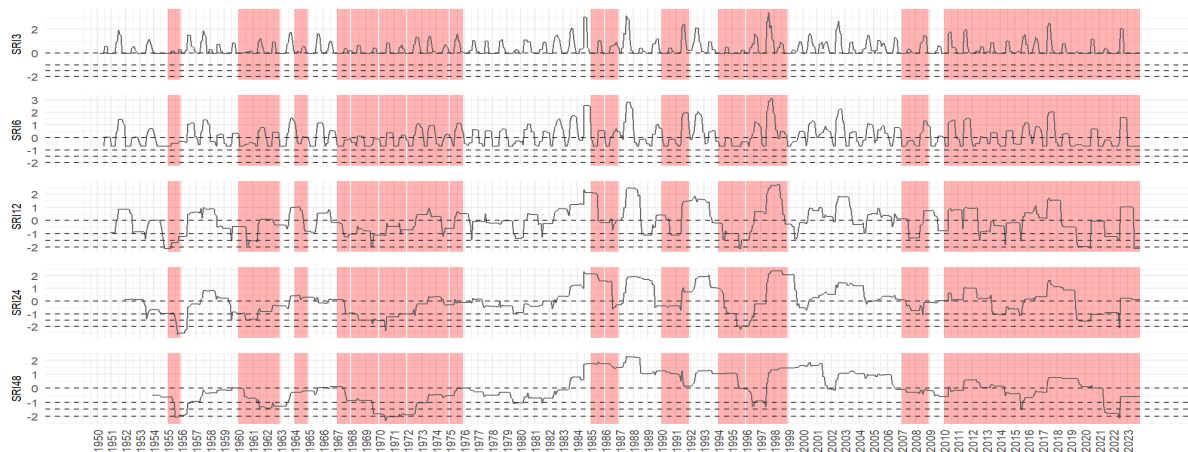
8 Anexos



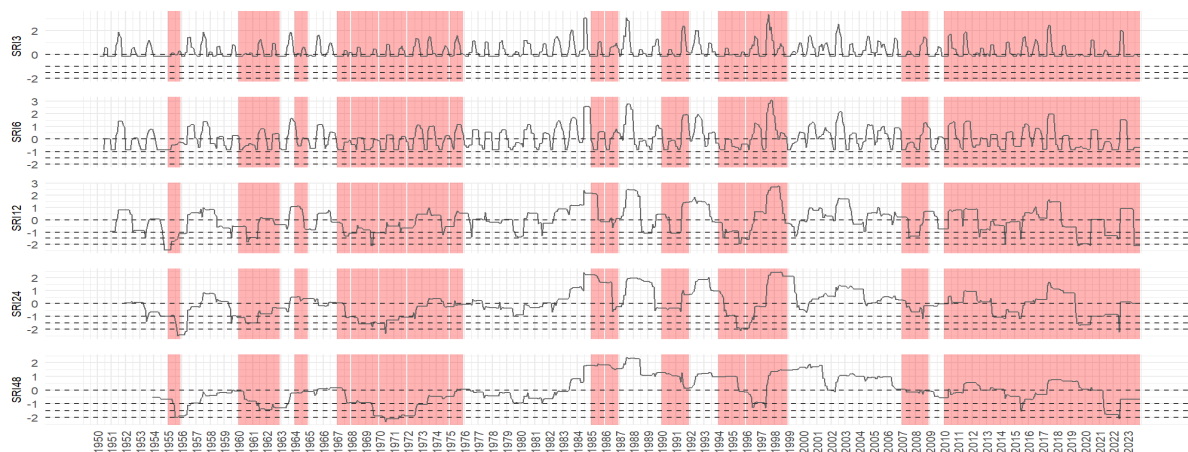
Anexo 1: Serie SPI con probabilidad condicional en cinco escalas temporales, con eventos de sequía observados en rojo. Estación Los Nichos.



