



SISSA

REPORTE TÉCNICO CRC-SAS

IMPLEMENTACIÓN DEL ÍNDICE ESTANDARIZADO DE CAUDALES (SSI) EN EL SISTEMA DE MONITOREO DE SEQUÍAS DE SISSA

SISSA - RT 005-2024
OCTUBRE 2024

SISSA.CRC-SAS.ORG



Financiado por
la Unión Europea





SISSA SISTEMA DE INFORMACIÓN SOBRE
SEQUÍAS PARA EL SUR DE SUDAMÉRICA

REPORTE TÉCNICO

IMPLEMENTACIÓN DEL ÍNDICE ESTANDARIZADO DE CAUDALES (SSI) EN EL SISTEMA DE MONITOREO DE SEQUÍAS DE SISSA

AUTORES: Dr. Oscar Manuel Baez Villanueva¹, Dr. Mauricio Zambrano Bigiarini²

¹Hydro-Climate Extremes Lab (H-CEL), Ghent University, Ghent, Belgium.

²Department of Civil Engineering, Universidad de la Frontera, Temuco, Chile Center for Climate and Resilience Research, Universidad de Chile, Santiago, Chile.

OCTUBRE 2024



ÍNDICE

1.	Introducción	4
2.	Objetivos	6
3.	Antecedentes teóricos	6
3.1.	Índice estandarizado de caudales (SSI)	6
3.2.	Global Flood Awareness System (GloFAS)	8
3.3.	Paquete spatSSI	10
4.	Implementación en R	10
4.1.	Actualización y pre-procesamiento de los caudales diarios GloFASv4 NRT	11
4.1.1.	Función <i>update GLOFASdailyQ SISSA</i> -	11
4.1.2.	Función <i>process GLOFAS dailyQ SISSA</i> - -	11
4.2.	Cálculo del índice SSI-1 para mapas raster diarios y mensuales (SSI-1 espacialmente distribuido)	12
4.2.1.	Función <i>update SSI SISSA</i> - -	12
4.2.2.	Función <i>update timeseries SISSA</i> -	12
5.	Resultados	13
6.	Verificación	15
6.1.	Caudales observados	15
6.1.1.	Solicitud de datos observados	15
6.1.2.	Selección de estaciones para verificación	27
6.2.	Metodología de verificación SSI-1	28
6.3.	Metodología de verificación SSI-1	28
6.3.1.	Correlación cruzada	28



SISSA SISTEMA DE INFORMACIÓN SOBRE SEQUÍAS PARA EL SUR DE SUDAMÉRICA

6.3.2.	Coincidencia de eventos	29
6.4.	Resultados de verificación SSI-1	31
6.4.1.	Análisis de correlación cruzada	31
6.4.2.	Análisis de coincidencia de eventos	34
7.	Conclusiones	37
	ANEXOS	42
A.	Cálculo de SSI-1 durante el periodo histórico	42
B.	Caudales observados proporcionados por cada país	51
C.	Cantidad de datos en estaciones seleccionadas	59
D.	Series temporales SSI-1 observadas y GloFASv4	70



1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, existe una amplia variedad de índices de sequía (Svoboda et al., 2002; Hayes et al., 2012; Cammalleri et al., 2021), pero no existe consenso sobre cuáles índices son los más apropiados para monitorear la sequía hidrológica ni sobre cuáles son las escalas temporales más adecuadas para ello (Vicente-Serrano and López-Moreno, 2005; Lorenzo-Lacruz et al., 2013; Jain et al., 2015; Zhao et al., 2017; Hoffmann et al., 2020; Vorobevskii et al., 2022). Esto se debe, en gran parte, a que solo unos pocos de estos índices han sido evaluados utilizando datos de impacto de sequías (Blauhut et al., 2015).

En la práctica, los índices de sequía se utilizan a menudo de manera individual o en combinación para monitorear de forma operativa el inicio, la duración y la severidad de los eventos de sequía. Ejemplos de estos índices incluyen el Monitor de Sequía de EE. UU. (Svoboda et al., 2002; Leeper et al., 2022), el Observatorio Europeo de Sequías (Vogt, 2011; Cammalleri et al., 2021), el Monitor de Sequías de Alemania (Zink et al., 2016), el Monitor de Sequías de Asia del Sur (Saha et al., 2021), el Monitor de Sequías de Australia (Guillory et al., 2023) y el Portal del Monitor de Sequías Global (Heim Jr. and Brewer, 2012; Hao et al., 2017).

El conocimiento limitado sobre los umbrales críticos relacionados a los impactos de la sequía hacia la sociedad, la economía y los ecosistemas (Steinemann, 2003; Stagge et al., 2015; Bachmair et al., 2016; Torelló-Sentelles and Franzke, 2022) dificultan su uso efectivo en la toma de decisiones, la mitigación de la sequía y la implementación de procesos de adaptación (Steinemann and Cavalcanti, 2006; Steinemann, 2014; Steinemann et al., 2015).

En general, para evaluar los impactos de la sequía en cuencas no intervenidas, se pueden seguir tres enfoques: i) utilizar índices meteorológicos y de humedad del suelo como aproximaciones a la sequía hidrológica (Baez-Villanueva et al., 2024), ii) calibrar modelos hidrológicos regionales o globales para predecir caudales y, a partir de esto, evaluar la sequía hidrológica (Trambauer et al., 2013), y iii) utilizar productos globales de caudales para caracterizar específicamente índices de sequía hidrológica. Varios investigadores han demostrado que depender únicamente de un índice de sequía meteorológica es difícil debido a que aspectos geomorfológicos (Barker et al., 2016b; Peña-Gallardo et al., 2019) e



hidrológicos (Baez-Villanueva et al., 2024) de las cuencas evaluadas influyen en la propagación de la sequía meteorológica a la sequía de humedad del suelo y, posteriormente, a la sequía hidrológica. Por lo tanto, es fundamental considerar las características de las cuencas para identificar los índices más adecuados que puedan utilizarse para caracterizar sequías hidrológicas en una región específica.

La modelación hidrológica de una área particular permite simular caudales, y de esta forma poder caracterizar la variación espacial de la sequía hidrológica. Sin embargo, este proceso lleva tiempo y requiere la selección de un modelo hidrológico capaz de representar adecuadamente los procesos hidrológicos de la zona de estudio, utilizando los datos disponibles para la región seleccionada. En la actualidad, gracias al avance tecnológico, existen diversos productos que estiman variables que pueden ser utilizadas para el monitoreo de la sequía hidrológica, tales como el almacenamiento total de agua (GRACE y GRACE-FO; Tapley et al., 2004; Kornfeld et al., 2019) y los caudales simulados por modelos hidrológicos globales (GloFAS; Alfieri et al., 2013a). Sin embargo, su uso requiere una evaluación previa con datos in situ para estimar el grado de concordancia que estos productos tienen en la zona de estudio.

Actualmente, el Sistema Global de Concienciación de Inundaciones (Global Flood Awareness System) (GloFAS; Alfieri et al., 2013a) proporciona datos diarios de caudales simulados espacialmente distribuidos, con una resolución espacial de 0.05° desde 1979 hasta el presente. Este conjunto de datos se generó utilizando el modelo hidrológico LISFLOOD y datos de reanálisis meteorológicos ERA5, interpolados a la resolución de GloFAS, a intervalos de tiempo de 24 horas. Se utilizan dos variantes de los datos forzantes ERA5, lo que resulta en dos tipos de datos de caudal: intermedios y consolidados. Los datos intermedios de caudal se producen utilizando datos de ERA5 Near Real Time (ERA5T) y se actualizan a diario, mientras que los datos consolidados se producen utilizando el reanálisis consolidado de ERA5 y se actualizan mensualmente.

Este proyecto hace uso de los caudales simulados entregados por GloFASv4 para calcular el índice estandarizado de caudales (Standardised Streamflow Index; SSI-1) en una versión espacialmente distribuida. Los resultados pueden ser visualizados en mapas y en series temporales para estaciones fluviométricas específicas. La metodología general es la



SISA SISTEMA DE INFORMACIÓN SOBRE
SEQUIÁS PARA EL SUR DE SUDAMÉRICA

siguiente: i) descarga y preprocesamiento de datos de caudales diarios de GloFASv4; ii) evaluación de su desempeño utilizando datos históricos de caudal observado en estaciones fluviométricas; y iii) cálculo del SSI-1 espacialmente distribuido sobre el área de estudio.

Este índice hidrológico está destinado a la región del sur de Sudamérica, con la finalidad de implementarlo en la página oficial del Sistema de Información sobre Sequías para el sur de Sudamérica (SISA). La visualización efectiva y oportuna de este índice de sequía hidrológica permitirá un monitoreo, gestión y planificación más eficiente de los recursos hídricos en el sur de Sudamérica. Además, esperamos que contribuya al desarrollo de estrategias de mitigación de los impactos de la sequía hidrológica, que fortalezcan la resiliencia de las diversas cuencas y comunidades bajo riesgo de sequías hidrológicas (Bachmair et al., 2016).



SISA SISTEMA DE INFORMACIÓN SOBRE
SEQUIAS PARA EL SUR DE SUDAMÉRICA



2. OBJETIVOS

Los objetivos principales de esta propuesta se describen en las siguientes actividades:

Actividad 1. Desarrollo de scripts en R (R Core Team, 2024) para la descarga y preprocesamiento de los caudales generados por GloFASv4. Entrega de documentación básica sobre las funciones de descarga y preprocesamiento de los caudales generados por GloFAS.

Actividad 2. Desarrollo de scripts en R (R Core Team, 2024) para la generación del índice de sequía hidrológica SSI-1 para series temporales diarias y mensuales (SSI-1 en un punto, no distribuido espacialmente). Entrega de los scripts necesarios para la generación del índice SSI-1 para series temporales diarias y mensuales con documentación básica relacionada con las funciones correspondientes.

Actividad 3. Desarrollo de scripts en R (R Core Team, 2024) para la generación del índice de sequía hidrológica SSI-1 para un conjunto de mapas raster diarios y mensuales (SSI-1 distribuido espacialmente). Entrega de los scripts necesarios para la generación del índice SSI-1 para un conjunto de mapas raster diarios y mensuales. Entrega de los mapas raster SSI-1 para el período 1979–2023, para ser comparados con los obtenidos por la plataforma web del SISSA. Entrega de un breve informe escrito sobre la generación del índice de sequía SSI-1 para un conjunto de mapas raster diarios y mensuales.



3. ANTECEDENTES TEÓRICOS

3.1. Índice estandarizado de caudales (SSI)

El Índice Estandarizado de Caudales (SSI por sus siglas en inglés; Shukla and Wood (2008)) es un índice de sequía hidrológica que es esencial para evaluar y cuantificar directamente la severidad de la sequía hidrológica en función de los déficits de caudal observados. Esto lo hace particularmente útil para monitorear sequías hidrológicas y evaluar sus impactos en los recursos hídricos y ecosistemas. El SSI es particularmente útil para predecir cambios en los caudales de los ríos, la humedad del suelo, el crecimiento de los bosques y el rendimiento de los cultivos, lo que lo convierte en una herramienta versátil para aplicaciones ecológicas, agrícolas e hidrológicas (Vicente Serrano et al., 2012).

Además, la integración del SSI con otros índices (e.g., índice estandarizado de precipitación (SPI) y el índice estandarizado de evapotranspiración y precipitación (SPEI)) contribuye a una comprensión integral del proceso de sequía y a mejorar nuestra comprensión de la propagación de sequías meteorológicas a hidrológicas a la escala de cuenca. Su naturaleza estandarizada también facilita su comparación entre diferentes regiones y cuencas.

El SSI es ampliamente reconocido como un índice valioso para el monitoreo de sequías hidrológicas, al igual que otros índices como el Índice de Escorrentía Estandarizado (SRI) (Van Loon, 2015). Este índice está diseñado específicamente para utilizar datos de caudal observados o simulados, lo que lo convierte en una herramienta útil para caracterizar sequías hidrológicas históricas en diferentes regiones, para identificar y analizar eventos de sequía (Barker et al., 2016a, 2019), y para evaluar el desempeño de simulaciones de eventos extremos (Smith et al., 2019). Además, se ha utilizado en la interpolación temporal de hidrogramas de nivel de agua subterránea para análisis de sequía regional (Marchant et al., 2022) y en análisis de correlación y coincidencia de eventos para identificar índices meteorológicos y escalas temporales que puedan ser utilizados como proxies de sequía hidrológica en cuencas con distintos regímenes hidrológicos (Baez-Villanueva et al., 2024).

Este índice se ha utilizado en diversos contextos geográficos, tales como en la cuenca del Ebro para analizar la respuesta de la escorrentía mensual a las condiciones climáticas (López-Moreno et al., 2013), y en la Península Ibérica para estudiar los patrones de sequía de



los caudales (Lorenzo-Lacruz et al., 2013); lo que demuestra su adaptabilidad y eficacia en diversos entornos hidrológicos (Wu et al., 2016).

El SSI agrega datos de caudal durante períodos temporales de acumulación específicos, siguiendo un procedimiento análogo al funcionamiento del Índice Estandarizado de Precipitación (SPI) para datos de precipitación (Smith et al., 2019): i) seleccionar una función de densidad de probabilidad (PDF) y estimar sus parámetros para representar la distribución a largo plazo de caudales para un período dado, y ii) derivar la correspondiente función de distribución acumulada (CDF) para transformar los caudales a una distribución normal estándar.

En este proyecto, utilizamos el SSI con un período de acumulación de un mes (SSI-1) para caracterizar la sequía hidrológica porque:

1. integra procesos hidrogeológicos a escala de cuenca (Barker et al., 2016b),
2. ya integra la hidrometeorología de los meses anteriores (Stahl et al., 2020), y
3. ha sido ampliamente utilizado en estudios previos de sequías en caudales (Barker et al., 2016b; Stahl et al., 2020; Li et al., 2020; Wang et al., 2020; Bevacqua et al., 2021; Baez-Villanueva et al., 2024).

