

La sequía en la agricultura: recursos digitales disponibles para diagnosticar su ocurrencia y reducir sus impactos en América Latina y el Caribe



La sequía en la agricultura: recursos digitales disponibles para diagnosticar su ocurrencia y reducir sus impactos en América Latina y el Caribe

Este informe, producto de un esfuerzo conjunto entre los programas de Digitalización Agroalimentaria y de Acción Climática y Sostenibilidad Agropecuarias del Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA), fue elaborado por Guillermo Podestá¹, Alice Alcántara² y Federico Bert³, con la colaboración de Kelly Witkowski⁴ y Carolina Borda⁵

¹ Especialista en Variabilidad Climática y sus Implicancias en los Sistemas Agropecuarios.

² Colaboradora del Programa de Digitalización Agroalimentaria del Instituto.

³ Gerente del Programa de Digitalización Agroalimentaria del IICA.

⁴ Gerente del Programa de Acción Climática y Sostenibilidad Agropecuarias del Instituto.

⁵ Colaboradora del Programa de Acción Climática y Sostenibilidad Agropecuarias del IICA.



La sequía en la agricultura: recursos digitales disponibles para diagnosticar su ocurrencia y reducir sus impactos en América Latina y el Caribe

se publica bajo la

Licencia Creative Commons Reconocimiento-Compartir
igual 4.0 IGO (CC-BY-SA 4.0 IGO)

(<http://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/igo/>)

Creado a partir de la obra en www.iica.int

El Instituto promueve el uso justo de este documento, así como el tratamiento de los datos personales, de acuerdo con la normativa del IICA vigente. Se solicita que sea citado apropiadamente cuando corresponda y que se garantice el derecho de toda persona a la protección de sus datos personales, según la normativa del IICA.

Esta publicación está disponible en formato electrónico (PDF) en el sitio web institucional en <https://repositorio.iica.int/>

Coordinación editorial: Federico Bert
Corrección de estilo: Unidad de Idioma IICA
Diagramado: Federico Asin
Diseño de portada: Federico Asin

La sequía en la agricultura: recursos digitales disponibles para diagnosticar su ocurrencia y reducir sus impactos en América Latina y el Caribe/ Guillermo Podestá, Federico Bert, Alice Alcantara- San José, Costa Rica; IICA, 2024, 106 p ; 21 x 16 cm.

ISBN: 978-92-9273-108-3

1. Sequía 2. Cultivo en tierras áridas 3. Cambio climático
4. Variabilidad del clima 5. Técnicas de predicción
6. Sistemas de información I. IICA II. Título

AGRIS
A01

DEWEY
631.586

San José, Costa Rica

Contenidos

Contenidos.....	4
Lista de siglas y acrónimos.....	7
Resumen ejecutivo.....	8
1. Introducción.....	12
a. Organización del informe.....	13
2. ¿Qué es la sequía?.....	15
a. Impactos de las sequías.....	16
b. Las sequías en un contexto de variabilidad y cambio climático.....	18
c. Hacia una gestión integrada de la sequía.....	19
i. Monitoreo, predicción y sistemas de alerta temprana de sequía.....	21
ii. Evaluación de riesgos e impactos de la sequía.....	22
iii. Planificación, preparación y respuesta.....	23
3. Variables e indicadores para el monitoreo de la sequía.....	26
a. La precipitación.....	27
b. El índice estandarizado de precipitación (SPI).....	30
c. El índice estandarizado de precipitación y evapotranspiración (SPEI).....	32
d. El índice de estrés evaporativo (ESI).....	33
e. La humedad del suelo (HS).....	34
i. HS proveniente de la misión SMAP.....	36
ii. HS proveniente del instrumento ASCAT.....	38
f. Los índices de vegetación.....	39
i. El índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI).....	39
ii. El índice de condición de la vegetación (VCI).....	41
iii. El índice mejorado de vegetación (EVI).....	42
iv. La fracción absorbida de radiación fotosintéticamente activa (FAPAR).....	42
g. ¿Cuál indicador de sequía conviene utilizar?.....	43
h. Indicadores de sequía compuestos o combinados.....	45
i. El índice de salud de la vegetación (VHI).....	45
ii. El índice de estrés agrícola (ASI).....	46
iii. El índice estandarizado multivariado de sequía (MSDI).....	47
iv. El Monitor de Sequía de los Estados Unidos (USDM).....	47
4. Pronóstico de la sequía.....	50
a. Métodos para la predicción de la sequía.....	50
b. Barreras para el uso de las predicciones de sequía.....	51
5. Recursos digitales para el monitoreo de la sequía.....	53
a. Recursos digitales públicos.....	54
i. Recursos globales.....	54
1. El Explorador de Cultivos.....	54
2. El Sistema Global de Información sobre Sequía (GDIS).....	56
3. El Sistema Mundial de Información y Alerta sobre la Alimentación y la Agricultura (SMIA).....	58

Fuente: Tomado de la FAO, SMIA (https://www.fao.org/giews/earthobservation/index.jsp?lang=es).....	59
ii. Recursos regionales.....	59
1. El Monitor de Sequía de Mesoamérica.....	59
2. El Centro Regional del Clima para el Caribe (CRC Caribe).....	61
3. El Centro Regional del Clima para el Sur de América del Sur (CRC-SAS).....	62
iii. Recursos nacionales.....	65
1. El Monitor de Sequías de Brasil.....	65
2. El Monitor de Sequías del Estado Plurinacional de Bolivia.....	67
3. El Observatorio Agroclimático de Chile.....	68
b. Recursos privados para el monitoreo.....	69
i. Caburé.....	69
ii. Agrosmart.....	70
iii. Hydrosat.....	72
6. Recursos digitales para el pronóstico de la sequía.....	74
a. Recursos públicos.....	74
i. Pronósticos estacionales de precipitación del IRI, Universidad de Columbia.....	74
ii. Pronóstico de condiciones inusualmente secas o húmedas.....	75
iii. Evolución esperada del SPI y las categorías de sequías con base en el pronóstico de lluvias GEFS-CHIRPS.....	76
b. Recursos privados.....	78
i. IGNITIA.....	78
ii. Tomorrow.io.....	81
7. Recursos digitales para la evaluación y gestión de los impactos de la sequía.....	83
a. Recursos públicos.....	83
i. Los monitores de cultivos de la GEOGLAM.....	83
ii. El Explorador de Cultivos.....	87
iii. El RDri-Agri.....	88
iv. Pronósticos de rendimiento de cultivos: ProRindes.....	90
b. Recursos privados.....	93
i. Kilimo.....	93
ii. Ecodrip.....	94
iii. Auravant.....	95
iv. Recursos digitales en desarrollo o planificados.....	98
1. Proyecto Monitoreo Satelital de Cantidad y Calidad de Biomasa Disponible en Sistemas Ganaderos Pastoriles de ALC.....	98
2. Suyana.....	99
8. Recursos digitales de preparación para la sequía.....	101
9. Referencias.....	102



Lista de siglas y acrónimos

ALC	América Latina y el Caribe
ASCAT	Advanced Scatterometer
ASI	Índice de estrés agrícola
AVHRR	Radiómetro avanzado de muy alta resolución
CDI	Indicador combinado de sequía
CHIRPS	Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Stations
CNULD	Convención de las Naciones Unidas de Lucha contra la Desertificación
CRC-SAS	Centro Regional del Clima para el Sur de América del Sur
DIR	Reportes de Impactos de Sequías
DRAMP	Marco de políticas de resiliencia, adaptación y gestión de la sequía
ECMWF	Centro Europeo de Previsiones Meteorológicas a Plazo Medio
EDDI	Índice de sequía por demanda evaporativa
ENOS	El Niño-Oscilación del Sur
ESI	Índice de estrés evaporativo
EVI	Índice mejorado de vegetación
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura
FAPAR	Fracción absorbida de radiación fotosintéticamente activa
GDIS	Sistema Global de Información sobre Sequía
GDM	Monitor Global de Sequía
GEE	Google Earth Engine
GEOGLAM	Iniciativa Global de Monitoreo Agrícola del Grupo de Observaciones de la Tierra
HS	Humedad del suelo
IDMP	Programa Internacional de Gestión de la Sequía
IICA	Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura
MERRA	Análisis Retrospectivo de la Era Moderna para la Investigación y Aplicación
MODIS	Espectrorradiómetro de imágenes de resolución moderada
MSDI	Índice estandarizado multivariado de sequía
NASA	Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio
NDMC	Centro Nacional de Mitigación de la Sequía
NDVI	Índice de vegetación de diferencia normalizada
NOAA	Administración Nacional Oceánica y Atmosférica
OMM	Organización Meteorológica Mundial
PSP	Productos satelitales de precipitación
RDri-Agri	Indicador de riesgo del impacto de la sequía en la agricultura
SENAMHI	Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología
SISSA	Sistema de Información sobre Sequías para el Sur de Sudamérica
SMAP	Medición activa/pasiva de la humedad del suelo
SMIA	Sistema Mundial de Información y Alerta sobre la Alimentación y la Agricultura
SPEI	Índice estandarizado de precipitación y evapotranspiración
SPI	Índice estandarizado de precipitación
SWDI	Índice de déficit de humedad del suelo
SWI	Índice de agua en el suelo
USDA	Departamento de Agricultura de los Estados Unidos

USDM	Monitor de Sequía de los Estados Unidos
VCI	Índice de condición de la vegetación
VHI	Índice de salud de la vegetación
VIIRS	Suite de radiómetro de imágenes infrarrojas visibles

Resumen ejecutivo

La sequía, que desde tiempos inmemoriales ha formado parte de la experiencia humana, ha tenido un impacto considerable en el entorno y las actividades del hombre. En particular, el de producción de alimentos, fibras y energía es uno de los sectores más sensibles a la sequía. Se prevé que en el futuro cercano los eventos secos serán más frecuentes e intensos a consecuencia del cambio climático antropogénico. En este contexto, diferentes actores sociales como gobiernos, comunidades, empresas y hogares necesitarán datos, información y conocimientos pertinentes para gestionar adecuadamente los riesgos y reducir los impactos presentes y futuros de la sequía. Afortunadamente, se dispone de cada vez más recursos digitales que aportan información útil sobre el pasado (la frecuencia histórica de las sequías en una región, la definición de condiciones “normales”, etc.), el presente (la situación actual de una sequía en curso) y el futuro (pronósticos semanales, mensuales, anuales o decadales de condiciones esperadas o verosímiles), así como acerca de los riesgos e impactos esperables en la producción agrícola. En este informe se presenta una muestra no exhaustiva de algunos recursos digitales producidos por entidades públicas y privadas que ayudan a diagnosticar la ocurrencia e intensidad y a reducir los impactos negativos

de las sequías en América Latina y el Caribe (ALC).

En primer lugar, se describen algunas características peculiares de las sequías que complican la gestión de sus riesgos e impactos, p. ej., su evolución lenta y su usual influencia sobre un área vasta, pero difusa, a diferencia de las inundaciones o los ciclones tropicales. Los efectos de la sequía se manifiestan una vez establecido el fenómeno, pero su finalización no es demasiado definida, ya que no necesariamente desaparecen cuando se reanudan las lluvias. Además, los impactos pueden variar considerablemente entre regiones y sectores, debido a la complejidad de las interacciones entre esta amenaza y los diferentes sistemas ecológicos y sociales sensibles. Asimismo, en este informe se discuten amenazas emergentes como los eventos climáticos compuestos, que involucran dos o más factores forzantes o amenazas hidroclimáticas que ocurren en forma simultánea o una tras otra. En este sentido, un evento compuesto sumamente relevante para la agricultura es la combinación de sequías y olas de calor.

Para facilitar la interpretación de la información sobre la sequía en ALC incluida en los recursos digitales seleccionados, en el informe se presentan algunas variables hidroclimáticas relevantes, como la precipitación y la humedad del suelo (HS).

También se describen indicadores comúnmente utilizados para caracterizar el estado presente y la posible evolución de una sequía, p. ej., el ampliamente difundido índice estandarizado de precipitación o indicadores del verdor y vigor de la vegetación. Asimismo, se presentan algunos indicadores todavía no muy difundidos, pero que probablemente ganen más popularidad en el futuro cercano, como el índice de estrés evaporativo, que resulta particularmente útil para alertar sobre la ocurrencia de sequías repentinas, es decir, sequías de desarrollo muy rápido que pueden afectar de manera significativa la producción agrícola y desafían las capacidades actuales de monitoreo. Además, se discuten las ventajas y posibles limitaciones de todas las variables y los indicadores y se sugiere dónde obtener o visualizar sus valores.

Finalmente, se presenta una muestra de recursos digitales disponibles en ALC para diagnosticar la ocurrencia e intensidad, y reducir los impactos negativos de las sequías. Se discuten no solo los recursos digitales públicos, esto es, los producidos por instituciones multilaterales o gubernamentales, sino también los generados por el sector privado, que complementan y aumentan los recursos públicos. Los recursos seleccionados se organizan en función de los tres pilares internacionalmente aceptados para la gestión moderna de la sequía: 1) el monitoreo, la predicción y la alerta temprana, 2) la caracterización y gestión de los riesgos e impactos y 3) la planificación, preparación y respuesta para la sequía.

En el informe se llega a la conclusión de que existe una gran cantidad de recursos digitales que aporta información útil y oportuna sobre la sequía en ALC. Los recursos que se presentan en el texto son solo una muestra de los diversos tipos de herramientas disponibles en la región. Casi todos los recursos privados a los que se hace referencia no se enfocan específicamente en

la sequía, pero son útiles sobre todo en términos del monitoreo de las condiciones locales de sequía, del pronóstico del tiempo con pocos días de antelación para planear labores y actividades agrícolas que requieran ciertas condiciones ambientales, y de la organización y documentación de tareas y actividades para gestionar los riesgos y efectos de las sequías.

Aunque el número de recursos digitales públicos y privados crece rápidamente, la disponibilidad de herramientas no es uniforme con respecto a los diferentes pilares de la gestión de la sequía; p. ej., existen abundantes recursos globales y regionales y muchos esfuerzos nacionales de monitoreo de la sequía en ALC. En comparación, hay muchos menos recursos para su predicción, la mayoría de los cuales se basa en pronósticos estacionales de precipitación. En relación con el segundo pilar, hay todavía menos recursos digitales para la estimación y gestión de los tipos y magnitudes de impactos que pueden asociarse a un evento seco, los denominados “pronósticos basados en impactos”. La baja disponibilidad de soluciones para este pilar probablemente se deba a la relativa escasez de datos sobre los impactos sectoriales de la sequía reportados en forma consistente y con una adecuada cobertura espacial y temporal. Finalmente, la mayoría de los recursos disponibles para el tercer pilar, relativo a la planificación y preparación, son de naturaleza pública; se cuenta con pocos recursos privados para ayudar a los productores agroalimentarios, extensionistas o asesores técnicos a planear acciones dirigidas a reducir los riesgos de una sequía y aumentar la resiliencia ante esta amenaza. En cambio, los recursos asociados a este pilar en su mayoría apuntan a asistir el desarrollo de un plan o programa nacional de acción ante la sequía, que establezca con antelación una serie de disposiciones, actividades y procedimientos para gestionar de forma oportuna, eficaz y apropiada las

contingencias ante la potencial ocurrencia de una sequía severa o extrema.

Pese a su creciente disponibilidad, los datos y la información acerca de la sequía aportados por recursos digitales como los presentados en este informe son útiles y necesarios, pero resultan insuficientes para eliminar o reducir los impactos de esta amenaza en el sector agrícola. En este documento se destaca la necesidad imperiosa de reemplazar el paradigma mediante el cual los gobiernos y las sociedades responden actualmente a las crisis generadas por las sequías: el enfoque reactivo actual, generalmente ineficiente y costoso, debe cambiarse por una gestión proactiva, que incluya la preparación y planificación de las estrategias y acciones por realizar antes, durante y después de un evento de sequía. Para ello los actores relevantes (gobiernos, instituciones de gestión de desastres, empresas, comunidades y hogares, entre otros) deben tener acceso a información de alta calidad, oportuna y relevante que ayude a reducir la vulnerabilidad y a aumentar la resiliencia de los sistemas y sectores sensibles a esta amenaza hidrológica. Las

tecnologías digitales son clave para lograr una difusión efectiva de la información y una capacitación amplia y equitativa de sus usuarios potenciales, a fin de facilitar la incorporación de la información climática y de otros tipos en el proceso de toma de decisiones para reducir los efectos negativos de eventos secos.

Un aspecto fundamental de la preparación para la sequía es la coordinación entre instituciones y actores relevantes de la sociedad, dirigida a articular capacidades y definir responsabilidades, roles y acciones. Esta coordinación es imprescindible, puesto que la responsabilidad de la gestión de la sequía generalmente está distribuida entre múltiples instituciones, actores y niveles jurisdiccionales de un país. La cooperación horizontal entre los países de ALC, facilitada posiblemente por instituciones regionales o multinacionales como el IICA, resulta esencial para compartir experiencias, reducir debilidades propias y capitalizar las fortalezas de otros países de la región.



1. Introducción

La sequía es una alteración extendida en el tiempo de uno o más componentes del ciclo hidrológico, la cual resulta en un déficit prolongado de agua que afecta a los componentes de varios sistemas naturales y sectores económicos o las actividades de algún grupo humano (Haile et al. 2020; Wilhite 2000). Esta amenaza hidrológica, que ha formado parte de la experiencia humana desde tiempos inmemoriales, tiene impactos que se propagan a través de ecosistemas, sociedades y economías y que influyen negativamente en actividades como la producción de alimentos y fibras, la generación de energía, el transporte fluvial, la provisión de agua para consumo doméstico e industrial y el cuidado de la salud humana y animal (United Nations Office for Disaster Risk Reduction 2021; Vogt et al. 2018).

En las próximas décadas las sequías continuarán presentando desafíos para la salud de los ecosistemas y la sostenibilidad de las actividades humanas en un mundo cada vez más interconectado y complejo. Se espera, además, que el cambio climático antropogénico incremente la frecuencia e intensidad de los eventos climáticos extremos, incluidas las sequías, lo que exacerbará el riesgo de desastres (Otto et al. 2018; Spinoni et al. 2020). En este contexto los tomadores de decisiones y formuladores de políticas deben prepararse para gestionar mejor los riesgos e impactos de la sequía. A tal fin, existe un consenso generalizado en torno a la necesidad de cambiar la forma en que los gobiernos y las sociedades responden actualmente a las crisis generadas por esta amenaza, reemplazando un enfoque reactivo – generalmente ineficiente y costoso – por una gestión proactiva que incluya una preparación y planificación de las estrategias y acciones a realizar antes, durante y después

de un evento de sequía (Sivakumar et al. 2014; Wilhite et al. 2014).

La gestión proactiva de la sequía requiere que los actores pertinentes (gobiernos, instituciones de gestión de desastres, comunidades, empresas y hogares, entre otros) tengan acceso a información climática de alta calidad, oportuna y relevante que ayude a reducir la vulnerabilidad y a aumentar la resiliencia de los sistemas y sectores sensibles a esta amenaza hidrológica. La producción y difusión de información climática en apoyo a la toma de decisiones se ha denominado “servicios climáticos” (Brasseur y Gallardo 2016; Ward et al. 2022). Los servicios climáticos enfocados en la sequía pueden aportar datos y conocimientos sobre el pasado (p. ej., la frecuencia de las sequías en una región, la definición de condiciones “normales”, etc.), el presente (la situación actual de una sequía) y el futuro (pronósticos de condiciones semanales, mensuales, anuales o decenales esperadas o verosímiles), así como sobre los riesgos e impactos esperables.

Las tecnologías digitales han resultado imprescindibles en la generación y comunicación de servicios climáticos confiables y relevantes. Estas tecnologías han permitido el diseño de nuevos instrumentos y plataformas de observación que ampliaron considerablemente las capacidades de monitoreo de variables climáticas e hidrológicas, el primer eslabón de la cadena de valor de los servicios climáticos. Asimismo, los avances en las capacidades de cómputo permiten pronosticar y proyectar condiciones climáticas y escenarios verosímiles con una antelación de días a décadas y con un detalle espacial impensable pocos años atrás. No obstante, pese a los enormes avances

científicos y tecnológicos en la producción de servicios climáticos, aún se debe superar un desafío clave para lograr que la sociedad obtenga beneficios efectivos: comunicar los datos y la información sobre la sequía y otras amenazas climáticas a la “última milla”, que en el sector agroalimentario incluye a los productores y sus hogares, los extensionistas, los administradores de recursos y los asesores técnicos, entre otros actores relevantes (FAO 2021). Las tecnologías digitales son esenciales para lograr una difusión efectiva de la información y una capacitación amplia y equitativa de sus usuarios potenciales que facilite la incorporación de la información climática y de otros tipos en el proceso de toma de decisiones (Hewitt et al. 2020).

a. Organización del informe

Este informe está organizado de la siguiente forma: luego de esta sección introductoria, en la sección 2 se describen algunas características de la sequía que la convierten en un fenómeno complejo y dificultan su gestión. Asimismo, se presentan los tres pilares internacionalmente adoptados para su gestión moderna: 1) el monitoreo, la predicción y la alerta temprana, 2) la caracterización de los riesgos e impactos y 3) la planificación, preparación y respuesta. En la sección 3 se presentan las variables hidroclimáticas y los indicadores más comúnmente utilizados para caracterizar el estado actual y la posible evolución de la sequía, así como algunos indicadores novedosos que probablemente se difundan más en un futuro cercano. Se discuten las ventajas y posibles limitaciones de todos los indicadores y se identifica dónde se pueden obtener sus valores. En la sección 4 se

De acuerdo con lo anterior, en la agenda del Instituto la digitalización de los sistemas alimentarios ha adquirido una máxima prioridad mediante la creación del Programa de Digitalización Agroalimentaria, con base en la noción de que la agricultura digital es un elemento central para la transformación dinámica e inclusiva de los sistemas agroalimentarios de las Américas. En este programa se reconoce que dicha transformación se ha acelerado debido a la creciente oferta de soluciones digitales y al aumento de la digitalización a causa de la pandemia de síndrome respiratorio agudo producido por un coronavirus. En este informe se refleja dicha prioridad creciente, ya que se proporciona información acerca de los recursos digitales disponibles para ALC que, directa o indirectamente, ayudan a diagnosticar y reducir los impactos negativos de las sequías.

examinan las técnicas y los recursos disponibles para pronosticar la evolución de una sequía, así como posibles barreras que han limitado una mayor disponibilidad de pronósticos operacionales de la sequía. En las secciones 5, 6, 7 y 8 se presentan ejemplos de recursos digitales relacionados con el monitoreo, la predicción, la evaluación y gestión de los impactos, y la planificación y preparación para la sequía en ALC, respectivamente. Los recursos seleccionados en estas secciones representan una muestra, que de ningún modo pretende ser exhaustiva, de herramientas digitales disponibles por medio de las cuales se puede obtener información relevante para caracterizar la sequía y apoyar las decisiones de distintos actores a fin de reducir los impactos de esta amenaza. Un objetivo transversal de este informe es brindar referencias útiles y relativamente recientes donde obtener más información sobre temas de interés.



2. ¿Qué es la sequía?

Aunque los efectos de la sequía se reconocen con claridad, no hay una definición precisa y universalmente aceptada de este fenómeno (Lloyd-Hughes 2014), lo que dificulta aún más su gestión. Pese a la falta de definiciones, se debe distinguir el término sequía de otros conceptos similares. Por ejemplo, la sequía no se debe confundir con la aridez, que es una característica permanente del clima de una región; en cambio, los eventos secos pueden durar hasta varios años, como la megasequía que afectó el centro de Chile (Garreaud et al. 2020), pero eventualmente desaparecen. Asimismo, la sequía es diferente de la escasez hídrica, en la que la disponibilidad de recursos hídricos en una región resulta insuficiente para satisfacer sostenidamente la demanda presente de agua.

En los siguientes párrafos se resumen los tipos comunes de sequías, tradicionalmente definidas en función de las variables utilizadas para caracterizarlas, sus impactos o los sistemas que se ven afectados por ellas (Ault 2020).

- Las sequías meteorológicas son períodos (semanas, meses o años) con un déficit en la precipitación o en el balance hídrico (precipitación menos evapotranspiración) en una región determinada.
- Las sequías agrícolas y ecológicas son períodos de baja HS que afectan la vegetación. La reducción en la HS puede ser el resultado de precipitaciones menores a las normales, eventos de lluvia menos frecuentes o una alta evapotranspiración. Las sequías ecológicas ocurren cuando la disponibilidad de agua cae por debajo del umbral requerido para sostener los

ecosistemas naturales y sus servicios a la sociedad (Duel et al. 2022).

- Las sequías hidrológicas están asociadas a disminuciones en los caudales de los ríos y los niveles de los lagos, reservorios y agua subterránea, como resultado de la falta de agua superficial y escurrimiento. Generalmente tienen una evolución más lenta que las anteriores, ya que involucran agua almacenada que no se reemplaza (Vogt et al. 2018).
- Las sequías socioeconómicas son el resultado de una interacción compleja entre una escasa oferta de agua y una excesiva demanda por parte de los sistemas humanos (Mishra y Singh 2010).

En realidad, la distinción entre los diferentes tipos de sequía mencionados no es absoluta. Según una perspectiva moderna, todos ellos constituyen diferentes manifestaciones del mismo fenómeno que pueden afectar diferentes sistemas o subdominios de manera simultánea o, más frecuentemente, propagarse de un sistema a otro con el tiempo (Rossi et al. 2023; Seneviratne et al. 2021).

Las sequías presentan características particulares que las distinguen de otras amenazas y fenómenos hidroclimáticos y que complican considerablemente la gestión de sus riesgos e impactos; p. ej., las inundaciones y los ciclones tropicales se desarrollan con rapidez, sus impactos suelen tener una extensión espacial definida y aparente (son claramente observables en la infraestructura y los medios de vida de las poblaciones) y su finalización se detecta de forma nítida. Por el contrario, la sequía a menudo comienza con lentitud y afecta un área extensa pero menos

definida, sus impactos se acumulan lentamente y con frecuencia no suelen detectarse hasta que el fenómeno está establecido en una región. Por último, la finalización de una sequía no es muy marcada

y a menudo los efectos persisten aún después de haber concluido el déficit de lluvias (Wilhite et al. 2014).

a. Impactos de las sequías

El Centro Nacional de Mitigación de la Sequía (NDMC) de los Estados Unidos define el impacto de una sequía como “Una pérdida observable o un cambio que ocurre en un lugar y momento específico a causa de la sequía”. Los impactos de las sequías son directos e indirectos (Vogt et al. 2018). Los impactos directos resultan de las interacciones entre un déficit hídrico y distintos componentes de los sistemas ecológicos, sociales o económicos afectados, mientras que los indirectos no son el resultado inmediato del déficit hídrico, sino de su propagación en cascada a lo largo de una trayectoria compleja de sistemas y sectores económicos interconectados. En consecuencia, los impactos indirectos de una sequía pueden manifestarse incluso fuera de la región directamente afectada por la falta de agua (Bachmair et al. 2015; Hagenlocher et al. 2023). Asimismo, en algunos casos los impactos pueden persistir durante varios años después de la finalización del período de baja precipitación, lo que dificulta su cuantificación y atribución a un evento seco determinado (Wilhite et al. 2007). Por todas estas razones, la evaluación de los impactos económicos, daños ambientales y perjuicios personales o empresariales supone un desafío formidable (Vogt et al. 2018).

La agricultura (en un sentido amplio, que incluye la producción agrícola, animal y forestal) es una de las actividades humanas más afectadas por la sequía (FAO 2019).

Según un informe reciente⁶ de la Convención de las Naciones Unidas de Lucha contra la Desertificación (CNULD), la sequía causa aproximadamente el 15 % de las pérdidas y los daños asociados a amenazas hidroclimáticas. Entre los impactos directos de las sequías en la producción agropecuaria se incluyen rendimientos bajos o nulos o pérdida de la calidad de los cultivos anuales; una baja productividad de los cultivos perennes y las pasturas; un crecimiento lento o una mala condición física del ganado, que limita el éxito reproductivo y, en casos extremos, incrementa la mortalidad; una reducción forzada de los stocks ganaderos por falta de alimento; una escasez de agua superficial o subterránea para riego y consumo animal; un aumento en el riesgo de incendios en pasturas, pastizales y bosques; una mayor incidencia de enfermedades e insectos; y daños ambientales, como la pérdida de biodiversidad y la degradación del suelo (FAO 2019).

Además, los impactos directos de la sequía generan múltiples impactos indirectos que se propagan a lo largo de la cadena de

⁶ Disponible solamente en inglés en www.unccd.int/sites/default/files/202308/Policy%20Brief_Drought%20Finance_August%202023.pdf.

valor agroalimentaria y otros sectores, entre los cuales se incluyen la reducción de los ingresos y la pérdida de los ahorros y bienes de agricultores y agronegocios; la malnutrición y problemas de salud mental en los hogares de los productores; mayores costos de riego por el bombeo de agua subterránea más profunda; la baja de los precios del ganado por las ventas forzadas; un aumento generalizado en los precios de los alimentos y el desempleo; la reducción de ingresos fiscales para los gobiernos; la disminución de las ventas en otros sectores de la cadena de valor agrícola (logística e insumos) y la imposibilidad de pagar deudas (FAO 2019).

Los impactos sociales, económicos y ambientales de la sequía pueden variar ampliamente entre regiones, actividades y grupos. En general, estos impactos abarcan áreas agrícolas más extensas que las afectadas por otras amenazas hidroclimáticas más localizadas; p. ej., una inundación puede influir negativamente en las partes bajas de un paisaje, pero el resto de la zona puede seguir siendo productiva; la sequía, en cambio, suele afectar uniformemente una amplia región. Es por este motivo que muchos productores perciben la sequía como una amenaza más perniciosa que las inundaciones.

A pesar de sus impactos generalizados sobre las cadenas agroalimentarias, las sequías pueden tener efectos desproporcionados en los actores más vulnerables de estas cadenas, incluidos los productores agrícolas pequeños y de subsistencia, y grupos como las mujeres y los ancianos. Estos actores generalmente cuentan con menores recursos y un acceso limitado a redes de apoyo técnico, social y financiero para evitar o afrontar posibles daños y pérdidas. Aún existen inequidades en el acceso de estos actores a tecnologías digitales y otros canales de comunicación que

brindan información oportuna, capacitación o asesoramiento técnico para la prevención de impactos, la preparación para nuevos eventos secos y la adaptación a su ocurrencia futura más frecuente (FAO 2021). En particular, las agricultoras de los países en desarrollo son especialmente vulnerables a la sequía, porque sus roles y responsabilidades sociales suelen ser diferentes de los de los hombres. En muchos casos, las mujeres deben asumir responsabilidades adicionales en respuesta a una sequía, con poca o ninguna reducción en sus tareas habituales (United Nations Office for Disaster Risk Reduction 2021). El impacto de las sequías severas puede transmitirse a través de generaciones, lo que daña no solo a las mujeres que las han experimentado, sino también a sus hijos, quienes tienen mayores probabilidades de sufrir desnutrición (Zaveri et al. 2023).

Los sistemas mundiales de gobernanza y mercado para la producción y distribución de alimentos presentan altos niveles de riesgo sistémico ante la sequía. Disrupciones moderadas en el suministro de alimentos causadas por las sequías generalmente pueden resolverse mediante el comercio regional o global. En cambio, una sequía que reduzca significativamente la producción de alimentos en los principales países agrícolas puede afectar el comercio y el precio de los alimentos en todo el mundo. Un evento especialmente preocupante es la falla simultánea en varias de las áreas principales de producción de alimentos como consecuencia de sequías u otras amenazas hidroclimáticas (Anderson et al. 2023; Gaupp et al. 2019; Gaupp et al. 2020). Eventos simultáneos de sequía, inundación o incendios que afecten graneros mundiales conectados por medio del comercio global como Argentina, Australia, Brasil, Europa y los Estados Unidos podrían conducir a una crisis mundial en los precios de los alimentos y, potencialmente, desencadenar otros riesgos sistémicos.

b. Las sequías en un contexto de variabilidad y cambio climático

En las próximas décadas las sequías seguirán presentando riesgos y desafíos a las actividades humanas y al desarrollo económico en un mundo cada vez más interconectado. Por un lado, la producción de alimentos deberá aumentar para satisfacer la demanda de una población creciente y con mayor poder adquisitivo (Godfray et al. 2010). En consecuencia, la posible expansión de las zonas agrícolas expone más áreas productivas a la variabilidad climática actual (la fluctuación natural en las condiciones climáticas de año a año). Al mismo tiempo, se espera que el cambio climático antropogénico intensifique el ciclo hidrológico, causando un incremento en la frecuencia e intensidad de eventos climáticos extremos, incluidas las sequías (AghaKouchak et al. 2020; Dai 2013; Otto et al. 2018; Spinoni et al. 2020).

Las fluctuaciones de año a año en el clima continuarán afectando las actividades humanas en el futuro cercano. Una de las principales fuentes de variabilidad climática interanual en el clima de ALC es el fenómeno El Niño-Oscilación del Sur (ENOS) (Anderson et al. 2017; Lin y Qian 2019). El ENOS presenta dos fases extremas, conocidas como El Niño y La Niña, y una fase intermedia (años “neutrales”). El Niño y La Niña generan cambios en la circulación atmosférica global que influyen en la temperatura y la precipitación de gran parte de ALC (Aceituno 1988; Barreiro 2010; Cai et al. 2020; Grimm et al. 2020; Hu et al. 2023; Meza 2013; Montecinos et al. 2000; Oertel et al. 2020; Poveda et al. 2006; Ropelewski y Bell 2008; Rusticucci et al. 2017; Tedeschi et al. 2015; Waylen y Caviedes 1990; Zhao et al. 2022). Por ejemplo, en los trópicos El Niño genera desplazamientos en las lluvias, como ocurre

en el noreste de Brasil, Centroamérica y el Caribe (Ault 2020).