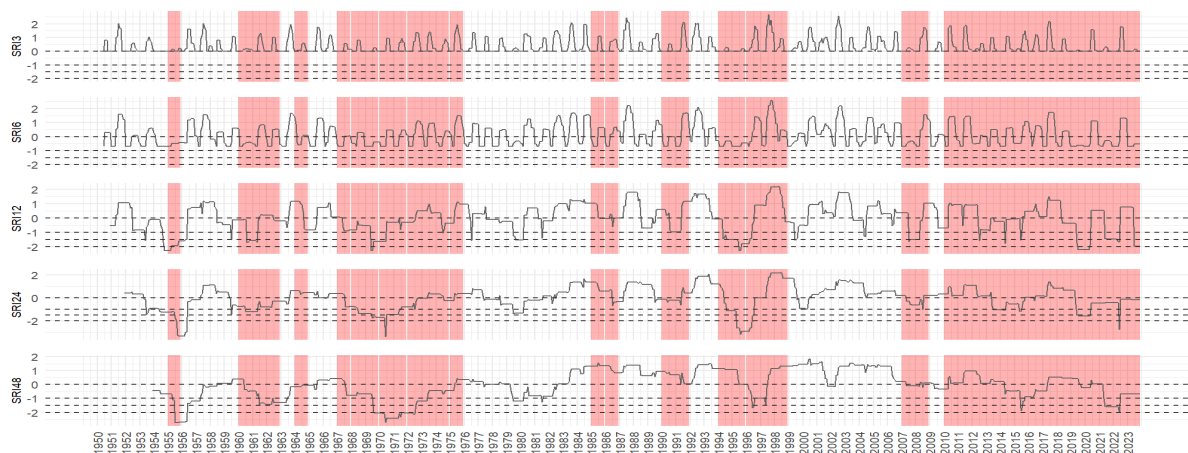
Anexo 2: Serie SPI con probabilidad condicional en cinco escalas temporales, con eventos de sequía observados en rojo. Estación Cochiguaz.



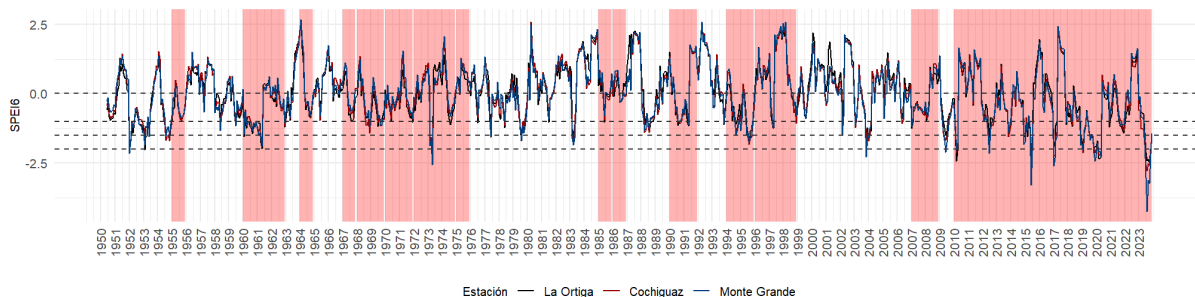
Anexo 3: Serie SPI con probabilidad condicional en cinco escalas temporales, con eventos de sequía observados en rojo. Estación Monte Grande.



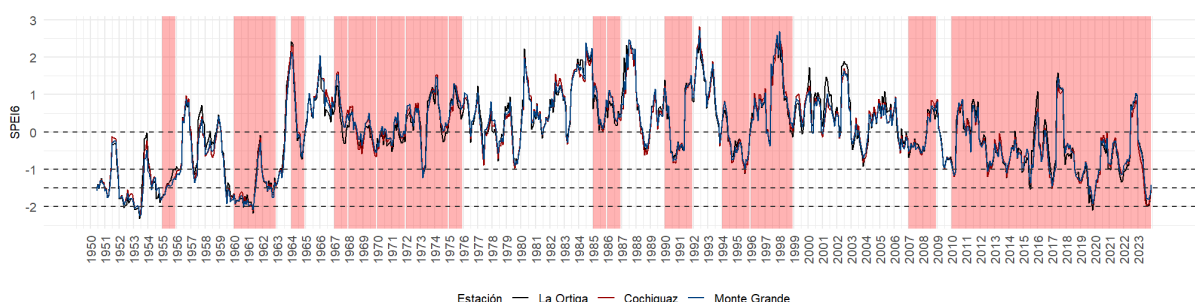
Anexo 4: Serie SPI con probabilidad condicional en cinco escalas temporales, con eventos de sequía observados en rojo. Estación Pisco Elqui DMC.



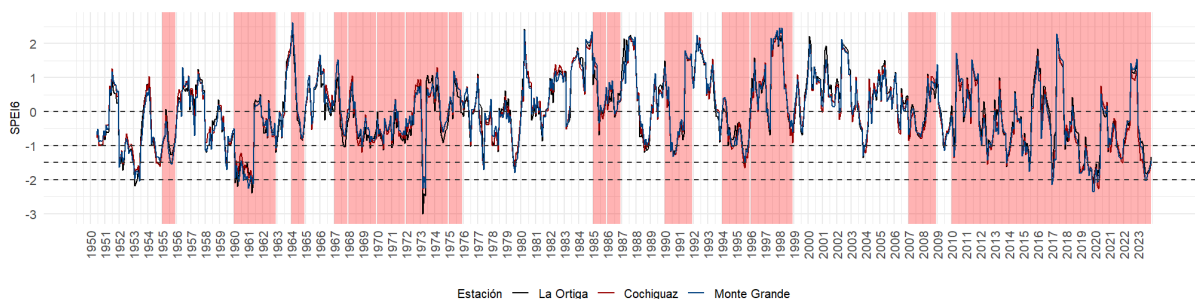
Anexo 5: Serie SPI con probabilidad condicional en cinco escalas temporales, con eventos de sequía observados en rojo. Estación Rio Claro en Rivadavia.