Debido a la importante variabilidad en las propiedades estadísticas de las series mensuales de caudales, es posible utilizar diversas distribuciones de probabilidad para calcular el SSI (Vicente Serrano et al., 2012). En este proyecto, utilizamos la distribución log-logística para calcular el SSI, ya que fue una de las distribuciones recomendadas por Vicente Serrano et al. (2012).

3.2. Global Flood Awareness System (GloFAS)

El Sistema Global de Concientización sobre Inundaciones (GloFAS, <https://www.globalfloods.eu/>) es un sistema de pronóstico de inundaciones basado en conjuntos de pronósticos a escala global desarrollado por el Centro Común de Investigación (JRC) de la Comisión Europea y el Centro Europeo de Pronósticos Meteorológicos a Mediano Plazo (ECMWF) como parte del Servicio de Gestión de Emergencias de Copernicus (Alfieri et al., 2013b; Revilla-Romero et al., 2015; Hirpa et al., 2016, 2018; Harrigan et al., 2020b;



Grimaldi et al., 2023). GloFAS ha evolucionado con el tiempo, desde una fase de producción experimental en 2011, hasta su adaptación para ejecutarse en el entorno pre-operativo del ECMWF en 2015, la incorporación de GloFAS Seasonal en 2017, hasta entrar en pleno funcionamiento en abril de 2018, con soporte 24/7 y pronósticos de 30 días (Copernicus, 2019; Harrigan et al., 2020a).

Su versión actual es GloFAS v4.0 (Grimaldi et al., 2023), tiene una resolución de 0.05 grados (4 veces mayor que la versión anterior) y utiliza los últimos resultados obtenidos en investigaciones y conjuntos de datos de teledetección para preparar el conjunto de mapas de alta resolución que se utilizan como dato de entrada para el modelo hidrológico. Este servicio de pronósticos de inundaciones se encuentra disponible gratuitamente y sirve como un sistema global de pronóstico y monitoreo hidrológico que opera sin estar limitado por fronteras administrativas o políticas. GloFAS está diseñado para proporcionar capacidades de alerta temprana de inundaciones comparando pronósticos conjuntos de caudales con distribuciones climatológicas a escala global (Alfieri et al., 2013b; Bischiniotis et al., 2019). El sistema utiliza una combinación de modelos, incluido el modelo de superficie terrestre HTESSEL para generar escorrentía superficial y subterránea y el modelo hidrológico de código abierto LISFLOOD para enrutar flujos de agua subterránea en alta resolución en toda la superficie terrestre global (Coughlan de Perez et al., 2017). Al emplear estos modelos, GloFAS puede generar predicciones conjuntas de caudales para cuencas fluviales a gran escala a nivel mundial con hasta 15 días de anticipación (Snow et al., 2016).

Una de las fortalezas de GloFAS es su capacidad para detectar inundaciones en grandes cuencas fluviales mediante simulaciones diarias de caudal (Hirpa et al., 2016). El sistema proporciona una visión general de posibles inundaciones futuras en las principales cuencas fluviales del mundo, lo que ayuda en los esfuerzos de preparación y respuesta ante inundaciones (Alfieri et al., 2013b). GloFAS ha sido fundamental para proporcionar pronósticos de inundaciones y alertas tempranas en regiones con escasez de datos al generar pronósticos diarios de caudales de mediano alcance en ríos de todo el mundo (Revilla-Romero et al., 2015). Además, el sistema se ha integrado y probado en varios sistemas de alerta temprana en diferentes países para mejorar los mecanismos de detección y respuesta a inundaciones (Bischiniotis et al., 2019; Mokkenstorm et al., 2021; MacLeod et al., 2021; Hunt et al., 2022).



GloFAS incorpora tecnologías avanzadas como la asimilación de datos de humedad del suelo para mejorar sus pronósticos de caudal (Baugh et al., 2020). Al utilizar el análisis operativo de la humedad del suelo dentro de su configuración, GloFAS mejora su capacidad para producir pronósticos precisos del caudal de los ríos, lo que contribuye a una concientización y preparación más efectivas frente a inundaciones (Baugh et al., 2020). El sistema también ofrece pronósticos conjuntos diarios de descarga de ríos y conjuntos de datos de pronóstico en tiempo real, que están disponibles abiertamente a través del almacén de datos climáticos del Servicio de Cambio Climático Copernicus (Harrigan et al., 2020a). Esta transparencia y accesibilidad de los datos mejoran aún más la utilidad de GloFAS para respaldar los procesos de toma de decisiones relacionados con la gestión del riesgo de inundaciones.

Además, GloFAS ha sido calibrado utilizando datos de caudal diarios para mejorar la precisión de sus capacidades de pronóstico de inundaciones (Hirpa et al., 2018). Este proceso de calibración garantiza que las predicciones del sistema se alineen estrechamente con los datos de caudal observados, mejorando la confiabilidad de sus alertas tempranas de inundaciones (Hirpa et al., 2018). GloFAS también se ha ampliado para proporcionar pronósticos hidrometeorológicos estacionales, combinando pronósticos meteorológicos estacionales con un modelo hidrológico para ofrecer pronósticos probabilísticos del caudal de los ríos con hasta 4 meses de anticipación a nivel mundial (Emerton et al., 2018). Esta extensión mejora la capacidad del sistema para proporcionar evaluaciones del riesgo de inundaciones y medidas de preparación a largo plazo.

Se ha descubierto que el sistema es eficaz en más del 93% de las cuencas evaluadas usando predicciones de corto y mediano alcance (1–3 y 5–15 días, respectivamente), y en más del 80% de las cuencas con predicciones de largo alcance (16–30 días; Harrigan et al., 2020a). GloFAS también ofrece un conjunto de datos operativos de reanálisis de descarga de ríos globales, que se ha demostrado que es útil en el 86% de las cuencas (Harrigan et al., 2020a).

En conclusión, el Sistema Global de Concientización sobre Inundaciones (GloFAS) es una herramienta muy útil en los sistemas de predicción y alerta temprana de inundaciones de distintos países que no cuentan con dichas capacidades. A través de las predicciones de caudales, técnicas avanzadas de modelación y mejoras continuas en el tiempo (e.g.,



asimilación y calibración de datos), GloFAS desempeña un papel crucial en la mejora de la concientización, la preparación y los esfuerzos para mejorar nuestras respuestas a los eventos de inundación en todo el mundo. Su integración en varios sistemas de alerta temprana del mundo y la entrega de conjuntos de datos disponibles abiertamente contribuyen a su eficacia para respaldar los procesos de toma de decisiones relacionados con la gestión del riesgo de inundaciones. Sin embargo, hasta el momento no encontramos antecedentes sobre el uso de los datos de caudales diarios entregados por GloFAS para el monitoreo de sequías, pero resultados preliminares encontrados por los autores de este reporte sugieren un potencial importante para este fin.

Los datos de caudales medios diarios utilizados en este proyecto se descargarán desde Copernicus CDS, en particular se utilizará la variable river discharge in the last 24 hours, la cual almacena el flujo volumétrico de agua promedio que circula en el cauce del río, en [m³/s], incluidos sedimentos, material químico y biológico.

3.3. Paquete spatSSI

Todas las actividades del proyecto se realizaron dentro del ambiente estadístico R (R Core Team, 2024), mediante la implementación de un paquete específicamente desarrollado para los fines de este proyecto, denominado spatSSI (Figura 1).

Figura 1: Figura conceptual del paquete en R desarrollado para este proyecto (spatSSI).

Este paquete contiene las funciones esenciales para la implementación del índice estandarizado de caudales (SSI-1), el cual será implementado en la plataforma de sequías del SISSA para una evaluación robusta de las condiciones de sequía asociada a los déficits de caudales en los principales ríos del sur de Sudamérica.

4. Implementación en R

La ejecución del proyecto se realizó en el entorno de programación R (R Core Team, 2024), mediante la implementación de un paquete específicamente desarrollado para este



proyecto, denominado spatSSI. La Figura 2 muestra las principales funciones implementadas en el paquete para la implementación del Índice Estandarizado de Caudales (SSI-1), el cual desempeñará un papel crucial en la plataforma de sequías del SISSA. Este enfoque metodológico estructurado garantizará la implementación eficiente y precisa del Índice Estandarizado de Caudales en la plataforma de monitoreo de sequías del SISSA, contribuyendo así a una evaluación robusta de los déficits de caudal en el sur de Sudamérica.

Figura 2: Funciones finales que utilizará el SISSA para la descarga y pre-procesamiento de GloFASv4, generación del SSI-1, y extracción de series temporales para cuencas seleccionadas. Estas funciones se incluyen en el paquete spatSSI.

4.1. Actualización y pre-procesamiento de los caudales diarios GloFASv4 NRT

Entrega de los scripts de R ([R Core Team, 2024](#)) necesarios para la descarga y pre-procesamiento de GloFASv4 que posteriormente serán utilizados para la generación del SSI-1.

4.1.1. Función *update GLOFASdailyQ SISSA* -

Esta función permite actualizar los caudales diarios espacialmente distribuidos desde los servidores ECMWF, donde se encuentran almacenados los datos de GloFASv4, hasta los servidores del SISSA. Estos datos se descargan en formato NetCDF con compresión ZIP, es decir, con extensión .nc.zip.

4.1.2. Función *process GLOFAS dailyQ SISSA* -

Descomprime los archivos NetCDF con compresión ZIP (.nc.zip) descargados con la función `update_GLOFASdailyQ_SISSA` y los procesa de acuerdo a la extensión espacial seleccionada por el usuario, para luego exportar los caudales diarios como mapas diarios en formato NetCDF. Posteriormente, los archivos descargados se mueven desde la carpeta de descargas y se almacenan en una carpeta llamada "Legacy". Los archivos descargados se exportan específicamente a la carpeta 2: Preprocessed GloFAS.



4.2. Cálculo del índice SSI-1 para mapas raster diarios y mensuales (SSI-1 espacialmente distribuido)

4.2.1. Función *update SSI SISSA* -

Esta función calcula el índice SSI-1 espacialmente distribuido solo para los días que han sido actualizados en los servidores de SISSA con la función *update GLOFASdailyQ SISSA* (i.e., los días que han sido descargados para los que no existe la capa de caudales diarios procesados del SSI-1). Los mapas de SSI-1 calculados en esta función quedan almacenados en el directorio 4 SSI.

4.2.2. Función *update timeseries SISSA* -

Esta función lee los mapas de SSI-1, almacenados en el directorio 4 SSI, y actualiza los archivos CSV que contienen las series temporales de SSI-1 calculadas en cada uno de los puntos que representan las estaciones fluviométricas con datos observados de caudales diarios proporcionados por SISSA. Los archivos .csv actualizados por esta función quedan disponibles en la carpeta 5 (SISSA time series).



5. Resultados

La Figura 3 muestra la distribución espacial del SSI-1 para el 1 de enero de los años: i) 1988, que representa un año húmedo; ii) 2000, que representa un año normal; y iii) 2013, que representa un año seco. Se puede observar que para el año 1988, los valores positivos predominan en la parte central, este y oeste del área de estudio, principalmente entre las latitudes 0–30°S, mientras que para el año 2013, valores negativos, que indican caudales menores al promedio, se observan en la parte central y noreste de la zona de estudio.

Figura 3: Distribución espacial del SSI-1 para el sur de Sudamérica el 1 de enero en los años 1998, 2000 y 2013.

Por otra parte, la Figura 4 muestra tres series temporales como ejemplo: i) Puerto Iguazú en Argentina; ii) Río Mostazal en Chile; y iii) Concepción en Paraguay. Las tres series temporales presentan valores negativos durante el periodo 2018–2023, coincidiendo con la sequía hidrológica en la cuenca del Plata ocurrida durante 2019–2022 (Rivera, 2024), en la cuenca del Río Paraguay (Marengo et al., 2021), y en Sudamérica en general (Gomes et al., 2021). Estos resultados sugieren una amplia afectación regional de eventos de sequía que impactan múltiples cuencas simultáneamente.

Además, la cuenca del Río Mostazal muestra valores negativos persistentes durante 2009–2016, lo cual coincide con la Megasequía en Chile, una de las sequías más prolongadas y severas registradas en la región (Garreaud et al., 2020). Esta megasequía ha impactado severamente a la agricultura, los recursos hídricos y los ecosistemas locales.

Figura 4: Series temporales del SSI-1 para tres cuencas: Puerto Iguazú (Argentina; panel superior); Río Mostazal (Chile; panel central); y Río Concepción (Paraguay; panel inferior) para el período 1980–2024.



6. Verificación

En esta sección se describe el procedimiento utilizado para verificar los valores de SSI-1 entregados por la nueva plataforma SISSA, el cual puede ser brevemente resumido de la siguiente manera:

Solicitud de datos observados: SISSA solicitó información de caudales medios diarios observados en estaciones fluviométricas de interés a los seis países miembros del Centro Regional del Clima para el Sur de América del Sur (Argentina, Bolivia, Brasil, Chile, Paraguay y Uruguay), pero sólo se recibió información para cinco países (Argentina, Brasil, Chile, Paraguay y Uruguay).

Selección de estaciones fluviométricas: En base a la longitud y calidad de las series temporales de caudales recibidas desde cada país, se realizó un proceso de selección de estaciones fluviométricas a utilizar en el proceso de verificación.

Cálculo del índice SSI-1: Con los caudales medios diarios observados en cada estación fluviométrica seleccionada y con sus correspondientes valores simulados obtenidos desde GloFASv4, se procedió a calcular el índice SSI-1 para las coordenadas espaciales correspondientes a las estaciones fluviométricas seleccionadas.