En muchos sitios de ALC la variabilidad climática asociada a las fases extremas del fenómeno ENOS tiene consecuencias económicas importantes para la producción de alimentos, la generación de energía, la disponibilidad de agua para consumo humano e industrial y los riesgos de desastres asociados a amenazas hidrológicas. Afortunadamente, los avances en la ciencia climática y las capacidades computacionales, complementados por tecnologías digitales que facilitan el monitoreo continuo de la atmósfera y el océano, han posibilitado la detección temprana y la predicción de la ocurrencia de las fases extremas del ENOS con meses de antelación (Anderson 2008; Barnston et al. 2015). Esta capacidad permitiría a gobiernos, comunidades, firmas comerciales e individuos prepararse para reducir las consecuencias negativas de los efectos regionales de dicho fenómeno, como sequías, excesos de humedad u otros (Pieper et al. 2021); sin embargo, como ya se mencionó, todavía se debe mejorar la comunicación y comprensión de la información, así como las alertas para la gestión efectiva de los riesgos.

Aunque el riesgo de sequías severas continuará en el futuro cercano como consecuencia de la variabilidad climática interanual, es probable que la rápida evolución del cambio climático antropogénico agrave este riesgo en muchos lugares del mundo, incluida la región de ALC (AghaKouchak et al. 2020; Spinoni et al. 2020). Lamentablemente, todavía existe bastante incertidumbre en torno a las tendencias de la

precipitación –la principal variable forzante de las sequías– en escenarios climáticos futuros; no obstante, existe un mayor consenso con respecto al aumento futuro de las temperaturas de la atmósfera. Aun si la precipitación no cambia demasiado, las temperaturas más altas del aire pueden amplificar los riesgos e impactos de la sequía a través de varios mecanismos (Zscheischler y Seneviratne 2017); p. ej., estas pueden inhibir la generación de precipitaciones e incrementar la demanda de humedad proveniente de la superficie terrestre, acelerando la pérdida de HS y agravando las condiciones de sequía (Ault 2020).

Los eventos climáticos compuestos, fenómenos que están recibiendo una atención creciente, involucran dos o más factores forzantes o amenazas hidroclimáticas, no necesariamente extremos, que ocurren en forma simultánea o uno tras otro y que contribuyen a crear riesgos sociales y ambientales (Zscheischler et al. 2020). La combinación de sequías y olas de calor es uno de los eventos compuestos más comunes (Geirinhas et al. 2021; Libonati et al. 2022); a menudo causan daños económicos y ecológicos más importantes que los provocados por cada amenaza individual, particularmente en la agricultura (Ghazaryan et al. 2020a; Zscheischler y Seneviratne 2017). El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático ha identificado con alta confiabilidad un aumento global en la ocurrencia conjunta de olas de calor y sequías durante el último siglo (Seneviratne et al. 2021); en décadas recientes Sudamérica, en particular Brasil, ha experimentado un incremento en la frecuencia de estos eventos. Asimismo, se espera que la probabilidad de ocurrencia de sequías y olas de calor crezca

considerablemente debido al aumento en las temperaturas extremas (AghaKouchak et al. 2014; Tripathy et al. 2023).

Otra señal de la asociación entre el cambio climático y la ocurrencia de sequías es el incremento en la frecuencia de las sequías repentinas (flash droughts). Pese a que las sequías suelen evolucionar de forma lenta, las sequías repentinas se inician y desarrollan rápidamente como resultado de la interacción entre un déficit hídrico y una alta evapotranspiración (asociada con altas temperaturas, baja humedad o vientos fuertes) que disminuye rápidamente la HS (Woloszyn et al. 2021). La velocidad con que estos eventos se inician y desarrollan desafía las capacidades actuales de su monitoreo y pronóstico y complica la mitigación de sus impactos, ya que el tiempo disponible antes de que los daños se manifiesten es mucho más corto que en las sequías convencionales (Christian et al. 2023; Yuan et al. 2023). Una vez desarrolladas, algunas sequías repentinas pueden persistir por varios meses, pero, aun si no duran demasiado, la pérdida rápida de HS puede tener efectos importantes en la agricultura. Además, pueden generar olas de calor, incendios y mala calidad del aire. Los registros climáticos ya están mostrando una frecuencia creciente de sequías repentinas: Christian et al. (2021) identificaron algunas regiones de ALC (México y sobre todo Brasil) donde este fenómeno se detectó en más del 30 % de los años entre 1980 y 2015. Se proyecta que la tendencia a sequías repentinas más frecuentes se extenderá a casi todo el globo, especialmente para los escenarios de emisiones más altas (Christian et al. 2023).

c. Hacia una gestión integrada de la sequía

Debido a los impactos crecientes de las sequías sobre comunidades, economías y ecosistemas, se requiere que los gobiernos y otros actores sociales intervengan para gestionar sus riesgos y mitigar sus posibles daños. Típicamente, estas intervenciones se inician una vez que la sequía está establecida y sus impactos se manifiestan. Este enfoque reactivo o ex post apunta sobre todo a aliviar una crisis ya declarada y puede incluir acciones como la distribución de ayuda de emergencia, alimentos y agua para poblaciones humanas y ganado y préstamos o donaciones de dinero, así como la postergación del pago o la cancelación de deudas o impuestos (Cruz et al. 2018); sin embargo, las intervenciones reactivas a menudo son improvisadas y, en consecuencia, ineficientes y costosas (Cools et al. 2023). Fundamentalmente, un enfoque reactivo no contribuye a reducir la vulnerabilidad ante futuras sequías, ya que no desalienta la continuación de acciones poco resilientes a la sequía (p. ej., como condición para la recepción de asistencia) y, por el contrario, aumenta la dependencia futura de los agricultores de la ayuda gubernamental o de otros donantes (Wilhite et al. 2014).

Un enfoque más eficiente es el desarrollo proactivo (previo a la ocurrencia de una crisis) de programas o planes de gestión de la sequía. Estos planes o programas, desarrollados con la participación de los actores sociales relevantes, tienen como objetivos prevenir y reducir impactos negativos y estimular cambios en la gestión o gobernanza que reduzcan la fragilidad futura de actividades o sectores sensibles a la sequía, además de facilitar la recuperación posterior a un desastre.

El enfoque proactivo para la gestión de la sequía implica 1) el desarrollo o refuerzo de sistemas de monitoreo, pronóstico y alerta temprana, a fin de entregar información útil y oportuna para la toma de decisiones (Pulwarty y Sivakumar 2014; Wilhite 2000); 2) la formulación de procedimientos para evaluar y reducir los impactos de la sequía; 3) inversiones para mejorar la gestión efectiva de los riesgos, reducir la vulnerabilidad y mejorar la resiliencia (p. ej., mediante la transferencia de riesgos por medio de seguros agrícolas, la implementación de sistemas de riego, la construcción de reservorios de agua en fincas agrícolas y, con más frecuencia, una mayor eficiencia en el uso del agua en la agricultura); y 4) una planificación anticipada de las respuestas y los procedimientos para evitar intervenciones improvisadas ante una crisis (Wilhite et al. 2014).

Todos los elementos de un enfoque proactivo se han resumido en los tres pilares para una gestión integrada de la sequía, propuestos por el Programa Internacional de Gestión de la Sequía (IDMP) y que incluyen:

- El monitoreo, la predicción y la alerta temprana de sequías;
- La evaluación de riesgos e impactos; y
- La planificación, preparación y respuesta.

Los tres pilares del IDMP, adoptados en muchas regiones del mundo por su utilidad en la estructuración de la gestión moderna de la sequía, abordan múltiples aspectos, entre los que se incluyen la reducción del riesgo de desastres, la aplicación de estrategias de adaptación al cambio climático y la gestión de recursos hídricos. En este informe se enfatiza

la contribución potencial de las tecnologías digitales a cada uno de dichos pilares, que se describen brevemente en las siguientes secciones.

i. Monitoreo, predicción y sistemas de alerta temprana de sequía

El primer pilar del IDMP involucra el monitoreo y la predicción de la sequía, así como el desarrollo de sistemas de alerta temprana. A partir de la vigilancia se puede generar un alerta temprana del comienzo de un evento seco, determinar su intensidad y extensión espacial y difundir esta información a los actores de la sociedad afectados por éste o a los responsables de su gestión (World Meteorological Organization 2006). Aunque es imposible prevenir la ocurrencia de una sequía, los sistemas de alerta temprana brindan tiempo adicional para implementar respuestas o acciones ya planeadas para evitar crisis potenciales (Bachmair et al. 2016a). Estos sistemas deben integrar cuatro elementos: 1) una caracterización del riesgo de sequía que considere no solo la amenaza hidroclimática, sino también otros componentes del riesgo, como la exposición de comunidades y bienes a esta amenaza y la vulnerabilidad a la sequía de los sistemas y las actividades expuestas; 2) el monitoreo y la predicción de las condiciones de la sequía; 3) la difusión y comunicación de alertas relevantes a actores y actividades en riesgo; y 4) el desarrollo y la coordinación de acciones de respuesta para mitigar los potenciales impactos de la sequía (Pulwarty y Sivakumar 2014).

En ALC existen o se están implementando múltiples esfuerzos nacionales o regionales (supranacionales) para el monitoreo y, en menor medida, la predicción de la sequía, algunos de los cuales se describen en las secciones 4 y 5; no obstante, pocos de ellos incluyen los cuatro

elementos de los sistemas de alerta temprana ya que, en la mayoría de los casos, el énfasis se pone en el monitoreo de la amenaza de sequía. Por este motivo, el IDMP insta a crear conciencia sobre la importancia de cubrir más eficazmente “la última milla” en los sistemas de alerta temprana. En este sentido, las tecnologías digitales y de comunicación (el tema central de este informe) pueden cumplir un rol fundamental para asegurar que la información sobre sequía alcance a los grupos y las actividades sensibles a esta amenaza, especialmente a los más vulnerables. Además de su importante papel en la comunicación de la información a los decisores, las herramientas digitales pueden facilitar la participación de múltiples actores relevantes en el diseño, la implementación y la revisión de los sistemas de alerta temprana.

ii. Evaluación de riesgos e impactos de la sequía

El monitoreo y la predicción de la sequía son fundamentales para caracterizar el estado reciente, actual y futuro de esta amenaza; sin embargo, la mayoría de los diagnósticos difundidos a través de sistemas de alerta temprana (incluida la mayor parte de los sistemas que se describen más adelante) no se traducen de manera directa en la información que los tomadores de decisiones públicos y privados realmente desean conocer, esto es, cuáles son los impactos negativos esperables como consecuencia de un evento seco en curso y cómo limitar dichos impactos.

En la producción agrícola una mejor comprensión de la naturaleza, la magnitud y el momento de ocurrencia de los impactos asociados a una sequía contribuiría a estimular la preparación temprana y a mejorar la resiliencia de los sistemas actuales de producción (O'Connor et al. 2023; Potopová et al. 2020). Lamentablemente, la caracterización del vínculo entre los valores observados o pronosticados de indicadores de sequía y los impactos esperados es el componente más débil en los sistemas actuales de información (Bachmair et al. 2016b; Bachmair et al. 2017).

Las tecnologías digitales y de comunicación son fundamentales para el monitoreo continuo y en tiempo casi real de los impactos de las sequías en múltiples sectores y actividades, incluido el sector agroalimentario. Por ejemplo, el uso cada vez más difundido de las redes sociales ha cambiado la forma en que la ciudadanía puede participar en una crisis asociada a la

sequía: los contenidos de estas redes pueden ayudar a la detección temprana de una amenaza de desarrollo lento, como la sequía, y contribuir a cuantificar sus posibles

Recursos para el desarrollo de planes y estrategias nacionales en materia de sequía

El IDMP ayuda a los países a desarrollar e implementar planes y estrategias dirigidas a abordar la sequía, para lo cual desarrolló una herramienta digital de asistencia (*help desk*) con dos secciones principales denominadas “Preguntar” y “Encontrar”.

En la sección “Preguntar” (www.droughtmanagement.info/ask/) se puede solicitar asesoramiento y directrices sobre distintos aspectos de la gestión de la sequía, desde el cálculo y uso de diferentes indicadores, hasta la preparación ante esta amenaza. Dicho asesoramiento está dirigido principalmente a organismos gubernamentales responsables de la gestión de sequías, aunque la sociedad civil, el sector privado y el mundo académico también pueden recibir apoyo para avanzar en este campo. Se presentan ejemplos de consultas relevantes de diferentes tipos de usuarios, como técnicos, investigadores y personal de instituciones públicas.

En la sección “Encontrar” (www.droughtmanagement.info/find/) se incluye una biblioteca de documentos técnicos (como la guía de indicadores de sequía de la OMM). Además, se ofrece un glosario con definiciones de términos técnicos relativos a la sequía y sus impactos.

Finalmente, en la sección “Políticas y planes de sequía” (www.droughtmanagement.info/drought-policies-and-plans/) se encuentran materiales sobre el proceso de 10 pasos, así como ejemplos de planes y políticas nacionales de sequía (o documentos preparatorios) para diferentes países.

impactos o a comprender la reacción de la sociedad (Mukherjee et al. 2022; Smith et al. 2020).

Los avances en las técnicas de aprendizaje automático, análisis de sentimientos y procesamiento de lenguaje natural permiten extraer información útil sobre la ocurrencia y los impactos de la sequía a partir de textos no estructurados como artículos en periódicos o revistas, reportes gubernamentales o publicaciones en redes sociales (Madruga de Brito et al. 2020;

Sodoge et al. 2023; Zhang et al. 2022). Pese a ser prometedores, estos métodos todavía conllevan desafíos, p. ej., sesgos en los reportes de diferentes tipos de impactos en los medios o cambios con el tiempo en las percepciones humanas (Shyrokaya et al. 2023). En ALC el uso de herramientas para el monitoreo de los impactos de la sequía mediante análisis de textos todavía está poco desarrollado, por lo que el IICA podría contribuir a su necesaria exploración y difusión en la región.

iii. Planificación, preparación y respuesta

El tercer pilar de la gestión integral de la sequía conlleva el desarrollo de un sistema de gobernanza y un marco regulatorio que faciliten la gestión proactiva de los riesgos de la sequía. Un elemento central de este pilar es el desarrollo de un plan o programa nacional de acción ante la sequía, en el que se debe establecer con antelación una serie de disposiciones, actividades y procedimientos para gestionar de forma oportuna, eficaz y apropiada las contingencias frente a la potencial ocurrencia de una sequía severa o extrema (Fuganti et al. 2020). Sin un plan coordinado que combine sistemas de monitoreo y alerta temprana, procedimientos para la evaluación de impactos, medidas de mitigación de riesgos y reducción de vulnerabilidades, y acciones de planificación, preparación y respuesta, los países continuarán respondiendo en modo reactivo a las crisis generadas por las sequías (Wilhite et al. 2014).

La planificación y preparación para la sequía no debe responder a eventos específicos, sino constituir un proceso sostenido, que considere e integre otras metas nacionales, como el desarrollo sostenible y la planificación del crecimiento

económico (FAO 2019). Asimismo, la planificación debe contemplar factores como el cambio climático o cambios en la vulnerabilidad de diferentes actividades o grupos humanos que podrían afectar la evolución de los riesgos de la sequía. Fundamentalmente, el proceso de planificación debería ser inclusivo y equitativo, esto es, ofrecer a todas las regiones de un país y a todos los segmentos de la sociedad, especialmente a los más vulnerables, la oportunidad de participar en los planes y las decisiones, asegurando que las opiniones sean valoradas y respetadas y logrando que el proceso reconozca y solucione posibles conflictos o impactos inesperados (Duel et al. 2022).

Un aspecto fundamental de un plan de preparación para la sequía es la coordinación entre múltiples instituciones y actores de la sociedad para articular capacidades y definir responsabilidades, roles y acciones (Zaveri et al. 2023). Esta coordinación se complica porque, típicamente, la responsabilidad de la gestión de la sequía está distribuida entre múltiples instituciones y niveles jurisdiccionales, p. ej., ministerios encargados de la producción agrícola o el ambiente,

instituciones de defensa civil o gestión de desastres, agencias de manejo de recursos hídricos, municipios, etc.

Para evitar la inacción o la emergencia de conflictos durante una crisis, en los planes formulados con antelación a un evento seco se deberían definir claramente procedimientos operativos donde se definan las responsabilidades y roles de cada institución o actor relevante (incluyendo a la sociedad civil y el sector privado), así como las acciones que corresponden a cada uno ante una sequía. Es decir, el resultado último de un plan de acción coordinado y consensuado es que cada parte interesada o afectada sepa qué debe hacer antes, durante y después de una sequía.

Datos sobre los impactos de las sequías

Un factor que dificulta conocer la asociación entre los diagnósticos del estado de una sequía y sus posibles impactos es la escasez de datos precisos, sistemáticos y extendidos en el tiempo y el espacio sobre los efectos de esta en los sectores y sistemas.

Aunque existen recursos para enfrentar este problema, en ALC se dispone de muy pocos; p. ej., en los Estados Unidos se estableció el sistema de Reportes de Impactos de Sequías (DIR) (droughtreporter.unl.edu/map/), que combina la exploración de publicaciones en diferentes medios con reportes de impactos realizados por autoridades o el público en general.

El Reporte de Impactos Agroclimáticos (agriculture.canada.ca/en/agricultural-production/weather/agroclimate-impact-reporte) de Canadá es similar al DIR, pero se enfoca en el sector agrícola: productores voluntarios responden una encuesta mensual en la que reportan condiciones que pueden verse afectadas por la ocurrencia de una sequía, como la humedad del suelo, la disponibilidad de agua superficial y subterránea, el estado de las pasturas y los pastizales, etc.

En ALC el inventario de desastres denominado *Desinventar* (db.desinventar.org) se comenzó a compilar en 1994 y actualmente es mantenido por la Corporación OSSO; no obstante, sus datos no cubren todos los países de ALC e incluyen los relativos a impactos de otros desastres geofísicos, además de los de la sequía.



3. Variables e indicadores para el monitoreo de la sequía

Las sequías se monitorean y caracterizan por medio de múltiples indicadores e índices⁷ que describen el estado de la sequía en un momento y un lugar determinados. Los indicadores pueden incluir variables hidroclimáticas como la precipitación y la HS o cantidades calculadas a partir de dichas variables. Además, se pueden utilizar indicadores derivados de datos provenientes de instrumentos a bordo de satélites, p. ej., indicadores del verdor o del vigor de la vegetación que reflejan impactos asociados a la sequía (Vogt et al. 2018). Se ha propuesto una enorme cantidad de indicadores (cuyo número aumenta constantemente) para el monitoreo de las condiciones de sequía en diferentes regiones y sectores (Lloyd-Hughes 2014). En una publicación de la Organización Meteorológica Mundial (OMM) y la Asociación Mundial para el Agua (2016) se enumeran muchos de estos indicadores, se resumen sus principales características y se clasifican de acuerdo con la dificultad de su cálculo o implementación.

En esta sección se abordan en primer lugar observaciones en torno a la precipitación, una variable climática fundamental para la vigilancia de la sequía. A continuación, se presentan algunos indicadores comúnmente utilizados (y otros más recientes, pero prometedores) en la vigilancia de la sequía y se discuten sus fortalezas y debilidades. En la sección 4 se presentan algunos recursos digitales en los cuales se puede encontrar información sobre el estado actual o reciente de estos indicadores en diferentes países de ALC.

⁷ Aunque en ocasiones los términos indicadores e índices se definen de manera separada, con fines de simplificación en este informe se usará solo el término indicadores, que técnicamente incluye el concepto de índices.

a. La precipitación

La precipitación es un componente fundamental del ciclo hidrológico y, en consecuencia, una variable esencial para caracterizar el estado de la sequía en una región y un momento determinados. Los pluviómetros manuales o automáticos proporcionan las mediciones más directas y precisas de la precipitación líquida o sólida (nieve o granizo). Las principales fuentes de datos de precipitación in situ son los servicios meteorológicos e hidrológicos de cada país, aunque en ALC todavía se enfrentan limitaciones para acceder fácilmente a esta información. Existen, además, redes de observación agrometeorológica o hidrológica operadas por otras instituciones gubernamentales como institutos de investigación agropecuaria o hidrológica (p. ej., en Chile y Uruguay). Los costos decrecientes de las estaciones meteorológicas automáticas son el motivo por el cual en los últimos años han proliferado redes de observación gestionadas por autoridades subnacionales (como las de algunos estados de Brasil), instituciones privadas o no gubernamentales (p. ej., bolsas de comercio de granos y cooperativas de productores agrícolas) e incluso empresas o productores individuales.

Un caso interesante es el de las redes comunitarias de monitoreo de precipitación y otras variables hidroclimáticas, como la Red Comunitaria Colaborativa sobre Lluvia, Granizo y Nieve (www.cocorahs.org), presente en Puerto Rico y Bahamas. Esfuerzos similares se han implementado en varios países andinos (Buytaert et al. 2014). Las redes comunitarias tienen impactos que van más allá de aumentar la disponibilidad de datos, ya que además generan una mayor conciencia entre la población acerca de los efectos de las amenazas hidroclimáticas y la necesidad de

prepararse para reducirlos; sin embargo, es necesario asegurar la continuidad temporal y la consistencia de las observaciones comunitarias.

Para apoyar la toma de decisiones en la gestión de la sequía es fundamental tener acceso a datos sobre precipitación de buena calidad y con amplia cobertura espacial y temporal. Los datos de diferentes instituciones, el sector privado y las redes comunitarias deben complementar las observaciones de las redes meteorológicas tradicionales de monitoreo e integrarse eficientemente con ellas (Buytaert et al. 2014). A tal fin, los principales desafíos son a) asegurar la instalación correcta y el mantenimiento apropiado de los instrumentos (ej., pluviómetros y termómetros), incluida su calibración periódica; b) utilizar protocolos adecuados de observación (horas de medición y frecuencia de observaciones); y c) mantener una documentación detallada de los datos, la instrumentación y los protocolos de observación.

La principal desventaja de las observaciones in situ de la precipitación es que su representatividad espacial, es decir, el área representada por una medición puntual de lluvia, puede resultar limitada (Bohnenstengel et al. 2011). La representatividad espacial varía con el relieve (es menor en zonas montañosas) y el tipo de precipitación, p. ej., disminuye cuando se trata de lluvias convectivas en las tormentas localizadas de verano (Buytaert et al. 2006). La variabilidad espacial y temporal de la precipitación requiere redes de observación densas, lo que no siempre es factible en ALC.

Una posible respuesta a la baja densidad espacial de las observaciones in situ de precipitación es el uso de productos derivados de instrumentos para aplicaciones hidrometeorológicas a bordo de satélites. La principal ventaja de los productos satelitales de precipitación (PSP) es su cobertura espacial amplia y repetida en el tiempo (Beck et al. 2020; Kidd et al. 2013; Maggioni et al. 2016; Sun et al. 2018). Algunos PSP (listados sin ningún orden especial) ampliamente utilizados en ALC y otras partes del mundo son:

- La Estimación de Precipitación a partir de Información Registrada Remotamente utilizando Redes Neuronales Artificiales (PERSIANN) (Nguyen et al. 2018);
- Las Recuperaciones Multisatelitales Integradas para la GPM (Huffman et al. 2020);
- El Mapa Satelital Mundial de Precipitaciones (Kubota et al. 2007); y
- La técnica de transformación (Morphing) del Centro de Predicción Climática (CMORPH) (Joyce et al. 2004).

Otros productos recientes como el denominado Soil Moisture to Rain - Advanced SCATterometer (Brocca et al. 2019) y el SM2RAIN (Massari et al. 2020) estiman la precipitación a través de cambios en la HS, es decir, utilizan el suelo como el receptáculo de un pluviómetro.

Por motivos de brevedad, los PSP mencionados no se examinan en detalle aquí, pero se pueden obtener y visualizar fácilmente en internet. Asimismo, muchos de estos productos se pueden analizar y visualizar mediante Google Earth Engine (GEE), una aplicación basada en la nube que permite combinar capacidades computacionales masivas con fácil acceso a un catálogo de múltiples petabytes de datos ambientales y socioeconómicos, listos para

ser analizados (Gorelick et al. 2017; Pouyan et al. 2023).

Interpretación de la precipitación

Para identificar condiciones de sequía, normalmente la precipitación se reporta o visualiza en términos de *anomalías*: una anomalía es la desviación de una variable o un indicador climático, en este caso, la precipitación, con respecto al valor medio histórico o "normal" en un momento y un lugar determinados.

Una forma simple de presentar los desvíos o anomalías de precipitación es a través del *porcentaje de precipitación normal*, en el que el cociente de la lluvia observada y el valor promedio o normal se expresa como porcentaje.

Además, en el contexto de la distribución histórica de esa variable un valor de precipitación se puede expresar como un *índice de deciles*. Los deciles bajos (de 1 a 4, p. ej.) sugieren déficits de precipitación.

Por último, la precipitación se puede expresar también como un *percentil*, o sea, el porcentaje de la distribución histórica con valores menores al observado. Como en el caso de los deciles, los percentiles bajos (p. ej., los menores al percentil 50) indican lluvias por debajo de lo normal. Los percentiles se pueden aplicar no solo a las precipitaciones, sino también a otros indicadores de sequía, como los índices de verdor de la vegetación que se explican más adelante.

Todos los PSP presentan limitaciones e imprecisiones, por lo que su desempeño debe ser caracterizado en diferentes regiones y épocas del año por medio de comparaciones con observaciones tradicionales u otras fuentes de datos. Afortunadamente, muchos estudios han evaluado su desempeño en distintos lugares y en aplicaciones como vigilancia de sequía y pronóstico de inundaciones. Casi todos los PSP suelen sobreestimar las precipitaciones bajas y subestimar las lluvias elevadas (lo que causa problemas para la caracterización de eventos extremos) o mostrar errores sistemáticos que varían con la época del año o el relieve.

Además de la exactitud y la precisión de los PSP, se deben evaluar otros aspectos a fin de decidir si un producto es apto para una aplicación determinada de monitoreo de la sequía:

- La resolución espacial del producto (es decir, el tamaño del área mínima que se puede resolver, que debe ser consistente con la aplicación deseada);
- La longitud de la serie temporal disponible, de modo que los valores recientes de lluvia puedan evaluarse en el contexto de registros históricos que capturen adecuadamente la variabilidad natural; y
- La latencia⁸, esto es, el tiempo transcurrido entre el momento de las observaciones y la disponibilidad de un producto para los usuarios.

Un PSP que se discute aquí con detalle por ser ampliamente utilizado en ALC es el Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Stations (CHIRPS) (Funk et al. 2015), cuya cobertura es casi global, de 50° norte a 50° sur (aunque en Sudamérica los datos presentan problemas al sur de 45° sur) en una grilla espacial regular de 0.05° (aproximadamente 5 km). La serie de datos CHIRPS es muy larga, ya que abarca desde 1981 hasta el presente, y estos se distribuyen por día, péntada⁹ o mes.

La precipitación de CHIRPS se estima en base a la duración de las nubes frías, medida con datos de satélites geoestacionarios que observan la temperatura del tope de las nubes. La duración de las nubes frías, que

⁸ La latencia de un PSP puede variar entre horas y meses.

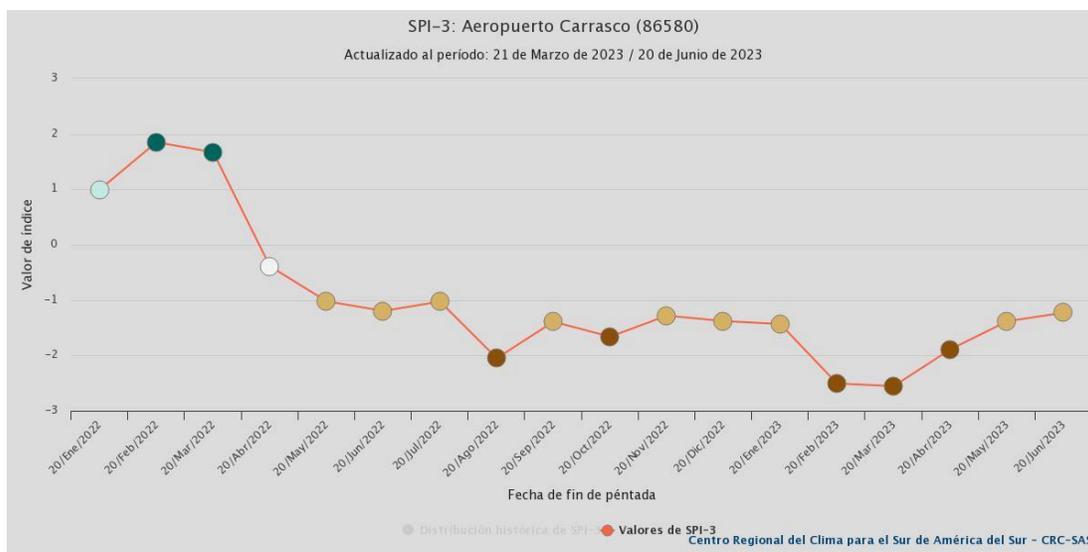
⁹ Las péntadas de CHIRPS son períodos de aproximadamente 5 días: las cinco primeras péntadas de un mes incluyen 5 días, pero la última péntada llega hasta el fin del mes (por lo que su longitud varía entre 3 y 6 días, según el mes en cuestión).

refleja el lapso durante el cual un punto ha estado cubierto por nubes frías y altas, se asocia al monto de precipitación. Además de los datos satelitales, CHIRPS incorpora observaciones in situ de precipitación para reducir los sesgos y mejorar las estimaciones. Los datos in situ se incorporan en dos etapas: una primera versión del producto está disponible de 2 a 3 días después de una péntada e incluye datos de (no muchas) estaciones meteorológicas que los reportan mediante la OMM, mientras que la versión final incluye más observaciones in situ y está disponible unas tres semanas después de finalizada una péntada.

El producto CHIRPS ha demostrado utilidad en muchas partes del mundo. Una lista de esfuerzos de validación de este producto en ALC puede encontrarse en Harrison et al. (2022). Zambrano et al. (2016) descubrieron que CHIRPS tendía a sobreestimar la precipitación en zonas áridas como el norte de Chile, pero que mostraba un mejor desempeño en regiones con mayor precipitación. Según otro estudio en Chile (Zambrano et al. 2017), CHIRPS tuvo un mejor desempeño en zonas de baja y mediana altura (de 0 a 1000 m s. n. m.) que en el altiplano chileno. En general, CHIRPS y otros PSP sobreestimaron la frecuencia de lluvias moderadas (de 1 a 5 mm por día) y subestimaron el número de eventos intensos de precipitación (>40 mm por día). Rivera et al. (2018; 2019) confirmaron que CHIRPS resulta útil para identificar eventos secos en zonas áridas y semiáridas como el oeste de Argentina, pero en escalas temporales superiores a un mes (esta no es una limitación seria en el caso de las sequías agrícolas, que generalmente reflejan las condiciones a lo largo de varios meses). En el estado de Mato Grosso en Brasil los eventos de sequía identificados con CHIRPS se vincularon con claras reducciones en los rendimientos de soja sin riego (Carvalho et al. 2020).

b. El índice estandarizado de precipitación (SPI)

Figura 1. Serie temporal del SPI para una escala temporal de 3 meses (SPI-3) en Carrasco, Montevideo, Uruguay. Un evento seco (definido como SPI-3 < -1.0) comenzó el 20 de mayo de 2022 y persistió hasta el 20 de junio de 2023 (últimos datos disponibles en el momento de escribir el informe).



Fuente: Tomado de Sistema de Información sobre Sequías para el sur de Sudamérica (SISSA, <https://sisssa.crc-sas.org>).

El SPI cuantifica las condiciones de déficit o exceso de precipitación en un lugar y para una escala temporal determinada (McKee et al. 1993). Después de haber sido utilizado en múltiples regiones y aplicaciones, el SPI fue recomendado por la OMM y la Declaración de Lincoln sobre la Sequía como un indicador universal de sequía meteorológica (Hayes et al. 2011).

El SPI tiene tres ventajas principales (Hayes et al. 1999). La primera es su simpleza, ya que solo requiere series históricas de precipitación y su cálculo es relativamente fácil. En segundo lugar, la naturaleza estandarizada del SPI permite comparar

valores del indicador¹⁰ en diferentes lugares. Su tercera ventaja es que se puede calcular para diferentes escalas temporales, lo que permite analizar distintos tipos de sequía; Por ejemplo, un SPI para escalas de 3 o 6 meses (SPI-3 o SPI-6) puede ser útil para monitorear sequías meteorológicas o agrícolas, mientras que las escalas más largas de 9 o 12 meses (SPI-9 y SPI-12) son más apropiadas para detectar sequías hidrológicas.

¹⁰ Los valores del SPI se expresan en términos de desviación estándar de una distribución normal o gaussiana con media 0 y varianza 1, también llamados z-scores, motivo por el cual los valores del indicador para condiciones secas y húmedas tendrán una distribución simétrica centrada alrededor de 0, salvo en el caso de que existan muchos valores nulos de lluvia (véase el texto).