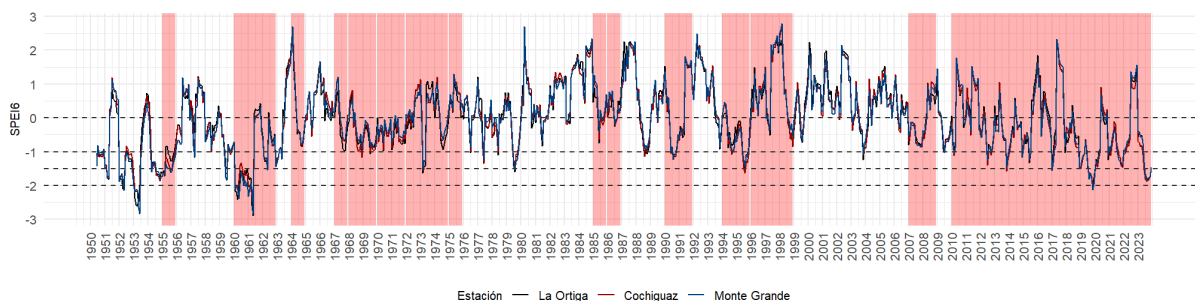
Anexo 6: Evolución temporal del SPEI-6 estimado con Thornthwaite en tres estaciones de la cuenca.



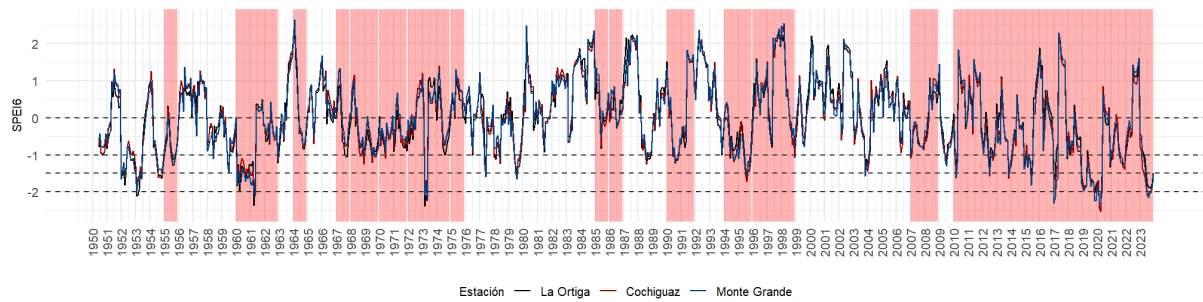
Anexo 7: Evolución temporal del SPEI-6 estimado con Ivanov en tres estaciones de la cuenca.



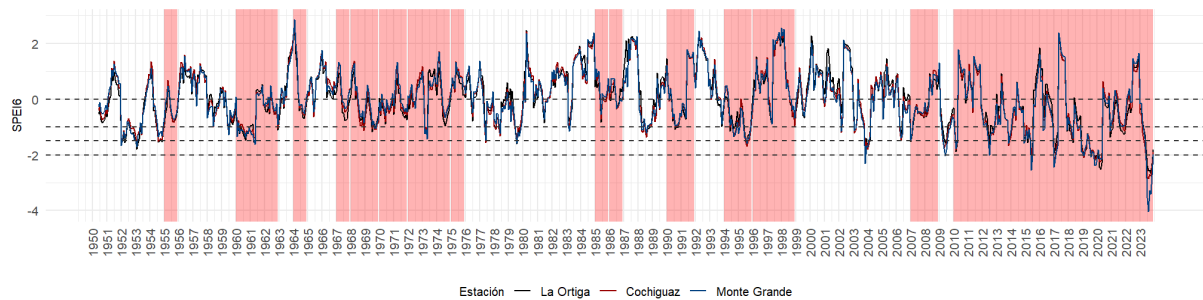
Anexo 8: Evolución temporal del SPEI-6 estimado con Hargreaves en tres estaciones de la cuenca.