Análisis de verificación: Con los valores de SSI-1 obtenidos desde los caudales observados y aquellos obtenidos desde GloFASv4 se realizó un análisis de correlación cruzada y un análisis de coincidencia de eventos, para verificar el grado de adecuación de los valores de SSI-1 obtenidos desde GloFASv4 con sus correspondientes valores observados.

El resto de este capítulo describe en detalle cada uno de los pasos mencionados anteriormente.

6.1. Caudales observados

6.1.1. Solicitud de datos observados



SISSA SISTEMA DE INFORMACIÓN SOBRE
SEQUIÁS PARA EL SUR DE SUDAMÉRICA

SISSA solicitó información de caudales medios diarios observados en estaciones fluviométricas de interés a los seis países miembros del Centro Regional del Clima para el Sur de América del Sur (Argentina, Bolivia, Brasil, Chile, Paraguay y Uruguay). La Tabla 1 muestra los metadatos de las 145 estaciones fluviométricas proporcionadas por los cinco países miembros del Centro Regional del Clima para el Sur de América del Sur que respondieron la solicitud que realizó SISSA (Argentina, Brasil, Chile, Paraguay y Uruguay).



SISA SISTEMA DE INFORMACIÓN SOBRE SEQUÍAS PARA EL SUR DE SUDAMÉRICA

Tabla 1: Metadatos de todas las estaciones fluviométricas proporcionadas para este informe por SISA. Información creada por SISA a partir de los datos enviados por cada uno de los países miembros.

País	Nombre de la Estación	Cuenca	Estación	Latitud	Longitud	Fuente
Argentina	ARR01	Iguazu	Puerto Iguazu	-25.59	-54.59	INA/SEC
						recursos hídricos / Pref



SISA SISTEMA DE INFORMACIÓN SOBRE
SEQUIAS PARA EL SUR DE SUDAMÉRICA

Argentina

AR02

Iguazu

Andrésito

-25.59

-53.99

estructural
INA / sec

recursos
shidri-
cos /
Prefectur



SISA SISTEMA DE INFORMACIÓN SOBRE
SEQUIAS PARA EL SUR DE SUDAMÉRICA

3	A r g e n t i n a	A R 0 3	P a r a g u a y	F o r m o s a	- 2 6 . 1 8	- 5 8 . 1 6	a l I N A / s e c r e c u r s o s h i d r i - c o s / P r e f e c t u r a l
4	A r g e	A R 0 4	P a r a	C o r ri	- 2 7 .	- 5 8 .	I N A / /



SISA SISTEMA DE INFORMACIÓN SOBRE SEQUÍAS PARA EL SUR DE SUDAMÉRICA

	n t i n a		n a		e n t e s	4 6	8 4	s e c
								r e c u r s o s h i d r i - c o s / P r e f e c t u r a l
!	A r g e n t i n a	A R 0 5	P a r a n a		R e c o n q u i s t	- 2 9 . 2 4	- 5 9 . 5 8	N A / s e c



SISA SISTEMA DE INFORMACIÓN SOBRE SEQUÍAS PARA EL SUR DE SUDAMÉRICA

a

(	A	A	P	P	-	-	r
	r	R	a	a	3	6	e
	g	0	r	r	1	0	c
	e	6	a	a	.	.	u
	n		n	n	7	5	s
	t		a	a	2	2	h
	i						i
	n						-
	a						c
							o
							s
							/
							P
							r
							e
							f
							e
							c
							t
							u
							r
							a
							I
							N
							A
							/
							s
							e
							c
							r
							e
							c
							u



SISA SISTEMA DE INFORMACIÓN SOBRE SEQUÍAS PARA EL SUR DE SUDAMÉRICA

	A	A	P	P	-	-	r
	r	R	i	il	2	5	s
	g	0	l	c	5	7	o
	e	7	c	o	.	.	s
	n		o	m	3	6	h
	t		a	a	7	5	i
	i		y	y			-
	n		o	o			c
	a						o
							s
							/
							P
							r
							e
							f
							e
							c
							t
							u
							r
							a
							I
							N
							A
							/
							s
							e
							c
							r
							e
							c
							u
							r
							s
							o
							s
							h



SISA SISTEMA DE INFORMACIÓN SOBRE
SEQUÍAS PARA EL SUR DE SUDAMÉRICA

{	A r g e n t i n a	A R 0 8	P i l c o m a y o	M is i n L a P a z	- 2 2 . 3 8	- 6 2 . 5 2	i d r i - c o s / P r e f e c t u r a l N A / s e c
---	---	------------------	---	--	----------------------------	----------------------------	--

r
e
c
u
r
s
o
s
h
i
d
r
i



SISA SISTEMA DE INFORMACIÓN SOBRE
SEQUIAS PARA EL SUR DE SUDAMÉRICA

-
C
O
S
/
C
O
R
E
B
E

Continúa en la página siguiente



SISA SISTEMA DE INFORMACIÓN SOBRE SEQUÍAS PARA EL SUR DE SUDAMÉRICA

Tabla 1: Metadatos de todas las estaciones pluviométricas proporcionadas para este informe por SISA. Información creada por SISA a partir de los datos enviados por cada uno de los países miembros.

País	Nombre de la Estación	Código	Coordenadas	Altitud (m)	Longitud (km)	Latitud (km)	Fuente
Argentina	ARR09	Uruguay	El Sobarbio	-27.30	-54.19		INASEC recursos hídricos /



SISA SISTEMA DE INFORMACIÓN SOBRE
SEQUIAS PARA EL SUR DE SUDAMÉRICA

:	A	A	U	G	-	-	P
(	r	R	r	a	2	5	r
	g	1	u	r	8	5	e
	e	0	g	r	.	.	f
	n		u	r	1	6	e
	t		a	c	7	4	c
	i		y	h			r
	n			o			e
	a			s			c
							u
							r
							s
							s
							h
							i
							d
							r
							i
							-
							c
							o
							s
							/
							P
							r
							e



SISA SISTEMA DE INFORMACIÓN SOBRE
SEQUIAS PARA EL SUR DE SUDAMÉRICA

Argentina

ARR11

Uruguay

Pasos de los Libres

- 29.73

- 57.09

estructural INA/sec

recursos hídricos / Pre



SISA SISTEMA DE INFORMACIÓN SOBRE
SEQUIAS PARA EL SUR DE SUDAMÉRICA

2012

Argentina

ARR12

Uruguay

Concordia

-31.41

-58.00

estructural
INA / sec
recursos
hidricos /
predec



SISA SISTEMA DE INFORMACIÓN SOBRE SEQUÍAS PARA EL SUR DE SUDAMÉRICA

3	Argentina	AR 13	Limay	Angostura	-4078	-7166	tura
4	Argentina	AR 14	Limay	Rahue	-3936	-7093	aic
5	Argentina	AR 15	neuquen	Loscarriños	-3712	-7075	aic
6	Argentina	AR 16	Negro	Neuquén	-3857	-6808	aic



SISA SISTEMA DE INFORMACIÓN SOBRE SEQUÍAS PARA EL SUR DE SUDAMÉRICA

3	n			n			
7	a						
	A	A	c	b	-	-	c
	r	R	o	u	3	6	o
	g	1	l	t	7	9	m
	e	7	o	a	.	.	i
	n		r	r	1	7	t
	t		a	a	0	3	'
	i		d	n			e
	n		o	q			i
	a			u			n
				i			-
				l			t
							e
							r
							j
							r
							i
							o
							c
							o
							-
							l
							o
							r
							a
							d
							o
							a
3	A	A	n	p	-	-	a
8	r	R	e	r	6	4	i
	g	1	g	i	3	0	c
	e	8	r	m	.	.	
	n		o	e	7	4	
	t			r	8	5	
	i			a			
	n			a			
	a			n			
				-			



SISA SISTEMA DE INFORMACIÓN SOBRE SEQUÍAS PARA EL SUR DE SUDAMÉRICA

9	Argentina	AR 19	neuquen	g o s t u r a l a h i g u e r a	- 6 9 .3 6	- 3 8 .5 8	a i c
10	Argentina	AR 20	Mendoza	G u i d o	- 3 2 .9 2	- 6 9 .2 4	s i P H
11	Argentina	AR 21	Tunuyan	V a l l e d e U c o	- 3 3 .7 8	- 6 9 .2 7	S I P H
12	Argentina	AR 22	Diamana	L a J a u	- 3 4 .6 6	- 6 9 .3 3	S I P H



SISA SISTEMA DE INFORMACIÓN SOBRE SEQUÍAS PARA EL SUR DE SUDAMÉRICA

2	t		n	l	7	2	
3	a		e	a			
2	A	A	A	L	-	-	S
3	r	R	t	a	3	6	I
	g	2	u	A	5	8	P
	e	3	e	n	.	.	H
	n		l	g	1	8	
	t			o	0	7	
	i			s			
	n			t			
	a			u			
				r			
				a			
2	A	A	M	L	-	-	S
4	r	R	a	a	3	6	I
	g	2	l	B	5	9	P
	e	4	a	a	.	.	H
	n		r	r	5	6	
	t		g	d	5	8	
	i		u	a			
	n		e				
	a						
2	A	A	J	C	-	-	A
5	r	R	u	a	2	6	E
	g	2	r	b	5	5	S
	e	5	a	r	.	.	
	n		m	a	2	2	
	t		e	C	7	4	
	i		n	o			
	n		t	r			
	a		o	a			
				l			
			S				
			a				
			l				
			a				



SISA SISTEMA DE INFORMACIÓN SOBRE
SEQUÍAS PARA EL SUR DE SUDAMÉRICA

d
o



Tabla 1: Metadatos de todas las estaciones fluviométricas proporcionadas para este informe por SISA. Información creada por SISA a partir de los datos enviados por cada uno de los países miembros.

País	Estación	Cuenca	Estación	Longitud	Longitud	Fuente
Argentina	ARR26	Juramento / Salado	El Tunal	-25	-64	AES
Argentina	ARR27	Salado	Rio Salados	-35	-57	ARN



SISA SISTEMA DE INFORMACIÓN SOBRE SEQUÍAS PARA EL SUR DE SUDAMÉRICA

2	A	A	R	2	-	-	-
8	r	R	i	R	3	6	
	g	2	o	o	2	4	
	e	8	T	T	.	.	
	n		e	e	1	1	
	t		r	r	5	3	
	i		c	c			
	n		e	e			
	a		r	r			
			o	o			
2	A	A	R	V	-	-	-
9	r	R	i	i	3	6	
	g	2	o	l	2	3	
	e	9	T	l	.	.	
	n		e	a	4	2	
	t		r	M	2	4	
	i		c	a			
	n		e	r			
	a		r	'			
			o	i			
				a			
3	A	A	R	E	-	-	A
0	r	R	i	l	3	6	g
	g	3	o	D	1	4	u
	e	0	S	i	.	.	a
	n		u	q	3	3	s
	t		q	u	6	8	
	i		u	e			
	n		i	c			
	a		a	i			
				t			
				o			

a
b
a
j
o
D
i



SISA SISTEMA DE INFORMACIÓN SOBRE
SEQUÍAS PARA EL SUR DE SUDAMÉRICA

3	A	A	R	L	-	-	q
2	r	R	i	o	3	6	u
	e	3	o	s	1	4	R
	n	1	L	M	.	.	o
	t		o	o	8	4	q
	i		s	l	4	5	u
	n		M	i			e
	a		o	n			A
			l	o			g
			i	s			u
			-				a
			n				b
			o				a
			s				j
							o
							D
							i
							q
							u
							e
							M
							o
							l
							i
							n
							o
							s
3	A	A	d	R	-	-	1
2	r	R	e	P	2	6	0
	g	3	l	3	9	0	9



SISA SISTEMA DE INFORMACIÓN SOBRE SEQUÍAS PARA EL SUR DE SUDAMÉRICA

	e n t i n a	2	p l a t a	8	. 8 7	. 3 4	4 (n u - m e r o e s t a - c i o n) I N A 2
3 3	A r g e n t i n a	A R 3 3	d e l p l a t a	R o s a r i o d e l T a l a L i	- 3 2 .3 1	- 5 9 .0 8	
4	A r	A R	d e		- 2	- 5	1 0



SISA SISTEMA DE INFORMACIÓN SOBRE SEQUÍAS PARA EL SUR DE SUDAMÉRICA

	g e n t i n a	3 4	l p l a t a	b e r t a d	5 . 9 2	4 . 6 2	
3	A r g e n t i n a	A R 3 5	d e l p l a t a	l t a t i	- 2 7 . 2 7	- 5 8 . 2 4	1 7
6	A r g e n t i n a	A R 3 6	d e l p l a t a	S a n t a F e	- 3 1 . 6 5	- 6 0 . 7 0	3 0
7	A r g e n t i n a	A R 3 7	d e l p l a t a	R o s a r i o	- 3 2 . 9 4	- 6 0 . 6 3	3 4
8	A r g e n t	A R 3 8	d e l p l a	S a n P e d	- 3 3 . 6 7	- 5 9 . 6 5	3 8



SISA SISTEMA DE INFORMACIÓN SOBRE SEQUÍAS PARA EL SUR DE SUDAMÉRICA

3	Argentina	AR 39	de la Plata	Barranqueras	- 27.48	- 58.93	20
4	Argentina	AR 40	de la Plata	Puerto Formosa	- 26.18	- 58.18	57
4	Argentina	AR 41	de la Plata	Salto Grande	- 31.28	- 57.94	77



SISA SISTEMA DE INFORMACIÓN SOBRE SEQUÍAS PARA EL SUR DE SUDAMÉRICA

4	A	A	d	e	-	-	7
3	r	R	e	A	3	5	8
	g	4	l	r	1	7	
	e	2	p	r	.	.	
	n		l	a	2	9	
	t		a	G	8	4	
	i		t	r			
	n		a	a			
	a			n			
				d			
				e			
				A			
				b			
				a			
				j			
				o			
				Y			
4	A	A	d	a	-	-	8
3	r	R	e	c	2	5	8
	g	4	l	y	7	6	
	e	3	p	r	.	.	
	n		a	e	4	7	
	t		t	'	8	3	
	i		a	a			
	n			e			
	a			f			
				l			
				u			
				e			
				n			
				t			



SISA SISTEMA DE INFORMACIÓN SOBRE
SEQUIÁS PARA EL SUR DE SUDAMÉRICA

e



Tabla 1: Metadatos de todas las estaciones fluviométricas proporcionadas para este informe por SISA. Información creada por SISA a partir de los datos enviados por cada uno de los países miembros.