Pese a sus ventajas, el SPI también tiene algunas limitaciones por considerar para interpretar los resultados. En primer lugar, la estimación requiere datos de al menos 30 años para producir resultados estables (McKee et al. 1993). Una segunda limitación es que la presencia de valores nulos de precipitación (o sea 0 mm), como puede ocurrir en zonas áridas o en escalas temporales cortas, puede causar problemas. En estos casos la distribución de valores del SPI no será simétrica alrededor de cero y los valores negativos aparecerán truncados (Wu et al. 2007), por lo que los valores del SPI deben interpretarse con cuidado.

Los interesados en estimar el SPI con sus propias series de datos sobre lluvias pueden descargar un programa (para sistemas Windows) disponible en <https://drought.unl.edu/Monitoring/SPI/SPIProgram.aspx>. En un informe de la OMM (World Meteorological Organization 2012) se describe este programa y se discuten en detalle las ventajas y desventajas del SPI. Asimismo, existe el paquete SCI (<https://CRAN.R-project.org/package=SCI>) para el lenguaje estadístico R, que permite el cálculo de índices estandarizados para diferentes escalas temporales. Si los datos corresponden a la precipitación, el índice resultante es el SPI.

En muchos de los recursos digitales que se analizan en la sección 4 se pueden encontrar mapas y series temporales del SPI derivados de observaciones de precipitación in situ o PSP. Las series temporales del SPI para una estación meteorológica o un punto de grilla determinado permiten identificar la ocurrencia de eventos de sequía: se asume que una sequía se inicia cuando el SPI cae por debajo de un cierto umbral (p. ej., -0.5 o -1.0) y finaliza cuando el indicador vuelve a cruzar el umbral en dirección opuesta. La diferencia

entre las fechas de inicio y finalización definen la duración de este evento específico. En la figura 1 se presenta un ejemplo de serie de SPI para una escala de 3 meses (SPI-3) correspondiente al Aeropuerto de Carrasco, cerca de Montevideo, Uruguay. Un evento seco (definido como $SPI-3 < -1.0$) comenzó a fines de mayo de 2022 y ha persistido hasta

Interpretación del SPI

Los valores positivos del SPI corresponden a lluvias acumuladas por encima de lo normal (precipitaciones mayores a la mediana, es decir, condiciones húmedas), mientras que los negativos indican condiciones de sequía. En la REF_Ref137807380 \h tabla 1 se muestran las categorías de condiciones secas y húmedas propuestas por Lloyd-Hughes y Saunders (2002), de acuerdo con el valor estimado del SPI.

Debido a que el SPI se expresa en términos de desviaciones estándar de una distribución gaussiana (también llamados *z-scores*), es posible calcular la probabilidad de ocurrencia de cada categoría (columna derecha en la REF_Ref137807380 \h tabla 1).

Tabla 1. Categorías de condiciones secas y húmedas con base en valores del SPI y probabilidad de cada categoría o intervalo.

Fuente: Lloyd-Hughes y Saunders (1994).

los datos más recientes (20 de junio de 2023), es decir, este evento ha durado al menos unos 13 meses.

c. El índice estandarizado de precipitación y evapotranspiración (SPEI)

Una de las principales críticas al SPI es que se basa solamente en datos de precipitación y, en consecuencia, no considera otras variables que influyen en la evolución de las sequías, como la temperatura, la evapotranspiración o la velocidad del viento. Para superar esta limitación, Vicente-Serrano et al. (2010a) propusieron el SPEI. A diferencia del SPI, el SPEI utiliza como entrada la diferencia entre la precipitación y la evapotranspiración potencial (ET₀)¹¹, que representa un balance hídrico simplificado, en ocasiones denominado “balance hidrológico climatológico”.

El SPEI fue diseñado para combinar la sensibilidad de indicadores más difíciles de calcular y calibrar con la simpleza del cálculo y la naturaleza multitemporal del SPI (Vicente-Serrano et al. 2010a). Si bien el SPEI es relativamente reciente, ya se utiliza de manera amplia (Beguería et al. 2013; Drumond et al. 2021; Vicente-Serrano et al. 2015); un ejemplo de ello se encuentra en el estudio de Tomasella et al. (2023) con respecto a Brasil. El SPEI se desempeñó algo mejor que el SPI en estudios que correlacionaron ambos índices con las respuestas en sistemas agrícolas, ecológicos e hidrológicos (de Medeiros et al. 2022). El SPEI es especialmente apropiado para explorar posibles impactos del calentamiento global sobre la severidad de las sequías (Beguería et al. 2013; Reyniers et al. 2023); no obstante, el SPEI y el SPI pueden producir resultados diferentes cuando se analizan escenarios climáticos futuros, por lo que en estos casos se debe seleccionar con cuidado el indicador por emplear (Reyniers et al. 2023).

Interpretación del SPEI

El SPEI se interpreta de la misma forma que el SPI: los valores negativos indican condiciones de sequía y los positivos representan exceso de lluvias. Se pueden usar incluso las mismas categorías que se muestran en la tabla 1 en relación con el SPI.

Vicente-Serrano et al. (2010b) implementaron un monitoreo global de sequías basado en el SPEI (disponible en <http://sac.csic.es/spei>). El sistema tiene una resolución espacial de 1° x 1° y cubre el período de 1955 al presente. El SPEI se calcula para múltiples escalas temporales, de entre 1 y 48 meses. Como sucede con el SPI, se pueden encontrar mapas y series temporales de SPEI en muchos de los recursos digitales examinados en la sección 5. Los interesados en estimar el SPEI con sus propios datos (incluido el cálculo de la ET₀) pueden utilizar el paquete `SPEI` (<https://cran.r-project.org/package=SPEI>) para el lenguaje estadístico R, desarrollado por los autores originales del indicador.

¹¹ La ET₀ se define como el máximo volumen de agua que sería transferido a la atmósfera por el suelo y la vegetación si no hubiera limitaciones en la oferta hídrica.

d. El índice de estrés evaporativo (ESI)

El ESI se utiliza para monitorear la influencia combinada de múltiples variables hidroclimáticas (la precipitación, la temperatura del aire, la humedad, la radiación, la velocidad del viento y la HS) en las condiciones que llevan a una intensificación rápida de las sequías agrícolas y ecológicas (Nguyen et al. 2019). En consecuencia, el ESI es particularmente útil para alertar sobre la ocurrencia de sequías repentinas, que son difíciles de identificar por medio de indicadores basados solamente en la precipitación (como el SPI); por esta razón, este indicador puede contribuir a mejorar la efectividad de los sistemas de alerta temprana (Otkin et al. 2013; Otkin et al. 2015b). Otra de sus ventajas es que refleja la HS sin utilizar observaciones de lluvia, lo que resulta útil en regiones de ALC que carecen de suficientes mediciones in situ de precipitaciones. Al no requerir datos de lluvias, el ESI también es provechoso para estudiar cómo los cultivos responden al riego. Aunque todavía no se ha difundido demasiado su uso, sobre todo en ALC, el ESI se incluye en este reporte porque promete ser un indicador eficaz para la detección temprana de sequías agrícolas que pueden causar estrés en cultivos y pasturas.

El ESI refleja anomalías en el cociente de la evapotranspiración real (ET) y la evapotranspiración de referencia¹² (ET_{ref}). El aspecto más complicado del cálculo del ESI es la estimación de la ET en un lugar y un momento determinados. Aunque una explicación detallada excede el alcance de este informe, la ET se estima con base en

¹² La ET_{ref} es la que se calcula con el método de Penman-Monteith en una superficie cubierta por pasto. Véase DeJonge, KC; Thorp, KR; Marek, GW. 2020. The apples and oranges of reference and potential evapotranspiration: Implications for agroecosystem models. *Agricultural & Environmental Letters* 5(1): e20011.

observaciones satelitales de variaciones en la temperatura de la superficie terrestre (Anderson et al. 2013; Hain y Anderson 2017). A medida que la HS disminuye en la zona de raíces, la temperatura del suelo y canopeo aumenta más que en suelos y vegetación con las mismas condiciones atmosféricas, pero sin estrés hídrico (Anderson et al. 2011). Mediante el Atmosphere–Land Exchange Inverse, un modelo de balance de energía de la superficie, se utilizan los cambios observados en la temperatura de la superficie para estimar la ET en el cálculo del ESI (Otkin et al. 2014, 2015a).

Aunque la principal ventaja del ESI es la detección de sequías repentinas en desarrollo, este indicador permite también el seguimiento de sequías tradicionales de evolución más lenta. Con dicho fin se ha utilizado con éxito en Estados Unidos (Anderson et al. 2013) y Australia (Nguyen et al. 2019), pero ha tenido menos difusión en ALC, a excepción de Brasil, donde el ESI ha explicado diferencias regionales en los rendimientos de soja, maíz y algodón durante el período 2003-2013 (Anderson et al. 2016). En otro estudio, este indicador mostró una mayor asociación que otros indicadores de sequía con los rendimientos de cultivos en Sudamérica (Ghazaryan et al. 2020b).

El programa SERVIR (www.servirglobal.net) genera datos globales de ESI. En la actualidad se distribuyen productos con dos escalas temporales: valores de ESI promediados para ventanas móviles de 4 semanas (para detectar el desarrollo rápido de sequías) y de 12 semanas (para dar seguimiento a sequías establecidas). Los datos de ESI tienen una resolución espacial aproximada de 1 km y se generan aproximadamente cada 7 días en las dos escalas temporales; sin embargo, la actualización de datos se efectúa dos veces

por mes (con algunas irregularidades) y en cada actualización se proporcionan datos correspondientes a dos o más semanas, por lo que con frecuencia se produce un retraso de algunos días entre el cierre de la ventana de datos utilizada y su disponibilidad. Los productos disponibles desde 2001 hasta el presente pueden descargarse del sitio <https://gis1.servirglobal.net/data/esi/>.

El programa SERVIR (que produce los datos de ESI) está desarrollando la herramienta ClimateSERV (<https://climateserv.servirglobal.net>), para visualizar precipitaciones CHIRPS y valores del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI). Aunque en el futuro los datos de ESI se podrán ver con esta herramienta, dichos valores no estaban disponibles cuando se elaboró este informe. Por el momento, el ESI se puede visualizar en el Sistema Global de Información sobre Sequía (GDIS) (gdis-noaa.hub.arcgis.com/pages/drought-monitoring), que se presenta más adelante (sección 5.1.1.1). El Sistema de Información

sobre Sequías para el Sur de Sudamérica (SISSA) (<https://sissa.crc-sas.org/monitoreo/indice-de-estres-evaporativo/>, véase la sección 5.1.2.3) produce mapas del ESI que se pueden comparar con estados anteriores.

Interpretación del ESI

El ESI se expresa como anomalías estandarizadas (o *z-scores*) de los valores del cociente ET/ET_{ref} en cada ventana móvil de 4 o 12 semanas del año durante un período de referencia de varios años. Como resultado de la estandarización, los valores del ESI deberían variar aproximadamente entre -3 y 3 y estar centrados en alrededor de 0.

Los valores positivos del ESI indican abundante humedad del suelo que no limita la ET, mientras que los negativos indican una ET reducida, debido, p. ej., al estrés hídrico.

e. La humedad del suelo (HS)

La HS cumple un rol fundamental en múltiples procesos que afectan el ciclo hidrológico terrestre y el sistema climático, constituyendo la principal fuente de agua para la agricultura y la vegetación natural (Seneviratne et al. 2010). En consecuencia, el monitoreo de esta variable puede ayudar a anticipar el desarrollo de las sequías agrícolas y sus impactos en el rendimiento de los cultivos y las pasturas (Spennemann et al. 2020).

La HS se define como la cantidad total de agua, incluido el vapor de agua, presente en los poros de la capa no saturada de un

suelo. Esta variable puede medirse in situ, a través de 1) métodos gravimétricos (pesaje de muestras de suelo antes y después de secarlas) o 2) sensores de diferentes tipos (Seneviratne et al. 2010). Lamentablemente, sobre todo en ALC, las redes de observación in situ de la HS son escasas, poco densas y sin continuidad temporal; la Red Internacional de Humedad del Suelo (<https://ismn.earth/>) muestra la disponibilidad global de observaciones in situ de HS. En consecuencia, se suelen usar formas alternativas de estimar la HS como 1) balances hidrológicos de diferentes grados de complejidad, que incluyen los modelos de superficie terrestre

(LSM) o 2) instrumentos a bordo de satélites que permiten llevar a cabo estimaciones repetidas en todo el mundo.

Los LSM son modelos numéricos que simulan procesos acoplados en la superficie terrestre y la atmósfera, entre los cuales, uno de los más utilizados es el Sistema Mundial de Asimilación de Datos Terrestres. Estos modelos, que dependen mucho de la calidad de los datos de entrada, tienen una latencia de varios meses, lo que los hace poco adecuados para el monitoreo operacional de las sequías (Spennemann et al. 2020). Como alternativa, se pueden utilizar balances hidrológicos más simples en dicho monitoreo.

Un ejemplo de un balance hidrológico simple es el producido por el Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA) de Uruguay (<http://www.inia.uy/gras/Monitoreo-Ambiental/Balance-H%C3%ADdrico/>), el cual estima el contenido de agua disponible con base en el tipo de suelo, la precipitación efectiva, la demanda potencial de agua de la atmósfera y la transpiración de la vegetación. El resultado se presenta en una grilla de 30 km y se actualiza en cada década¹³ del mes. El balance hídrico del INIA puede consultarse mediante la aplicación SIGRAS, desarrollada por dicho instituto (disponible para IOS y Android en <http://inia.uy/gras/Alertas-y-herramientas/sigras-app>). El Servicio Meteorológico Nacional (SMN) de Argentina realiza estimaciones del agua en el perfil de suelo por medio del modelo de Balance Hídrico Operativo para el Agro (Fernández Long et al. 2012; Spennemann et al. 2020). Los mapas del porcentaje de agua útil en la capa arable y en todo el perfil se actualizan en cada década del mes y pueden consultarse en www.smn.gob.ar/monitoreo_estados. También en Argentina, la Oficina de Riesgo Agropecuario publica periódicamente el

contenido de agua en el suelo en diferentes localidades y tipos de cultivos con base en un balance hídrico desarrollado por esa institución; los gráficos de agua en el suelo pueden consultarse en www.ora.gov.ar/camp_actual_reservas.php. Con apoyo del IICA y aportes técnicos de Argentina y Uruguay, se desarrolló en Paraguay el Balance Hidrológico Agrícola (bhag.meteorologia.gov.py), a fin de evaluar la disponibilidad actual de agua en el suelo para ciertos cultivos de secano y pasturas en diferentes suelos.

Además de estos recursos nacionales, el Centro de Predicción del Clima (CPC) de los Estados Unidos produce y pone a disposición del público mapas mensuales de HS, anomalías y percentiles, derivados de un modelo hidrológico global que utiliza la precipitación y la temperatura como entrada. Los mapas de HS están disponibles con algunos días de latencia en www.cpc.ncep.noaa.gov/products/Soilmst_Monitoring/gl_Soil-Moisture-Monthly.php.

Las estimaciones de HS, generadas a través de instrumentos satelitales, han producido información sin precedentes que no se puede obtener mediante observaciones in situ (Abbaszadeh et al. 2021). Los métodos de estimación de HS incluyen el uso de instrumentos pasivos y activos de microondas (entre ellos radiómetros, dispersómetros y radares de apertura sintética) y mediciones de la gravedad terrestre (Seneviratne et al. 2010). Los instrumentos que operan en las microondas son sensibles a variaciones en la constante dieléctrica del suelo, muy asociada a la humedad en su capa superficial. Otras ventajas de los instrumentos de microondas es que pueden operar día y noche y no son afectados por la cobertura nubosa; además, las mediciones en las microondas son menos sensibles a la rugosidad de la superficie y penetran (hasta cierto punto) la cobertura vegetal (Zhang et al. 2021).

¹³ Las décadas de un mes son períodos de aproximadamente 10 días. La duración de la última década del mes puede ser variable.

Una limitación a menudo mencionada de las estimaciones satelitales de HS es que aparentemente reflejan las condiciones de la capa más superficial del suelo (unos 5 cm); no obstante, estudios recientes sugieren que las observaciones de microondas contienen información útil de la HS en profundidades > 5 cm, incluida la zona del perfil de donde las raíces de cultivos anuales y pasturas extraen la mayor parte del agua que consumen (Feldman et al. 2023). Por otra parte, para mejorar la representatividad de los valores de HS en todo el perfil, los datos satelitales se pueden combinar con modelos numéricos que producen estimaciones de HS en una profundidad mayor.

Por razones de brevedad, en este informe se examinan solo algunos productos satelitales relativos a la HS que tienen un registro histórico de algunos años y que están disponibles por medio de recursos digitales accesibles para ALC; sin embargo, Brocca et al. (2023) analizaron algunos instrumentos satelitales recientes que permitirán estimar la HS con una resolución espacial no disponible previamente. Los datos provenientes de estos nuevos instrumentos prometen aportar nuevas soluciones y aplicaciones innovadoras, desde el monitoreo de sequías a escala de una parcela o un lote en una finca, hasta mejoras en la predicción de inundaciones repentinas.

Interpretación de la HS

Las estimaciones de HS de la misión SMAP o el instrumento ASCAT se emplean mediante sus valores absolutos y la humedad volumétrica (volumen de agua en el volumen de suelo).

La humedad volumétrica es un número sin dimensiones con un rango de entre 0.0 y 0.6. También puede expresarse como porcentaje, pero este depende del tipo de suelo: un suelo en capacidad de campo puede presentar porcentajes de humedad de entre 20 % (suelos arenosos) y 40 % (suelos arcillosos).

Dado que la humedad volumétrica o el porcentaje de humedad pueden tener significados diferentes para distintos tipos de suelo, estas cantidades tienen limitaciones para caracterizar el estado de la sequía, debido a lo cual es más útil calcular a) anomalías de HS con respecto a los promedios históricos de un lugar y la misma época del año o b) los percentiles de la distribución.

Alternativamente, se puede utilizar la diferencia entre mapas de humedad en dos momentos separados por semanas o meses: una disminución en la HS se puede asociar a condiciones de sequía (Eswar et al. 2018).

i. HS proveniente de la misión SMAP

Los datos de HS generados por la misión de medición activa/pasiva de la humedad del suelo (SMAP) de la Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio (NASA) de los Estados Unidos están entre los más utilizados. La misión SMAP emplea un instrumento que mide la radiación

de microondas¹⁴ emitida por la superficie

¹⁴ La misión SMAP originalmente combinaba un radiómetro de microondas con un radar, que falló poco después del inicio de la misión, debido a lo cual en la actualidad las estimaciones de HS se generan solo con base en los datos del radiómetro.

terrestre en banda L (1.4 GHz), la cual luego se convierte en estimaciones de la HS. De esta forma, el radiómetro SMAP ha generado estimaciones globales de HS desde marzo de 2015 hasta el presente.

La misión SMAP estima el contenido volumétrico de humedad (expresado en m^3 de agua por m^3 de suelo) cada 2 a 3 días, con una latencia de unos 3 días y con una resolución espacial de ≈ 36 km, que se mejora a 9 km a través de un procesamiento adicional. Un producto SMAP combina los datos del radiómetro con un modelo de superficie terrestre para producir estimaciones de HS en la zona de raíces, de 0 cm a 100 cm de profundidad aproximadamente (Reichle et al.

2019). Las estimaciones de HS son bastante confiables (error cuadrático medio $\leq 0.04 m^3/m^3$), salvo en regiones con vegetación muy densa, como las selvas tropicales, y en suelos con muy alto contenido de materia orgánica ($>8.7\%$), mucha arcilla ($>40\%$) o mucha arena ($>85\%$) (Colliander et al. 2022; Min et al. 2023; Yueh et al. 2020).

Los datos de la misión SMAP están disponibles en el Centro Nacional de Datos de Nieve y Hielo de los Estados Unidos, así como en GEE. El SMN de Argentina ofrece mapas de humedad volumétrica de 0 cm a 5 cm derivada de SMAP por década del mes (www.smn.gov.ar/monitoreo_estados), pero solamente para dicho país.

ii. HS proveniente del instrumento ASCAT

La segunda fuente satelital de estimaciones de HS analizada en este informe es el instrumento denominado Advanced Scatterometer (ASCAT). El ASCAT es un dispersómetro o radar de apertura real en banda C (5.2 GHz) a bordo de la serie de satélites europeos MetOp (Bartalis et al. 2007). Este instrumento estima el porcentaje de saturación de agua en la capa superficial del suelo, que luego se convierte en HS volumétrica mediante información sobre la porosidad de los suelos. La HS se calcula diariamente con una resolución espacial de ≈ 25 km.

Aunque la información generada por el ASCAT se puede utilizar de manera directa, es mucho más frecuente el empleo del índice de agua en el suelo (SWI), derivado de los datos originales de ese instrumento. El SWI convierte las estimaciones de HS en los primeros centímetros del perfil en contenido de agua de una porción más profunda del perfil, para lo cual utiliza un modelo que describe la infiltración de agua a lo largo del

perfil en función del tiempo en días. Las estimaciones del SWI se proporcionan con respecto a 8 diferentes valores de tiempo que determinan cuán fuerte es la influencia de las estimaciones anteriores de HS en el valor del SWI (Rassl et al. 2022). No existe una regla general que vincule el factor tiempo con la profundidad del suelo representada en el SWI, ya que esta asociación depende de las propiedades de cada suelo. Generalmente se usa T (tiempo) = 10 días, pero se sugiere consultar el manual del producto para una aplicación específica. El SWI se expresa en porcentaje o fracción de 0 a 1.

Como ocurre con otros datos satelitales acerca de la HS, esta variable no se puede calcular cuando el suelo está congelado o cubierto de nieve. Estas condiciones se identifican por medio de códigos de calidad en los datos del SWI. Se proporciona además información estática (que no varía con el tiempo) para identificar otras condiciones en las cuales la estimación de HS no es factible, tales como regiones con topografía compleja,

cobertura permanente de agua o selvas tropicales.

Los valores del SWI están disponibles en el servicio europeo Copernicus (Global Land Service, <https://land.copernicus.eu/global/products/swi>), con una resolución espacial de 0.1° diarios o agregados por década del mes. Los archivos diarios o decádicos del SWI tienen formato netCDF4 y pueden visualizarse con versiones recientes del software QGIS.

Resolución espacial de los datos acerca de la HS. Los datos sobre la HS de la misión SMAP y el instrumento ASCAT resultan útiles para el monitoreo de la sequía en el ámbito regional, pero su resolución espacial (de 9 km a 10 km para ambas fuentes de datos) es

insuficiente para gestionar parcelas o fincas individuales (Peng et al. 2021). Por tal motivo, se están desarrollando métodos para aumentar la resolución espacial de la HS en escalas de 1 km a 3 km (Abbaszadeh et al. 2021; Fatholouloumi et al. 2022; Mohseni et al. 2022); no obstante, el uso de estos métodos aún no está muy difundido.

f. Los índices de vegetación

Una de las principales estrategias utilizadas para detectar una sequía agrícola y monitorear su evolución se basa en el uso de índices de vegetación, que se calculan a partir de datos de instrumentos satelitales y que constituyen indicadores adimensionales de la biomasa y la condición de la vegetación.

Por lo general, estos índices se estiman con un cociente o una combinación lineal de observaciones en dos o más porciones del espectro electromagnético (bandas o canales del instrumento), influenciadas por las características espectrales de la vegetación

(Huete et al. 1994). Debido a la cobertura temporal repetida de los instrumentos satelitales, los índices de vegetación permiten seguir variaciones estacionales, interanuales y de más largo plazo en la vegetación para monitorear la producción agrícola mundial, detectar posibles situaciones de inseguridad alimentaria y la ocurrencia de incendios en la vegetación (Huete et al. 1994). Se han empleado numerosos índices de vegetación en el seguimiento de la sequía (Kogan et al. 2020). En este informe se presentan solo algunos de los más usados y que están disponibles en ALC a través de recursos digitales de acceso abierto.

i. El índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI)

El NDVI es uno de los índices de vegetación más simples y, por tanto, uno de los más ampliamente utilizados. Se calcula por medio de la radiación electromagnética absorbida durante la fotosíntesis o reflejada por la vegetación terrestre en dos longitudes de onda del espectro: el rango visible (400-700 nm) y el infrarrojo cercano (700-1100 nm). Cuando la vegetación no está estresada (es decir, cuando está muy verde y vigorosa y cubre uniformemente el terreno), la radiación reflejada es baja en el visible (cerca del rojo) y alta en el infrarrojo cercano (Kogan et al. 2020). Por el contrario, si la vegetación está amarillenta y marchita y es poco uniforme (o falta en algunos lugares), se considera que está sufriendo estrés y el patrón de radiación reflejada se invierte: es alta en el visible y baja en el infrarrojo cercano.

Desde principios de los ochenta el NDVI se ha utilizado de modo extensivo en el monitoreo de la sequía, ya que puede calcularse a partir de muchas familias de satélites e instrumentos (Kogan et al. 2019, 2020). Por ejemplo, la serie de 40+ años de NDVI calculado con el radiómetro avanzado de muy alta resolución (AVHRR) a bordo de satélites polares de los Estados Unidos (NOAA-x) y europeos (Metop), proporciona datos invaluable para estudiar cambios en la vegetación global y el uso/la cobertura de la tierra (Pinzon y Tucker 2014). Desde inicios del siglo XXI el espectrorradiómetro de imágenes de resolución moderada (MODIS) en los satélites Terra y Aqua ha permitido producir un NDVI con mayor resolución espacial (grillas de 250, 500 y 1000 m) y con un instrumento más sensitivo que el AVHRR. La nueva generación de satélites polares de los Estados Unidos (Suomi, NOAA-20 y NOAA-21) llevan a bordo el instrumento de la suite de

radiómetro de imágenes infrarrojas visibles (VIIRS), con el cual ya se producen estimaciones de NDVI que continuarán la serie de este indicador una vez que los instrumentos MODIS dejen de funcionar (Kogan et al. 2015).

En aplicaciones que requieren mayor resolución espacial (decenas de metros) el NDVI se puede calcular a partir de satélites como los Spot, Landsat o Sentinel 2. Muchos recursos digitales de monitoreo ofrecidos por el sector privado (véase la sección 4.2) brindan datos del NDVI con una alta resolución espacial. Este se puede calcular incluso en lotes individuales con cámaras multispectrales a bordo de aviones, helicópteros o drones (Sozzi et al. 2021). Cabe subrayar que, aunque el cálculo del NDVI sea el mismo, los valores del índice pueden variar entre las distintas fuentes de datos (salvo que los datos se hayan armonizado), debido fundamentalmente a diferencias en la configuración de los diferentes instrumentos, como las características espectrales de las bandas o los canales de cada instrumento (Liu et al. 2023).

Los valores del NDVI varían en un lugar determinado a lo largo de un año en respuesta a las distintas etapas fenológicas de la vegetación presente. En consecuencia, para identificar posibles condiciones de sequía a través de las variaciones en la cantidad de biomasa y su verdor, es recomendable el uso de anomalías o desvíos del NDVI: los valores del NDVI en un lugar y un momento determinados se comparan con la tendencia central (media o mediana) de estos valores, calculada con base en datos históricos (p. ej., los últimos 10 años) para ese lugar y esa época del año.

Los valores del NDVI calculados a partir de datos de los instrumentos MODIS y VIIRS están disponibles sin costo en el sitio del GIMMS Global Agricultural Monitoring (<https://glam1.gsfc.nasa.gov/>), desarrollado por la NASA y el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA). Este sitio muestra mosaicos de 8 días del NDVI y anomalías del índice. La herramienta permite exportar imágenes y extraer series temporales para un lugar determinado. Los valores globales del NDVI por década del mes (calculados con datos de MODIS y VIIRS) se encuentran en el sitio del Sistema Mundial de Información y Alerta sobre la Alimentación y la Agricultura (SMIA) de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) en <https://www.fao.org/giews/earthobservation>. El NDVI de todo el globo, calculado con datos de los satélites Sentinel y PROBA-V, se puede descargar del Servicio de Vigilancia Terrestre de Copernicus (<https://land.copernicus.eu/global/products/ndvi>) con una resolución espacial de 300 m en períodos de 10 días. En internet se encuentran numerosos tutoriales para calcular el NDVI con diferentes tipos de datos (incluso de drones), mediante herramientas como el software QGIS o GEE. En la sección 4 se explorarán algunos recursos digitales disponibles en ALC que muestran valores del NDVI.

Interpretación del NDVI

El NDVI tiene un rango de valores entre -1 y 1. Los valores negativos (generalmente cercanos a -1) corresponden a superficie cubierta por agua. Valores positivos bajos (entre 0.0 y 0.1) corresponden generalmente a suelo sin vegetación (roca, arena o nieve). Valores entre 0.2 y 0.4 indican pastizales y arbustos, en tanto que valores altos corresponden a bosques o selvas templadas y tropicales.

Si se asume que la cobertura no varía demasiado para un lugar determinado, los valores bajos en una serie de anomalías de NDVI (véase el texto) pueden asociarse a condiciones de estrés temporario, por ejemplo, debido a sequía. Sin embargo, valores bajos de NDVI también pueden deberse a heladas, enfermedades y pestes o deficiencias de nutrientes (Ghazaryan et al. 2020b).

ii. El índice de condición de la vegetación (VCI)

Una variante del NDVI es el VCI, desarrollado por (Kogan y Sullivan 1993). Su objetivo es separar las variaciones en el NDVI en escalas temporales cortas (p. ej., asociadas a condiciones de sequía) de fluctuaciones de más largo plazo (como las variaciones anuales asociadas con distintas etapas fenológicas). Para calcular el VCI los valores del NDVI en un lugar determinado y un momento del año se

re-escalan utilizando los valores mínimos y máximos del índice correspondientes al mismo lugar y la misma época en un período histórico de referencia. Liu y Kogan (1996) demostraron la utilidad del VCI en el monitoreo de la evolución temporal y espacial de la sequía en Brasil. El VCI se utiliza como un componente de algunos índices compuestos o combinados (véase más

adelante la discusión de los índices combinados).

Los valores globales del VCI por década del mes están disponibles en el sitio del SMIA de la FAO en <https://www.fao.org/giews/earthobservation>. Los mapas del VCI forman parte del sistema Meso-sequía (<https://meso-sequia-geocatie.hub.arcgis.com/>), una nueva herramienta de seguimiento de la sequía en Centroamérica, desarrollada por la Unidad de Acción Climática del Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza de Costa Rica. Este sistema ha estado disponible durante pocos meses (desde marzo de 2023), por lo que no se discute en detalle en la sección 4 sobre recursos digitales operacionales para el monitoreo de la sequía.

Interpretación del VCI

Se puede considerar al VCI como un NDVI estandarizado. Este indicador tiene un rango de 0 a 1, donde 0 corresponde al mínimo NDVI observado en la serie histórica de referencia en un lugar y una época del año determinados, mientras que el valor 1 corresponde al máximo histórico para ese lugar y esa época. Los valores bajos del VCI indican malas condiciones de la vegetación en relación con el rango histórico y los altos sugieren lo opuesto (Kogan y Sullivan 1993).

iii. El índice mejorado de vegetación (EVI)

El EVI fue desarrollado para superar algunas limitaciones del NDVI, como la influencia de los efectos atmosféricos en las mediciones del sensor MODIS o la saturación de los valores del NDVI en regiones con mucha vegetación (Huete et al. 2002). Otra ventaja del EVI es que reduce la influencia del suelo que subyace la vegetación: en general, con la misma cantidad de vegetación los suelos oscuros o húmedos producen valores más altos de NDVI que los suelos más claros (Liu y Huete 1995). Con respecto a la detección de la sequía, una comparación del NDVI y el EVI, realizada por Bajgain et al. (2015) en pastizales naturales, mostró un desempeño comparable para ambos índices, con una ligera ventaja para el EVI.

El SISSA (presentado en la sección 4.1.2.3) produce mapas del EVI y sus anomalías en todo el sur de Sudamérica. Además, este sistema muestra mapas del EVI (y del NDVI) en unidades administrativas de nivel 2, como departamentos o partidos de Argentina (<https://sissa.crc-sas.org/monitoreo/indices-de-vegetacion/mapas-locales-de-indices-de-vegetacion/>). Además, se pueden visualizar series temporales de estos indicadores y sus valores de referencia o climatológicos, así como las distribuciones empíricas de valores de EVI en diferentes años. El EVI se interpreta de manera similar al NDVI; sin embargo, se debe tener en cuenta que, probablemente, este índice presente más variación que el NDVI en condiciones de vegetación densa y sin estrés.

iv. La fracción absorbida de radiación fotosintéticamente activa (FAPAR)

El estrés hídrico en la vegetación asociado con la sequía afecta la capacidad de los canopeos vegetales (cultivos agrícolas o vegetación natural) para interceptar la radiación solar y, por lo tanto, reduce la tasa de crecimiento de la vegetación. La FAPAR, que representa la fracción de la energía solar absorbida por la vegetación durante el proceso de fotosíntesis, está directamente correlacionada con la productividad primaria de la vegetación, puesto que la radiación fotosintéticamente activa interceptada por la vegetación es la energía subyacente a los procesos de productividad de las plantas (Sepulcre-Canto et al. 2012). La FAPAR depende de la estructura del canopeo, las propiedades ópticas de los elementos de la vegetación y las condiciones de iluminación.

La FAPAR estimada a partir de instrumentos satelitales se puede emplear en el monitoreo y evaluación de sequías agrícolas (Cammalleri et al. 2022; Peng et al. 2019; Rossi y Niemeyer 2012). Sus ventajas son su amplia cobertura geográfica, su complementación con otros indicadores meteorológicos y su relación con la productividad de los cultivos. Ravelo et al. (2016) demostraron la utilidad de las anomalías de la FAPAR para identificar condiciones de sequía en Centroamérica.