Anexo 9: Evolución temporal del SPEI-6 estimado con Turc en tres estaciones de la cuenca.



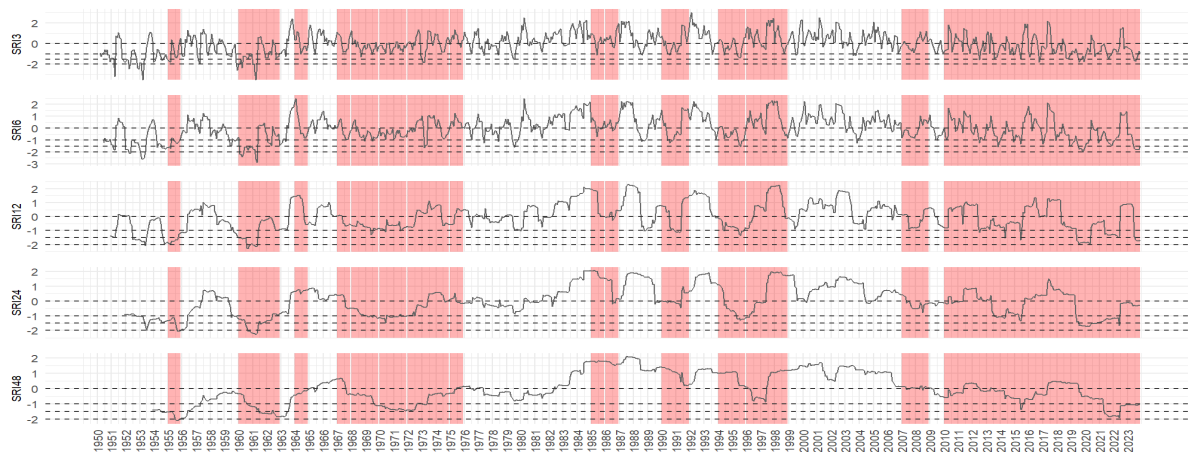
Anexo 10: Evolución temporal del SPEI-6 estimado con Jensen-Haise en tres estaciones de la cuenca.



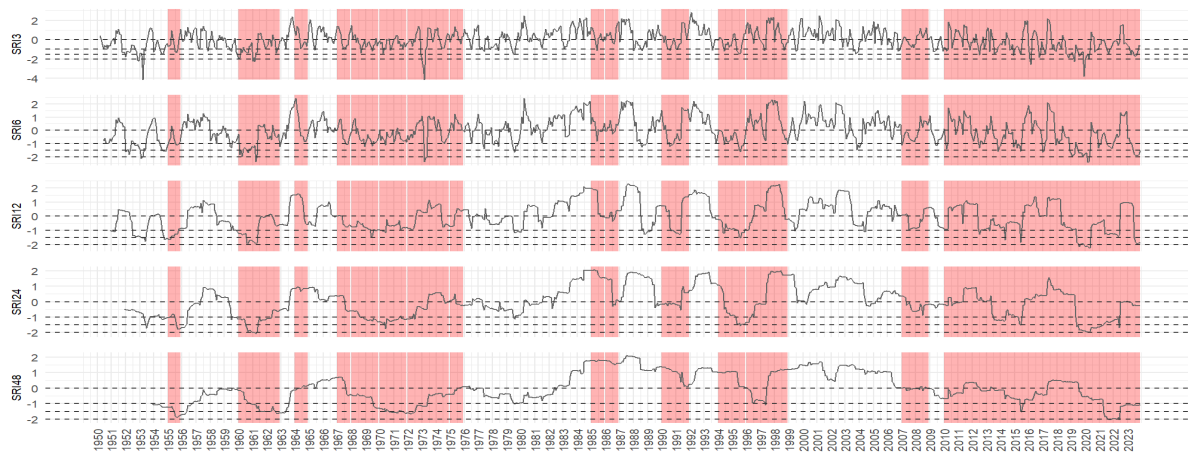
Anexo 11: Evolución temporal del SPEI-6 estimado con Blaney & Criddle en tres estaciones de la cuenca.



Anexo 12: Serie SPEI utilizando Ivanov en cinco escalas con eventos de sequía observados en rojo, estación La Ortiga.