País	Estación	Cuenca	Estación	Longitud	Fuente
Argentina	ARR44	de la Plata	Represas	- 2 5 5 8	9 4
			Cañones	- 2 5 5 8	
			Cañones	- 2 5 5 8	
			Cañones	- 2 5 5 8	
Argentina	ARR45	de la Plata	Cañones	- 2 5 5 4 9	9 5
			Cañones	- 2 5 5 4 9	
			Cañones	- 2 5 5 4 9	
			Cañones	- 2 5 5 4 9	
Argentina	ARR46	de la Plata	Monte	- 3 0 2 5 7 6	7 4
			Monte	- 3 0 2 5 7 6	
			Monte	- 3 0 2 5 7 6	
			Monte	- 3 0 2 5 7 6	



SISA SISTEMA DE INFORMACIÓN SOBRE SEQUÍAS PARA EL SUR DE SUDAMÉRICA

	Argentina	Argentina	Argentina	Caseros	5	3	
47	Argentina	ARR47	de la plata	Posadas	-27.37	-55.88	14
48	Argentina	ARR48	de la plata	Conflicuencia	-25.59	-54.59	93
49	Argentina	ARR49	de la plata	Yacret, afflu	-27.48	-56.73	87



SISA SISTEMA DE INFORMACIÓN SOBRE SEQUÍAS PARA EL SUR DE SUDAMÉRICA

5	A	A	d	e	-	-	1
(	r	R	e	R	3	6	0
	g	5	l	e	1	0	3
	e	0	p	c	.	.	
	n		l	r	4	7	
	t		a	e	9	8	
	i		t	o			
	n		a	-			
	a		a	R			
				u			
				t			
				a			
				P			
				r			
				o			
				v			
				i			
				n			
				c			
				i			
				a			
				l			
				n			
				o			
				7			
				0			
5	A	A	C	E	-	-	S
:	r	R	h	l	4	7	I
	g	5	u	M	2	1	P
	e	1	b	a	.	.	H
	n		u	i	1	1	
	t		t	t	0	7	
	i			,			
	n			e			
	a			n			
5	A	A	S	C	-	-	S
:	r	R	a	h	5	7	I
	g	5	n	a	0	1	P



SISSA SISTEMA DE INFORMACIÓN SOBRE SEQUÍAS PARA EL SUR DE SUDAMÉRICA

	e n t i n a	2	t a C r u z	r l e s F u h r	.	.	H
					2	9	
					5	1	
5	U r u g u a y	U R 0 1	R í o S a n t a L u c i a	F r a y M a r c o s	-	-	D i n a g u a
					3	5	
					4	5	
					.2	.7	
					2	4	
5	U r u g u a y	U R 0 2	R í o S a n t a L u c i a	P a s o P a c h e	-	-	D i n a g u a
					3	5	
					4	6	
					.3	.2	
					6	5	
5	U r u g	U R 0 3	R í o	F l o r	-	-	D i n a
					3	5	
					4	6	
					.	.	



SISA SISTEMA DE INFORMACIÓN SOBRE SEQUÍAS PARA EL SUR DE SUDAMÉRICA

	U		S	i	0	2	g
	a		a	d	9	0	u
	y		n	a			a
			t				
			a				
			L				
			u				
			c				
			i				
			a				
			C				
			h				
			i				
			c				
			o				
			R				
5	U	U	'	D	-	-	D
6	r	R	i	u	3	5	i
	u	0	o	r	3	6	n
	g	4	Y	a	.	.	a
	u		'	z	3	5	g
	a		I	n	6	3	u
	y		R	o			a
5	U	U	R	P	-	-	D
7	r	R	i	a	3	5	i
	u	0	o	s	1	5	n
	g	5	T	o	.	.	a
	u		a	d	8	4	g
	a		c	e	8	7	u
	y		u	l			a
			a	B			
			-	o			
			r	-			
			e	r			
			m	a			
			b	c			
			'	h			
			o	o			
5	U	U	R	P	-	-	D
8	r	R	'	i	3	5	i
	u	0	i	c	3	4	n
	g	6	o	a	.	.	a



SISA SISTEMA DE INFORMACIÓN SOBRE SEQUÍAS PARA EL SUR DE SUDAMÉRICA

	U a y		C e b o l l a t , I	d e l	8 3	7 7	g u a
U r u g u a y	U R 0 7	R ' i o	O l i m a r	C o r b o T r e i n t a y T r e s	- 3 3 . 2 4	- 5 4 . 4 0	D i n a g u a
U r u g u a y	U R 0 8	A r r o y o M a l	G r a n d e	M a l d o n a d o	- 3 4 . 7 5	- 5 4 . 9 5	D i n a g u a



SISA SISTEMA DE INFORMACIÓN SOBRE SEQUÍAS PARA EL SUR DE SUDAMÉRICA

(	U	U	-	P	-	-	I
:	r	R	d	a	2	5	N
	u	0	o	s	9	7	A
	g	9	a	o	.	.	
	u		d	d	7	0	
	a		o	e	3	8	
	y		U	l			
			r	o			
			u	s			
			g	L			
			u	i			
			a	-			
			y	b			P
				r			r
				e			e
				s			f
				(			e
				A			c
				r			t
				g			u
)			-

ra Arg / CTM Salto Grande

Continúa en la página siguiente



Tabla 1: Metadatos de todas las estaciones pluviométricas proporcionadas para este informe por SISA. Información creada por SISA a partir de los datos enviados por cada uno de los países miembros.

País	Estación	Código	Coordenadas	Altitud (m)	Longitud (m)	Latitud (m)	Fuente
Uruguay	UR10	Río Uruguay		3138	5802		INARA Prefectura Argentina



SISA SISTEMA DE INFORMACIÓN SOBRE SEQUÍAS PARA EL SUR DE SUDAMÉRICA

€	P	P	R	P	C	-	-	T
€	a	A	i	a	o	2	5	M
	r	O	o	r	n	3	7	S
	a	1		a	c	.4	.4	a
	g			-	e	1	5	l
	u				p			t
	a		g		c			o
	y		u		i			G
			a		'			r
			y		o			a
					n			n
								d
								e
								A
								N
								N
								P
€	P	P	R	P	A	-	-	A
€	a	A	i	a	s	2	5	N
	r	O	o	r	u	5	7	N
	a	2		a	n	.2	.6	P
	g			-	c	8	4	
	u		g		i			
	a		u		o			
	y		a		n			
			y					
€	B	B	P	(				S
€	o	O	I	P				e



SISA SISTEMA DE INFORMACIÓN SOBRE SEQUÍAS PARA EL SUR DE SUDAMÉRICA

	l	0	a	i				n
	i	1	t	l				a
	v		a	c				m
	i			o				h
	a			-				i
			m					
			a					
			y					
			o					
			y					
			P					
			a					
			r					
			a					
			-					
			g					
			u					
			a					
			y					
)					
€	B	B	A					S
€	o	O	l					e
	l	0	t					n
	i	2	i					a
	v		p					m
	i		l					h
	a		a					i
			n					
			o					
€	B	B	A					S
€	o	O	m					e
7	l	0	a					n
	i	3	z					a
	v		'					m
	i		o					h
	a		n					i
			i					
			c					
			a					
€	B	B	P		6	-	-	F
€	r	R	a		0	1	4	U



SISA SISTEMA DE INFORMACIÓN SOBRE SEQUÍAS PARA EL SUR DE SUDAMÉRICA

	a s i l	0 1	r a n a i b a	6 1 0 0 8 0	8 . 4 0	9 . 0 9	R N A S
			/ P a r a n a ,				
€	B r a s i l	B R 0 2	P a r a n a i b a	1 9 0 2 7	- 1 9 . 1 0	- 5 0 . 2 9	S A O S I M A O
			/ P a r a n a ,				
7	B r a s i l	B R 0 3	P a r a n a i b a	6 0 1 6 0 0 8 0	- 1 8 . 4 6	- 4 7 . 9 3	C E M I G



SISA SISTEMA DE INFORMACIÓN SOBRE SEQUÍAS PARA EL SUR DE SUDAMÉRICA

7			a				
1	B	B	/				
	r	R	P	6	-	-	C
	a	O	a	0	1	4	E
	s	4	r	3	9	7	M
	i		a	3	.	.	I
	l		n	5	1	6	G
			a	0	3	9	
			i	8			
			b	0			
			a				
			/				
			P				
			a				
			r				
			a				
			n				
			a				
			,				
7	B	B	G	6	-	-	A
2	r	R	r	1	1	5	E
	a	O	a	9	9	0	S
	s	5	n	9	.	.	B
	i		d	8	8	3	R
	l		e	0	6	4	A
			/	8			S
			P	0			I
			a				L
			-				
			r				
			a				
			n				
			,				



SISA SISTEMA DE INFORMACIÓN SOBRE SEQUÍAS PARA EL SUR DE SUDAMÉRICA

7 3	B r a s i l	B R 0 6	a G r a n d e / P a - r a n ,	6 1 9 4 1 0 8 0	- 2 0 . 3 0	- 4 9 . 1 9	F U R N A S
7 4	B r a s i l	B R 0 7	a G r a n d e / P a - r a n ,	6 1 6 6 1 0 0 0	- 2 0 . 6 7	- 4 6 . 3 1	F U R N A S
7 5	B r a s i l	B R 0 8	a T i e t ^ e / P a -	6 2 9 0 0 0 8 0	- 2 0 . 6 7	- 5 1 . 2 9	T I J O A



SISA SISTEMA DE INFORMACIÓN SOBRE SEQUÍAS PARA EL SUR DE SUDAMÉRICA

7	B	B	r	6	-	-	R
€	r	R	a	2	2	5	I
	a	0	n	0	0	1	O
	s	9	,	2	.	.	P
	i		a	0	3	3	A
	l		T	0	7	6	R
			i	8			A
			e	0			N
			^				A
			/				
			P				
			a				
			-				
			r				
			a				
			n				
			,				
			a				
			P	6	-	-	C
			a	3	2	5	E
			r	9	2	2	S
			a	9	.	.	P
			n	5	4	9	
			,	0	8	5	
			a	8			
				0			

Continúa en la página siguiente



SISA SISTEMA DE INFORMACIÓN SOBRE SEQUÍAS PARA EL SUR DE SUDAMÉRICA

Tabla 1: Metadatos de todas las estaciones fluviométricas proporcionadas para este informe por SISA. Información creada por SISA a partir de los datos enviados por cada uno de los países miembros.

N r o	P a i s	I D	C u e n c a	E s t . F l u v . .	L a t	L o n	Fuen te
7 8	B r a s i l	B R 1 1	P a r a n a p a n e m a / P a r a n . a	6 4 2 1 5 0 8 0	- 2 3 . 2 1	- 4 9 . 2 2	PARA NAP ANE MA
7 9	B r a s i l	B R 1 2	P a r a n a p a n	6 4 5 7 1 0 8 0	- 2 2 . 6 0	- 5 2 . 8 7	PARA NAP ANE MA



SISA SISTEMA DE INFORMACIÓN SOBRE SEQUÍAS PARA EL SUR DE SUDAMÉRICA

			e m a / P a r a n ,					
8 0	B r a s i l	B R 1 3	P a r a n a p a n e m a / P a r a n ,	6 4 6 0 9 0 0 0	- 2 2 . 3 9	- 5 4 . 7 9		ANA
8 1	B r a s i l	B R 1 4	P a r a n a p a n e	6 4 6 8 5 0 0 0	- 2 3 . 3 2	- 5 2 . 6 6		ANA



SISA SISTEMA DE INFORMACIÓN SOBRE SEQUÍAS PARA EL SUR DE SUDAMÉRICA

8 2	B r a s i l	B R 1 5	m a / P a r a n , a P a r a n a p a n e m a / P a r a n , a P a r a n a p a n e m	6 4 6 9 3 0 0 0	- 2 3 . 1 9	- 5 3 . 3 1	ANA
8 3	B r a s i l	B R 1 6	m a / P a r a n , a P a r a n a p a n e m	6 4 8 3 0 0 0	- 2 4 . 1 8	- 5 3 . 7 4	ANA



SISA SISTEMA DE INFORMACIÓN SOBRE SEQUÍAS PARA EL SUR DE SUDAMÉRICA

			a / P a r a n ,					
8 4	B r a s i l	B R 1 7	P a r a n a p a n e m a	6 4 9 0 2 0 8 0 / 1 9 0 5 8	- 2 5 . 4 0	- 5 4 . 5 8	ITAIP U	
			/ P a r a n ,				BINA CIO-	
8 5	B r a s i l	B R 1 8	I g u a . c u / P	6 5 8 0 3 0 0 2	- 2 5 . 7 9	- 5 2 . 1 1	NAL COP EL	