La FAPAR y el NDVI muestran una asociación consistente casi lineal en cuanto a la vegetación verde. Si la FAPAR está tan vinculada con el NDVI, ¿por qué es necesario mencionarla también aquí? La razón fundamental es que la FAPAR es utilizada de forma regular por el Observatorio Global de la Sequía (GDO) de la Comisión Europea y, de hecho, es uno de los tres componentes del indicador combinado de sequía del GDO (Sepulcre-Canto et al. 2012), que se emplea

Interpretación de la FAPAR

Los valores de la FAPAR se interpretan de la misma manera que los del NDVI debido a la relación estrecha entre ambos índices: además de las fluctuaciones producto de la cobertura del suelo y las variaciones estacionales, los valores más bajos de la FAPAR en un lugar y un momento determinados pueden asociarse a condiciones de estrés en la vegetación.

Las anomalías de la FAPAR utilizadas por el GDO se interpretan de forma similar: cada pixel o celda con una anomalía de la FAPAR negativa (es decir, una FAPAR menor que el promedio de largo plazo de ese pixel y esa década) indica condiciones de estrés en la vegetación, especialmente en relación con la sequía.

para calcular el indicador de riesgo del impacto de la sequía en la agricultura (RDri-Agri) del GDO, que se analiza en la sección 6.1.3.

En el Servicio de Vigilancia Terrestre de Copernicus se pueden obtener datos de la FAPAR, disponibles cada 10 días desde 2014 hasta el presente, con una resolución espacial de 300 m (<https://land.copernicus.eu/global/products/fapar>). Entre enero de 2014 y junio de 2020 los datos se obtuvieron del satélite PROBA-V. Desde 2020 hasta el presente se adaptó el algoritmo para obtener estimaciones de la FAPAR a partir del instrumento de color oceánico y terrestre a bordo del satélite Sentinel-3.

g. ¿Cuál indicador de sequía conviene utilizar?

En las secciones anteriores se presentaron diferentes indicadores de sequía a través de los cuales se intenta reflejar varios componentes del ciclo hidrológico terrestre (precipitación, evapotranspiración, etc.) y sus impactos sobre la vegetación y los cultivos. Estos indicadores, seleccionados por ser los más utilizados en ALC o porque se puede acceder fácilmente a sus datos, representan una porción ínfima del universo de indicadores existentes. En este sentido, algunas preguntas por formularse son: ¿qué indicador de sequía se debe emplear para monitorear la ocurrencia, intensidad, extensión espacial y evolución temporal de una sequía determinada? y ¿cuáles indicadores resultan más útiles para identificar una alta probabilidad de impactos negativos? Lamentablemente, debido a la naturaleza compleja de la sequía, estas preguntas están lejos de tener una respuesta simple.

Resulta tentador el uso de un indicador único de sequía, ya que ciertamente es más fácil de calcular en un área extensa, así como de comunicar a una audiencia heterogénea para impulsar acciones de preparación (Shyrokaya et al. 2023); no obstante, los diferentes tipos de sequía pueden conducir a distintos impactos en diversos sistemas y sectores con diferentes tiempos de ocurrencia. Por lo tanto, el uso de un indicador único no puede capturar la complejidad de un fenómeno multifacético como la sequía.

Esta conclusión ha sido confirmada en múltiples estudios dirigidos a contribuir a la selección de indicadores (y sus respectivos umbrales) asociados con los impactos de la sequía (Bachmair et al. 2016b; Bachmair et al. 2017; Bachmair et al. 2018), cuyos resultados

pueden orientar el uso de estos indicadores en ALC. Estos estudios demuestran que resulta difícil o imposible seleccionar un único indicador o una única escala temporal del indicador (p. ej., un SPI de 3 o 6 meses) para todos los sistemas y sectores afectados por la sequía. En primer lugar, los indicadores más apropiados varían entre sectores afectados, lo que no es sorprendente, dada la naturaleza compleja de la sequía y sus efectos. En segundo lugar, aun en el mismo sistema (como la producción de un cultivo determinado) los indicadores y umbrales óptimos para anticipar impactos pueden variar en el tiempo y el espacio. La variación espacial en los indicadores óptimos se observó incluso dentro de países relativamente pequeños (el Reino Unido y Alemania) donde se realizaron los estudios (Bachmair et al. 2017). Este resultado pone en cuestión el uso de indicadores únicos y umbrales fijos en un país entero o una subregión extensa de ALC.

En resumen, probablemente no exista un único indicador de sequía que se desempeñe uniformemente bien en todas partes, en toda época del año y para todos los diferentes tipos de sequía y actividades expuestas a esta amenaza (Hao et al. 2017a). La selección de indicadores de sequía debe estar determinada por las circunstancias específicas de la región y el sector o la actividad por monitorear. Dicha selección dependerá, entre otros factores, de la disponibilidad de datos espaciales y temporales para monitorear la sequía, los tipos de impactos que se desee prevenir o mitigar, la capacidad técnica de las instituciones o los grupos que producirán y utilizarán los indicadores para apoyar la toma de decisiones y los diferentes contextos

(climático, económico e institucional) en el que la información se usará (Crossman 2019).

Dado que, en última instancia, la sequía es un déficit extendido de agua, un enfoque razonable es comenzar con el cálculo de los indicadores más simples: p. ej., aquellos derivados solo de datos sobre precipitación de fácil cálculo y ampliamente utilizados. Por este motivo, p. ej., el SPI fue recomendado por la OMM como un indicador universal de sequía meteorológica (Hayes et al. 2011). Luego se pueden incorporar indicadores más complejos, considerando sus fortalezas y debilidades y examinando cuidadosamente la

correlación o asociación entre todos ellos y con los impactos de interés. La coherencia entre diferentes indicadores de sequía, sobre todo en el contexto de un objetivo específico (como la detección de impactos en los rendimientos de los cultivos), puede aportar una “convergencia de evidencia” que justifique la iniciación formal de actividades de mitigación de impactos (Enenkel et al. 2019).

h. Indicadores de sequía compuestos o combinados

En la sección anterior se hizo hincapié en las limitaciones del empleo de un indicador único en la caracterización de una amenaza hidroclimática compleja como la sequía. En consecuencia, una tendencia cada vez más prevalente es el uso simultáneo de múltiples indicadores o de indicadores compuestos o combinados que resultan de la fusión o combinación de varios indicadores individuales (Hao y Singh 2015).

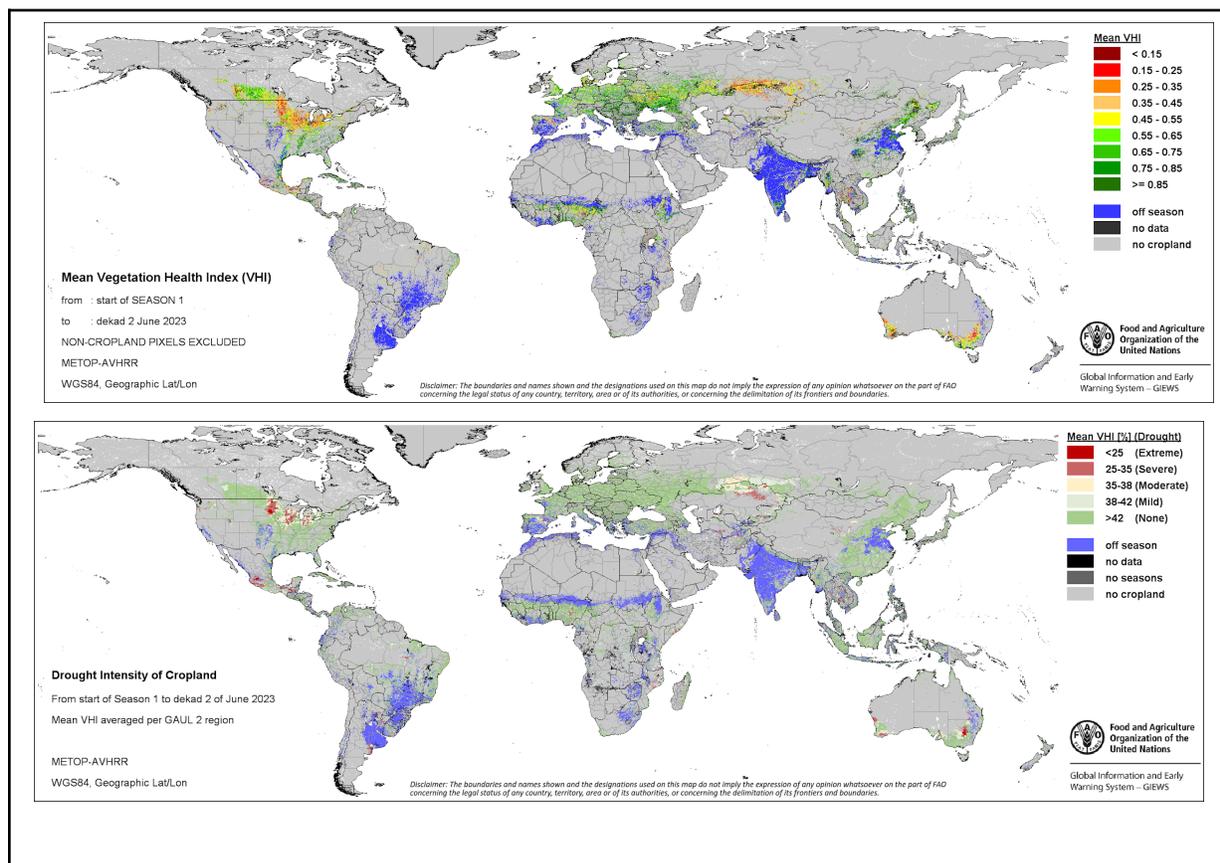
Una combinación de un conjunto de indicadores, sobre todo si describen diferentes aspectos del fenómeno,

probablemente proporcione más información sobre la severidad, frecuencia y ocurrencia de la sequía (World Bank 2019). Por otra parte, los indicadores combinados no están libres de críticas; p. ej., a veces estos no captan los diferentes matices de las condiciones de sequía relevantes para diferentes tipos de decisores (Ward et al. 2022). Otras críticas se refieren a la ambigüedad o falta de justificación del énfasis o peso relativo que se da a los distintos componentes de un índice combinado. Debido a la utilidad potencial de los indicadores combinados, en esta sección se describen algunos que se están utilizando para monitorear la sequía en ALC.

i. El índice de salud de la vegetación (VHI)

Figura 2. Panel superior: valores globales del VHI ponderado. Este indicador permite evaluar la severidad de una sequía desde el inicio del ciclo de cultivo hasta el momento del análisis (segunda década de junio de 2023), con base en la salud de la vegetación y la influencia de la temperatura del suelo. En la principal región agrícola de Sudamérica (y otras regiones del hemisferio sur) los colores indican que no hay un ciclo de cultivo en progreso. Panel inferior: extensión espacial de eventos de sequía identificados a través del cálculo del porcentaje de píxeles o celdas en áreas cultivables con

diferentes valores del VHI ponderado (valores entre 35 y 25: sequía severa, valores < 25: sequía extrema).



Fuente: Tomado de la FAO, SMIA (<https://www.fao.org/giews/earthobservation/index.jsp?lang=es>).

El VHI se basa en la combinación lineal de dos índices: 1) el VCI (sección 3.6.2), calculado a partir del NDVI, cuya escala fue modificada en base a los valores máximos y mínimos en una serie de referencia para un punto determinado (Kogan y Sullivan 1993); y 2) el índice de condición de la temperatura, estimado de manera similar, mediante una modificación de la escala de los valores de temperatura del suelo (que no es lo mismo que la temperatura del aire en los reportes meteorológicos), estimada por medio de radiómetros satelitales infrarrojos. El VHI es el principal indicador utilizado para calcular el índice de estrés agrícola (ASI) que se examina en la sección 3.8.2. En el sitio web del Servicio

Nacional de Satélites, Datos e Información sobre el Medio Ambiente de los Estados Unidos (https://www.star.nesdis.noaa.gov/smcd/emb/vci/vh/vh_browse.php) se pueden consultar mapas semanales del VHI (estimados a partir de la VIIRS) de todo el globo. Además, en el SMIA de la FAO (<https://www.fao.org/giews/earthobservation>) se encuentran mapas del VHI, de los cuales se presenta un ejemplo en la figura 2. Debido a que ambos índices que componen el VHI tienen un rango de 0 a 1, el índice compuesto presenta el mismo rango de variación. Los valores bajos del índice indican posibles condiciones de estrés en la vegetación.

ii. El índice de estrés agrícola (ASI)

La FAO ha desarrollado el ASI para ayudar a los países a monitorear la sequía agrícola y a gestionar sus riesgos. Se trata de un indicador que facilita la identificación temprana de áreas cultivadas con crecimiento anómalo de la vegetación y con alta probabilidad de estrés por sequía durante un ciclo de cultivo (Rojas 2020, 2021).

El ASI se basa en la integración del VHI (sección 3.8.1) en las dimensiones temporal y espacial. Una de sus ventajas es que considera la sensibilidad de un cultivo al estrés hídrico durante momentos sensibles a la sequía (floración, llenado de grano, etc.) a través de coeficientes de cultivo (kc). El cálculo del ASI integra valores del VHI ajustados por kc desde el inicio del ciclo de un cultivo hasta el momento del análisis, cuando se determina el porcentaje de píxeles (o puntos en la grilla del VHI ajustado) en zonas cultivables con un valor de VHI ponderado inferior al 35 %, que se identificó como un umbral crítico asociado a impactos de la sequía en investigaciones anteriores. Cada área analizada (p. ej., una división administrativa de nivel 2) se clasifica según el porcentaje de área afectada para

facilitar la interpretación rápida de los resultados (Rojas 2020, 2021). Adicionalmente, el porcentaje de la zona agrícola con valores del VHI ponderado por debajo de un cierto umbral se puede utilizar como “gatillo” para el inicio de acciones de mitigación de los impactos de la sequía. Este valor también podría funcionar como “detonador” del pago de una indemnización en un seguro agrícola paramétrico o “seguro de índice”. Por último, los valores históricos del ASI en una región determinada pueden combinarse con datos de rendimientos de un cultivo determinado para generar modelos de predicción de rendimientos.

En el SMIA de la FAO, disponible en <https://www.fao.org/giews/earthobservation> (sección 5.1.1.2), así como en GEE, se pueden encontrar mapas del ASI y de los componentes del cálculo (VHI ponderado). Además, el ASI se ha incluido en algunos sistemas de alerta de sequías en el ámbito nacional, desarrollados con ayuda de la FAO. Uno de estos sitios, desarrollado para El Salvador, está disponible en <http://asis.marn.gob.sv/mapas>.

iii. El índice estandarizado multivariado de sequía (MSDI)

El MSDI es una extensión conceptual del SPI, pero incorpora en su formulación una o dos variables hidroclimáticas adicionales, como la HS o el escurrimiento superficial (Hao y AghaKouchak 2013). Este índice se discute aquí por dos motivos. Primero, el MSDI combina información acerca de la precipitación o la HS con base en la distribución conjunta de dichas variables, que se determina mediante cópulas matemáticas, es decir, funciones que combinan la distribución marginal (o univariada) de cada

variable (Hao y AghaKouchak 2013). Esta metodología es diferente de la de otros indicadores (p. ej., el VHI), que se calculan por medio de una combinación lineal de las variables individuales incluidas en el indicador.

En segundo lugar, este indicador se puede visualizar en diferentes escalas temporales (1, 3, 6, 9 y 12 meses) en el Monitor de Sequía de Mesoamérica (sección

5.1.2.1), que vigila las condiciones de sequía en México, Centroamérica, el Caribe y el norte de Sudamérica (<http://galileo.imta.mx/Sequias/moseq/index.html>). En dicho monitor se utiliza el conjunto de datos de la segunda versión del Análisis Retrospectivo de la Era Moderna para la Investigación y Aplicación (MERRA-2),

disponible desde 1980 hasta el presente. Los datos del MERRA-2 se actualizan mensualmente con una latencia de aproximadamente 3 semanas y están disponibles en el sitio del Centro de Servicios de Información y Datos de Ciencias de la Tierra de Goddard de la NASA (<https://disc.sci.gsfc.nasa.gov>).

iv. El Monitor de Sequía de los Estados Unidos (USDM)

El USDM (<https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/nadm/>) es uno de los ejemplos más conocidos de la combinación de múltiples indicadores de sequía (Rippey et al. 2021; Svoboda et al. 2002). Se desarrolló en 1999 y,

desde entonces, su cobertura se ha extendido al resto de Norteamérica. Aunque solo cubre un país de ALC (México), se describe en este informe porque su diseño ha servido de modelo para el establecimiento de sistemas similares en otras partes de la región, como el

Monitor de Secas de Brasil (sección 5.1.3.1). Además, los países de ALC a menudo muestran interés en seguir las condiciones de sequía en la región agrícola de los Estados Unidos, debido a su posible incidencia en los precios de los productos básicos agrícolas de todo el mundo.

función de los percentiles del indicador o la combinación de indicadores empleada (véase la tabla 2); p. ej., la sequía extrema (categoría D3) se asigna a los percentiles entre 2 y 5. Debido a que los indicadores estandarizados (como el SPI o el SPEI) se expresan en términos de desvíos estándar de una distribución normal (o z-scores), existe una correspondencia directa entre el valor de un indicador estandarizado (columna derecha de la tabla 2) y el percentil correspondiente: p. ej., la sequía extrema D3 corresponde a los valores del SPI entre -1.6 y -2.0.

Las seis categorías de sequía utilizadas por el USDM han sido ampliamente adoptadas por otros sistemas de monitoreo de sequía en todo el mundo, incluyendo: 1) condiciones normales (sin sequía) y 2) condiciones anormalmente secas (denominadas D0, que identifican zonas que pueden estar entrando o saliendo de un evento), así como 3) a 6) cuatro niveles con severidad creciente de sequía: moderada (D1), severa (D2), extrema (D3) y excepcional (D4). Estas diferentes categorías se definen en

Tabla 2. Rango de percentiles de las categorías de sequía utilizadas por el USDM. La relación entre percentiles y valores de indicadores estandarizados (redondeados para facilitar la lectura) se muestra en la columna de la derecha.

Categoría	Rango de percentiles para indicadores no estandarizados	Rango de indicadores estandarizados (SPI, SPEI, ESI)
Condiciones no secas (normales o húmedas)	≥31.00	≥-0.49
D0: condiciones anormalmente secas	21.00 a 30.99	De -0.50 a -0.79
D1: sequía moderada	11.00 a 20.99	De -0.80 a -1.29
D2: sequía severa	6.00 a 10.99	De -1.30 a -1.59
D3: sequía extrema	3.00 a 5.99	De -1.60 a -1.99
D4: sequía excepcional	0.00 a 2.99	≤-2.00

Fuente: NDMC (<https://droughtmonitor.unl.edu/About/AbouttheData/DroughtClassification.aspx>).

La versión más reciente del USDM, que se actualiza semanalmente, se puede consultar en <https://droughtmonitor.unl.edu/>. Para generar cada actualización, varios autores (de diferentes instituciones y regiones) se turnan para examinar múltiples indicadores individuales, incluidos la HS, los caudales de los ríos, los niveles de agua subterránea e indicadores de evapotranspiración, entre otros, así como para producir mapas de los diferentes niveles de severidad de la sequía. La primera versión

de los mapas semanales es revisada por expertos, quienes aportan comentarios e interpretación para producir la versión final, que se distribuye cada jueves. Cabe mencionar que los mapas del USDM se basan no solo en indicadores de la amenaza hidrológica, sino también en los impactos regionales reportados por expertos de diferentes sectores y, más recientemente, por el público, a través del sistema de informes de observadores del monitoreo de condiciones (<https://droughtimpacts.unl.edu/Tools/ConditionMonitoringObservations.aspx>).



4. Pronóstico de la sequía

a. Métodos para la predicción de la sequía

La ocurrencia de numerosas sequías severas en todo el mundo en las últimas décadas, así como la perspectiva futura de eventos secos más frecuentes e intensos a consecuencia del cambio climático, señalan la necesidad de mejorar la capacidad para hacer frente a esta seria amenaza hidrológica. Un componente importante de dicha capacidad lo constituyen los sistemas de alerta temprana que, además de un monitoreo rutinario y sostenido, deben incluir la predicción del comienzo y evolución de las sequías. La predicción cumple una función importante en la gestión de los riesgos de este fenómeno (Hao et al. 2017b), p. ej., mediante la anticipación de acciones de mitigación o reducción de posibles impactos.

La predicción de la sequía suele basarse en tres tipos principales de métodos. El primero incluye enfoques estadísticos para explorar relaciones empíricas entre factores que influyen en la ocurrencia o severidad de la sequía. El segundo método, que abarca enfoques dinámicos basados en modelos computacionales de circulación atmosférica global, genera pronósticos de sequía fundamentados en la simulación de procesos físicos de la atmósfera, el océano y la superficie terrestre. El tercer método (que no se discute aquí por motivos de brevedad y porque está menos difundido) comprende métodos híbridos que combinan enfoques estadísticos y dinámicos (Hao et al. 2018).

Los enfoques estadísticos para la predicción de la sequía se basan en la detección de relaciones empíricas en registros históricos, sin considerar los mecanismos físicos subyacentes (Hao et al. 2016). Estos métodos utilizan predictores que pueden incluir desde índices climáticos de gran escala (como el índice de oscilación del sur o la

oscilación decadal del Pacífico) que reflejan patrones globales de circulación atmosférica y oceánica, hasta variables climáticas locales que capturan asociaciones con la ocurrencia y severidad de las sequías a nivel regional. Recientemente se han desarrollado modelos de predicción de sequía fundamentados en técnicas de aprendizaje automático o inteligencia artificial, p. ej., diferentes tipos de redes neuronales (Belayneh et al. 2016; Karbasi et al. 2023; Yaseen et al. 2021), cuya principal ventaja es que captan interacciones complicadas y no lineales en el sistema hidrológico; sin embargo, la interpretación de los resultados obtenidos a veces no es intuitiva.

En la actualidad los enfoques dinámicos son las herramientas más avanzadas para predecir el clima y la sequía. De hecho, los mayores avances recientes en esta materia se derivan de la disponibilidad de pronósticos climáticos estacionales (Hao et al. 2017b; Yuan y Wood 2013), que anticipan condiciones con una antelación que va desde unas semanas hasta un año (Doblas-Reyes et al. 2013). Además, las predicciones estacionales de precipitación y temperatura se utilizan para calcular valores futuros de indicadores de sequía (Dutra et al. 2014; Lyon et al. 2012). Algunas limitaciones de los modelos dinámicos incluyen 1) su costo computacional, 2) su relativamente baja resolución espacial (generalmente del orden de 1°, aunque está mejorando) y 3) la presencia de sesgos o errores sistemáticos que requieren una corrección antes de su uso (AghaKouchak 2014; Hao et al. 2017b).

Algunas predicciones experimentales de sequía se han basado en modelos de pronóstico del Centro Europeo de Previsiones Meteorológicas a Plazo Medio (ECMWF). El

ECMWF genera dos tipos de pronósticos dinámicos: 1) uno “extendido” (de 6 a 7 semanas en el futuro), producido por el Sistema de Pronóstico Integrado (IFS), y 2) uno estacional, que se extiende hasta 12 meses, generado por el sistema SEAS5 (Johnson et al. 2019). Lavaysse et al. (2015) demostraron que el pronóstico de precipitación del IFS predijo adecuadamente los valores del SPI con un mes de antelación (un mejor pronóstico que el derivado del simple uso de valores históricos de lluvia). Además, se encontró que la utilización de conjuntos (o “ensambles”) de múltiples pronósticos fundamentados en condiciones iniciales de simulación algo diferentes generó una predicción más robusta, sobre todo cuando la mayoría de los miembros del conjunto coincidía en sugerir la ocurrencia de una sequía. Los ensambles de

pronósticos se emplean en la generación del indicador para el pronóstico de condiciones inusualmente secas o húmedas del GDO (véase la sección 7.2). Dutra et al. (2014) descubrieron que una versión anterior del sistema de pronóstico estacional del ECMWF podía mostrar un mejor desempeño que la climatología para predecir el SPI en escalas de 3 y 6 meses, pero solo en algunas regiones y épocas del año. Estos resultados fueron confirmados en Sudamérica por Carrão et al. (2018). El pronóstico a menudo muestra un mejor desempeño en regiones donde existe una señal en las lluvias asociada al fenómeno ENOS. Aunque los resultados mencionados resultan prometedores para la predicción de la ocurrencia de sequías, el pronóstico de la intensidad de los eventos secos continúa presentando problemas (Carrão et al. 2018).

b. Barreras para el uso de las predicciones de sequía

La predicción efectiva del inicio, el desarrollo, la severidad y la finalización de la sequía requerirá una serie de avances. En primer lugar, todavía se necesita una mejor comprensión de los procesos que generan una sequía y de las diferentes fuentes de predictibilidad climática. En segundo lugar, los resultados anteriores sugieren que la habilidad para predecir la sequía varía según la época del año, la región y la antelación del pronóstico, debido a lo cual, una evaluación sistemática del desempeño y la incertidumbre de los pronósticos de sequía es fundamental para el uso rutinario de estas herramientas en la gestión de riesgos. En tercer lugar, el uso de predicciones de sequía como herramientas de alerta temprana y prevención de impactos requiere que los usuarios tengan acceso a

pronósticos probabilísticos¹⁵, cuya incertidumbre esté adecuadamente cuantificada.

Se puede considerar el uso de “predicciones decenales” para pronosticar la evolución del sistema climático entre un año y un par de decenios en el futuro (Delgado-Torres et al. 2022). Este tipo de predicciones cubren la brecha entre los pronósticos climáticos estacionales (que llegan hasta un año en el futuro) y las proyecciones de cambio climático (que no

¹⁵ Un pronóstico probabilístico de sequía puede expresarse de diferentes maneras: 1) la distribución completa de los valores pronosticados para un indicador (p. ej., el SPI), 2) la probabilidad de diferentes categorías de sequía, 3) el promedio y la dispersión del indicador calculado a partir de todos los miembros de un ensamble de pronósticos (una menor dispersión sugiere un mayor consenso entre los miembros) y o 4) la probabilidad de que el indicador de interés esté por encima (o por debajo) de un umbral de interés (Hao, Z; Singh, VP; Xia, Y. 2018. Seasonal Drought Prediction: Advances, Challenges, and Future Prospects. *Reviews of Geophysics* 56(1): 108-141.

generan resultados robustos antes de 1 a 2 decenios en el futuro). La predicción de variaciones en el clima o la frecuencia de eventos secos de 1 a 10 años puede ser de gran interés para los tomadores de decisiones, ya que esta escala coincide con el horizonte de planificación de muchos sectores socioeconómicos (Bruno Soares et al. 2018). En el sector agrícola algunas posibles aplicaciones de las predicciones climáticas decenales incluyen la selección o el desarrollo de variedades o lugares futuros de cultivo, la formulación de políticas agrícolas nacionales o regionales y el diseño de estrategias internacionales de negocios (Solaraju-Murali

et al. 2022). Algunos experimentos iniciales de pronóstico de condiciones de sequía (caracterizadas por medio de indicadores como el SPI y el SPEI) con varios años de antelación en regiones del mundo con una importante producción de trigo, incluido el sudeste de Sudamérica (Solaraju-Murali et al. 2022), muestran resultados prometedores; no obstante, es probable que el uso habitual de estos pronósticos suponga la obtención de muchos más resultados robustos y una caracterización detallada de la incertidumbre antes de que los decisores los incorporen con eficacia en sus procesos de planificación estratégica.



5. Recursos digitales para el monitoreo de la sequía

En esta sección se describen algunos recursos digitales disponibles para el monitoreo operacional de la sequía en ALC, producidos no solo por instituciones públicas, sino también por el sector privado. Ambos tipos de recursos se discuten aquí, ya que son muy complementarios: por un lado, los públicos son prácticamente irremplazables, debido a la importante infraestructura observacional y computacional que requieren y, por el otro, los privados pueden cumplir un rol importante en la consolidación y el resumen de los diferentes tipos de datos e información climática de múltiples fuentes públicas, así como en su presentación accesible y geográficamente más localizada a los tomadores de decisiones.

En esta sección y en las siguientes se ejemplifican los diferentes tipos de recursos disponibles para la gestión de la sequía con una cobertura geográfica balanceada a lo largo de la región de influencia del IICA. Cabe señalar que la lista es necesariamente limitada y de ninguna manera exhaustiva.

Para su presentación, los recursos digitales públicos dirigidos al monitoreo de la sequía se organizan de acuerdo con su cobertura territorial en 1) globales, 2) regionales y 3) nacionales. La discusión en esta y otras secciones de los recursos privados seleccionados presenta algunas limitaciones, ya que se han debido respetar aspectos en materia de propiedad; sin embargo, se ha hecho un esfuerzo para caracterizar las capacidades y posibles limitaciones de cada recurso, no solo con base en la información disponible públicamente (p. ej., en las páginas web de los recursos), sino también, en casi todos los casos¹⁶, a través de entrevistas que los autores de este informe realizaron a los responsables de cada recurso.

¹⁶ Pese a reiterados intentos, no fue posible entrevistar a los responsables de dos de los recursos incluidos en este informe.

a. Recursos digitales públicos

i. Recursos globales

1. *El Explorador de Cultivos*

El Explorador de Cultivos (<https://ipad.fas.usda.gov/cropexplorer>), desarrollado por el USDA, es un recurso digital para analizar las condiciones de sequía en las principales regiones agrícolas del mundo. En ALC esta herramienta permite visualizar condiciones en a) México, Centroamérica y el Caribe; b) Brasil; c) el norte de Sudamérica, que incluye Venezuela, Colombia, Ecuador, Perú, Bolivia, Guyana Francesa, Surinam y Guyana; d) el sur de Sudamérica, que abarca Argentina, Paraguay y Uruguay; y (d) Chile. En cada una de estas regiones, esta herramienta ofrece diferentes variables e indicadores asociados con las condiciones de sequía (ejemplos de ello se muestran en la figura 3):

- Precipitación,
- Temperatura del aire,
- HS e
- Índices de vegetación.

La sección sobre precipitación contiene mapas de precipitación total y porcentajes de precipitación normal por pñtada, década y períodos de 1, 2 y 3 meses, todos actualizados por pñtada, provenientes del producto CHIRPS, el CPC de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA) y estaciones meteorológicas reportadas por la OMM. Los patrones de lluvias pueden mostrar algunas diferencias entre fuentes, sobre todo en escalas temporales cortas, las cuales se reducen en escalas de agregación más largas (1-3 meses).

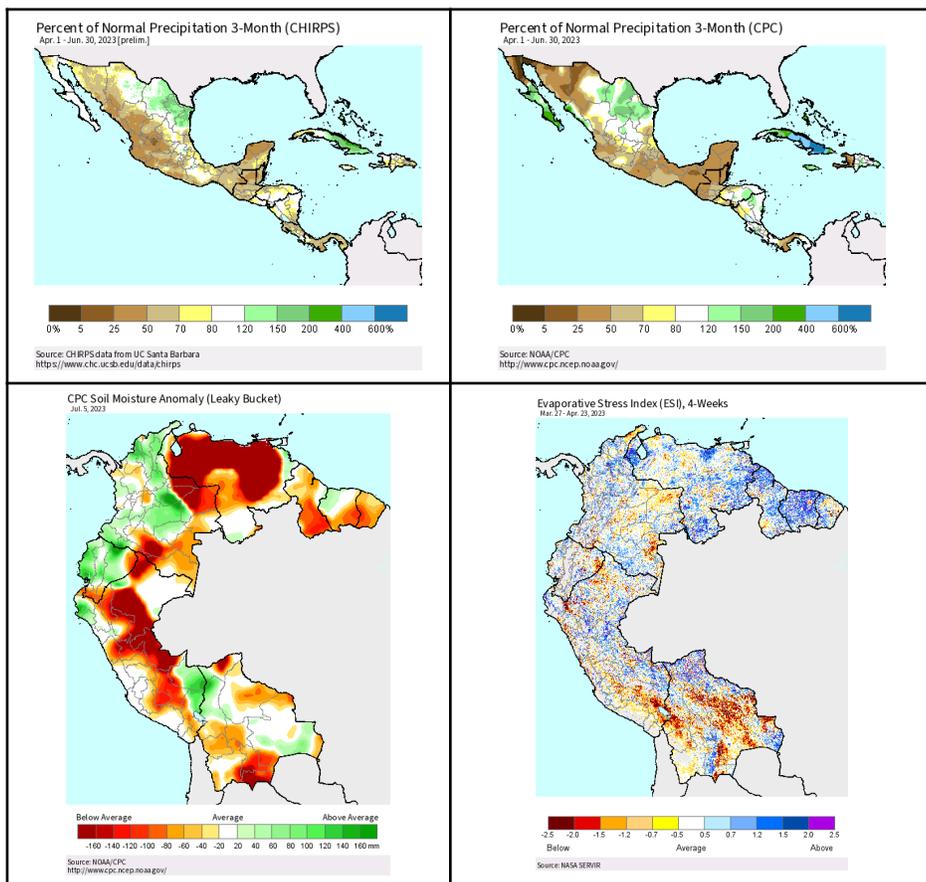
En la sección acerca de temperatura se muestran temperaturas medias, máximas y mínimas diarias y sus anomalías en períodos de 7 días. Como en el caso de la precipitación, los mapas se basan en datos del CPC de la

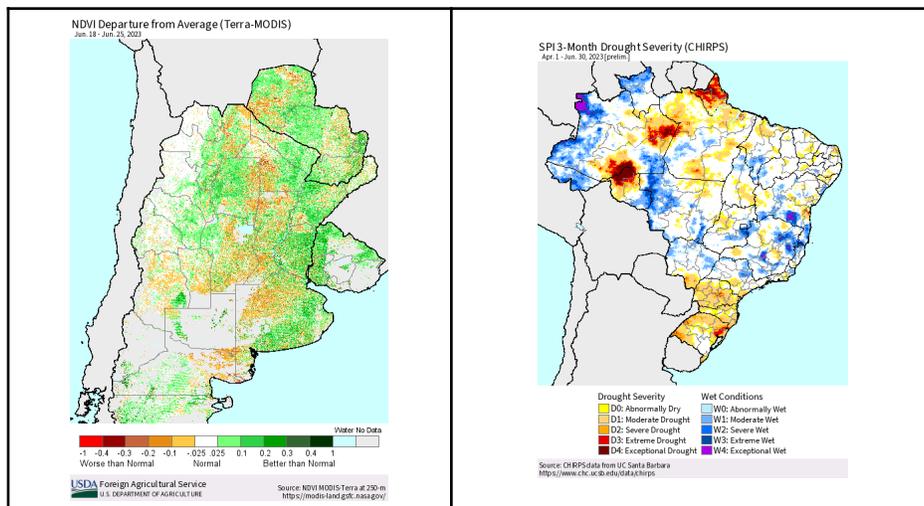
NOAA y de estaciones meteorológicas reportadas por la OMM. Un mapa que no está disponible en otros recursos digitales discutidos en este informe es el correspondiente al número de días en un período de 7 días con temperaturas que pueden causar estrés (>35 °C) o daños (>38 °C). Este producto es interesante, debido a la frecuencia cada vez mayor de eventos conjuntos de sequía y ondas de calor (véase su discusión en la sección 2.2).