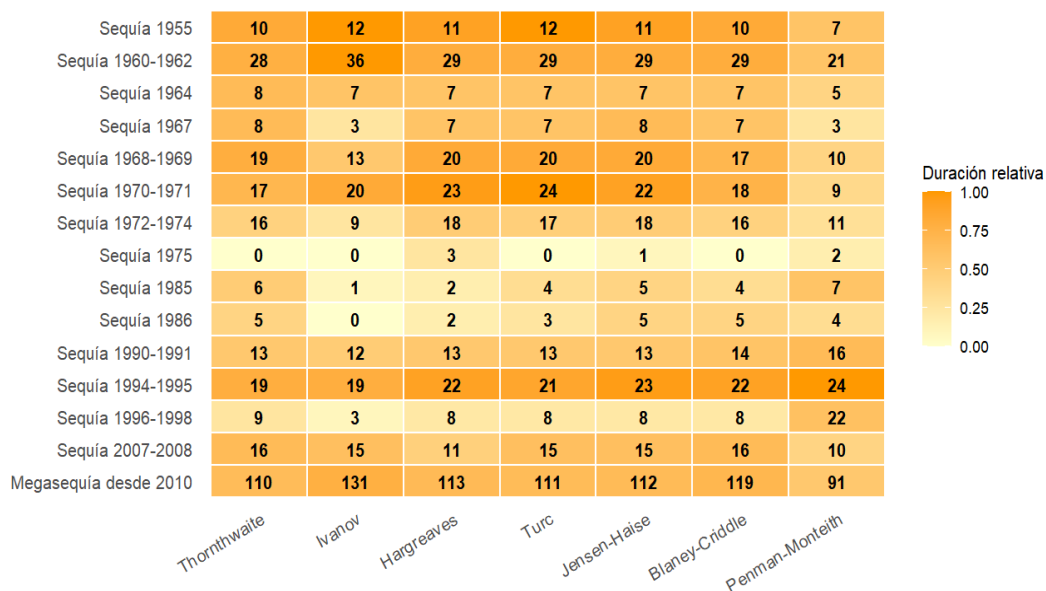
Anexo 13: Serie SPEI utilizando Turc en cinco escalas con eventos de sequía observados en rojo, estación La Ortiga.



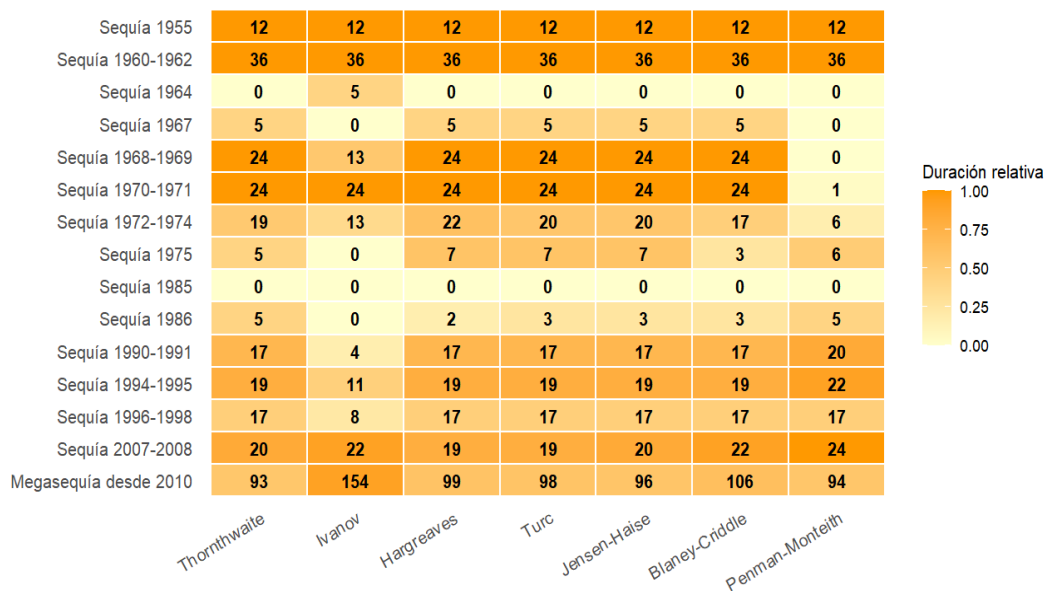
Anexo 14: Serie SPEI utilizando Jensen-Haise en cinco escalas con eventos de sequía observados en rojo, estación La Ortiga.



Anexo 15: Serie SPEI utilizando Blaney & Criddle en cinco escalas con eventos de sequía observados en rojo, estación La Ortiga.



Anexo 16: Extensión temporal de los eventos históricos de sequía simulados mediante el SPEI-6 en la estación La Ortiga. La escala cromática indica la duración relativa de cada evento respecto a su período máximo esperado.



Anexo 17: Extensión temporal de los eventos históricos de sequía simulados mediante el SPEI-24 en la estación La Ortiga. La escala cromática indica la duración relativa de cada evento respecto a su período máximo esperado.