SISA SISTEMA DE INFORMACIÓN SOBRE SEQUÍAS PARA EL SUR DE SUDAMÉRICA

			a					
			-					
			r					
			a					
			n					
			,					
			a					
8	B	B	l	6	-	-	ITAIP	
6	r	R	g	5	2	5	U	
	a	1	u	9	5	3		
	s	9	a	8	.	.		
	i		,	7	5	9		
	l		c	0	6	3		
			u	0				
			/	0				
			P					
			a					
			-					
			r					
			a					
			n					
			,					
			a					
8	C	4	R	R	-	-	DGA-	
7	h	3	'	'	2	7		
	i	2	i	i	9	0		
	l	3	o	o	.	.		
	e	0	E	E	9	9		
		0	l	l	8	0		
		1	q	q				
			u	u				
			i	i				
				e				
				n				
				A			CHIL	
				l			E	
				m				
				e				
				n				
				d				
				r				



SISA SISTEMA DE INFORMACIÓN SOBRE SEQUÍAS PARA EL SUR DE SUDAMÉRICA

88	Chile	541002	Río Aconcagua	a l Río Aconcagua en Chacabuco quinto	-3285	-7051	DGA-
89	Chile	830700	Río Bío Bío	Río Bío Bío	-3820	-7131	DGA-



SISA SISTEMA DE INFORMACIÓN SOBRE SEQUÍAS PARA EL SUR DE SUDAMÉRICA

		2	o - B ' I o	o ' I o					
				L l a n q u ' e n					CHIL E
9 0	C h i l e	1 2 4 5 2 0 0 1	R ' I o P ' e r e z	R ' I o P ' e r e z		- 5 2 . 5 5	- 7 1 . 9 8		DGA-
				D e s e m b o c a - d u r a					CHIL E
9	C	1	R	R		-	-		DGA-



SISA SISTEMA DE INFORMACIÓN SOBRE SEQUÍAS PARA EL SUR DE SUDAMÉRICA

1	h i l e	3 1 0 0 0 2	' i o S a n J o s ' e	i o S a n J o s e	1 8 . 5 8	6 9 . 8 1	
				E n A u s i p a r			CHIL E
9 2	C h i l e	2 1 0 1 0 0 1	R ' i o L o a	R i o L o a A n - t e s	- 2 1 . 6 6	- 6 8 . 6 6	DGA-
				R e p r e s a			CHIL E



SISA SISTEMA DE INFORMACIÓN SOBRE
SEQUIÁS PARA EL SUR DE SUDAMÉRICA

Lequena



SISA SISTEMA DE INFORMACIÓN SOBRE SEQUÍAS PARA EL SUR DE SUDAMÉRICA

Tabla 1: Metadatos de todas las estaciones fluviométricas proporcionadas para este informe por SISA. Información creada por SISA a partir de los datos enviados por cada uno de los países miembros.

N r o	P a í s	I D	C u e n c a	E s t. F l u v i o	L a t	L o n	F u e n t e
9 3	C h i l e	3 4 3 0 0 3	R í o C o p i a p í o	R i o C o p i a p o E n P a s t i l l o	- 2 8 . 0 0	- 6 9 . 9 7	D G A - C H I L E
9 4	C h i l e	4 3 1 4 0 0 2	R í o C l a	R i o C l a r	- 2 9 . 9 8	- 7 0 . 5 5	D G A - C H I L E



SISA SISTEMA DE INFORMACIÓN SOBRE SEQUÍAS PARA EL SUR DE SUDAMÉRICA

	le	5002	o M o s t a z a l	M o s t a z a l E n C a r e n R i o R a p e l E n J u n t a R i o G r a n d e	. 8 4	. 7 7	-
97	Chile	4522002	R ' i o R a p e l	R i o R a p e l E n J u n t a R i o G r a n d e	- 3 0 7 1	- 7 0 8 7	D G A -
98	Chile	4523002	R ' i o G r a n d e	R i o G r a n d e	- 3 0 7 0	- 7 0 9 2	C H I L E D G A -



SISA SISTEMA DE INFORMACIÓN SOBRE SEQUÍAS PARA EL SUR DE SUDAMÉRICA

				E				C
				n				H
				P				I
				u				L
				n				E
				t				
				i				
				l				
				l				
				a				
				S				
				a				
				n				
				J				
				u				
				a				
				n				
9	C	4	R	R	C	-	-	D
9	h	5	'	i	o	3	7	G
	i	3	i	o	g	1	1	A
	l	1	o		o	.	.	-
	e	0	C		t	0	0	
		0	o		i	3	4	
		2	g					
			o					
			t					
			'					
			i					
				E				C
				n				H
				t				I
				r				L
				a				E
				d				
				a				
				E				



SISA SISTEMA DE INFORMACIÓN SOBRE SEQUÍAS PARA EL SUR DE SUDAMÉRICA

			a n t e	a n t e				C H I L E
1	C	7	R	R	-	-	D	D
0	h	1	'	i	3	7	G	G
2	i	1	l	o	5	1	A	-
	l	5	o	P	.	.	-	
	e	0	P	a	2	0		
		0	a	l	7	2		
		1	l	o				
			s	s				
				E				C
				n				H
				J				I
				u				L
				n				L
				t				E
				a				
				C				
				o				
				n				
				C				
				o				
				-				
				l				
				o				
				r				
				a				
				d				
				o				
1	C	7	R	R	-	-	D	D



SISA SISTEMA DE INFORMACIÓN SOBRE SEQUÍAS PARA EL SUR DE SUDAMÉRICA

03	Chile	330001	' I o P e r q u i - l a u q u ' e n	i o P e r q u i l a u - q u e n E n S a n M a n u e l R i o L o n g a v ' i E n	3638	7162	G A - C H I L E D G A - C H
104	Chile	735003	R ' I o L o n g a v ' i		-3626	-7134	



SISA SISTEMA DE INFORMACIÓN SOBRE SEQUÍAS PARA EL SUR DE SUDAMÉRICA

105	Chile	7354002	Río Achi-bueno	El Castillo Rio Achi - buen o En La Recova Rio Cl a	-36.00	-71.44	ILE DGA - CHILE
106	Chile	737200	Río C l		-35.18	-71.38	DGA -



SISA SISTEMA DE INFORMACIÓN SOBRE
SEQUIAS PARA EL SUR DE SUDAMÉRICA

1

a
r
o

r
o
E
n
C
a
m
a
r
i
c
o

C
H
I
L
E



SISA SISTEMA DE INFORMACIÓN SOBRE SEQUÍAS PARA EL SUR DE SUDAMÉRICA

109	Chile	8123001	Río Itata	En Cholliguan	-37.15	-72.07	DGA
							CHILE
110	Chile	8124002	Río Itata	En Trilaleo	-37.07	-72.18	DGA
							CHILE
111	Chile	8121	Río	Río	-37	-72	DGA



SISA SISTEMA DE INFORMACIÓN SOBRE SEQUÍAS PARA EL SUR DE SUDAMÉRICA

1	i l e	3 2 0 0 1	I O D i g u i l l ' i n	O D i g u i l i n E n L o n g i t u d i - n a l	6 . 8 7	2 . 3 3	A -
1 1 2	C h i l e	8 3 1 7 0 0 1	R ' I O B i o - B ' I O	R i o B i o b i o E n R	- 3 7 . 7 1	- 7 1 . 9 0	D G A - C



SISA SISTEMA DE INFORMACIÓN SOBRE SEQUÍAS PARA EL SUR DE SUDAMÉRICA

				u				H
				c				I
				a				L
				l				E
				h				
				u				
				e				
1	C	8	R	R	-	-	D	
1	h	3	´	i	3	7	G	
3	i	3	l	o	7	2	A	
	l	4	o	B	.	.	-	
	e	0	B	i	5	5		
		0	i	o	5	9		
		1	o	b				
			-	i				
			B	o				
			´	E				
			l	n				
			o					
				C				C
				o				H
				i				I
				h				L
				u				E
				e				
				R				
1	C	8	R	R	-	-	D	
1	h	3	´	i	3	7	G	
4	i	4	l	o	7	2	A	
	l	2	o		.	.	-	
	e	0	R	R	8	3		
		0	e	e	5	8		
		1	n	n				
			a	a				
			i	i				
			c	c				
			o	o				
				E				C
				n				H
				L				I
				o				L



SISA SISTEMA DE INFORMACIÓN SOBRE SEQUÍAS PARA EL SUR DE SUDAMÉRICA

115	Chile	9123001	Río Cautín	Regional Río Cautín En Rari-Ruca Río Cautín	-38.43	-72.01	DGA -	E
116	Chile	9129002	Río Cautín	Regional Río Cautín	-38.69	-72.50	DGA -	CHILE



SISA SISTEMA DE INFORMACIÓN SOBRE SEQUÍAS PARA EL SUR DE SUDAMÉRICA

			I	E				
			n	n				
				C				C
				a				H
				j				I
				o				L
				n				E
1	C	9	R	R	-	-		D
1	h	1	´	i	3	7		G
7	i	3	i	o	8	2		A
	l	4	o		.	.		-
	e	0	H	H	8	3		
		0	u	u	5	3		
		1	i	-				
			-	c				C
			c	h				H
			h	a				I
			a	h				L
			h	u				E
			u	e				
			e					
				E				
				n				
				F				
				a				
				j				
				a				
				2				
				4				
				0				
				0				
				0				
				R				D
1	C	9	R	i	-	-		G
1	h	1	´	o	3	7		A
8	i	3	i	Q	8	2		-
	l	5	o	u	.	.		
	e	0	Q	e	8	6		
		0	u		5	2		



SISA SISTEMA DE INFORMACIÓN SOBRE
SEQUIAS PARA EL SUR DE SUDAMÉRICA

n
M
e
l
i
p
e
u
c
o

H
I
L
E



SISA SISTEMA DE INFORMACIÓN SOBRE SEQUÍAS PARA EL SUR DE SUDAMÉRICA

Tabla 1: Metadatos de todas las estaciones fluviométricas proporcionadas para este informe por SISA. Información creada por SISA a partir de los datos enviados por cada uno de los países miembros.

N r o	P a í s	I D	C u e n c a	E s t . F l u v . .	L a t	L o n	F u e n t e
1	C	9	R	R	-	-	D
2	h	4	'	i	3	7	G
1	i	0	i	o	8	2	A
	l	4	o		.	.	-
	e	0	A		9	2	
		0	l		8	3	
		1	l				
			i				
			p				
			'				
			e				
			n				
				p			C
				e			H
				n			I
				E			L
				n			E
				L			
				o			
				s			
				L			
				a			
				u			
				r			



SISA SISTEMA DE INFORMACIÓN SOBRE SEQUÍAS PARA EL SUR DE SUDAMÉRICA

1	C	9	R	e	-	-	D
2	h	4	'	l	3	7	G
2	i	1	i	s	9	1	A
	l	4	o	R	.	.	-
	e	0	T	i	3	7	
		0	r	o	3	7	
		1	a	T			
			n	r			
			c	a			
			u				
			r				
			a	A			C
				n			H
				t			I
				e			L
				s			E
				R			
				i			
				o			
				L			
				l			
				a			
				-			
				f			
				e			
				n			
				c			
				o			
1	C	9	R	R	-	-	D
2	h	4	'	i	3	7	G
3	i	2	i	o	9	2	A
	l	0	o	T	.	.	-
	e	0	T	o	2	2	
		0	o	l	7	3	
		1	l	t			



SISA SISTEMA DE INFORMACIÓN SOBRE SEQUÍAS PARA EL SUR DE SUDAMÉRICA

			t ' e n	e n E n V i l l a r i c a				C H I L E
1	C	9	R	R	-	-	D	
2	h	4	'	i	3	7	G	
4	i	3	l	o	9	2	A	
	l	4	o	D	.	.	-	
	e	0	D	o	1	6		
		0	o	n	0	8		
		1	n	g				
			g	u				
			u	i				
			i	E				C H I L E
				n				
				G				
				o				
				r				
				b				
				e				
				a				
1	C	1	R	R	-	-	D	
2	h	0	'	i	3	7	G	
5	i	1	l	o	9	2	A	
	l	1	o	S	.	.	-	
	e	1	S	a	7	4		
		0	a	n	7	7		
		0	n	P				
		1	P					



SISA SISTEMA DE INFORMACIÓN SOBRE SEQUÍAS PARA EL SUR DE SUDAMÉRICA

			e - d r o	P e - d r o E n D e s - a g u e L a g o R i - n i h u e R i o C o l l i l e u f			C H I L E
1 2 6	C h i l e	1 0 1 2 1 0 0 1	R i o C o l l i l e u -	R i o C o l l i l e u f	- 3 9 . 8 6	- 7 2 . 8 3	D G A -



SISA SISTEMA DE INFORMACIÓN SOBRE SEQUÍAS PARA EL SUR DE SUDAMÉRICA

			f	u	E			C
					n			H
					L			I
					o			L
					s			E
					L			
					a			
					g			
					o			
					s			
1	C	1	R	R	R	-	-	D
2	h	0	'	i	o	4	7	G
7	i	1	i	o	C	0	2	A
	l	2	o	a	a	.	.	-
	e	2	C	l	l	5	6	
		0	a	e	e	7	1	
		0	l	-	-			
		1	l	C	l			
			e	a	e			
			-	l	E			C
			C	l	n			H
			a	e	B			I
			l	E	a			L
			e	n	S			E
				B	a			
				a	s			
				S	a			
				a	n			
				J	a			
				v	v			
				i	i			
				e	e			



SISA SISTEMA DE INFORMACIÓN SOBRE SEQUÍAS PARA EL SUR DE SUDAMÉRICA

128	Chile	1034001	Río Cruces	Río Cruces En Rucaco	-39.55	-72.90	DGA - CHILE
129	Chile	1037001	Río Inaque	Río Inaque En Mafil	-39.67	-72.95	DGA - CHILE
130	Chile	1034000	Río C	Río Cal	-40.25	-72.27	DGA -