Otra sección, que contiene mapas de HS estimados mediante un modelo hidrológico simple del CPC de la NOAA, incluye también mapas de anomalías y percentiles de esta variable. En otro mapa se muestra el porcentaje de agua en el suelo, calculado en estaciones meteorológicas reportadas por la OMM. Con estos datos también se elaboran mapas de HS (en mm) en las capas superficial y subsuperficial del suelo, aunque las profundidades de éstas no están especificadas. Finalmente, esta sección incluye mapas del ESI (sección 3.4).

La sección sobre índices de vegetación contiene mapas del NDVI y sus anomalías en distintas épocas del año. El NDVI que se muestra se calcula para períodos de 10 días y los valores se extraen de dos instrumentos satelitales diferentes: el MODIS y la VIIRS. Se pueden ver los índices de vegetación de toda la zona seleccionada o solo para las áreas cultivadas. En la sección de temporada de cultivo se puede visualizar una secuencia de mapas del NDVI durante una estación de crecimiento: p. ej., en el sur de Sudamérica se incluyen cultivos de invierno (de mayo a enero) y de verano (de septiembre a junio).

Figura 3. Ejemplos de indicadores de sequía incluidos en el Explorador de Cultivos del USDA. Fila superior: porcentaje de precipitación normal en México, Centroamérica y el Caribe, correspondiente a un período de 3 meses finalizado el 30 de junio de 2023; se muestran productos de dos fuentes diferentes para ilustrar posibles diferencias: CHIRPS (izquierda) y CPC (derecha). Fila media: anomalía de HS (izquierda) y del ESI (derecha). Fila inferior: anomalía del NDVI con respecto al normal para la época del año (izquierda); el SPI-3 y las categorías de sequía estimadas a partir de producto CHIRPS.





Fuente: Tomado de USDA, Explorador de Cultivos (<https://ipad.fas.usda.gov/cropexplorer>)

2. El Sistema Global de Información sobre Sequía (GDIS)

El GDIS (<https://gdis-noaa.hub.arcgis.com>) es un esfuerzo internacional dirigido a proveer la mejor información posible sobre las condiciones actuales de la sequía en todo el mundo. El primer componente de este sistema es el Monitor Global de Sequía (GDM), que permite visualizar las condiciones actuales de la sequía en todo el mundo. Algunas de las capas visibles en este recurso incluyen:

- El SPI y el SPEI, calculados a partir de productos de precipitación para una grilla regular¹⁷;
- El ESI (sección 3.4);
- El índice de sequía por demanda evaporativa (EDDI), que examina cuán anómala es la demanda evaporativa de la atmósfera en un lugar y un período determinados. El EDDI, que no se analizó en las secciones

anteriores por su limitada en ALC, es relativamente análogo al ESI.

- El contenido de HS en la superficie y la zona radicular, calculados a partir de datos satelitales gravimétricos de la misión GRACE-FO (<https://nasagrace.unl.edu>); y
- El VHI (sección 3.8.1), calculado con datos del instrumento VIIRS.

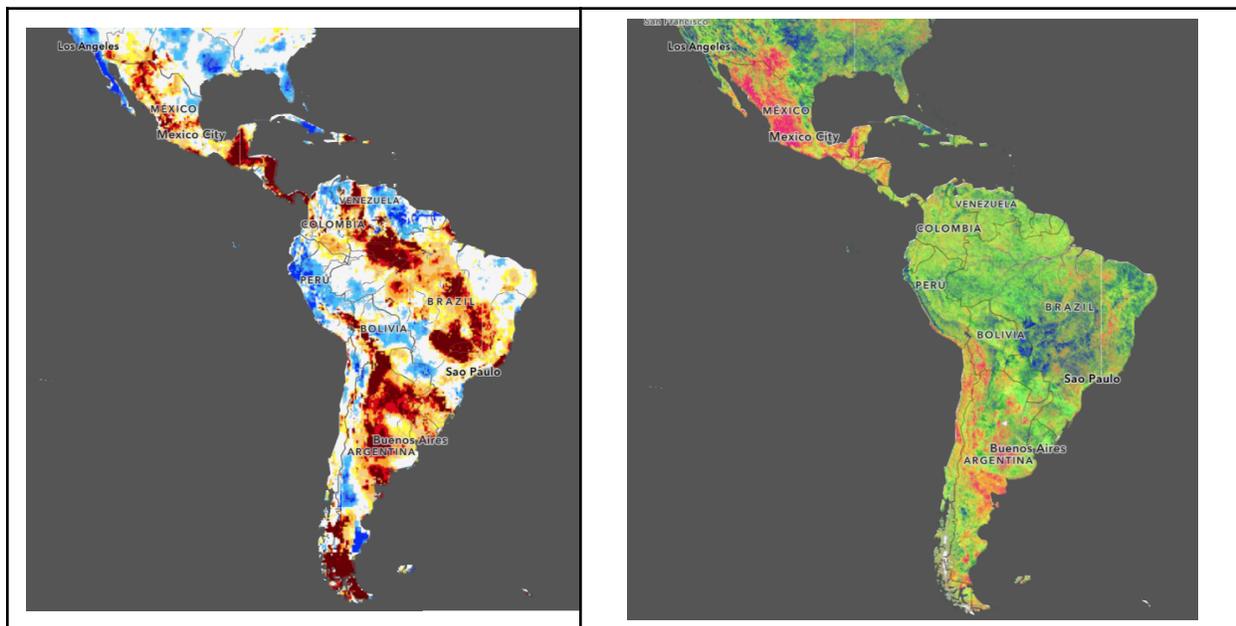
Aunque en el GDM se visualizan diferentes productos (en la figura 4 se presentan ejemplos), se debe consultar su fecha (panel de la derecha en el GDM), ya que las actualizaciones no se realizan de modo simultáneo para todos los productos.

Otros componentes del GDIS están menos desarrollados, por lo que solo se mencionan brevemente. Uno de ellos se enfoca en la predicción de la sequía. Como no existe un pronóstico global de sequías ampliamente aceptado, este componente del GDIS incluye solo vínculos a instituciones en diferentes países que generan pronósticos meteorológicos o climáticos; p. ej., en ALC se

¹⁷ Ejemplos de estos productos de precipitación grillados incluyen los del Centro Mundial de Climatología de las Precipitaciones y el producto satelital CMORPH.

indica el Centro de Predicción Meteorológica y Estudios Climáticos de Brasil. Un tercer componente del GDIS está dedicado a herramientas de gestión de riesgos e impactos de la sequía, las cuales son recursos útiles para apoyar el desarrollo de planes nacionales o locales de prevención o mitigación proactiva de los posibles impactos negativos de la sequía (véase la sección 2.3.3). El último componente del GDIS tiene vínculos con recursos educativos en materia de sequía para estudiantes e investigadores.

Figura 4. Izquierda: HS en la zona de raíces, estimada a partir de datos satelitales de la misión GRACE-FO al 20 de junio de 2023. Los colores amarillos y rojos indican percentiles de HS consistentes con las categorías de sequía del Monitor de Sequía de Estados Unidos (los colores azules indican una HS alta). Derecha: VHI calculado a partir de datos del sensor VIIRS. Los colores rojos indican situaciones de estrés en la vegetación: disminución en el verdor o la cantidad de biomasa.



Fuente: Tomado de GDIS (<https://gdis-noaa.hub.arcgis.com>).

3. El Sistema Mundial de Información y Alerta sobre la Alimentación y la Agricultura (SMIA)

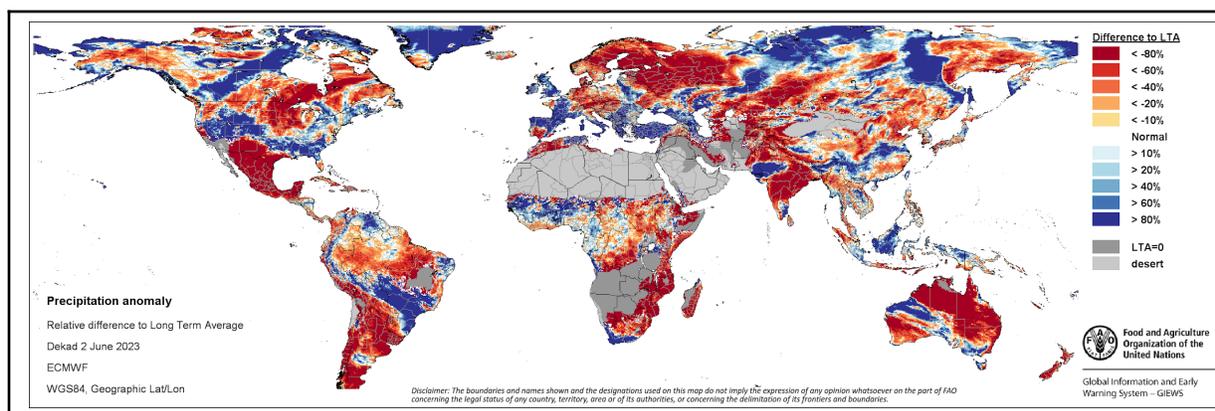
El SMIA, desarrollado por la FAO (<https://www.fao.org/gIEWS/es>), monitorea el estado de los principales cultivos alimentarios en todo el mundo para evaluar las perspectivas de producción.

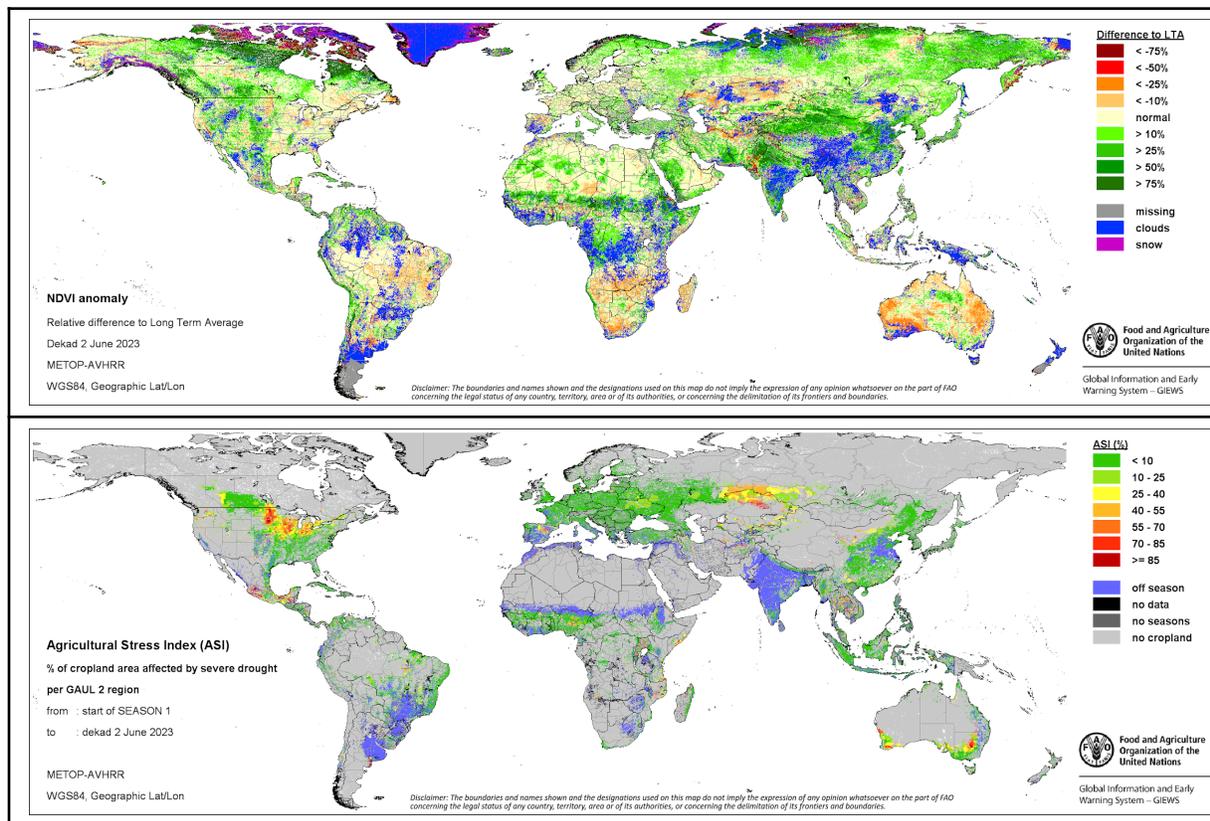
En el componente “Observación de la Tierra” (<https://www.fao.org/gIEWS/earthobservation/index.jsp?lang=es>) se utilizan datos de sensores satelitales y de otras fuentes para aportar información sobre la disponibilidad de agua y la salud de la vegetación durante el crecimiento de los cultivos. Los datos del SMIA por país o de todo el mundo están disponibles para el público. Este recurso muestra mapas de totales y anomalías de precipitación obtenidos del ECMWF. Además, se pueden ver mapas del NDVI (anomalías con respecto a la media para el período visualizado), del VCI (sección 3.6.2) y del ASI (sección 3.8.2). En la figura 5 se presentan algunos ejemplos de diagnósticos de sequías disponibles en este

sistema. En la sección 3.8.2, con respecto al ASI, se muestran ejemplos de otros mapas disponibles en el SMIA, como el VHI ponderado y la extensión espacial de los eventos de sequía identificados a partir de esos valores.

La mayoría de los datos incluidos en el SMIA (<https://asis.apps.fao.org>), disponibles para todo el globo, corresponden al período desde 1984 hasta la actualidad. Los datos también han sido publicados por la FAO como servicios de imagen (Sistema de Administración de Almacenes), que permiten un análisis más profundo por medio de aplicaciones de terceros (p. ej., el programa QGIS). Los conjuntos de datos del Sistema del Índice de Estrés Agrícola también se han puesto a disposición del público en GEE; para solicitar el acceso a ellos, los interesados deben enviar un correo electrónico a giews1@fao.org.

Figura 5. Indicadores globales de sequía disponibles en el SMIA de la FAO. Panel superior: anomalías de precipitación. Panel medio: anomalías del NDVI. Panel inferior: ASI. Todos los mapas corresponden a la segunda década (días del 11 al 20) de junio de 2023.





Fuente: Tomado de la FAO, SMIA (<https://www.fao.org/giews/earthobservation/index.jsp?lang=es>).

ii. Recursos regionales

1. El Monitor de Sequía de Mesoamérica

El Monitor de Sequía de Mesoamérica (<http://galileo.imta.mx/Sequias/moseq/index.html>) fue desarrollado por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, junto con la Agencia Mexicana de Cooperación Internacional para el Desarrollo y la FAO. También denominado Tzolkin (palabra maya cuyo significado es "cuenta de los días" o calendario maya), este recurso monitorea las condiciones de sequía en México, Centroamérica, el Caribe y el norte de Sudamérica.

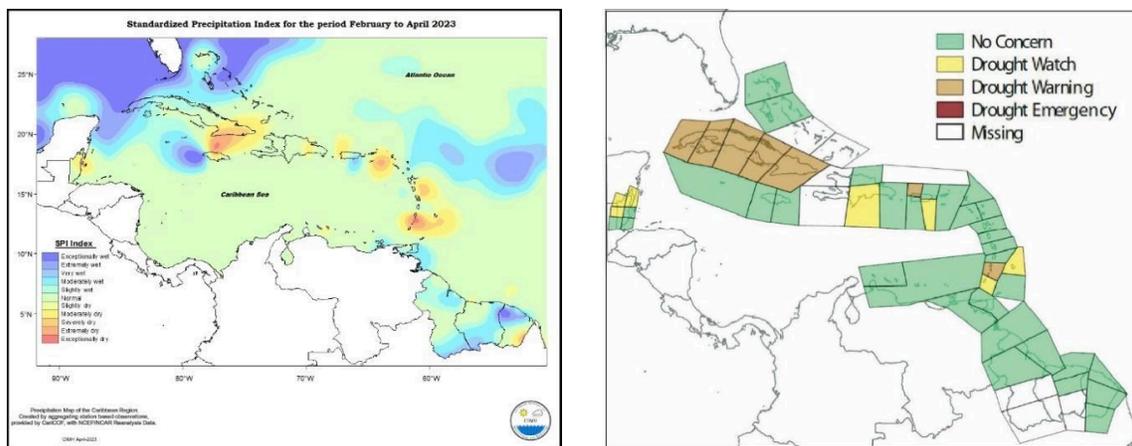
Esta herramienta muestra mapas del SPI y otros dos indicadores estandarizados: la HS y el escurrimiento superficial en escalas de 1, 3, 6, 9 y 12 meses. Además, estos tres indicadores se combinan para producir mapas de tres índices estandarizados multivariados de sequía (sección 3.8.3), que combinan 1) la precipitación y la HS, 2) la precipitación y el escurrimiento superficial y 3) las tres variables, respectivamente. En la figura 6 se presenta un ejemplo del índice multivariado que combina la precipitación y la HS.

Figura 6. MSDI que combina la precipitación y la HS del período de 3 meses que finalizó en abril de 2023.



Fuente: Tomado del Monitor de Sequía de Mesoamérica (<http://galileo.imta.mx/Sequias/moseq/index.html>).

Figura 7. Izquierda: mapa del SPI-3 para el Caribe, período febrero-abril de 2023. Derecha: perspectivas de sequía de largo plazo (12 meses) para mayo 2023; los diferentes colores indican niveles de alerta, desde situación “no preocupante” (verde) a “emergencia”.



Fuente: Tomado de Centro Regional del Clima para el Caribe (<https://rcc.cimh.edu.bb/>).

2. El Centro Regional del Clima para el Caribe (CRC Caribe)

El CRC Caribe (<https://rcc.cimh.edu.bb/>) es parte de la red de centros regionales del clima de la OMM, que son centros de excelencia dirigidos a reforzar las capacidades nacionales para generar y difundir información climática en apoyo a la toma de decisiones en sectores y actividades humanas sensibles al clima. Es liderado por el Instituto de Meteorología e Hidrología del Caribe, con sede en Barbados.

En 2009 el CRC Caribe estableció la Red Caribeña de Monitoreo de la Sequía y la Precipitación. Además, coordina el proceso de los foros de perspectivas climáticas para el Caribe, que periódicamente reúne a expertos de la región, generalmente entre mayo y junio, a fin de emitir perspectivas climáticas para el Caribe.

Durante el período entre cada foro climático, el CRC Caribe, junto con muchos de los servicios meteorológicos nacionales de la región, emite mensualmente las perspectivas de precipitación y temperatura de los tres meses siguientes (<https://rcc.cimh.edu.bb/long-range-forecasts-archive>). En relación con la sequía, combina las observaciones de lluvia de toda la región y los reanálisis por modelos numéricos para generar mapas del SPI de 1, 3, 6, 12 y 24 meses (lado izquierdo de la figura 7); al respecto, véanse los mapas disponibles en <https://rcc.cimh.edu.bb/spi-monitor-april-2023/>.

Asimismo, el CRC Caribe prepara todos los meses una perspectiva de la sequía <https://rcc.cimh.edu.bb/long-range-forecasts/caricof-climate-outlooks/>, que incluye una

descripción de la situación actual de este fenómeno, una perspectiva de cómo dicha situación evolucionará en los siguientes tres meses y otra perspectiva que integra un período más largo de observaciones para reflejar la situación en una escala temporal de

12 meses y anticipar sus posibles impactos (se asume que si en una escala de 12 meses un SPI presenta valores ≤ -0.8 , se pueden esperar impactos negativos. Las perspectivas de sequías contienen tres categorías de alerta: “vigilancia”, “advertencia” y “emergencia” (véase el lado derecho de la figura 7).

3. *El Centro Regional del Clima para el Sur de América del Sur (CRC-SAS)*

El CRC-SAS, que es otro centro regional de la OMM, cubre geográficamente Argentina, Bolivia, parte de Brasil (la porción al sur de 10°S), Chile, Paraguay y Uruguay. Desarrolló un proyecto específicamente dedicado a la sequía en su zona de cobertura: el SISSA (<https://sissa.crc-sas.org/>), que ofrece información de monitoreo de la sequía basada en estaciones meteorológicas in situ y datos provenientes de instrumentos a bordo de satélites y que combina observaciones con pronósticos de lluvias de 15 días para predecir el SPI (véase la sección 6.1.3).

Con los datos proporcionados por distintas estaciones meteorológicas se calculan varios indicadores de sequías, entre ellos el SPI, el SPEI, deciles y el porcentaje de precipitación normal, en múltiples escalas temporales desde un mes hasta 48 meses. A diferencia de otros sitios, el SISSA actualiza los valores de todos los indicadores y escalas temporales en cada pñntada del mes, es decir, seis veces por mes. En cambio, en la mayoría de los recursos digitales descritos aquí los indicadores se actualizan mensualmente, una vez terminado el mes calendario. La actualización frecuente de los indicadores fue solicitada por usuarios del sector agropecuario, quienes no deseaban esperar un mes entero para recibir los valores más recientes, sobre todo durante un evento de sequía. La actualización frecuente de los diagnósticos, además, puede resultar útil y necesaria para detectar la aparición de sequías repentinas, cuya evolución es mucho

más rápida que la de las sequías tradicionales (Yuan et al. 2023).

De conformidad con los datos in situ, un panel inicial resume el estado actual de los diferentes indicadores en cada estación meteorológica y escala temporal (<https://sissa.crc-sas.org/monitoreo/indices-de-sequia/>) para indicar el valor actual del indicador, la categoría de sequía correspondiente y la variación con respecto al período anterior. También se pueden visualizar series temporales del indicador y la escala temporal deseados correspondientes a una determinada estación meteorológica. Asimismo, es posible listar diferentes eventos secos (definidos por un umbral determinado del SPI o el SPEI seleccionado por el usuario) en el registro histórico de una estación, ordenarlos por fecha de ocurrencia, duración o intensidad del evento y visualizar la serie temporal de indicadores de cada evento identificado.

Además de los indicadores derivados de observaciones en estaciones meteorológicas, el SISSA genera mapas de precipitación calculados a partir del producto CHIRPS. En escalas temporales de 3, 6 y 12 meses, los mapas incluyen: 1) totales de precipitación, 2) anomalías de precipitación, 3) percentiles de precipitación, 4) SPI y 5) categorías de sequía definidas de acuerdo con el Monitor de Sequía de Estados Unidos. Las herramientas disponibles permiten comparar mapas de dos períodos (a través de una barra deslizable) y generar animaciones con múltiples mapas. En

la figura 8 se presenta un ejemplo de los percentiles de lluvia y las categorías de sequía estimados a partir del CHIRPS.

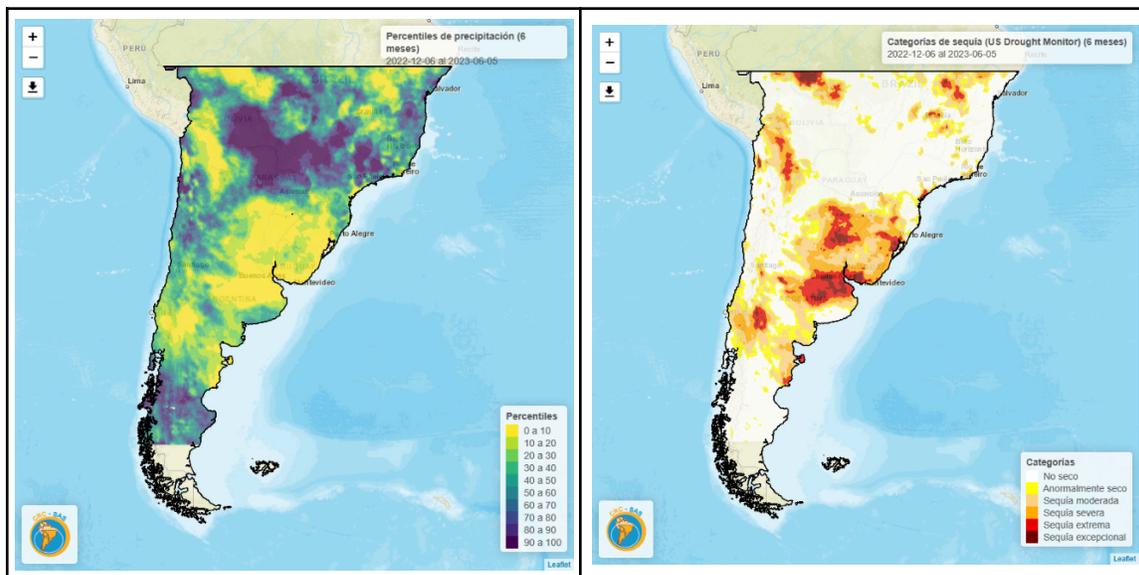
En el SISSA otros productos disponibles derivados de instrumentos satelitales son el ESI y dos indicadores de verdor de vegetación: el NDVI y el EVI, en torno a los cuales se muestran mapas de los indicadores y las anomalías (calculados de acuerdo con el registro histórico correspondiente a la misma época del año) de todo el sur de Sudamérica. Adicionalmente, el SISSA genera mapas de los indicadores de vegetación en divisiones administrativas de nivel 2 de cada país incluido. Los mapas detallados muestran la distribución de valores de los indicadores en relación con la misma época en años anteriores, así como series temporales de los indicadores de los 2 o 3 años más recientes (junto con los valores normales, para facilitar la visualización de anomalías).

¿Cómo está la sequía actualmente? Un recurso muy útil disponible en el SISSA es una página (<https://sisso.crc-sas.org/monitoreo/estado-ac>

tual-de-la-sequia/) donde se presentan varios indicadores calculados a partir de diferentes fuentes para proporcionar un resumen del estado actual de la sequía (véanse varios ejemplos en la figura 9). En dicha página se brinda acceso rápido a mapas:

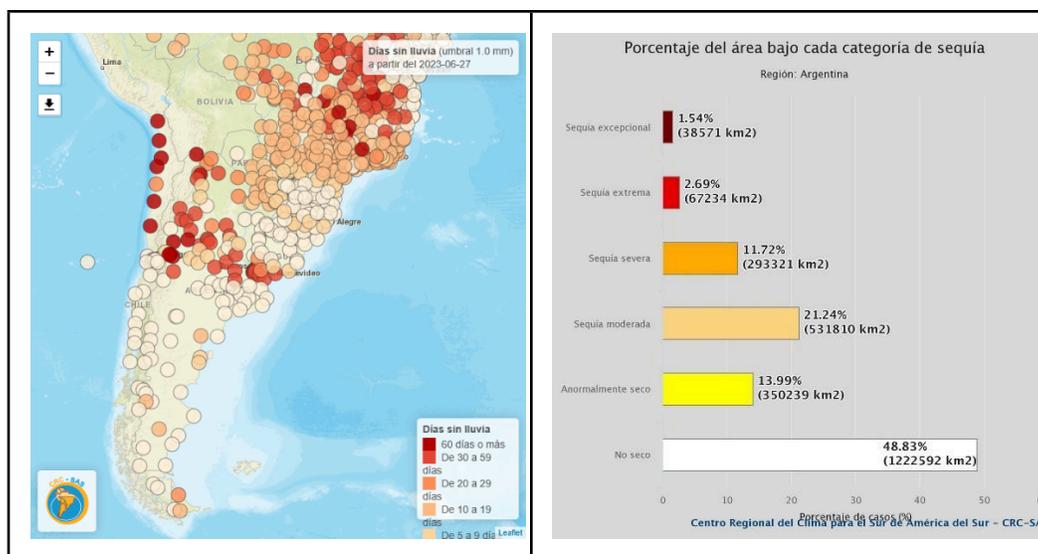
- Del número de días desde la última lluvia registrada;
- De estaciones meteorológicas con sequía o exceso de precipitación;
- De zonas con sequía o exceso de humedad (estimadas según datos del CHIRPS);
- De la extensión espacial de las zonas con diferentes categorías de sequía por región, país y unidades administrativas de niveles 1 y 2);
- Dinámicos, para la comparación de categorías de sequías en dos períodos; y
- Que muestran la evolución (el mejoramiento o empeoramiento) de las categorías de sequías entre dos períodos (p. ej., el presente y un año atrás).

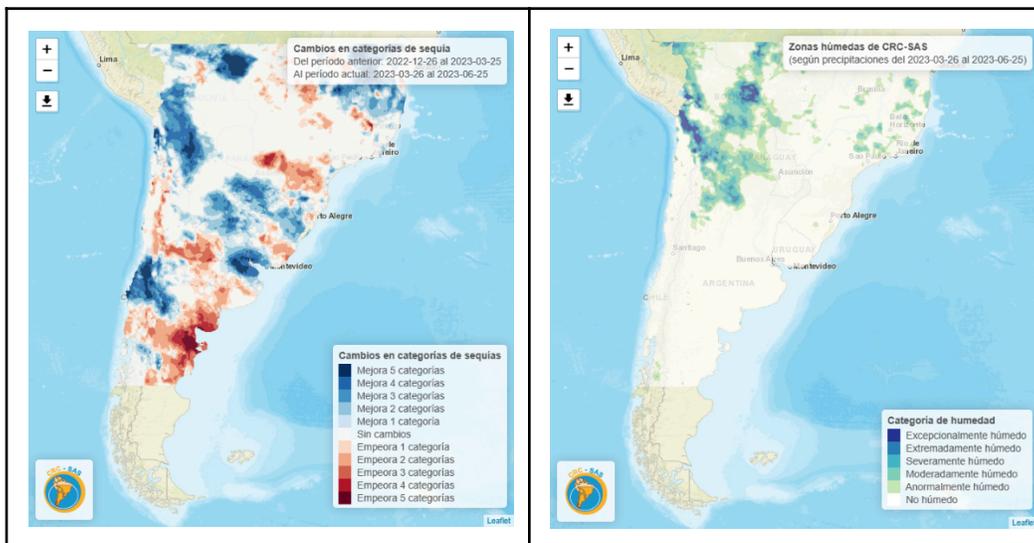
Figura 8. Precipitación estimada mediante el producto CHIRPS en el sur de Sudamérica. Izquierda: percentiles de lluvia del período de 6 meses finalizado el 6 de junio de 2023. Los percentiles se calculan con respecto al período de referencia 1982-2016. Derecha: categorías de sequía correspondientes al mismo período, calculadas a partir de los percentiles. Se pueden ver claramente los bajos percentiles (izquierda) en el centro/norte de Argentina, Uruguay y el sur de Brasil que se asocian con sequías de severas a extremas en la misma región (derecha).



Fuente: Tomado de SISSA (<https://sisa.crc-sas.org>).

Figura 9. Ejemplos de mapas donde se resume el estado actual de la sequía en el sur de Sudamérica. Arriba, a la izquierda: el número de días desde la última lluvia registrada superior a 1 mm hasta el 27 de junio de 2023. Arriba, a la derecha: porcentaje del área de Argentina (hasta 42° S) bajo diferentes categorías de sequía; más de la mitad del área está bajo alguna categoría de sequía durante el período del 26 de marzo al 25 de junio de 2023. Abajo, a la izquierda: cambios en las categorías de sequía (para una escala temporal de 3 meses) entre la situación actual (25 de junio de 2023) y la situación tres meses antes; los colores rojos indican zonas donde la sequía se intensificó, mientras que los azules indican un mejoramiento de las condiciones. Abajo, a la derecha: regiones con exceso de precipitación durante el período del 26 de marzo al 25 de junio de 2023.





Fuente: Tomado de SISSA (<https://sissa.crc-sas.org>).

iii. Recursos nacionales

1. El Monitor de Sequías de Brasil

Esta herramienta efectúa un seguimiento mensual de las regiones de dicho país en diferentes condiciones de sequía. Se genera mediante un proceso similar al del sistema descrito de los Estados Unidos (sección 3.8.4), es decir, instituciones de cada estado de Brasil, junto con otros actores relevantes, contribuyen a la generación y validación de un mapa mensual de categorías de sequía en casi todo el país. Todo el proceso es coordinado por la Agencia Nacional de Agua y Saneamiento de Brasil.

En la preparación de los mapas participan diferentes tipos de actores:

- Los proveedores de datos utilizados en el diagnóstico (véase la lista en el sitio del Monitor: <https://monitordesecas.ana.gov.br>), que incluyen los relativos a las precipitaciones observadas por diferentes redes in situ,

los niveles de los ríos y reservorios, la HS y otras variables;

- Los autores, quienes analizan los datos y diseñan o revisan cada mapa en forma colaborativa; y
- Los validadores, que aportan evidencia (documentos, fotos y otras pruebas) para refinar y validar el mapa inicial de sequías. En este grupo se incluyen personas o instituciones que viven o trabajan en las diferentes regiones afectadas por la sequía, p. ej., agricultores, extensionistas, gestores de recursos hídricos y comités de cuenca.

El Monitor, cuyo desarrollo comenzó alrededor de 2014 con el apoyo financiero del Banco Mundial, inicialmente se concentró en el noreste de Brasil, una zona afectada por sequías recurrentes con serios impactos sociales y económicos (Marengo et al. 2017;

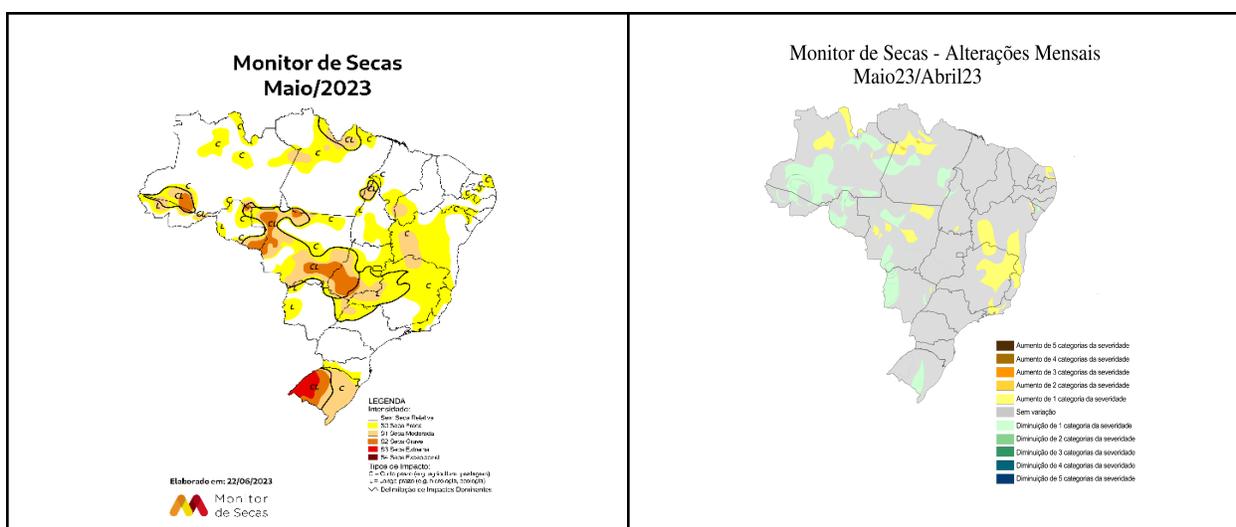
Marengo et al. 2022). Desde entonces se ha expandido paulatinamente y, al momento de preparar este informe (junio de 2023), abarcaba todos los estados de Brasil, excepto Amapá y Roraima, ubicados en el norte del país.

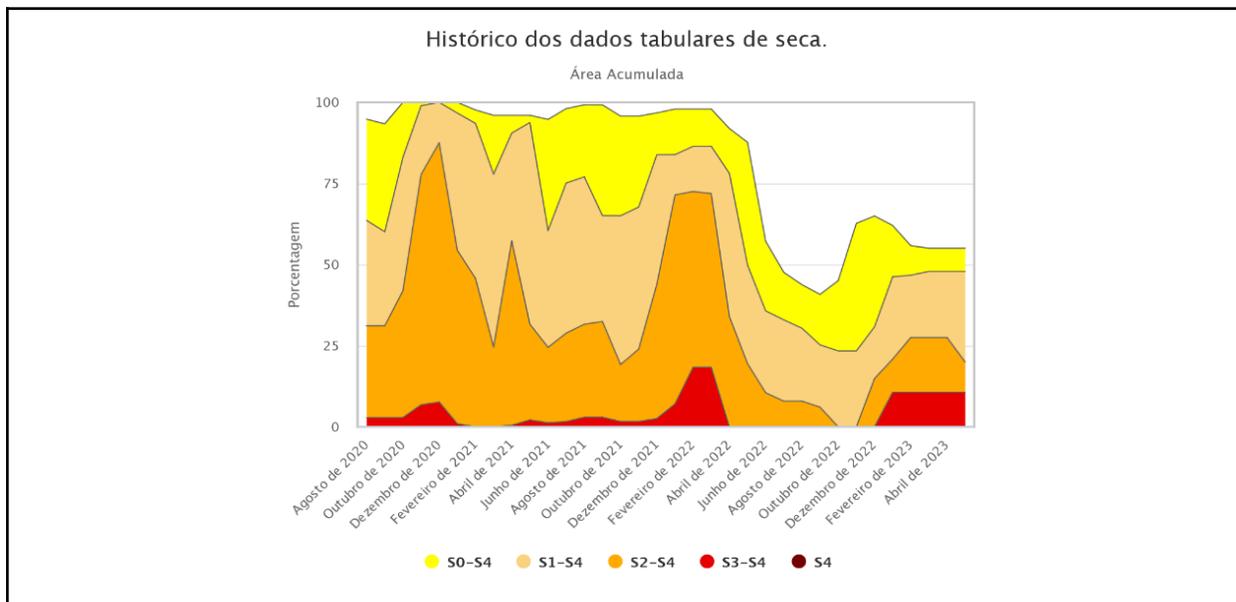
Los mapas actualizados mensualmente están disponibles no solo en el sitio del Monitor, sino también por medio de aplicaciones en dispositivos Android o IOS (<https://monitordesecas.ana.gov.br/aplicativos>). Las categorías de sequía son las mismas que en otros recursos: condiciones anormalmente secas y sequía moderada, severa, extrema y excepcional. Además, se indica en el mapa si la naturaleza de los impactos es de corto plazo (sobre cultivos o

pasturas) o de largo plazo (impactos hidrológicos o ecológicos).

En el sitio se incluye una descripción de la situación en cada mapa, organizada con respecto a todo el país y separadamente por estado. Además del mapa más reciente, se visualizan mapas de cambios en las zonas bajo diferentes categorías de sequías entre dos períodos (p. ej., la situación más reciente y el mapa de 6 meses atrás). También se pueden comparar los mapas de dos períodos distintos. Por último, se puede ver una serie temporal de los porcentajes del área bajo cada categoría de sequía por estado o por región de Brasil. Algunos ejemplos de los mapas disponibles se presentan en la figura 10.

Figura 10. Arriba, a la izquierda: mapa del Monitor de Sequías de Brasil de mayo de 2023. Nótese que casi la totalidad del país está cubierta por el Monitor, con la excepción de dos estados en el norte (Amapá y Roraima). Arriba, a la derecha: cambios en las categorías de sequía entre mayo y abril de 2023; el color amarillo en la región del sudeste, p. ej., indica un empeoramiento de las condiciones de sequía. Abajo: porcentaje de la región sur de Brasil bajo cada categoría de sequía; puede verse que entre agosto de 2020 y julio de 2022 casi toda la región Sur estaba bajo alguna categoría de sequía.





Fuente: Tomado del Monitor de Sequías de Brasil (<https://monitordeseacas.ana.gov.br>).

2. El Monitor de Sequías del Estado Plurinacional de Bolivia

Este monitor es una plataforma en línea (<https://monitoresequias.senamhi.gob.bo>) para el monitoreo y la difusión de las condiciones de sequía en el territorio boliviano. Como otros monitores de este tipo, este producto se genera en forma colaborativa, con la participación de cuatro instituciones gubernamentales: 1) el Ministerio de Medio Ambiente y Agua; 2) el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI); 3) el Viceministerio de Defensa Civil, dependiente del Ministerio de Defensa; y 4) el Ministerio de Desarrollo Rural y Tierras. Su implementación se inició en agosto de 2020, con el respaldo del Banco Mundial.

Este recurso se incluye en este informe porque tiene una característica interesante: además del mapa con categorías de sequía, en cada actualización mensual se ofrece un análisis de riesgo desde la perspectiva sectorial de cada institución participante, p. ej., una discusión de los impactos esperados

en la agricultura, los recursos hídricos y la población del país.

El primer paso en el desarrollo del mapa mensual del Monitor es la recopilación de las diferentes fuentes de datos por utilizar, entre las que se incluyen:

- Observaciones de la red de estaciones hidrometeorológicas del SENAMHI;
- Estimaciones de precipitación provenientes del producto satelital PERSIANN;
- Estimaciones de la HS generados por la misión SMAP (sección 3.5.1);
- Estimaciones de la evapotranspiración, la temperatura de la superficie terrestre, la salud de la vegetación y la cobertura de nieve a través del sensor MODIS; y
- El cálculo de la extensión de cuerpos de aguamediante la misión Landsat-8.

Una vez compilados los diferentes tipos de datos, se calculan cuatro indicadores individuales de sequía: 1) el SPEI-3, 2) el SWDI en una escala de dos meses, 3) el VHI en una escala de un mes y 4) la anomalía de la FAPAR en una escala de un mes. Luego, con los cuatro indicadores individuales, se calcula un índice combinado (véanse detalles al respecto en el sitio del Monitor). Con los valores del índice combinado se definen cuatro categorías de sequía que se vuelcan en una versión inicial del mapa. Los valores de los indicadores individuales y el índice combinado son analizados por expertos de las instituciones participantes y se revisa el mapa inicial. Los expertos consideran también datos sobre vulnerabilidad y exposición, así como impactos observados en años anteriores en su sector respectivo. Los

mapas y las discusiones desde las perspectivas sectoriales se generan en relación con cada una de las siete macrorregiones de Bolivia que representan una combinación de ecorregiones y municipios: el Altiplano, la Amazonía, el Chaco, la Chiquitanía, las Llanuras-sabanas, los Valles y Yungas-Chapare.

Los mapas actualizados mensualmente y su discusión están disponibles en el sitio del Monitor

(<https://monitorsequias.senamhi.gob.bo>).

Como en el Monitor de Sequías de Brasil, se puede visualizar una serie temporal (de 2007 al presente) de los porcentajes de área bajo cada categoría de sequía en el ámbito nacional o en cada macrorregión del país.

3. *El Observatorio Agroclimático de Chile*

El Observatorio Agroclimático de Chile (<http://www.climatedatalibrary.cl/UNEA/maproom/index.html>) fue desarrollado por la Sección de Emergencias y Gestión de Riesgos Agrícolas del Ministerio de Agricultura, con la asesoría técnica de la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura, la FAO y el Centro del Agua para Zonas Áridas y Semiáridas de América Latina y el Caribe. Utiliza herramientas originalmente desarrolladas por el Instituto Internacional de Investigaciones para el Clima y la Sociedad (IRI) de la Universidad de Columbia, específicamente una biblioteca de datos y varias salas virtuales de mapas.

En la actualidad incluye salas de mapas enfocadas respectivamente en a) el monitoreo y la información histórica sobre el ENOS y sus impactos en Chile, b) alertas hidrológicas y agroclimáticas que afectan la agricultura y otros sectores, c) análisis históricos de la frecuencia de las sequías en Chile, d) el monitoreo de la sequía por medio de indicadores relevantes y e) un atlas de

vulnerabilidad a la sequía agrícola de Chile y cada comuna del país. Esta discusión se enfocará solo en el monitoreo de la sequía.

La sala de mapas de monitoreo de la sequía permite el seguimiento del estado actual de dicho fenómeno a través de diferentes indicadores de sequía meteorológica, hidrológica y agrícola, así como un índice combinado. Para la vigilancia de la sequía meteorológica, el Observatorio publica mapas de precipitación, medida en estaciones de varias redes de observación de Chile, así como anomalías expresadas como porcentaje de la precipitación normal. Además, esta sección incluye mapas del SPI calculados en diferentes escalas temporales. El monitoreo de las sequías hidrológicas involucra anomalías en los caudales de las principales cuencas de Chile, observadas por la Dirección General de Aguas de este país, las cuales se expresan en un porcentaje del valor normal esperado en cada mes y como anomalía estandarizada. El Observatorio también tiene páginas para monitorear los

niveles de los reservorios y la altura de nieve, así como varios indicadores de sequía

hidrológica, pero parece que estas secciones no han sido actualizadas recientemente.

b. Recursos privados para el monitoreo

i. Caburé

Caburé es una plataforma de origen argentino (<https://cabure.com.ar/>) que reúne y distribuye datos e información meteorológica y climática. Enfocada en el sector agrícola, tiene como objetivo mejorar la toma de decisiones mediante el análisis de datos relacionados con el clima y la producción de cultivos. Aunque no se centra de manera específica en la sequía (como la mayoría de los recursos privados descritos en este informe), Caburé permite visualizar información georreferenciada sobre precipitaciones recientes o históricas y otras variables climáticas. Los datos meteorológicos se pueden asociar en forma automática con lotes o parcelas de producción para que el usuario pueda evaluar su impacto en el desarrollo de los cultivos.

Esta herramienta articula e integra una amplia red de estaciones meteorológicas a lo largo de Argentina, Brasil y España. Los datos meteorológicos provienen de diversas fuentes, p. ej., del SMN de Argentina y, sobre todo, de las estaciones meteorológicas que los productores tienen en sus propios campos (en este sentido, la plataforma actúa en modo colaborativo). Las redes en los diferentes países proporcionan una visión espacialmente detallada, lo que contribuye al monitoreo de la sequía a escalas locales; un ejemplo de ello se muestra en el mapa de precipitación en Argentina correspondiente a agosto de 2022 (figura 11). Las estaciones meteorológicas registran información clave como la relativa a temperatura, precipitación, humedad y velocidad del viento. Estos datos son analizados y presentados por medio de mapas, gráficos y otras representaciones visuales para facilitar su interpretación y

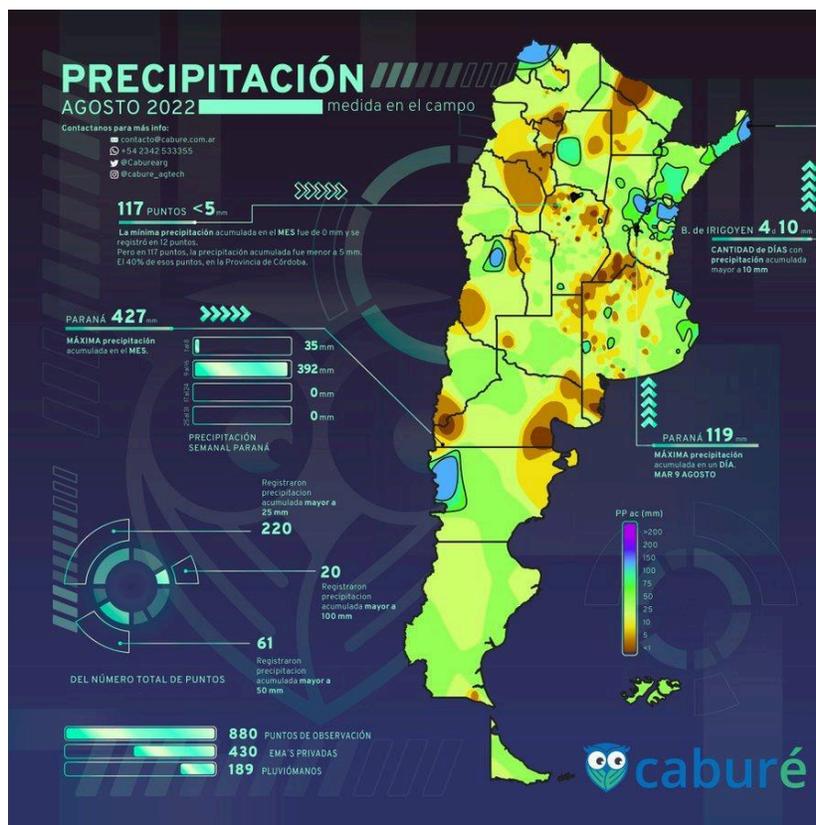
comprensión. Además, la plataforma ofrece otras funciones de utilidad para los agricultores, vinculadas con la organización de labores (lo que permite gestionar actividades de mitigación de los impactos de la sequía) y el cálculo de resultados económicos.

Entre las herramientas disponibles en la plataforma se encuentran las de:

- Condiciones meteorológicas medidas y pronósticos meteorológicos;
- Monitoreo de múltiples variables por cultivo;
- Recomendaciones de pulverización;
- Generación de órdenes de trabajo;
- Reportes de labores e insumos; y
- Cálculo de márgenes brutos.

Los flujos de datos se integran en la plataforma web y en una aplicación móvil, lo que permite a los usuarios acceder a la información en tiempo real desde cualquier lugar y en cualquier momento. La plataforma cuenta con cuatro planes de suscripción, con diferentes niveles de acceso y soporte: un nivel gratuito y tres niveles pagos (básico, avanzado y corporativo). Para obtener más información, visitense las siguientes páginas: <https://cabure.com.ar/> y <https://news.agrofy.com.ar/noticia/201391/cabure-como-funciona-y-cuanto-cuesta-red-informacion-meteorologica-que-cada-vez-tiene>.

Figura 11. Mapa de precipitaciones en Argentina correspondiente a agosto de 2022. Se elaboró con base en los datos reportados por la red de estaciones meteorológicas creada por Caburé en diferentes ubicaciones a lo largo del país.



Fuente: Tomado de Caburé (<https://twitter.com/Caburearg/status/1566167975962492934>).

ii. Agrosmart

Agrosmart es una agtech brasileña especializada en el monitoreo agrícola y la gestión del agua para los cultivos (<https://agrosmart.com.br/>). Integra diversas tecnologías como sensores, imágenes satelitales y análisis de datos para monitorear posibles condiciones de sequía y gestionar los cultivos de manera más eficiente. Su objetivo es mejorar las prácticas agrícolas a través de decisiones basadas en datos climáticos precisos y recomendaciones específicas para el cuidado de los cultivos.

Se apoya en la integración de datos provenientes del satélite Sentinel-2, disponibles mediante UrsulaGIS¹⁸, y en pronósticos meteorológicos generados por el Instituto Meteorológico de Noruega

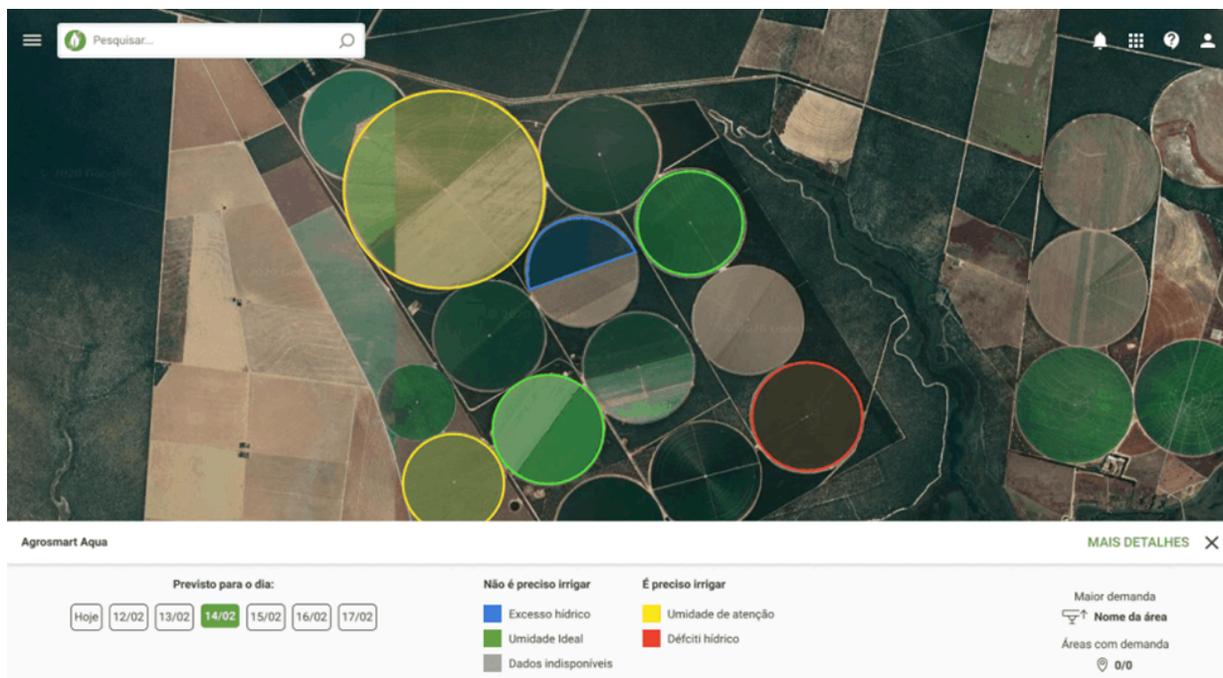
¹⁸ Se trata de una herramienta de agricultura de precisión que posibilita la visualización y limpieza de mapas de cosecha, la descarga de mapas del NDVI, la creación de mapas de potencial y la generación de recomendaciones para la fertilización (<https://www.ursulagis.com/>).

(<https://www.met.no/>) y las empresas AccuWeather (<https://www.accuweather.com/>), Weather Channel (<https://weather.com/>) y Tomorrow.io (<https://www.tomorrow.io/>). Además, se emplean datos provenientes de estaciones meteorológicas instaladas en las fincas de los usuarios para monitorear las condiciones locales de los cultivos, incluidas las relativas a lluvias, temperatura, humedad y velocidad y dirección del viento. De conformidad con estas condiciones y modelos de pronóstico, la plataforma proporciona alertas y recomendaciones personalizadas para gestionar el riego y controlar y prevenir la aparición plagas y enfermedades.

Después de adquirir la plataforma de origen argentino BoosterAGRO, Agrosmart ofrece dos soluciones adicionales:

- BoosterAgro, una aplicación móvil gratuita que permite comparar diferentes pronósticos meteorológicos (provenientes de los principales centros de predicción), visualizar las lluvias recientes, identificar los momentos adecuados de pulverización en los cultivos, acceder a imágenes de satélite del NDVI para el seguimiento del desarrollo de las plantas y compartir datos e información sobre el cultivo con el equipo de operaciones.
 - BoosterPRO, una plataforma web complementaria a BoosterAgro, accesible por medio de una suscripción paga. Ofrece alertas sobre condiciones climáticas adversas inminentes y proporciona recomendaciones personalizadas para el control y la prevención de plagas y enfermedades. Los paneles de control muestran datos sobre precipitación, evapotranspiración, radiación solar, temperatura, humedad relativa del aire y HS, entre otros. Además, la herramienta calcula las necesidades hídricas de los cultivos a través de un algoritmo propio (de modo similar a las soluciones Kilimo y Ecodrip, que también se examinan en este informe). Este algoritmo se basa en datos acerca del suelo, la atmósfera y las características de la planta. El monitoreo y pronóstico de variables meteorológicas relacionadas con el cultivo permiten calcular la disponibilidad de agua y prever las necesidades de riego. Un ejemplo de mapas donde se indican las necesidades de riego se muestra en la figura 12.
- De acuerdo con su sitio web, Agrosmart provee servicios de monitoreo a más de 100 000 productores en nueve países de América Latina (la mayoría en Argentina y Brasil) y cubre más de 48 000 ha con sus tres productos: BoosterAGRO, BoosterPRO y Analytics (monitoreo de cadenas de valor).

Figura 12. Ejemplo de la gestión del riego efectuada por medio de la herramienta Agrosmart Aqua, disponible en la plataforma BoosterPRO. Esta herramienta proporciona información sobre la cantidad de agua requerida y el momento más adecuado para el riego, según la demanda hídrica de un cultivo determinado. En esta representación las parcelas se diferencian por los bordes azules (exceso de agua) y los verdes (humedad ideal), que indican que no es necesario regar estas zonas, mientras que las marcadas con bordes amarillos (humedad de atención) y rojos (déficit hídrico) indican que resulta esencial realizar el riego.



Fuente: Tomado de Booster Agro (<https://boosteragro.com/blog-po/manejo-de-irrigacao/>).

iii. Hydrosat

Hydrosat (<https://www.hydrosat.com/>) es una plataforma estadounidense de inteligencia geoespacial para el clima y la agricultura. En su análisis de datos geoespaciales utiliza imágenes satelitales infrarrojas para proporcionar pronósticos precisos del rendimiento de los cultivos, comprender las condiciones climáticas que guían las decisiones relacionadas con el riego y ayudar a prepararse para posibles incendios forestales.

Lleva a cabo el monitoreo y la predicción de las sequías con base en imágenes recopiladas por los satélites Aqua y Terra (que llevan el sensor MODIS) y Landsat de la NASA. Las imágenes térmicas facilitan la identificación de focos de calor y otras características que no suelen ser detectadas

por las imágenes de canales visibles. La solución analítica de Hydrosat estima constantemente la temperatura de la superficie y el estrés de la vegetación, lo que fortalece las capacidades de detección temprana de una sequía.

Mediante la herramienta Irrigate, disponible por medio de una aplicación web y móvil y una interfaz de programación de aplicaciones (API), es posible efectuar la gestión del riego. Además, a través de este recurso los usuarios reciben información sobre el momento ideal para realizar el riego y la cantidad adecuada de agua por utilizar, con un planificador de riego de 8 días, en apoyo a la toma de decisiones en torno a diversos cultivos. Los servicios se ofrecen mediante una suscripción en dos paquetes diferentes: Premium y Dryland.



6. Recursos digitales para el pronóstico de la sequía

a. Recursos públicos

A pesar de la gran utilidad potencial de los pronósticos de sequía en la gestión de riesgos, aún son muy escasos los sistemas operacionales de pronóstico disponibles. En general, la mayoría de los recursos se enfocan en pronósticos estacionales de precipitación, a partir de los cuales los usuarios deben determinar cómo pueden surgir o evolucionar las condiciones de sequía en una región de interés. No obstante, en esta sección también se describe un producto fundamentado en

pronósticos meteorológicos extendidos (15 días en el futuro), que calcula explícitamente cómo evolucionará un indicador de sequía (el SPI-3) en función de la combinación de lluvias observadas y pronosticadas. Por último, en su estrategia 2023-2025, el IDMP (<https://www.droughtmanagement.info>) pone énfasis en la provisión de pronósticos subestacionales de sequía como una necesidad que se debe explorar con más eficacia en el futuro cercano.

i. Pronósticos estacionales de precipitación del IRI, Universidad de Columbia

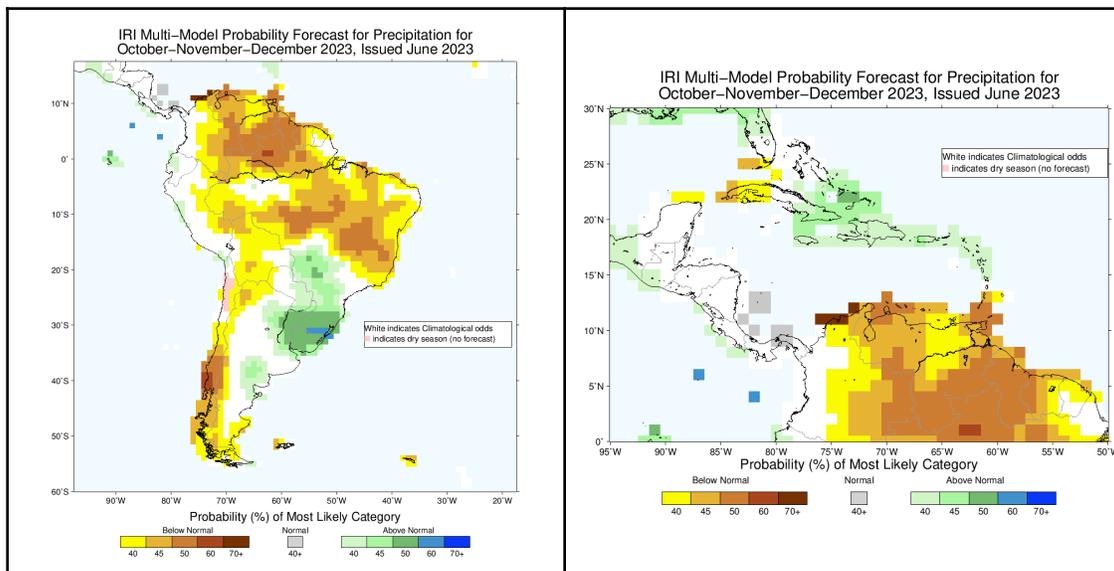
Uno de los recursos digitales más utilizados para consultar las perspectivas de precipitaciones futuras son los pronósticos climáticos estacionales producidos por el IRI (<https://iri.columbia.edu/our-expertise/climate/forecasts/seasonal-climate-forecasts/>). Estos pronósticos indican las probabilidades de lluvias en cada tercil de la distribución histórica: si estas son mayores a 0.33 (valor climatológico) en el tercil inferior (valores bajos de precipitación), es más probable que ocurran lluvias por debajo de lo normal. Por el contrario, si estas son mayores a 0.33 en el tercil superior (valores altos de precipitación), es posible que ocurran lluvias por encima de

lo normal. Los valores de precipitación que delimitan cada categoría en una región y un trimestre determinados pueden consultarse en

<http://iridl.ldeo.columbia.edu/maproom/Global/Forecasts/Percentiles/precipitation.html>.

Los pronósticos estacionales del IRI se basan en los resultados calibrados de varios modelos climáticos incluidos en el proyecto Conjunto Multi-Modelo Norteamericano de la NOAA de Estados Unidos. En la figura 13 se presentan ejemplos de un pronóstico estacional de precipitación correspondiente a octubre, noviembre y diciembre de 2023, emitido en junio de 2023.

Figura 13. Izquierda: pronóstico estacional de precipitación para octubre, noviembre y diciembre de 2023 emitido en junio de 2023 por el IRI de la Universidad de Columbia. El pronóstico indica la probabilidad de lluvias en cada tercil de la distribución histórica. Además, muestra un patrón de precipitaciones que responde al evento el Niño en curso durante la segunda mitad de 2023: lluvias por encima de lo normal en Uruguay, el centro-este de Argentina y el sur de Brasil, así como lluvias por debajo de lo normal en el norte y nordeste de Brasil. Derecha: pronóstico para el mismo período (octubre-diciembre 2023) en el Caribe.



Fuente: Tomado de IRI, Universidad de Columbia (<https://iri.columbia.edu>).

ii. Pronóstico de condiciones inusualmente secas o húmedas

El GDO del Servicio Copernicus de Gestión de Emergencias (<https://emergency.copernicus.eu/>) desarrolló un indicador para el pronóstico de condiciones inusualmente secas o húmedas, fundamentado en valores del SPI calculados a partir de pronósticos climáticos estacionales con 1, 3 y 6 meses de antelación producidos por el ECMWF. El indicador identifica regiones donde muchos miembros (al menos 40%) del ensamble de predicciones de lluvia (51 miembros) coinciden en anticipar condiciones muy secas o húmedas.

El indicador se emite con tres niveles de alerta, de acuerdo con el período de retorno estimado de las anomalías esperadas. Una descripción breve y relativamente simple de éste se puede descargar de https://edo.jrc.ec.europa.eu/documents/factsheets/factsheet_spi_forecasts.pdf. En Lavaysse et al. (2020) se pueden encontrar más detalles del cálculo del indicador. Aunque

todavía no existe un recurso digital para visualizarlo fácilmente, su uso debería considerarse en ALC, a fin de identificar regiones donde un pronóstico de condiciones extremas se considera robusto. Un ejemplo del indicador para el período mayo-julio de 2023 en Sudamérica (figura 14) sugiere la ocurrencia de condiciones secas en el noreste de Argentina y el sur de Brasil y Uruguay, así como de condiciones húmedas en Perú, Ecuador y Colombia.

Los valores del indicador desde 2017 se pueden descargar en varios formatos (netCDF o GeoTiff) de <https://edo.jrc.ec.europa.eu/gdo/php/index.php?id=2112>. Antes de la descarga se debe seleccionar la antelación del indicador (1, 3 o 6 meses). El nombre del archivo indica el mes en que comienza el período de pronóstico.

Figura 14. Indicador para el pronóstico de condiciones inusualmente secas o húmedas durante el período mayo-julio de 2023 en Sudamérica, generado por el GDO del Servicio Copernicus de Gestión de Emergencias. El pronóstico, que se basa en previsiones climáticas estacionales del ECMWF con 1, 3 y 6 meses de antelación, sugiere la ocurrencia de condiciones secas en el noreste de Argentina y el sur de Brasil y Uruguay, así como condiciones húmedas en Perú, Ecuador y Colombia.



Fuente: Adaptado de Toreti et al. (2023).

iii. Evolución esperada del SPI y las categorías de sequías con base en el pronóstico de lluvias GEFS-CHIRPS

El SISSA genera productos experimentales para el sur de Sudamérica que combinan la observación de precipitaciones recientes (producto CHIRPS, véase la sección 3.1) con un pronóstico de

precipitaciones de 15 días en el futuro. El pronóstico es generado por el Centro de Riesgos Climáticos (CHC), la misma institución que produce estimaciones de lluvias por medio del producto CHIRPS. El pronóstico de

la precipitación es generado en el modelo numérico denominado Sistema Global de Predicción por Conjuntos (GEFS) (https://www.esrl.noaa.gov/psd/forecasts/refo_recast2/), desarrollado por el Centro Nacional de Predicción Ambiental de los Estados Unidos. El CHC realiza luego un proceso de calibración (o remoción del sesgo) de los valores pronosticados por el sistema GEFS, que reduce errores sistemáticos y asegura que la tendencia central (media) y la dispersión (variancia) de los valores calibrados de lluvia sean aproximadamente consistentes con la distribución de los valores históricos en el producto CHIRPS. En Harrison et al. (2022) se encuentran detalles en torno al pronóstico de lluvias.