SISA SISTEMA DE INFORMACIÓN SOBRE SEQUÍAS PARA EL SUR DE SUDAMÉRICA

		0	a	c				
		1	l	u				
			c	r				
			u	r				
			-	u				
			r	-				
			r	p				C
			u	e				H
			p	E				I
			e	n				L
				D				E
				e				
				s				
				e				
				m				
				-				
				b				
				o				
				c				
				a				
				d				
				u				
				r				
				a				
1	C	1	R	R	-	-	D	
3	h	0	'	i	4	7	G	
1	i	3	o	o	0	3	A	
	l	2		P	.	.	-	
	e	8	P	i	3	0		
		0	i	l	8	0		
		0	l	m				
		1	m	a				
			a	i				
			i	-				
			-					
			q	q			C	
			u	u			H	
			'	e			I	
			e	n			L	



SISA SISTEMA DE INFORMACIÓN SOBRE SEQUÍAS PARA EL SUR DE SUDAMÉRICA

			n	E			E
				n			
				S			
				a			
				n			
				P			
				a			
				b			
				l			
				o			
1	C	1	R	R	-	-	D
3	h	0	'	i	4	7	G
2	i	3	i	o	0	3	A
	l	5	o	N	.	.	-
	e	6	N	e	7	2	
		0	e	g	1	3	
		0	g	r			
		1	r	o			
			o	E			
				n			
				C			C
				h			H
				a			I
				h			L
				u			E
				i			
				l			
				c			
				o			
1	C	1	R	R	-	-	D
3	h	0	'	i	4	7	G
3	i	3	i	o	0	3	A
	l	6	o	D	.	.	-
	e	2	D	a	6	0	
		0	a	m	2	6	
		0	m	a			
		1	a	s			
			s	E			
				n			
				T			C



SISA SISTEMA DE INFORMACIÓN SOBRE
SEQUIAS PARA EL SUR DE SUDAMÉRICA

a
c
a
m
o

H
I
L
E



SISA SISTEMA DE INFORMACIÓN SOBRE SEQUÍAS PARA EL SUR DE SUDAMÉRICA

136	Chile	11302001	Río Ñiregua	es Junta Rio Mororo Río Ñiregua En Villamánig	-45.15	-72.12	LE DGA - CHILE
-----	-------	----------	-------------	---	--------	--------	----------------



SISA SISTEMA DE INFORMACIÓN SOBRE
SEQUÍAS PARA EL SUR DE SUDAMÉRICA

1	C	1	R	u				
3	h	1	'	a				
7	i	3	i	l				
	l	0	o	e				
	e	7	E	s				
		0	m	R		-	-	D
		0	p	i		4	7	G
		1	e	o		5	2	A
			r	E		.	.	-
			a	m		2	2	
			-	p		3	3	
			d	e				
			o	r				
			r	a				
			G	d				
			u	o				
			i	r				
			l	G				
			l	u				
			e	i				
			r	l				
			-	e				
			m	r				
			o	-				
				m				
				o				
				A				
				n				
				t				
				e				
				s				
				J				
				u				
				n				
				t				
				a				
				M				



SISA SISTEMA DE INFORMACIÓN SOBRE SEQUÍAS PARA EL SUR DE SUDAMÉRICA

1 3 8	C h i l e	1 1 3 0 8 0 0 1	R ' i o	a n ~ i g u a l e s	R i o	M a g n i -	- 4 5 . 3 8	- 7 2 . 4 7	D G A -
			M a n ~ i h u a - l e s	g u a l e s	A n t e s	R i o			C H I L E
1	C	1	R	J u n t a S i m p s o n R	R	-	-	D	



SISA SISTEMA DE INFORMACIÓN SOBRE SEQUÍAS PARA EL SUR DE SUDAMÉRICA

141	Chile	12876001	Río Grande	Ferriopero Grande	-53.89	-68.88	DGA
				ENTERRADA DEL FUEGO			CHILE
142	Chile	12284002	Río Bagua	Riobagua	-51.02	-72.48	DGA



SISA SISTEMA DE INFORMACIÓN SOBRE SEQUÍAS PARA EL SUR DE SUDAMÉRICA

4	h	2	'	i	5	7	G
4	i	2	i	o	1	2	A
	l	8	o	L	.	.	-
	e	4	L	a	0	5	
		0	a	s	5	2	
		0	s	C			
		6	C	h			
			h	i			
			i	-			
			-				
			n	n			C
			a	a			H
			s	s			I
				E			L
				n			E
				C			
				e			
				r			
				r			
				o			
				G			
				u			
				i			
				d			
				o			

Continúa en la página siguiente



Tabla 1: Metadatos de todas las estaciones fluviométricas proporcionadas para este informe por SISSA. Información creada por SISSA a partir de los datos enviados por cada uno de los países miembros.

N o	P a ís	I D	C o d e	Est. Fluv.	L a t	L o n	F u e n t e
1	C	1	R	Chi-	-	-	D
4	h	2	,	Rio	5	7	G
5	i	2	l	Las	1	2	A
	e	8	o	Chi-	.	.	-
		4	L	nas	2	5	-
		0	a	Antes	5	2	C
		0	s	Desag			H
		7	n	u'e			I
			a	Del			L
			s	Toro			E
Fin de la tabla							

El Anexo B contiene figuras con las series temporales de cada una de las estaciones fluviométricas proporcionadas por los cinco países miembros del Centro Regional del Clima para el Sur de América del Sur que respondieron la solicitud que realizó SISSA (Argentina, Brasil, Chile, Paraguay y Uruguay).

6.1.2. Selección de estaciones para verificación

En base a la longitud y calidad de las series temporales de caudales recibidas desde cada país, se realizó un proceso de selección de estaciones fluviométricas a utilizar en el proceso de verificación. El detalle del proceso de selección realizado para las estaciones proporcionadas por cada país es el que se describe a continuación:

Argentina: Las estaciones AR1, AR3, AR5, AR6, AR14, AR15, AR17, AR20, AR22, AR24, AR25, AR26, AR28 y AR29 fueron descartadas debido a que solo tenían datos en fechas anteriores al año 1990 o bien por tener algunos valores outliers que no pudieron ser explicados. Por



otra parte, las estaciones AR31 hasta AR52 fueron descartadas por no contener series temporales en lo absoluto, sino solo metadatos.

Brasil: Las estaciones BR12, BR13, BR14, BR15, BR16, BR17, BR18 y BR19 fueron descartadas por no contener series temporales en lo absoluto, sino solo metadatos.

Chile: Las estaciones 8307002, 2101001, 8334001, 10122001 y 12284007 fueron descartadas debido a que solo tenían datos en fechas anteriores al año 1990 o bien por tener algunos valores outliers que no pudieron ser explicados.

Paraguay: Todas las estaciones proporcionadas fueron utilizadas.

Uruguay: Las estaciones UR09 y UR10 fueron descartadas por no contener series temporales en lo absoluto, sino solo metadatos.

6.2. Metodología de verificación SSI-1

El cálculo del SSI-1 se realizó para el período de referencia 1991–2020, con el fin de asegurar la coherencia y comparabilidad estadística entre las dos series temporales analizadas: una proveniente de las estaciones de aforo y otra generada en base al producto GloFASv4. El uso de este período específico se basó en la disponibilidad de datos históricos de caudal, los cuales permitieron garantizar una adecuada evaluación de los eventos de sequía hidrológica.

Para calcular el SSI-1 basado en los caudales observados, se utilizó la función ssi del paquete SpatIndex, diseñado para la creación de índices de sequía a partir de productos espacialmente distribuidos y series temporales hidrometeorológicas. Este análisis se realizó empleando los datos de las estaciones de aforo disponibles para el período 1990–2020. Por otro lado, el cálculo del SSI-1 a partir de los datos de GloFASv4 se realizó usando el paquete spatSSI, empleando el mismo período de referencia (1991–2020). En ambos casos, la función de distribución log-logística fue seleccionada para ajustar los datos de caudal y obtener los valores del índice, ya que esta función ha demostrado ser adecuada para representar las distribuciones de caudal en este tipo de análisis.

6.3. Metodología de verificación SSI-1



Para evaluar el desempeño de GloFASv4 en la caracterización de sequías hidrológicas, utilizamos dos análisis en cada uno de los 91 cuencas seleccionadas: i) un análisis de correlación cruzada, para medir la similitud entre las series temporales observadas y las series temporales SSI-1 de GloFASv4, y ii) un análisis de coincidencia de eventos, para evaluar la interdependencia estadística entre eventos específicos de ambas series temporales del SSI-1, las observadas y las de GloFASv4.

6.3.1. Correlación cruzada

Un análisis de correlación cruzada (Ecuación 1) mide la similitud de dos series temporales en función del desplazamiento relativo de una respecto a la otra. Dos series temporales (X_t y Y_t) Pueden estar relacionadas en diferentes desfases entre ellas (por ejemplo, la serie temporal

Y
 t
 Y
 t

puede estar relacionada con desfases pasados o futuros de X_t). La función de correlación cruzada se define como un conjunto de correlaciones entre X_{t+h} y Y_t para diferentes desfases ($h = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm n$). En este estudio, X_t representa la serie temporal del SSI-1 con caudales observados para cada una de las 91 cuencas seleccionadas, mientras que Y_t representa la serie temporal del SSI-1 calculado mediante GloFASv4. Adicionalmente, en este estudio, solo se evaluó desfase $h = 0$ dado que ambas series temporales utilizan datos de caudales y el objetivo es ver si los datos de GloFASv4 pueden ser utilizados para representar la sequía hidrológica en cuencas para las que no se cuenta con estaciones de medición de caudales. Los análisis de correlación cruzada se han aplicado previamente para analizar la propagación de sequías meteorológicas a sequías de caudal y para investigar la influencia del clima y las propiedades de la cuenca en las características de las sequías hidrológicas (Barker et al., 2016b; Peña-Gallardo et al., 2019).



6.3.2. Coincidencia de eventos

El análisis de correlación cruzada utiliza la serie temporal completa de los índices de sequía seleccionados y, por lo tanto, toma en cuenta la influencia de los períodos sin sequía. Para superar esta limitación del análisis de correlación cruzada, también utilizamos en este trabajo el análisis de coincidencia de eventos (Donges et al., 2016; Siegmund et al., 2017), una técnica estadística diseñada específicamente para evaluar la interdependencia entre dos series temporales de eventos; en este caso, entre el SSI-1 calculado con datos observados y GloFASv4. Este método examina el grado de asociación temporal entre eventos evaluando la frecuencia de eventos simultáneos, considerando respuestas retrasadas (especificadas por un término de desfase T) y tiempos inciertos (especificados por una ventana de coincidencia ΔT) entre series temporales binarias (Siegmund et al., 2017). Las series binarias se calculan utilizando un umbral, donde las entradas con un valor de uno corresponden a pasos de tiempo con un evento, y las entradas con valor cero corresponden a pasos de tiempo sin un evento (Donges et al., 2016). Este método permite cuantificar la fuerza de las interrelaciones estadísticas entre dos series de eventos A y B, considerando los eventos de tipo B como precursores (el evento B precede al evento A) y desencadenantes (el evento B desencadena el evento A). En este estudio, se analizó únicamente las tasas de coincidencia de precursores y no las tasas de desencadenantes, porque estamos interesados en determinar el número de eventos de sequía hidrológica calculados con datos observados, que coincidieron con eventos de sequía hidrológica calculados mediante GloFASv4. De igual manera, no se evaluaron desfases entre las series temporales. La tasa de coincidencia de precursores se calcula de la siguiente manera:

EQ 2 (Reporte PDF)

La Ecuación 2 cuantifica la proporción de eventos de tipo A que son precedidos por al menos un evento de tipo B. Considera múltiples eventos de tipo B dentro del intervalo de coincidencia como una única ocurrencia. La función de Heaviside $\Theta()$ se utiliza en la ecuación, definida como $\Theta(x) = 0$ para $x \leq 0$ y $\Theta(x) = 1$, de lo contrario. Además, se emplea la función indicadora $1I()$ para representar la presencia de valores dentro de un intervalo



específico I , definida como $1I(x)=1$ para x dentro de I y $1I(x)=0$, de lo contrario.

El valor óptimo de la tasa de coincidencia de precursores es uno y representa la proporción de eventos A que coinciden con eventos B . Por ejemplo, si se obtiene un valor de 0.6 en este caso, significa que el 60% de los eventos de sequía calculados con datos observados coinciden con un evento de sequía calculado con GloFASv4.

Este método ha sido ampliamente utilizado para analizar i) inundaciones como desencadenantes de brotes epidémicos (Donges et al., 2016); ii) extremos meteorológicos (Siegmund et al., 2016); iii) la sincronización de sequías e inundaciones (Siegmund et al., 2017); y iv) sequías y períodos húmedos (He and Sheffield, 2020), así como para calcular las tasas de coincidencia de precursores y desencadenantes (Donges et al., 2016). El umbral seleccionado para definir un evento de sequía es $\leq -1,0$ (Barker et al., 2016b). En este sentido, se consideran como eventos (valor = 1) aquellos valores menores o iguales al umbral seleccionado, mientras que los valores superiores al umbral representan períodos sin evento (valor = 0).

Además, para evaluar la fortaleza de la relación estadística entre estos tipos de sequía, realizamos una prueba de significancia asumiendo un proceso de Poisson, que cuantifica la robustez de la relación entre ellos. Esta prueba evalúa la hipótesis de que la ocurrencia de estas señales se distribuye de manera aleatoria y no está relacionada entre sí. La metodología para este enfoque se explica en detalle en Donges et al. (2016) y ha sido utilizada en estudios previos (Donges et al., 2016; Siegmund et al., 2017; He and Sheffield, 2020).