Dado que la calibración asegura la consistencia entre las lluvias observadas (CHIRPS) y las pronosticadas, el SISSA combina 2.5 meses de lluvias observadas con 0.5 meses (15 días) de lluvias pronosticadas para calcular totales de lluvia correspondientes a un período de 3 meses (que finaliza 15 días después de la fecha de pronóstico). En cada punto de una grilla de 0.5° se calcula un SPI a escala de 3 meses (SPI-3), así como la categoría de sequía correspondiente. Con estos datos, se generan mapas de:

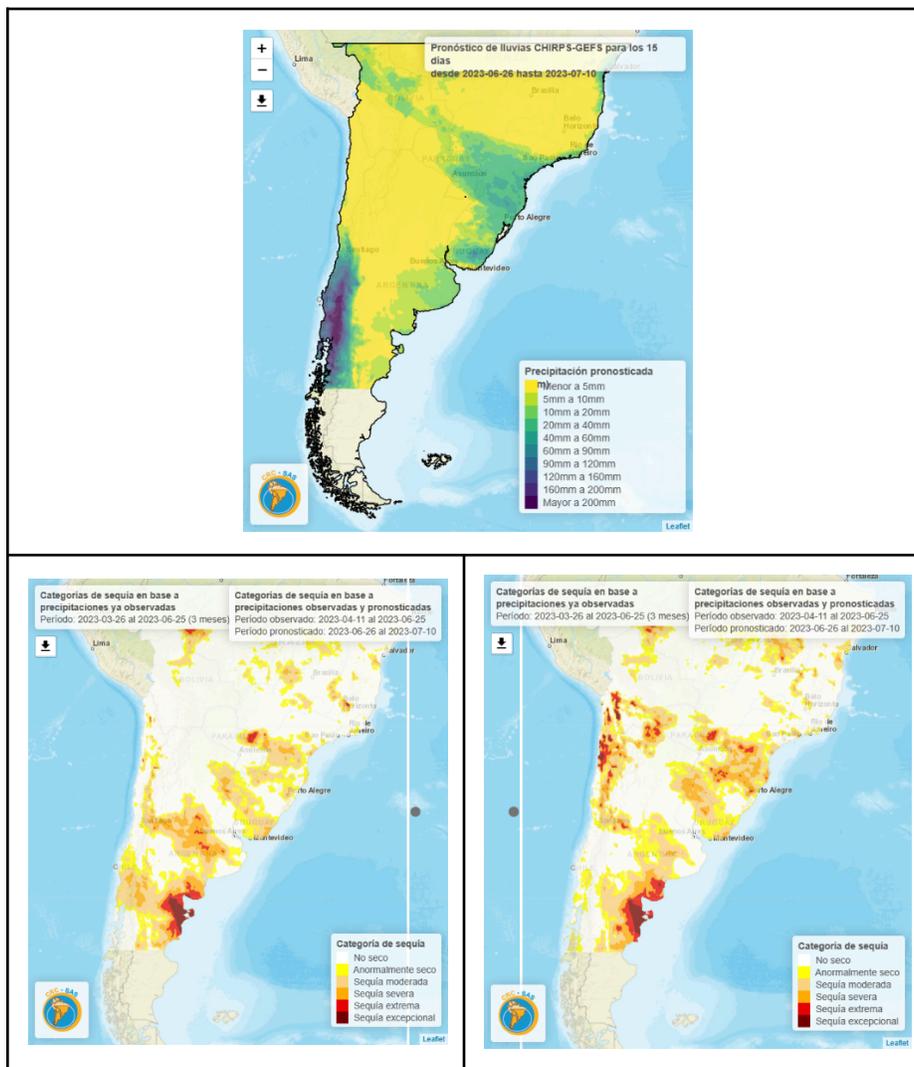
- Las lluvias pronosticadas para los próximos 15 días;
- Las categorías de sequía 15 días en el futuro (derivadas del SPI-3 calculado); y

- Los cambios esperados (mejora o empeoramiento) en las categorías de sequía entre el presente y 15 días en el futuro.

El SISSA advierte que este producto es experimental, por lo que recomienda a los usuarios proceder con cautela. Los productos descritos se pueden visualizar en <https://sisso.crc-sas.org/pronosticos-de-lluvia-y-sequia/pronostico-de-sequia-a-15-dias-chirps-gefs/>. En la figura 15 se muestran ejemplos de algunos de ellos.

Figura 15. Arriba: pronóstico de lluvias en el sur de Sudamérica, basado en el pronóstico GEFS-CHIRPS recalibrado de conformidad con el producto CHIRPS de precipitación. En el panel superior se muestra la lluvia entre el 26 de junio y el 10 de julio de 2023. En el inferior se presentan dos mapas de categorías de sequía (ambas calculadas para una escala temporal de 3 meses) antes y después del pronóstico de lluvia. Se muestran las dos figuras, ya que es imposible capturar la comparación dinámica de la situación actual y la pronosticada que se realiza en el sitio del SISSA, a través de una barra que se desliza de izquierda a derecha. Abajo, a la izquierda: categorías de sequía observadas durante el período del 26 de marzo al 25 de junio de 2023 (fecha de emisión del pronóstico). Abajo, a la derecha: categorías de sequía pronosticadas para el 10 de julio de 2023,

basadas en a) 2.5 meses de lluvias observadas (producto CHIRPS, del 11 de abril al 25 de junio de 2023) y b) 0.5 meses de lluvias pronosticadas (del 26 de junio al 10 de julio de 2023). Dado que el pronóstico (panel superior) no muestra lluvias importantes salvo en el centro-sur de Chile, los dos mapas en la fila inferior de la figura no muestran demasiadas diferencias.



Fuente: Tomado de SISSA (<https://sissa.crc-sas.org>).

b. Recursos privados

i. IGNITIA

Ignitia (<https://ignitia.se/>), un recurso de origen sueco, se autodefine como una plataforma de inteligencia climática especializada en proporcionar pronósticos

meteorológicos de alta precisión a países tropicales, a fin de que sean capaces de tomar decisiones tácticas sobre la aplicación de diferentes prácticas agrícolas. Se basa en un

modelo de pronóstico meteorológico desarrollado específicamente para satisfacer las demandas de las regiones tropicales, para lo cual ofrece datos hiperlocalizados por coordenadas geográficas y de bajo costo a través de mensajes de texto.

Esta plataforma ha creado su propio modelo de predicción con base en pronósticos meteorológicos generados por instituciones como el ECMWF y la empresa finlandesa Vaisala¹⁹, el cual está diseñado para abordar desafíos relacionados con la predicción de las precipitaciones y la variabilidad climática típica del clima tropical. Asimismo, ofrece una amplia cobertura geográfica y una alta definición espacial y promete lograr un nivel de precisión en sus predicciones del 84 %. Sus pronósticos detallados permiten formular recomendaciones sobre el momento apropiado para realizar diferentes tareas agrícolas, un ejemplo de lo cual se muestra en la figura 16.

Ignitia ofrece diferentes mecanismos de distribución de su información. El primero, denominado ISKA, mediante un servicio de mensajes cortos (SMS), envía a diario mensajes de texto con pronósticos de lluvia y datos sobre temperatura, humedad y velocidad del viento a los pequeños productores de zonas rurales; un ejemplo de ello se muestra en la figura 17. Además de los envíos por SMS, brinda las siguientes tres soluciones, a partir de planes anuales o mensuales con diferentes costos, dependiendo de los servicios prestados por cada una:

- **Ignitia Farm.** Se trata de un servicio de inteligencia climática y alertas brindado a los agricultores por medio

de una suscripción de WhatsApp. Estos reciben un reporte multiparamétrico diario de condiciones relevantes para la planificación y ejecución de sus labores agronómicas.

- **Ignitia Smart.** Esta herramienta envía alertas personalizadas sobre cuándo plantar, cosechar y aplicar fertilizantes y otros insumos en los cultivos. Además, ofrece una pantalla con información climática y soluciones de análisis de datos para productores agroindustriales y cooperativas de gran escala.
- **Ignitia Enterprise.** Este servicio ofrece soluciones en materia de datos climáticos a bancos y aseguradoras del sector agroalimentario.

En la actualidad Ignitia cuenta con 2 millones de usuarios en África occidental (no hay datos sobre el número de usuarios en ALC) y tiene oficinas operativas en Ghana y Brasil.

¹⁹ Vaisala XWeather: <https://www.xweather.com/>.

Figura 16. Modelo de recomendación de pulverización diaria proporcionado por Ignitia para una ubicación específica en Brasil. El momento adecuado para llevarla a cabo dentro de los tres días siguientes, indicado por el modelo de inteligencia climática de Ignitia con color verde, depende de la temperatura, la velocidad del viento y la lluvia.

Momento ideal para pulverizar

+123 (Avenida Ilha Bela, Centro, São Sebastião, Região Imediata de Caraguatuba-Ubatuba-São Sebastião, Região Metropolitana do Vale do Paraíba e Litoral Norte, Região Geográfica Intermediária de São José dos Campos, São Paulo, Região Sudeste, 11608-530, Brasil)
Sao Sebastiao

Tempo adequado  Tempo não adequado



Mais detalhes

Fuente: Tomado de Ignitia (<https://ojobrasil.ignitia.se/>).

. **Figura 17.** Ejemplo de mensaje enviado mediante WhatsApp como parte del plan Ignitia Farm. Contiene un informe conciso sobre la posibilidad de lluvias, la precipitación potencial, las temperaturas máximas y mínimas, la velocidad del viento y la humedad en un lugar específico en Brasil.



Fuente: Tomado de Ignitia (<https://ojobrasil.ignitia.se/>).

ii. Tomorrow.io

Tomorrow.io es una plataforma estadounidense de inteligencia climática que proporciona pronósticos del tiempo altamente precisos y específicos a diversas industrias, incluida la de producción agrícola. Con base en más de 30 parámetros meteorológicos hiperlocales diferentes, ofrece alertas en tiempo real para proteger cultivos, optimizar el riego y facilitar operaciones eficientes.

Presenta funcionalidades que combinan datos de diferentes modelos de pronóstico meteorológico, incluidos los producidos por la NOAA y el ECMWF. Además, cuenta con su propio modelo de pronóstico: el Modelo Atmosférico Integral a Medida (Comprehensive Bespoke Atmospheric Model), que incorpora millones de sensores virtuales a fin de llenar las brechas espaciales y temporales en las observaciones meteorológicas disponibles públicamente.

Tomorrow.io proporciona datos predictivos acerca de cómo las condiciones meteorológicas afectarán las operaciones de una empresa. En el ámbito agrícola, brinda recomendaciones para el manejo de los cultivos, como el momento óptimo para regar y la cantidad adecuada de agua por utilizar. Asimismo, ayuda a entender cómo las condiciones del tiempo pueden influir en la efectividad de las pulverizaciones.

También ofrece distintos tipos de soluciones en todo el mundo: una aplicación móvil de pronóstico del clima (Tomorrow.io Weather Forecast) y una API de acceso libre y gratuito. Además, se dispone de una plataforma web con servicios personalizados para satisfacer las necesidades operativas de grandes organizaciones a través de suscripciones pagas.



7. Recursos digitales para la evaluación y gestión de los impactos de la sequía

La información acerca de los impactos esperados es una de las principales carencias de los sistemas actuales de información sobre sequía. Lamentablemente, muy pocos recursos digitales públicos o privados disponibles contienen información explícita (en particular, cuantitativa) con respecto a los impactos esperados de una sequía (p. ej., en lo que se refiere a rendimientos de cultivos). Algunos recursos digitales disponibles, sin

embargo, permiten evaluar simultáneamente la evolución de diferentes indicadores climáticos relevantes en áreas importantes de la producción de un cultivo, los cuales reflejan las condiciones de este durante su ciclo de crecimiento y, en consecuencia, pueden aportar una convergencia de evidencia para identificar condiciones anómalas posiblemente asociadas a impactos agrícolas (Becker-Reshef et al. 2020).

a. Recursos públicos

i. Los monitores de cultivos de la GEOGLAM

La Iniciativa Global de Monitoreo Agrícola del Grupo de Observaciones de la Tierra (GEOGLAM), establecida por los ministros de Agricultura del Grupo de los Veinte, tiene como objetivos mejorar la transparencia de los mercados agrícolas y asegurar la seguridad alimentaria mediante la producción y difusión de información relevante, oportuna y aprovechable sobre las condiciones de los cultivos y las perspectivas de producción en los planos nacional, supranacional y global. La GEOGLAM ha desarrollado dos herramientas para la identificación temprana de posibles impactos negativos sobre los rendimientos de ciertos cultivos y la seguridad alimentaria (<https://cropmonitor.org/>), los cuales, asociados no solo a la sequía, sino también a otros factores hidroclimáticos como temperaturas anómalas u otros eventos extremos, pueden ser resultantes también de la aparición de plagas y enfermedades o responder a factores socioeconómicos como conflictos o disrupciones económicas. Dichas herramientas son:

- El monitor del Sistema de Información sobre Mercados Agrícolas (AMIS) y
- El monitor de cultivos para alerta temprana (CM4EW).

El monitor del AMIS (<https://cropmonitor.org/index.php/cmreports/amis-report/>) tiene como fin reducir la volatilidad y aumentar la transparencia de los mercados agrícolas (Becker-Reshef et al. 2019). Se enfoca en cuatro cultivos importantes (trigo, arroz, maíz y soja) y en los principales países productores y exportadores de estos, responsables de aproximadamente el 80 % de la producción global. Los países de ALC incluidos en esta herramienta son Argentina, Brasil y México.

El CM4EW (<https://cropmonitor.org/index.php/cmreports/earlywarning-report/>) se desarrolló poco tiempo después para aportar información confiable y ofrecer alertas tempranas sobre posibles impactos negativos en países

sensibles a la inseguridad alimentaria (Becker-Reshef et al. 2020). En ALC este monitor abarca a Cuba, El Salvador, Guatemala, Haití, Honduras y Nicaragua. Los principales cultivos incluidos son el trigo, el maíz, el arroz, el mijo, el sorgo, el teff y las legumbres.

Un tercer monitor de la GEOGLAM, el Monitor Global de Cultivos (<https://cropmonitor.org/index.php/global-cm-report/>), combina y sintetiza la información de las dos herramientas antes mencionadas e incluye además aportes directos de los países participantes.

Todos los monitores de la GEOGLAM se fundamentan en metodologías similares y, por lo tanto, presentan una estructura parecida. Utilizan una combinación de información agrometeorológica, datos satelitarios e información de campo provista por instituciones participantes y otros actores del sector agrícola. Luego de compilarlos y organizarlos, los participantes llevan a cabo un proceso de discusión para eliminar discrepancias y elaborar reportes mensuales consensuados con una resolución espacial subnacional y en los que se definen diferentes categorías de zonas, según sus condiciones para los cultivos: a) excepcional, b) favorable, c) por vigilar debido a una posible evolución desfavorable, d) pobre (rendimientos esperados de 5 % a 25 % por debajo del promedio reciente) y e) de cultivo fallido (rendimientos esperados 25 % por debajo del promedio reciente).

El contenido principal de los reportes de la GEOGLAM incluye 1) descripciones generales por región de las condiciones de los cultivos cuyo ciclo productivo está en curso, 2) resúmenes de la situación de eventos climáticos globales como El Niño o La Niña que pueden afectar la producción agrícola y 3) discusiones de las condiciones de los cultivos en regiones específicas. El texto de la

discusión se complementa con mapas que resumen las condiciones globales de los diferentes cultivos y los factores asociados con posibles condiciones desfavorables. Comprende además un gráfico de pastel relativo a cada cultivo, donde cada sector del diagrama representa la proporción de la producción global en cada país participante. En el sector correspondiente a un país, la proporción del área productiva en diferentes condiciones se indica con colores distintos. Con respecto a las condiciones desfavorables, el gráfico incluye íconos de los factores hidroclimáticos o de otro tipo que pueden estar afectando los rendimientos en cada región. En la figura 18 (izquierda) se presentan ejemplos del mapa en el que se resumen las condiciones del cultivo de soja en febrero de 2023. En el panel derecho de la misma figura se muestra la proporción de las áreas (sobre todo en Argentina y Brasil, los principales productores durante el verano austral) en diferentes condiciones.

Los reportes mensuales de los distintos monitores de la GEOGLAM, junto con reportes ad hoc de situaciones especiales como las climáticas desfavorables que se desarrollan rápidamente o en relación con conflictos sociales, se pueden encontrar en <https://cropmonitor.org/index.php/cmreports/reports-archive>.

En el sitio web de la GEOGLAM se encuentra además la evolución de múltiples indicadores de condiciones climáticas relativos a las categorías de condiciones resumidas en los monitores de diferentes cultivos (<https://cropmonitor.org/tools/agmet>). En el panel inferior de la figura 18 se presenta un resumen de series temporales de varios indicadores para el ciclo de soja 2022-2023 de la provincia de Buenos Aires, Argentina, una división de nivel administrativo 1 responsable de una gran proporción (≈31 %) de la

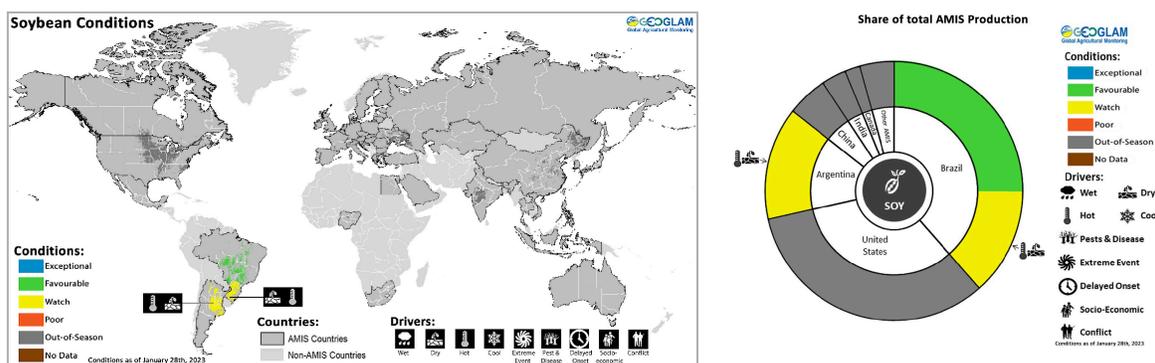
producción nacional de dicho cultivo. Algunos de los indicadores incluyen:

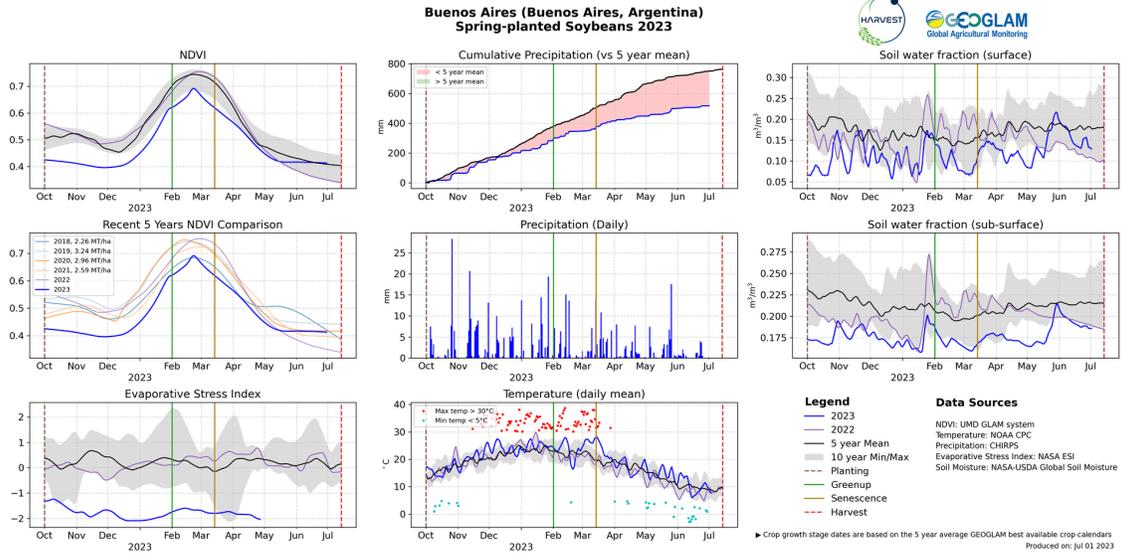
- El NDVI del ciclo de cultivo presente, en comparación con el promedio y el rango histórico;
- El NDVI del ciclo presente en comparación con los 5 ciclos previos;
- La precipitación acumulada (en relación con la normal) y montos diarios de precipitación;
- La HS volumétrica en las capas superficial y profunda;

- El ESI; y
- La temperatura media del aire (además de las temperaturas máximas diarias > 30 °C y mínimas diarias < 5 °C, ambas potencialmente dañinas).

Los diferentes indicadores aportan una convergencia de evidencia que explica la gran pérdida de producción de soja en Argentina como consecuencia de la sequía durante el ciclo 2022-2023 y las altas temperaturas máximas que ocurrieron durante la primavera y el verano en dicho ciclo.

Figura 18. En la fila superior, a la izquierda: mapa de condiciones de la soja en países cubiertos por el monitor AMIS de la GEOGLAM en febrero de 2023. Pueden observarse regiones con sequía en la Pampa de Argentina central y el sur de Brasil por vigilar para evaluar la evolución futura del cultivo y la ocurrencia de altas temperaturas que exacerban la falta de precipitaciones. En la parte central de Brasil la soja muestra condiciones favorables. En la fila superior, a la derecha: gráfico de pastel de la distribución de condiciones en los países del AMIS (solo en Argentina y Brasil el ciclo de la soja está en curso durante el verano austral de 2023). El gráfico muestra la mezcla de condiciones en Brasil y las condiciones que requieren vigilancia en toda la zona productiva de Argentina. Fila inferior: indicadores de condiciones climáticas experimentadas por la provincia de Buenos Aires, Argentina (división de nivel administrativo 1) durante el ciclo de producción de soja 2022-2023.

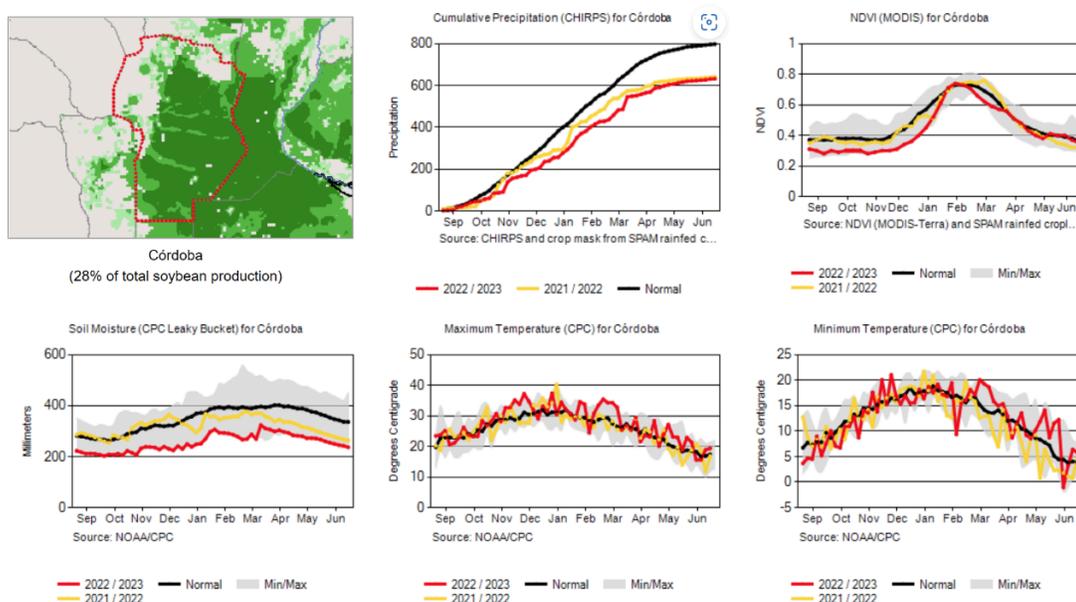




Fuente: Tomado de Monitor de Cultivos de la GEOGLAM (<https://cropmonitor.org>).

Figura 19. Indicadores de las condiciones climáticas en la provincia de Córdoba, Argentina durante el ciclo de producción de soja 2023-2024. La ubicación de Córdoba se indica con el contorno rojo en el panel superior izquierdo de la figura; los tonos verdes indican las zonas de producción de soja en Argentina. En los restantes paneles se presentan las malas condiciones climáticas experimentadas por la soja durante el ciclo 2023-2024. En el panel superior central se muestra que la precipitación acumulada durante este ciclo (línea roja) fue claramente inferior a la normal (línea negra). Las condiciones de sequía se reflejan también en la evolución del NDVI (panel superior derecho), sobre todo al inicio del ciclo, y de la HS (panel inferior izquierdo). La serie de temperatura máxima del aire (panel inferior central) sugiere la ocurrencia de altas temperaturas en los meses más cálidos del ciclo, que pueden haber contribuido a exacerbar las condiciones de sequía.

 Sub-National Summary: Córdoba (Argentina) Soybean



Fuente: Tomado de USDA, Explorador de Cultivos (<https://ipad.fas.usda.gov/cropexplorer>).

ii. El Explorador de Cultivos

En la sección 4.1.1.3 de este informe se describieron los indicadores de sequía para diferentes regiones de ALC que produce el Explorador de Cultivos del USDA; sin embargo, aquí se presenta otra sección del Explorador de Cultivos que se enfoca en las principales regiones de producción de diferentes productos básicos agrícolas en ALC. Esta sección del Explorador permite evaluar

simultáneamente la evolución de diferentes indicadores climáticos relevantes en áreas importantes de producción de un cultivo, lo que refleja las condiciones experimentadas por un cultivo durante su ciclo de crecimiento.

En la figura 19 se muestra un ejemplo de varios indicadores de las condiciones de sequía y el clima durante el ciclo agrícola

2022-2023 de producción de soja en la provincia de Córdoba, Argentina, una división administrativa de nivel 1 que produce aproximadamente el 28 % de la soja

argentina. Como se mencionó anteriormente, durante el período 2022-2023 Argentina sufrió una merma muy importante (>40 %) en su producción nacional de soja, como consecuencia de una sequía intensa.

iii. El RDri-Agri

El RDri-Agri, un indicador producido por el GDO del Servicio de Gestión de Emergencias de Copernicus (<https://edo.jrc.ec.europa.eu/gdo/php/index.php?id=2001>), se utiliza para detectar y monitorear la posibilidad de impactos de la sequía en zonas agrícolas: las que presentan valores altos de riesgo tienen una mayor probabilidad de reportar impactos sobre la producción agrícola. Su cobertura es global, con una resolución espacial de 1°. Se actualiza cada 10 días aproximadamente (por década del mes). En la figura 20 se muestra un ejemplo del RDri-Agri.

Según la Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres (United Nations Office for Disaster Risk Reduction 2021), el riesgo de sequía se puede definir como la probabilidad de consecuencias perjudiciales o pérdidas resultantes de las interacciones entre tres factores determinantes independientes: 1) la amenaza de sequía (es decir, la posible ocurrencia futura de eventos de sequía de cierta severidad), 2) la exposición a la sequía (esto es, la población total y sus medios de vida y activos como zonas cultivadas o de pastoreo en áreas propensas a la sequía) y 3) la vulnerabilidad a la sequía (o sea, la propensión de los elementos expuestos a sufrir efectos adversos cuando se ven afectados por un evento de sequía). El RDri-Agri incorpora en su cálculo estas tres dimensiones del riesgo de sequía.

En el presente informe se incluye únicamente una descripción muy breve del cálculo de cada componente del RDri-Agri. Para obtener más detalles se puede consultar un documento del GDO disponible en https://edo.jrc.ec.europa.eu/documents/factsheets/factsheet_rdri_agri.pdf.

En primer lugar, la amenaza de sequía se estima de la misma forma que el indicador combinado de sequía (CDI) del Observatorio Europeo de la Sequía del Centro Común de Investigación de la Comisión Europea (<https://edo.jrc.ec.europa.eu>). Este indicador se desarrolló para brindar una descripción sintética de la situación de la sequía agrícola. El CDI combina tres indicadores diferentes: 1) el SPI, calculado en una escala de 3 meses (SPI-3); 2) anomalías de la HS, estimada por medio del modelo hidrológico distribuido LISFLOOD; y 3) anomalías de la FAPAR. El diseño conceptual del CDI se basa en una relación idealizada de causa y efecto en la sequía agrícola. Se asume que un déficit de precipitación (la causa) conduce con cierto retraso temporal a una anomalía negativa en la HS que, con otro retraso temporal, resulta en una reducción de la producción de la vegetación (el efecto).

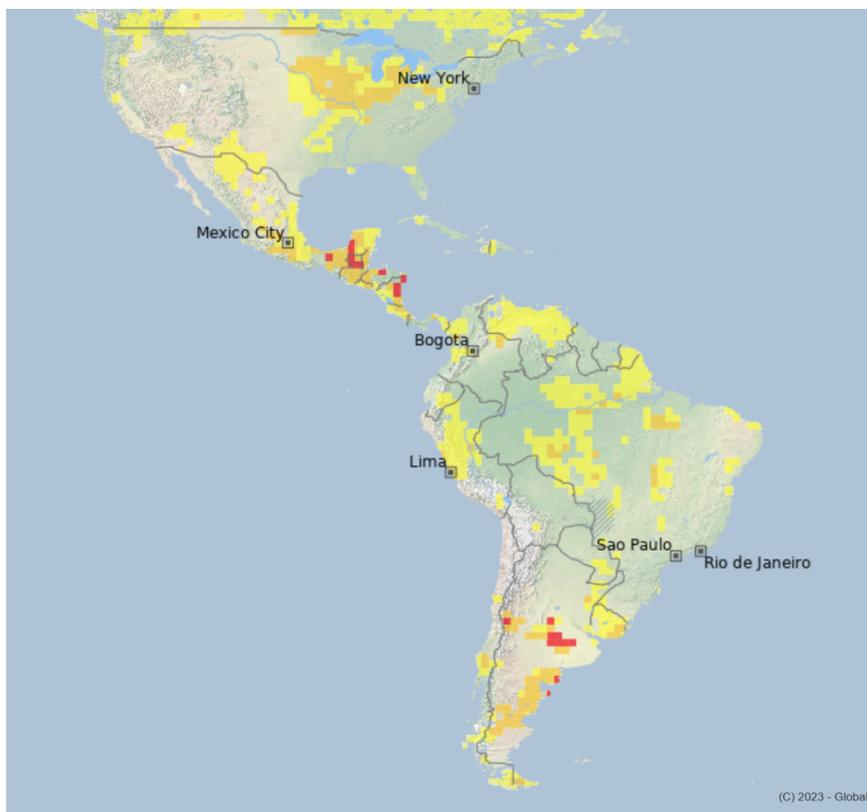
Segundo, la exposición de sistemas agrícolas a la sequía se deriva de cuatro indicadores provenientes de diferentes fuentes: 1) la población humana, 2) las tierras dedicadas a la producción agrícola, 3) la población ganadera (número de animales de diferentes tipos) y 4) el estrés hídrico de base.

En tercer lugar, la vulnerabilidad a la sequía de una región se basa en múltiples indicadores que representan factores sociales, económicos e infraestructurales y que se enumeran en Carrão et al. (2016). Entre los indicadores sociales se incluyen la proporción de la población rural, la estructura de edad de la población e indicadores de la calidad de la gobernanza y la preparación para desastres. Los indicadores económicos abarcan, entre otros, la contribución de la agricultura al producto bruto y al producto bruto per cápita. Por último, los indicadores infraestructurales consideran el porcentaje de tierra bajo irrigación y la densidad de las rutas y los caminos.

Cabe señalar que la escala de riesgos utilizada en el RDri-Agri no brinda una medida absoluta de las pérdidas esperadas o los posibles daños a poblaciones y actividades. En

cambio, este indicador debe interpretarse como una medida relativa que permite comparar diferentes regiones geográficas. Según sus desarrolladores, una de sus fortalezas es que la metodología de cálculo del RDri-Agri vincula las ciencias físicas y sociales a través de un indicador en el que se consideran todas las dimensiones del riesgo de sequía. El monitoreo del RDri-Agri permite identificar áreas en las cuales puede ser necesario realizar acciones proactivas para reducir potenciales impactos negativos de la sequía. Por otra parte, una debilidad del RDri-Agri es que muchos de los componentes utilizados para cuantificar la vulnerabilidad ante la sequía están disponibles en el ámbito nacional, por lo que resulta imposible resolver diferencias subnacionales; además algunos componentes del indicador son dinámicos, por lo que requieren una actualización periódica.

Figura 20. Mapa del RDri-Agri, producido por el Observatorio Global de la Sequía, tercera década (del 21 al 30) de junio de 2023. En Centroamérica y el sudeste de Sudamérica se pueden observar condiciones de alto riesgo de impactos.