6.4. Resultados de verificación SSI-1

Esta sección presenta los resultados de la evaluación del SSI-1, obtenidos a partir del producto GloFASv4 y distribuidos espacialmente en toda la zona de estudio.

6.4.1. Análisis de correlación cruzada



La Figura 5 muestra las series temporales del SSI-1 calculadas con datos observados (azul) y aquellas calculadas con GloFASv4 (rojo) para dos cuencas: i) Uruguay (VAL.AR12; panel superior), y ii) Río Longaví en Chile (VAL.CH18; panel inferior). Ambas figuras indican una fuerte concordancia entre el SSI-1 calculado a partir de los caudales observados y los de GloFASv4. La cuenca en Uruguay muestra períodos secos en 2002 y 2021 que son bien capturados por GloFASv4, mientras que la cuenca en Chile muestra períodos secos en 1997, 1999 y 2021, para los cuales los valores de GloFASv4 son más extremos en comparación con las observaciones. La correlación cruzada de la cuenca en Uruguay es de 0.84, mientras que la de la cuenca ubicada en Chile es de 0.83.

Figura 5: Series temporales del SSI-1 para dos cuencas: Uruguay (VAL.AR12 [lon = -58.0047, lat = -31.4052]; panel superior); Río Longaví, Chile (VAL.CH18 [lon = -71.3400, lat = -31.2600]; panel inferior) para el período 1991–2021.

La Figura 6 muestra un boxplot de todos los valores de correlación cruzada en el área de estudio. A pesar de la fuerte concordancia en estas cuencas, la mediana de la correlación cruzada para todas las cuencas analizadas es de 0.70 y se representa como una línea negra gruesa. Los límites superior e inferior de la caja del boxplot representan los cuantiles 0.75 y 0.25, respectivamente, con valores de correlación cruzada de 0.77 y 0.61. La línea roja representa la mediana más alta de la correlación cruzada obtenida por Baez-Villanueva et al. (2021) al evaluar diversos índices de sequía meteorológica, de humedad del suelo y de nieve a diferentes escalas en Chile para ser utilizados como proxies de sequías hidrológicas. El mejor desempeño medio del SSI-1 obtenido con GloFASv4 muestra que este índice supera a otros índices basados en precipitación, evaporación, humedad del suelo y equivalente en agua de nieve para caracterizar sequías hidrológicas a escala de cuenca.

Figura 6: Boxplot de los valores de correlación cruzada para todas las cuencas en la zona de estudio durante el período 1991–2021. La línea roja indica la mediana del índice de sequía meteorológica, de humedad del suelo o de nieve que mejor representó las sequías hidrológicas en Chile, según la evaluación de Baez-Villanueva et al. (2021).

La Figura 7 muestra la distribución espacial de los valores de correlación cruzada en las cuencas seleccionadas para la evaluación. En general, la mayoría de las cuencas presentan valores de correlación superiores a 0.6, lo que indica que el SSI-1 calculado a partir de GloFASv4 es capaz de representar de manera adecuada la sequía hidrológica. Se observa un bajo desempeño en la parte austral de Chile, lo cual podría estar relacionado con procesos



nivales, y en la región centro-norte y norte de Argentina, lo cual podría estar vinculado a procesos antropogénicos.

Figura 7: Distribución espacial de las estaciones utilizadas en la evaluación del producto GloFASv4 SSI-1, según su desempeño en la evaluación de correlación cruzada durante el período 1991–2021.

6.4.2. Análisis de coincidencia de eventos

La Figura 8 presenta las series temporales del SSI-1 calculadas a partir de datos observados (en azul) y aquellas derivadas de GloFASv4 (en rojo) para dos cuencas: i) Uruguay (VAL.AR12; panel superior) y ii) Grande Paraná en Argentina (panel inferior). Para definir un evento de sequía, se utilizó un umbral de SSI-1 de -1, considerando como evento cualquier valor inferior a este. En la cuenca de Uruguay, se observa un precursor rate de 0.67, mientras que en la cuenca de Grande Paraná el precursor rate es de 0.78. Esto indica que GloFASv4 detecta correctamente la mayoría de los eventos de sequía, aunque en general tiende a identificar un mayor número de eventos en comparación con los valores del SSI-1 obtenidos a partir de datos observados. Esta tendencia sugiere que GloFASv4 puede ser más sensible a las condiciones de sequía, capturando eventos adicionales que podrían no ser tan evidentes en los registros observados.

Figura 8: Series temporales del SSI-1 para dos cuencas: Uruguay (VAL.AR12 [lon = -58.0047, lat = -31.4052]; panel superior); Río Longaví, Chile (VAL.CH18 [lon = -71.3400, lat = -31.2600]; panel inferior) para el período 1991–2021.

La Figura 9 muestra un boxplot de los valores de precursor rate obtenidos para todas las cuencas en el análisis de coincidencia de eventos. La mediana del precursor rate es de 0.62, representada por una línea negra gruesa en el gráfico. Los límites superior e inferior de la caja del boxplot corresponden a los cuantiles 0.75 y 0.25, con valores de 0.73 y 0.51, respectivamente. Además, se incluye una línea roja que marca un precursor rate de 0.54, lo que refleja la mediana obtenida por Báez-Villanueva et al. (2021) en un estudio anterior que evaluó diversos índices de sequía meteorológica, de humedad del suelo y de nieve en Chile. La mayor mediana del precursor rate obtenida en este estudio con GloFASv4 indica que, en promedio, este índice tiene un mejor desempeño en la detección de eventos particulares de sequía hidrológica en comparación con otros índices utilizados para representar sequías a escala de cuenca.



Figura 9: Boxplot de los valores de correlación cruzada para todas las cuencas en la zona de estudio durante el período 1991–2021. La línea roja indica la mediana del índice de sequía meteorológica, de humedad del suelo o de nieve que mejor representó las sequías hidrológicas en Chile, según la evaluación de Báez-Villanueva et al. (2021).

La Figura 10 muestra la distribución espacial de los valores de precursor rate en las cuencas seleccionadas para la evaluación mediante el análisis de coincidencia de eventos. Se observan patrones espaciales similares a los de la correlación cruzada, con valores relativamente bajos en el sur de Chile y en el norte de Chile. Además, se identifican cuencas con valores particularmente bajos de precursor rate (inferiores a 0.3) en el noreste de Argentina y en Chile. En particular, la cuenca en el noreste de Argentina, las cuencas del norte de Chile (Río Copiapó, VAL.CH07), y tres cuencas en la zona central de Chile (Río Aconcagua, VAL.CH02; Río Cogotí, VAL.CH13; Río Grande, VAL.CH12; y Río Mostazal, VAL.CH10) presentan un desempeño bajo. El bajo desempeño de las cuencas VAL.CH10, VAL.CH12 y VAL.CH13 se debe a un número muy reducido de eventos de sequía (valores menores a -1) en las series temporales del SSI-1 calculadas con los datos observados, lo que dificulta una evaluación precisa. Estos resultados sugieren que, aunque GloFASv4 es generalmente eficaz en la detección de sequías hidrológicas, existen limitaciones en ciertas regiones que podrían estar relacionadas con la frecuencia y la intensidad de los eventos de sequía observados y, similarmente a otros índices, a modificaciones antrópicas en las cuencas.

Figura 10: Distribución espacial de las estaciones utilizadas en la evaluación del producto GloFASv4 SSI-1, según su desempeño en la evaluación de correlación cruzada durante el período 1991–2021



7. Conclusiones

Los resultados obtenidos a partir del análisis de correlación cruzada y del análisis de coincidencia de eventos destacan la efectividad del producto GloFASv4 en la caracterización de sequías hidrológicas en el sur de Sudamérica. El análisis de correlación cruzada mostró que el SSI-1 calculado a partir de GloFASv4 muestra una alta correlación con las series temporales de caudales observados en las cuencas evaluadas, indicando una fuerte concordancia entre los datos generados por el modelo y las observaciones reales. Este hallazgo sugiere que GloFASv4 puede replicar de manera efectiva los patrones de sequía observados, lo que es crucial para la evaluación precisa de las condiciones hidrológicas en la región.

El análisis de coincidencia de eventos reveló que GloFASv4 detecta correctamente la mayoría de los eventos de sequía, con una tasa de coincidencia de precursores que supera la mediana de estudios previos. Aunque GloFASv4 tiende a identificar un mayor número de eventos en comparación con los datos observados, lo que podría reflejar una mayor sensibilidad del modelo a las condiciones de sequía, los resultados son en general positivos. La capacidad del modelo para identificar eventos de sequía con una alta tasa de coincidencia resalta su efectividad en la detección de sequías en comparación con otros índices evaluados en estudios anteriores.

A nivel espacial, la distribución de los valores de correlación cruzada y las tasas de coincidencia de eventos muestra que la mayoría de las cuencas evaluadas presentan un desempeño positivo, con valores superiores a 0.6. Sin embargo, se observan algunas áreas con bajo desempeño, especialmente en el sur de Chile y en regiones del noreste de Argentina. Estos patrones pueden estar relacionados con procesos nivales y factores antropogénicos que afectan la precisión del modelo en ciertas zonas. A pesar de estas limitaciones regionales, los resultados generales indican que GloFASv4 es una herramienta valiosa para la gestión de sequías hidrológicas, proporcionando una base sólida para la toma de decisiones en regiones con infraestructura de monitoreo limitada.

En conclusión, los análisis sugieren que GloFASv4 tiene un alto potencial para mejorar la caracterización y gestión de sequías hidrológicas en el sur de Sudamérica. La capacidad del



SISA SISTEMA DE INFORMACIÓN SOBRE
SEQUIÁS PARA EL SUR DE SUDAMÉRICA

modelo para replicar patrones observados y detectar eventos de sequía con una alta tasa de coincidencia refuerza su utilidad en la planificación y respuesta ante sequías. Aunque existen algunas limitaciones regionales, el uso de GloFASv4 puede ofrecer un enfoque basado en datos más proactivo y anticipado para la gestión de recursos hídricos, ayudando a mitigar los impactos negativos de las sequías en áreas vulnerables.



Referencias

- Alfieri, L., Burek, P., Dutra, E., Krzeminski, B., Muraro, D., Thielen, J., Pappenberger, F., 2013a. GloFAS—global ensemble streamflow forecasting and flood early warning. *Hydrology and Earth System Sciences* 17, 1161–1175.
- Alfieri, L., Burek, P., Dutra, E., Krzeminski, B., Muraro, D., Thielen, J., Pappenberger, F., 2013b. GloFAS—global ensemble streamflow forecasting and flood early warning. *Hydrology and Earth System Sciences* 17, 1161–1175.
- Bachmair, S., Svensson, C., Hannaford, J., Barker, L.J., Stahl, K., 2016. A quantitative analysis to objectively appraise drought indicators and model drought impacts. *Hydrology and Earth System Sciences* 20, 2589–2609.
- Baez-Villanueva, O.M., Zambrano-Bigiarini, M., Mendoza, P.A., McNamara, I., Beck, H.E., Thurner, J., Nauditt, A., Ribbe, L., Thinh, N.X., 2021. On the selection of precipitation products for the regionalisation of hydrological model parameters. *Hydrology and Earth System Sciences* 25, 5805–5837.
- Baez-Villanueva, O.M., Zambrano-Bigiarini, M., Miralles, D.G., Beck, H.E., Siegmund, J.F., Alvarez-Garretón, C., Verbist, K., Garreaud, R., Boisier, J.P., Galleguillos, M., 2024. On the timescale of drought indices for monitoring streamflow drought considering catchment hydrological regimes. *Hydrology and Earth System Sciences* 28, 1415–1439.
- Barker, L., Hannaford, J., Chiverton, A., Svensson, C., 2016a. From meteorological to hydrological drought using standardised indicators. *Hydrology and Earth System Sciences* .
- Barker, L., Hannaford, J., Parry, S., Smith, K., Tanguy, M., Prudhomme, C., 2019. Historic hydrological droughts 1891–2015: Systematic characterisation for a diverse set of catchments across the uk. *Hydrology and Earth System Sciences* .
- Barker, L.J., Hannaford, J., Chiverton, A., Svensson, C., 2016b. From meteorological to hydrological drought using standardised indicators. *Hydrology and Earth System Sciences* 20, 2483–2505.
- Baugh, C., de Rosnay, P., Lawrence, H., Jurlina, T., Drusch, M., Zsoter, E., Prudhomme, C., 2020. The impact of smos soil moisture data assimilation within the operational global flood awareness system (glofas). *Remote Sensing* 12, 1490.
- Bevacqua, A.G., Chaffe, P.L., Chagas, V.B., AghaKouchak, A., 2021. Spatial and temporal patterns of propagation from meteorological to hydrological droughts in Brazil. *Journal of Hydrology* 603, 126902.
- Bischiñotis, K., van den Hurk, B., Zsoter, E., Coughlan de Perez, E., Grillakis, M., Aerts, J.C., 2019. Evaluation of a global ensemble flood prediction system in Peru. *Hydrological Sciences Journal* 64, 1171–1189.
- Blauhut, V., Gudmundsson, L., Stahl, K., 2015. Towards pan-european drought risk maps: quantifying the link between drought indices and reported drought impacts. *Environmental Research Letters* 10, 014008.
- Cammalleri, C., Arias-Mun˜oz, C., Barbosa, P., de Jager, A., Magni, D., Masante, D., Mazzeschi, M., McCormick, N., Naumann, G., Spinoni, J., et al., 2021. A revision of the combined drought indicator (cdi) used in the european drought observatory (edo). *Natural Hazards and Earth System Sciences* 21, 481–495.
- Copernicus, 2019. The copernicus global flood awareness systems (glofas). overview and service evolution. https://globalfloodpartnership.org/sites/default/files/2019-06/gfp2020/session2/02_Zsoter_ECMWF.pdf.pdf.
- Donges, J.F., Schleussner, C.F., Siegmund, J.F., Donner, R.V., 2016. Event coincidence analysis for quantifying statistical interrelationships between event time series. *The European Physical Journal Special Topics* 225, 471–487.



- Emerton, R., Zsoter, E., Arnal, L., Cloke, H.L., Muraro, D., Prudhomme, C., Stephens, E.M., Salamon, P., Pappenberger, F., 2018. Developing a global operational seasonal hydro-meteorological forecasting system: Glofas-seasonal v1.0. *Geoscientific Model Development* 11, 3327–3346.
- Garreaud, R.D., Boisier, J.P., Rondanelli, R., Montecinos, A., Sepúlveda, H.H., Veloso-Aguila, D., 2020. The central Chile mega drought (2010–2018): a climate dynamics perspective. *International Journal of Climatology* 40, 421–439.
- Gomes, M.S., de Albuquerque Cavalcanti, I.F., Müller, G.V., 2021. 2019/2020 drought impacts on South America and atmospheric and oceanic influences. *Weather and Climate Extremes* 34, 100404.
- Grimaldi, S., Salamon, P., Russo, C., Disperati, J., Zsoster, E., Carton De Wiart, C., Mazzetti, C., Choulga, M., Moschini, F., Harrigan, S., et al., 2023. GloFAS v4.0: towards hyper-resolution hydrological modelling at global scale, in: EGU General Assembly Conference Abstracts, pp. EGU–3410.
- Guillory, L., Pudmenzky, C., Nguyen-Huy, T., Cobon, D., Stone, R., 2023. A drought monitor for Australia. *Environmental Modelling & Software* 170, 105852.
- Hao, Z., Yuan, X., Xia, Y., Hao, F., Singh, V.P., 2017. An overview of drought monitoring and prediction systems at regional and global scales. *Bulletin of the American Meteorological Society* 98, 1879–1896.
- Harrigan, S., Zoster, E., Cloke, H., Salamon, P., Prudhomme, C., 2020a. Daily ensemble river discharge reforecasts and real-time forecasts from the operational Global Flood Awareness System. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions* 2023, 1–22.
- Harrigan, S., Zsoter, E., Alfieri, L., Prudhomme, C., Salamon, P., Wetterhall, F., Barnard, C., Cloke, H., Pappenberger, F., 2020b. GloFAS-ERA5 operational global river discharge reanalysis 1979–present. *Earth System Science Data* 12, 2043–2060.
- Hayes, M.J., Svoboda, M.D., Wardlaw, B.D., Anderson, M.C., Kogan, F., 2012. Drought monitoring: Historical and current perspectives, in: Wardlaw, B.D., Anderson, M.C., Verdin, J.P. (Eds.), *Remote Sensing of Drought: Innovative Monitoring Approaches*. CRC Press/Taylor & Francis.
- He, X., Sheffield, J., 2020. Lagged compound occurrence of droughts and pluvials globally over the past seven decades. *Geophysical Research Letters* 47, e2020GL087924.
- Heim Jr., R.R., Brewer, M.J., 2012. The global drought monitor portal: The foundation for a global drought information system. *Earth Interactions* 16, 1–28.
- Hirpa, F.A., Salamon, P., Alfieri, L., Thielen-del Pozo, J., Zsoter, E., Pappenberger, F., 2016. The effect of reference climatology on global flood forecasting. *Journal of Hydrometeorology* 17, 1131–1145.
- Hirpa, F.A., Salamon, P., Beck, H.E., Lorini, V., Alfieri, L., Zsoter, E., Dadson, S.J., 2018. Calibration of the Global Flood Awareness System (GloFAS) using daily streamflow data. *Journal of Hydrology* 566, 595–606.
- Hoffmann, D., Gallant, A.J.E., Arblaster, J.M., 2020. Uncertainties in drought from index and data selection. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 125, e31946.
- Hunt, K.M., Matthews, G.R., Pappenberger, F., Prudhomme, C., 2022. Using a long short-term memory (LSTM) neural network to boost river streamflow forecasts over the western United States. *Hydrology and Earth System Sciences* 26, 5449–5472.
- Jain, V.K., Pandey, R.P., Jain, M.K., Byun, H.R., 2015. Comparison of drought indices for appraisal of drought characteristics in the Ken River Basin. *Weather and Climate Extremes* 8, 1.
- Kornfeld, R.P., Arnold, B.W., Gross, M.A., Dahya, N.T., Klipstein, W.M., Gath, P.F., Bettadpur, S., 2019. Grace-fo: the gravity recovery and climate experiment follow-on mission. *Journal of Spacecraft and Rockets* 56, 931–951.
- Leeper, R.D., Bilotta, R., Petersen, B., Stiles, C.J., Heim, R., Fuchs, B., Prat, O.P., Palecki, M., Ansari, S., 2022. Characterizing US drought over the past 20 years using the US Drought Monitor. *International*



Journal of Climatology 42, 6616–6630.

Li, Q., He, P., He, Y., Han, X., Zeng, T., Lu, G., Wang, H., 2020. Investigation to the relation between meteorological drought and hydrological drought in the upper Shaying River Basin using wavelet analysis. *Atmospheric Research* 234, 104743.

Lorenzo-Lacruz, J., Vicente-Serrano, S.M., González-Hidalgo, J.C., López-Moreno, J.I., Cortesi, N., 2013. Hydrological drought response to meteorological drought in the Iberian Peninsula. *Climate Research* 58, 117–131.

Lorenzo-Lacruz, J., Morán-Tejeda, E., Vicente-Serrano, S.M., López-Moreno, J.I., 2013. Streamflow droughts in the Iberian Peninsula between 1945 and 2005: Spatial and temporal patterns. *Hydrology and Earth System Sciences*.

López-Moreno, J.I., Vicente-Serrano, S.M., Zabalza, J., Beguería, S., Lorenzo-Lacruz, J., Azorín-Molina, C., Morán-Tejeda, E., 2013. Hydrological response to climate variability at different time scales: A study in the Ebro basin. *Journal of Hydrology*.

MacLeod, D.A., Dankers, R., Graham, R., Guigma, K., Jenkins, L., Todd, M.C., Kiptum, A., Kila-vi, M., Njogu, A., Mwangi, E., 2021. Drivers and subseasonal predictability of heavy rainfall in equatorial East Africa and relationship with flood risk. *Journal of Hydrometeorology* 22, 887–903.

Marchant, B.P., Cuba, D., Brauns, B., Bloomfield, J.P., 2022. Temporal interpolation of groundwater level hydrographs for regional drought analysis using mixed models. *Hydrogeology Journal*.

Marengo, J.A., Cunha, A.P., Cuartas, L.A., Deusdará Leal, K.R., Broedel, E., Seluchi, M.E., Michelin, C.M., De Praga Baião, C.F., Chuchón Angulo, E., Almeida, E.K., et al., 2021. Extreme drought in the Brazilian Pantanal in 2019–2020: characterization, causes, and impacts. *Frontiers in Water* 3, 639204.

Mokkenstorm, L.C., van den Homberg, M.J., Winsemius, H., Persson, A., 2021. River flood detection using passive microwave remote sensing in a data-scarce environment: a case study for two river basins in Malawi. *Frontiers in Earth Science* 9, 670997.

Penã-Gallardo, M., Vicente-Serrano, S.M., Hannaford, J., Lorenzo-Lacruz, J., Svoboda, M., Domínguez-Castro, F., Maneta, M., Tomas-Burguera, M., El Kenawy, A., 2019. Complex influences of meteorological drought time-scales on hydrological droughts in natural basins of the contiguous United States. *Journal of Hydrology* 568, 611–625.

Coughlan de Perez, E., Stephens, E., Bischiniotis, K., Van Aalst, M., Van Den Hurk, B., Mason, S., Nissan, H., Pappenberger, F., 2017. Should seasonal rainfall forecasts be used for flood preparedness? *Hydrology and Earth System Sciences* 21, 4517–4524.

R Core Team, 2024. R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria.

Revilla-Romero, B., Hirpa, F.A., Pozo, J.T.d., Salamon, P., Brakenridge, R., Pappenberger, F., De Groeve, T., 2015. On the use of global flood forecasts and satellite-derived inundation maps for flood monitoring in data-sparse regions. *Remote Sensing* 7, 15702–15728.

Rivera, J.A., 2024. Characterization of the recent (2019–2022) La Plata basin hydrological drought from a centennial-scale perspective. *HydroResearch*.

Saha, T.R., Shrestha, P.K., Rakovec, O., Thober, S., Samaniego, L., 2021. A drought monitoring tool for South Asia. *Environmental Research Letters* 16, 054014.

Shukla, S., Wood, A.W., 2008. Use of a standardized runoff index for characterizing hydrologic drought. *Geophysical Research Letters* 35.

Siegmund, J.F., Sanders, T.G., Heinrich, I., Van der Maaten, E., Simard, S., Helle, G., Donner, R.V., 2016. Meteorological drivers of extremes in daily stem radius variations of beech, oak, and pine in northeastern Germany: an event coincidence analysis. *Frontiers in Plant Science* 7, 733.

Siegmund, J.F., Siegmund, N., Donner, R.V., 2017. CoinCalc—A new R package for quantifying



simultaneities of event series. *Computers & Geosciences* 98, 64–72.

Smith, K., Barker, L., Tanguy, M., Parry, S., Harrigan, S., Legg, T., Prudhomme, C., Hannaford, J., 2019. A multi-objective ensemble approach to hydrological modelling in the uk: An application to historic drought reconstruction. *Hydrology and Earth System Sciences* .

Snow, A.D., Christensen, S.D., Swain, N.R., Nelson, E.J., Ames, D.P., Jones, N.L., Ding, D., Noman, N.S., David, C.H., Pappenberger, F., et al., 2016. A high-resolution national-scale hydrologic forecast system from a global ensemble land surface model. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association* 52, 950–964.

Stagge, J.H., Kohn, I., Tallaksen, L.M., Stahl, K., 2015. Modeling drought impact occurrence based on meteorological drought indices in Europe. *Journal of Hydrology* 530, 37–50.

Stahl, K., Vidal, J.P., Hannaford, J., Tjeldeman, E., Laaha, G., Gauster, T., Tallaksen, L.M., 2020. The challenges of hydrological drought definition, quantification and communication: an interdisciplinary perspective. *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences* 383, 291–295.

Steinemann, A., 2003. Drought indicators and triggers: a stochastic approach to evaluation. *Journal of the American Water Resources Association (JAWRA)* 39, 1217–1233.

Steinemann, A., 2014. Drought information for improving preparedness in the western states. *Bulletin of the American Meteorological Society* 95, 843–847.

Steinemann, A., Iacobellis, S.F., Cayan, D.R., 2015. Developing and evaluating drought indicators for decision-making. *Journal of Hydrometeorology* 16, 1793–1803.

Steinemann, A.C., Cavalcanti, L.F.N., 2006. Developing multiple indicators and triggers for drought plans. *Journal of Water Resources Planning and Management* 132, 164–174.

Svoboda, M., LeCompte, D., Hayes, M., Heim, R., Gleason, K., Angel, J., Rippey, B., Tinker, R., Palecki, M., Stooksbury, D., et al., 2002. The drought monitor. *Bulletin of the American Meteorological Society* 83, 1181–1190.

Tapley, B.D., Bettadpur, S., Ries, J.C., Thompson, P.F., Watkins, M.M., 2004. GRACE measurements of mass variability in the Earth system. *science* 305, 503–505.

Torelló-Sentelles, H., Franzke, C.L.E., 2022. Drought impact links to meteorological drought indicators and predictability in Spain. *Hydrology and Earth System Sciences* 26, 1821–1844.

Trambauer, P., Maskey, S., Winsemius, H., Werner, M., Uhlenbrook, S., 2013. A review of continental scale hydrological models and their suitability for drought forecasting in (sub-saharan) africa. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C* 66, 16–26.

Van Loon, A.F., 2015. *Hydrological drought explained*. Wiley Interdisciplinary Reviews Water .

Vicente-Serrano, S.M., López-Moreno, J.I., 2005. Hydrological response to different time scales of climatological drought: an evaluation of the Standardized Precipitation Index in a mountainous Mediterranean basin. *Hydrology and Earth System Sciences* 9, 523–533.

Vicente Serrano, S.M., López-Moreno, J.I., Beguería, S., Lorenzo-Lacruz, J., Azorin-Molina, C., Morán-Tejeda, E., 2012. Accurate computation of a streamflow drought index, *American Society of Civil Engineers*.

Vogt, J., 2011. The European Drought Observatory, in: *2011 GEOSS Workshop XL-Managing Drought through Earth Observation*, IEEE. pp. 1–16.

Vorobevskii, I., Kronenberg, R., Bernhofer, C., 2022. Linking different drought types in a small catchment from a statistical perspective – case study of the wernersbach catchment, germany. *Journal of Hydrology X* 15, 100122.

Wang, F., Wang, Z., Yang, H., Di, D., Zhao, Y., Liang, Q., Hussain, Z., 2020. Comprehensive evaluation of



hydrological drought and its relationships with meteorological drought in the Yellow River basin, China. *Journal of Hydrology* 584, 124751.

Wu, J., Chen, X., Gao, L., Yao, H., Chen, Y., Liu, M., 2016. Response of hydrological drought to meteorological drought under the influence of large reservoir. *Advances in Meteorology* .

Zhao, H., Gao, G., An, W., Zou, X., Li, H., Hou, M., 2017. Timescale differences between SC-PDSI and SPEI for drought monitoring in China. *Physics and Chemistry of the Earth* 102, 48–58.

Zink, M., Samaniego, L., Kumar, R., Thober, S., Mai, J., Schäfer, D., Marx, A., 2016. The german drought monitor. *Environmental Research Letters* 11, 074002.