Fuente: Tomado del Observatorio Global de la Sequía, Centro Común de Investigación, Comisión Europea (<https://edo.jrc.ec.europa.eu>).

iv. Pronósticos de rendimiento de cultivos: ProRindes

Ninguno de los recursos digitales discutidos anteriormente proporciona una estimación cuantitativa de los posibles impactos de una sequía. Por este motivo, en este informe se incluye el Sistema de Pronóstico de Rindes Simulados ProRindes (<https://prorindes.smn.gob.ar/>), una herramienta dirigida a predecir el rendimiento de la soja de siembra temprana y tardía, el maíz temprano y tardío, el trigo y la cebada en 19 localidades de la región agrícola de Argentina a lo largo de un ciclo de cultivo. Los pronósticos se emiten cada 7 a 15 días, desde la siembra hasta la cosecha de los cultivos. También se pueden generar

pronósticos especiales después de algún evento que pueda modificar sensiblemente los rendimientos esperados (p. ej., una lluvia intensa después de un período muy seco). El ProRindes es el único ejemplo operativo que se ha encontrado al preparar este informe de un pronóstico basado en impactos para la producción agrícola en ALC. Como su nombre lo sugiere, un pronóstico fundamentado en impactos no indica solamente cómo evolucionará una sequía, sino también los efectos que podría tener en los sistemas de interés (Boult et al. 2022).

El ProRindes fue originalmente desarrollado como una prueba de concepto financiada por proyectos de investigación y fuentes privadas, pero desde el período 2018-2019 esta herramienta funciona bajo la coordinación de tres entidades públicas y privadas de Argentina: el SMN, la Secretaría [de Agricultura, Ganadería y Pesca](#) y una organización no gubernamental (ONG) de productores denominada Consorcios Regionales de Experimentación Agrícola.

Los pronósticos de rendimiento se basan en modelos computacionales que simulan el crecimiento y desarrollo de cada cultivo incluido. ProRindes usa modelos de la familia del Sistema de Apoyo a las Decisiones de Transferencia Agrotecnológica (Hoogenboom et al. 2004). En particular, se utilizan los modelos CERES Maize en la simulación de maíz, trigo y cebada, y CropGro, en la de soja. Ambos han sido calibrados y validados en Argentina mediante comparaciones entre rendimientos simulados y observados. En el conjunto de situaciones evaluadas, el rendimiento medio simulado y su variabilidad no difirieron en más de 5 % con respecto a lo observado. En cada situación específica (p. ej., una finca en particular), el error medio esperado puede estar entre 15 % y 20 %.

Los pronósticos del ProRindes se realizan para los suelos más representativos y para 2 o 3 manejos agronómicos típicos de cada localidad. En cada sitio se predicen rendimientos de todas las combinaciones de a) suelo, b) cultivo, c) manejo agronómico y d) contenido de agua en el suelo a la siembra, de modo que los productores puedan seleccionar la situación más afín a sus propias condiciones y decisiones.

Para simular los rendimientos de un cultivo, este sistema requiere series de valores diarios de cuatro variables climáticas:

temperaturas del aire máxima y mínima, precipitación total y radiación solar total. Estas variables, que se miden en estaciones meteorológicas operadas por el SMN de Argentina, se ubican muy cerca de las localidades en las que se pronostican los rendimientos. Otros datos necesarios incluyen los perfiles de los suelos típicos, las características de los genotipos utilizados en los cultivos simulados y los manejos agronómicos más representativos de cada cultivo y región. Lamentablemente, debido a los requerimientos de datos, esta herramienta digital no se transfiere con facilidad a cualquier región.

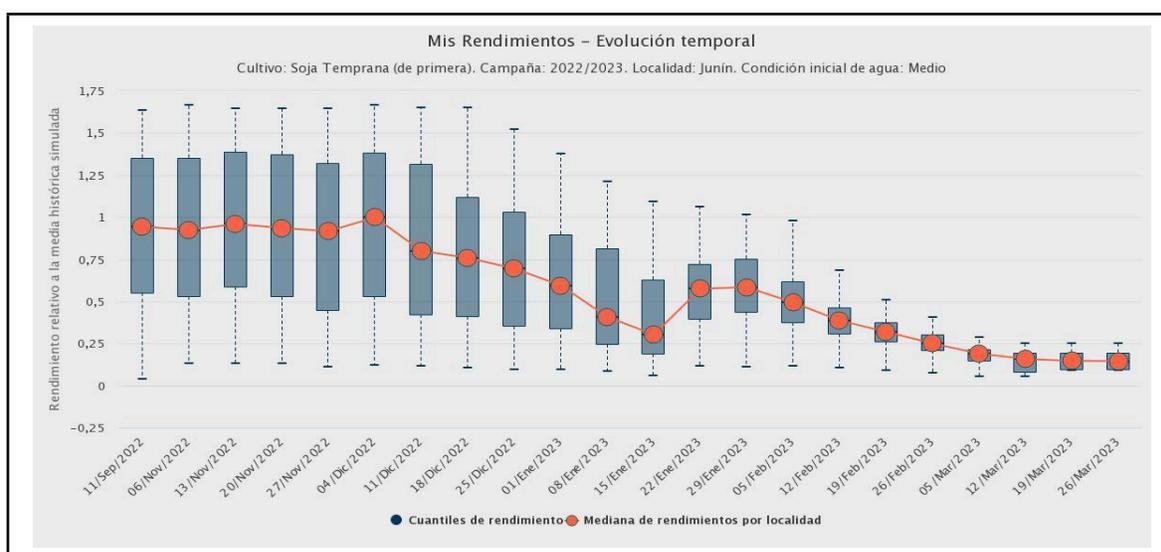
Para pronosticar un rendimiento final las series de datos climáticos empleadas deben cubrir el período desde el comienzo de las simulaciones (antes de la siembra) hasta la cosecha de un cultivo; no obstante, a fin de emitir pronósticos durante el ciclo de un cultivo, es necesario construir series híbridas, o sea, que combinan dos componentes: 1) una primera parte, que incluye datos climáticos observados durante la campaña en curso hasta el momento en que se emite un pronóstico, y 2) una segunda parte, que va desde la fecha de emisión del pronóstico hasta el fin del ciclo y que contiene datos correspondientes a un año anterior en el registro histórico. Entonces, con un registro histórico de 50 años (más el ciclo actual) se pueden generar 50 series híbridas (cada una, con la misma probabilidad de ocurrencia) y, en consecuencia, se pueden simular 50 posibles rendimientos finales. La dispersión o variabilidad de los 50 rendimientos simulados refleja la incertidumbre en las condiciones climáticas no experimentadas, es decir, entre el momento del pronóstico y el fin de ciclo del cultivo.

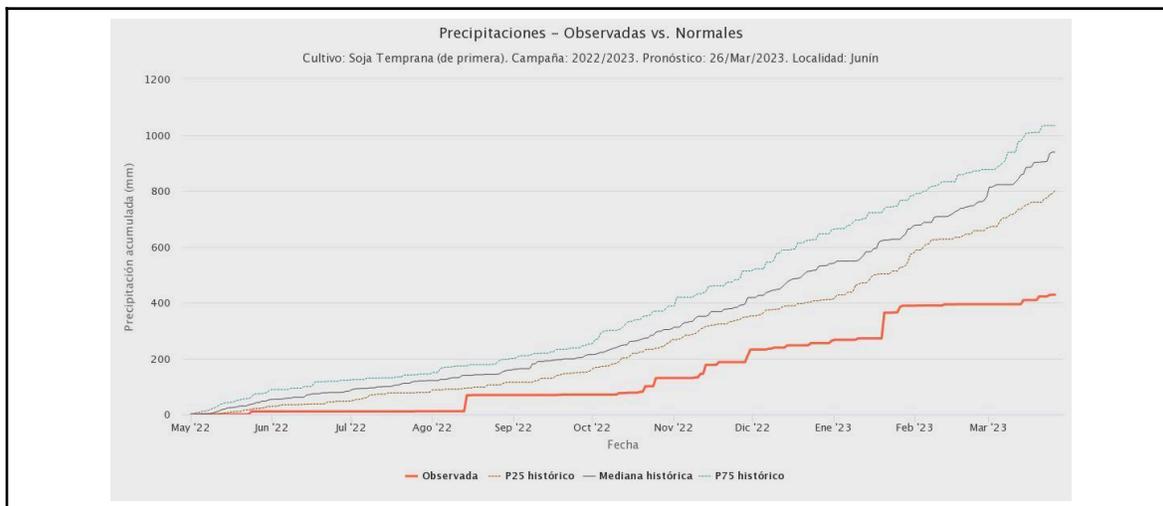
En el panel superior de la figura 21 se muestra una serie de rendimientos simulados semanalmente de la soja de ciclo largo en Junín, provincia de Buenos Aires, Argentina. La

tendencia central (la mediana) de los rendimientos simulados decrece durante todo el ciclo en respuesta a las condiciones de sequía experimentadas por el cultivo. A medida que el ciclo progresa, cada serie híbrida de entrada incluye una proporción cada vez mayor de datos observados en el ciclo actual y menor de datos históricos. En consecuencia, la dispersión o variabilidad de los rendimientos simulados (reflejada por la altura de las cajas y los bigotes) se va reduciendo a medida que avanza el ciclo. Para

explicar el patrón de rendimientos simulados decrecientes, en el panel inferior de la figura 21 se muestran las precipitaciones acumuladas (mediana y percentiles 25 y 75) en la localidad simulada: puede verse que las lluvias acumuladas realmente observadas durante el ciclo 2022-2023 se mantuvieron de forma consistente por debajo del percentil 25 histórico, lo que evidencia la intensa sequía sufrida por la pampa húmeda del centro-este de Argentina, que es evidente también en los diagnósticos de la GEOGLAM y el Explorador de Cultivos examinados anteriormente.

Figura 21. Fila superior: evolución temporal de los rendimientos pronosticados de la soja de ciclo largo en Junín, provincia de Buenos Aires, Argentina, entre septiembre de 2022 y marzo de 2023. Los rendimientos simulados se expresan en relación con la media histórica simulada para cada localidad, tipo de suelo y manejo agronómico (rendimiento = 1.0). La línea y los puntos rojos indican la mediana de todos los rendimientos simulados en cada fecha de pronóstico. Las cajas y bigotes en cada fecha de pronóstico describen la dispersión de los rendimientos simulados: la caja gris contiene el 50 % central de los valores simulados y los bigotes abarcan el rango de las simulaciones. Fila inferior: desviaciones de las precipitaciones acumuladas entre mayo de 2022 (unos meses antes de la siembra) y marzo de 2023 en Junín. La línea gris sólida indica la mediana histórica de la precipitación acumulada y las dos líneas grises punteadas, los percentiles 75 y 25 de la lluvia acumulada. La línea roja representa la precipitación acumulada durante el ciclo de soja 2022-2023, cuando las lluvias fueron muy inferiores al percentil 25, lo que explica los bajos rendimientos alcanzados.





Fuente: Tomado de ProRindes (<https://prorindes.smn.gob.ar/>).

b. Recursos privados

i. Kilimo

Kilimo, una plataforma de gestión del riego creada en Argentina (<https://kilimo.com/>), permite limitar los posibles impactos de una sequía en sistemas irrigados. Combina información meteorológica, satelital y de campo para calcular la cantidad de agua consumida diariamente por un cultivo y llevar un balance hídrico del suelo ajustado y actualizado. Por medio de tecnologías de aprendizaje automático, una datos de distintas fuentes a fin de recomendar un riego óptimo para cada tipo de cultivo, lo que resulta en mejores rendimientos y un uso más eficiente del agua.

Su funcionamiento se basa en datos meteorológicos de estaciones climáticas cercanas a una finca (a una distancia no superior a 15 km, si están disponibles), los cuales permiten estimar la evapotranspiración potencial de cada parcela que requiere riego. A través del análisis de imágenes del NDVI (véase la sección 3.6.1), provenientes de cinco satélites públicos (un

Landsat, dos Sentinel y dos que llevan el sensor MODIS), junto con una red de satélites privados de la constelación PlanetScope (cuyas imágenes son procesadas y mejoradas mediante aprendizaje automático), se establece un coeficiente de cultivo específico para cada zona irrigada. De esta forma se estima la evapotranspiración real de cada lote y, al combinarla con las características del suelo analizadas en el muestreo en el campo, se formulan recomendaciones precisas de cuándo y cuánto regar. Las recomendaciones de riego se envían a los usuarios por medio de la plataforma web o la aplicación móvil de Kilimo. Los usuarios reciben información detallada sobre la conveniencia de regar o no, la cantidad de milímetros u horas de riego necesarios y la frecuencia recomendada de riego.

Kilimo monitorea más de 44 cultivos en Argentina, Brasil, Chile, Guatemala, México y Perú, con un alcance de más de 4000 agricultores, muchos de los cuales son

atendidos a través de colaboraciones con ONG, cooperativas o exportadores que agrupan productores. La plataforma es completamente digital y no requiere la

instalación de hardware en el campo. Su modelo de negocios original se fundamenta en una suscripción anual paga por el servicio. El costo de la suscripción varía según la superficie bajo riego y el tipo de cultivo.

ii. Ecodrip

Ecodrip, una solución digital desarrollada en Argentina (<https://www.ecodrip.com.ar/>), se especializa en la gestión del riego y el uso eficiente del agua en la agricultura. Su software utiliza información meteorológica, imágenes satelitales del NDVI y análisis de macrodatos para ofrecer un control preciso de la humedad de cada lote de cultivo, a fin de lograr rendimientos más altos y contribuir a un uso más económico y racional del agua. Aunque fue diseñada para el monitoreo del riego, también se puede emplear en el seguimiento del contenido hídrico (monitoreo de sequías) en parcelas que carecen de sistemas de riego.

De un modo similar a Kilimo (sección 7.2.1), Ecodrip realiza un balance hídrico mediante la combinación de la información proveniente de estaciones meteorológicas de los clientes o ubicadas en las cercanías con imágenes satelitales del NDVI, generadas con datos de los satélites

Sentinel-2 y Landsat-7 y 8, sensores de HS e información proporcionada por los propios usuarios, como un análisis del suelo con sus constantes hídricas y la humedad inicial. A partir de estos datos, un algoritmo determina el momento de regar y la cantidad de agua requerida, dependiendo del tipo de cultivo y su estado actual, definido por medio de la medición en tiempo real de la humedad en cada lote.

Los usuarios pueden acceder al balance hídrico y al historial de riego de sus cultivos a través de la aplicación móvil EcoApp, que brinda recomendaciones de riego personalizadas mediante planes basados en la superficie de la parcela por ser monitoreada; un ejemplo de ello se presenta en la figura 22. El costo de la suscripción al servicio (anual o por campaña agrícola) depende de la cantidad de hectáreas cubiertas y el tipo de cultivo: intensivo o extensivo. En la actualidad esta solución cubre más de 8000 ha en Argentina.

Figura 22. Planificación del riego en la aplicación móvil EcoApp de Ecodrip, según el contenido hídrico y el seguimiento del umbral mínimo definido para un cultivo.

Planificación de Riego

Calcular

DDS	Fecha	Lluvias	Riegos	Ag.Ut.	%Disp.
102	21/11/2021	0,00	0,00	65 mm	49 %
103	22/11/2021	0,00	0,00	64 mm	49 %
104	23/11/2021	0,00	0,00	63 mm	48 %
105	24/11/2021	0,00	0,00	62 mm	47 %
106	25/11/2021	0,00	0,00	62 mm	47 %
107	26/11/2021	0,00	0,00	61 mm	46 %
108	27/11/2021	0,00	0,00	61 mm	46 %
109	28/11/2021	0,00	0,00	61 mm	46 %

Valores Actuales:

AU Disponible: 65 mm
(49 %)

Valores Calculados:

AU Disponible: 61 mm
(46 %)



Fuente: Fuente: Imagen compartida por Ecodrip.

iii. Auravant

Auravant (<https://www.auravant.com/>) es una plataforma de registro y análisis de información agronómica para una gestión precisa de los procesos agrícolas. Al igual que las soluciones mencionadas previamente, integra diversas fuentes de datos ambientales como imágenes satelitales, mapas de rendimiento y de suelo, pronósticos y registros de lluvias, datos de sensores de suelo y estaciones meteorológicas.

Ofrece diversas herramientas para el análisis y seguimiento de los cultivos. El mapa

base utilizado es el Bing Aerial with Labels²⁰, a partir del cual la plataforma posibilita la creación de parcelas para luego analizar variables como la HS y la temperatura, a fin de generar alarmas, si los datos superan los umbrales establecidos. Las imágenes satelitales de Copernicus Sentinel-2A y 2B (<https://www.copernicus.eu/es/sobre-copernicus/infraestructura/estos-son-nuestros-satelite-s>), junto con las imágenes de alta definición (AD) de 3 m/píxel, proporcionadas en tiempo real por la constelación PlanetScope, facilitan el seguimiento preciso de los cultivos por

²⁰ Este mapa de Bing Maps de Microsoft combina imágenes aéreas con etiquetas e información geográfica (<http://br.bing.com/maps/>).

medio de distintos índices de vegetación (en las figuras 23 y 24 se muestran algunos ejemplos). Esto permite generar mapas de áreas productivas, detectar adversidades como focos de malezas, delimitar con precisión zonas anegadas debido a eventos climáticos y analizar ensayos de fertilización, entre otras aplicaciones. Además, la herramienta incluye un componente climático que proporciona información sobre condiciones meteorológicas actuales y pronosticadas para los próximos 10 días correspondientes a cada parcela marcada, lo que permite anticiparse a eventos climáticos y planificar tareas agrícolas de manera eficiente²¹.

Los usuarios de Auravant tienen acceso a sus herramientas a través de una aplicación móvil y una plataforma web. Pueden optar por un paquete gratuito, con una limitación de hasta 1000 ha, o por versiones pagas que ofrecen diferentes planes: Gestión, Profesional, Profesional Full y Profesional Gold, que incluyen una serie de funciones y ventajas adicionales, tales como:

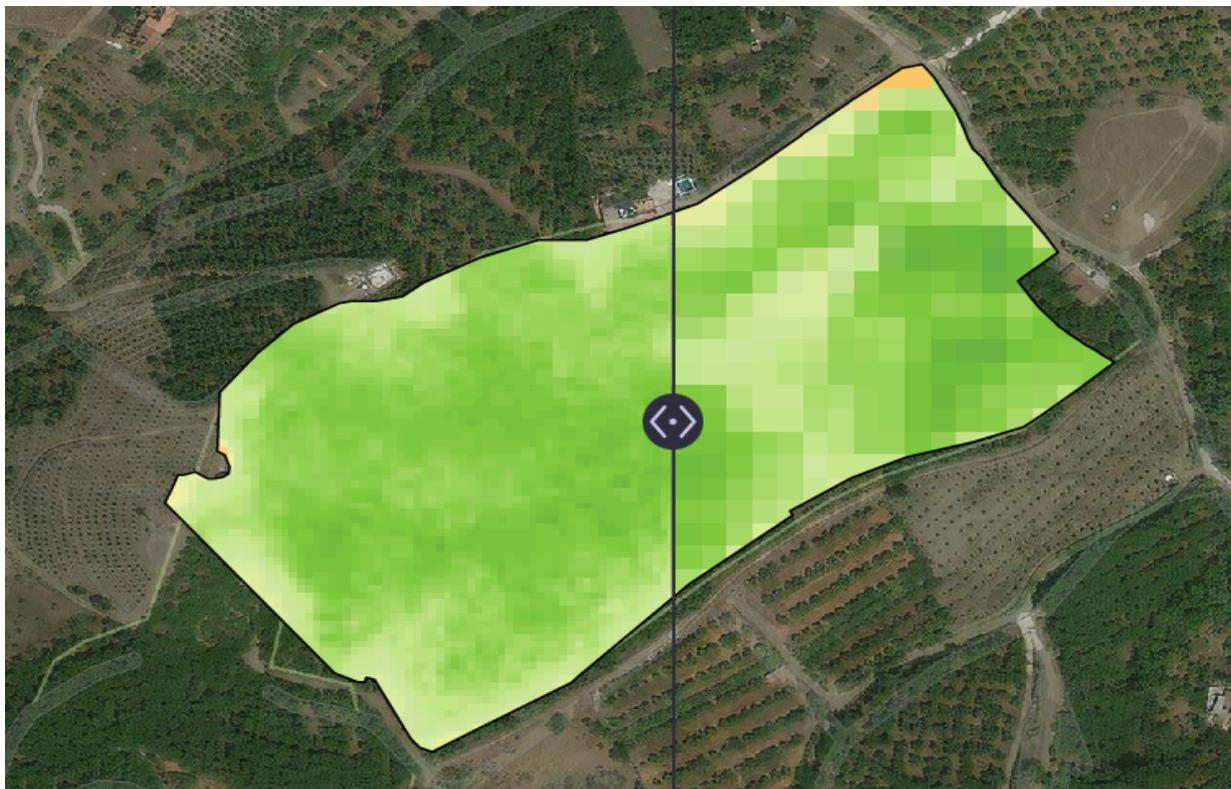
- Imágenes satelitales en AD: 3 m x 3 m por pixel (9 m²);
- Visualización y descarga de mapas y diagnósticos sobre la evolución del cultivo;
- Integración de sensores en la plataforma;
- Planificación de campañas y exportación de datos;
- Monitoreo sin conexión desde la aplicación móvil;

- Generación de reportes automáticos;
- Soporte personalizado; y
- Capacitación sobre la plataforma.

Este recurso cuenta con una amplia base de usuarios. Mediante él se atiende a más de 100 000 personas en más de 130 países y se cubre una extensión agrícola que supera los 13 000 000 ha. Para obtener más información, ingrese en: <https://www.auravant.com/>.

²¹ El componente climático permite al usuario visualizar un pronóstico de la temperatura, el viento y las precipitaciones para los próximos 10 días, además de acceder a un registro de precipitaciones históricas, que incluye las lluvias de la campaña actual y un promedio histórico de la finca. La plataforma permite la integración con herramientas de proveedores climáticos externos y con estaciones meteorológicas o sondas de humedad de los usuarios.

Figura 23. Diferencias entre la resolución de las imágenes satelitales de definición estándar (10 m x 10 m) a la derecha y la resolución de AD (3 m x 3 m) a la izquierda, disponible en los planes pagos de Auravant.



Fuente: Tomado de Auravant (<https://www.auravant.com/ayuda-es/imagenes-indices-y-capas/5204016-imagenes-satelitales-en-alta-definicion-hd/>).

Figura 24. Ejemplos de los diferentes índices de vegetación disponibles en la plataforma Auravant. El menú de la aplicación permite acceder al NDVI y a los índices de vegetación de diferencia normalizada verde, de vegetación ajustado al suelo modificado y de diferencia normalizada de borde rojo. Además, se puede ver la imagen satelital cruda RGB.



Fuente: Tomado de Auravant (<https://www.auravant.com/ayuda-es/imagenes-indices-y-capas/5964005-visualizacion-de-imagenes/>).

iv. Recursos digitales en desarrollo o planificados

Esta sección es diferente de las anteriores, ya que incluye dos recursos digitales que no presentan ni el mismo grado de madurez ni la disponibilidad amplia de los descritos anteriormente; sin embargo, tienen algunas características que justifican su

inclusión: o se dirigen a satisfacer necesidades identificadas en el informe, como la evaluación directa de los impactos de una sequía, o intentan aportar instrumentos como seguros paramétricos para reducir los posibles impactos económicos de una sequía.

1. Proyecto Monitoreo Satelital de Cantidad y Calidad de Biomasa Disponible en Sistemas Ganaderos Pastoriles de ALC

Aunque el proyecto intitulado Monitoreo Satelital de Cantidad y Calidad de Biomasa Disponible en Sistemas Ganaderos Pastoriles de ALC está en sus fases iniciales de desarrollo, constituye uno de los pocos recursos digitales diseñados para contribuir a la estimación cuantitativa de los impactos de una sequía (en este caso, la cantidad y calidad de forraje) y al uso de esta información para

reducir sus riesgos e impactos. Esta iniciativa público-privada cuenta con el financiamiento del Fondo Regional de Tecnología Agropecuaria y del Ministerio de Industrias Primarias de Nueva Zelanda.

El objetivo de las herramientas a ser desarrolladas por este proyecto es facilitar una gestión más eficiente de los recursos

forrajeros, por medio de la cuantificación de los impactos de las sequías sobre la producción de pasto. En el proyecto se propone el uso de imágenes satelitales para estimar en tiempo casi real la cantidad y calidad del forraje en pasturas y pastizales de Argentina, Colombia, Costa Rica y Uruguay. Se calibrarán modelos predictivos en los cuales se utilizará información derivada de sensores satelitales para estimar la producción de

biomasa de forraje a lo largo del tiempo, a través de la identificación de variaciones relacionadas con amenazas climáticas como la sequía. Con esta información, los productores podrán ajustar sus decisiones y adoptar prácticas de manejo para conservar alimento durante períodos de escasez. Se puede encontrar más información sobre el proyecto en <https://www.fontagro.org/new/proyectos/monitoreosatelital/es>.

2. *Suyana*

La solución digital Suyana, creada en Bolivia, Chile y Estados Unidos (<https://suyana.finance/>), se incluye en este informe por dos motivos. En primer lugar, constituye uno de los pocos recursos digitales que proponen facilitar el uso de los seguros paramétricos o “de índice” de costo asequible para transferir los riesgos de amenazas hidroclimáticas como la sequía. La segunda razón es que, luego de un diálogo entre algunos miembros del personal del IICA y los responsables de Suyana, se determinaron claramente las dificultades concretas que supone la implementación operativa de este tipo de instrumentos financieros.

Este recurso tiene como objetivo entender y evaluar los riesgos climáticos a los que se exponen los agricultores para ofrecerles seguros que no requieran verificación directa de posibles impactos, a fin de proteger los resultados económicos de los cultivos frente a los impactos de la sequía y las inundaciones. Un elemento previo imprescindible para el desarrollo de estos seguros es establecer la relación entre las condiciones climáticas (caracterizadas mediante los valores de diferentes indicadores de sequía, p. ej.) y los rendimientos de los cultivos por ser cubiertos.

Aunque durante el diálogo con los funcionarios del Instituto el personal de Suyana manifestó tener experiencia en la integración y el análisis de información climática y ambiental proveniente de diversas fuentes, la principal dificultad que encontraron fue obtener datos confiables y abundantes sobre los rendimientos de los cultivos por ser cubiertos por los seguros paramétricos. La indisponibilidad de datos climáticos se señaló como otro factor limitante, pero en menor medida. Como ya se discutió en este informe, la escasa disponibilidad de datos consistentes y con buena cobertura espacial y temporal acerca de los impactos constituye una barrera importante para desarrollar pronósticos de los efectos esperables de una sequía y diseñar herramientas financieras para la gestión de sus riesgos. Como resultado de las dificultades para la compilación de datos sobre impactos agrícolas, Suyana ha decidido redirigir momentáneamente sus esfuerzos a la gestión de riesgos de amenazas menos complejas que las sequías, como inundaciones o eventos extremos de tiempo, mientras exploran alternativas para enfrentar las limitaciones encontradas.



8. Recursos digitales de preparación para la sequía

Los recursos digitales disponibles para respaldar el proceso de preparación y planificación previo a la sequía discutidos en esta sección no son ni aplicaciones ni sitios web, como los enumerados en secciones anteriores de este informe. Se trata fundamentalmente de 1) guías para facilitar el desarrollo de planes nacionales de sequía y 2) ejemplos de planes de sequía elaborados por diferentes países.

Para facilitar la preparación de planes de sequía se ha propuesto un proceso de 10 pasos (WMO & GWP 2014). Desarrollado originalmente en los noventa por el Dr. Donald Wilhite del NDMC para contribuir a esta planificación en los Estados Unidos (donde la gran mayoría de los estados ya disponen de planes de sequía), este esquema ya ha sido ampliamente utilizado en muchos lugares del mundo. Los países pueden adaptar los 10 pasos para reflejar su propio contexto institucional, infraestructural, legal, socioeconómico y ambiental. Un recurso muy útil para guiar este proceso es la publicación intitulada Directrices de política nacional para la gestión de sequías: modelo para la adopción de medidas, disponible en la biblioteca digital del IDMP (https://www.droughtmanagement.info/literature/GWP-WMO_IDMP_NDMPG_2014_es.pdf).

La CNULD ha apoyado a muchos países en el diseño de planes nacionales de sequía. A tal fin, se desarrolló el Marco de políticas de resiliencia, adaptación y gestión de la sequía (DRAMP), que permite aprovechar la organización y los instrumentos disponibles en un país para delinear y estructurar su plan de gestión del riesgo de sequías. Un documento en el que se describe en detalle el DRAMP se puede descargar de <https://www.unccd.int/resources/publications/drought-resilience-adaptation-and-management-policy-dramp-framework>. Además, por

medio de la CNULD se ha financiado el diseño de planes de sequía en el ámbito nacional: más de 70 países han participado en este proceso y ya se han publicado 34 planes nacionales de sequía para compartir buenas prácticas y promover el aprendizaje mutuo entre las naciones. Estos documentos están disponibles en <https://www.unccd.int/land-and-life/drought/drought-planning#>.

Por último, la FAO ha publicado la Guía práctica para la formulación de planes de alerta y acción temprana ante la sequía agrícola (Fuganti et al. 2020), que contiene sugerencias específicas para desarrollar un plan nacional de sequía. Este documento contiene sugerencias concretas, propone una estructura para un plan y lista las posibles fases por completar durante el proceso de planificación.

9. Referencias

- Abbaszadeh, P; Moradkhani, H; Gavahi, K; Kumar, S; Hain, C; Zhan, X; Duan, Q; Peters-Lidard, C; Karimiziarani, S. 2021. High-Resolution SMAP Satellite Soil Moisture Product: Exploring the Opportunities. *Bulletin of the American Meteorological Society* 102(4): 309-315.
- Aceituno, P. 1988. On the functioning of the Southern Oscillation in the South American sector. Part I: Surface climate. *Monthly Weather Review* 116: 505-524.
- AghaKouchak, A. 2014. A baseline probabilistic drought forecasting framework using standardized soil moisture index: application to the 2012 United States drought. *Hydrology and Earth System Sciences* 18(7): 2485-2492.
- AghaKouchak, A; Cheng, L; Mazdiyasni, O; Farahmand, A. 2014. Global warming and changes in risk of concurrent climate extremes: Insights from the 2014 California drought. *Geophysical Research Letters* 41(24): 8847-8852.
- AghaKouchak, A; Chiang, F; Huning, LS; Love, CA; Mallakpour, I; Mazdiyasni, O; Moftakhari, H; Papalexioiu, SM; Ragno, E; Sadegh, M. 2020. Climate Extremes and Compound Hazards in a Warming World. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 48(1): 519-548.
- Anderson, DLT. 2008. Overview of seasonal forecasting. *In* Troccoli, A; Harrison, M; Anderson, DLT y Mason, SJ (eds.), *Seasonal Climate: Forecasting and Managing Risk*. NATO Science Series: IV: Earth and Environmental Sciences. Springer, Dordrecht, p. 47-68.
- Anderson, MC; Hain, C; Wardlow, B; Pimstein, A; Mecikalski, JR; Kustas, WP. 2011. Evaluation of Drought Indices Based on Thermal Remote Sensing of Evapotranspiration over the Continental United States. *Journal of Climate* 24(8): 2025-2044.
- Anderson, MC; Hain, C; Otkin, J; Zhan, X; Mo, K; Svoboda, M; Wardlow, B; Pimstein, A. 2013. An Intercomparison of Drought Indicators Based on Thermal Remote Sensing and NLDAS-2 Simulations with U.S. Drought Monitor Classifications. *Journal of Hydrometeorology* 14(4): 1035-1056.
- Anderson, MC; Zolin, CA; Sentelhas, PC; Hain, CR; Semmens, K; Tugrul Yilmaz, M; Gao, F; Otkin, JA; Tetrault, R. 2016. The Evaporative Stress Index as an indicator of agricultural drought in Brazil: An assessment based on crop yield impacts. *Remote Sensing of Environment* 174: 82-99.
- Anderson, W; Seager, R; Baethgen, W; Cane, M. 2017. Life cycles of agriculturally relevant ENSO teleconnections in North and South America. *International Journal of Climatology* 37(8): 3297-3318.
- Anderson, W; Baethgen, W; Capitanio, F; Ciais, P; Cook, BI; Cunha, CGRd; Goddard, L; Schauburger, B; Sonder, K; Podestá, G; van der Velde, M; You, L. 2023. Climate variability and simultaneous breadbasket yield shocks as observed in long-term yield records. *Agricultural and Forest Meteorology* 331: 109321.
- Ault, TR. 2020. On the essentials of drought in a changing climate. *Science* 368(6488): 256-260.
- Bachmair, S; Kohn, I; Stahl, K. 2015. Exploring the link between drought indicators and impacts. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 15(6): 1381-1397.
- Bachmair, S; Stahl, K; Collins, K; Hannaford, J; Acreman, M; Svoboda, M; Knutson, C; Smith, KH; Wall, N; Fuchs, B; Crossman, ND; Overton, IC. 2016a. Drought indicators revisited: the need for a wider consideration of environment and society. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water* 3(4): 516-536.
- Bachmair, S; Svensson, C; Hannaford, J; Barker, LJ; Stahl, K. 2016b. A quantitative analysis to objectively appraise drought indicators and model drought impacts. *Hydrology*

- and Earth System Sciences 20(7): 2589-2609.
- Bachmair, S; Svensson, C; Prosdocimi, I; Hannaford, J; Stahl, K. 2017. Developing drought impact functions for drought risk management. *Natural Hazards and Earth System Sciences Discussion 2017*: 1-22.
- Bachmair, S; Tanguy, M; Hannaford, J; Stahl, K. 2018. How well do meteorological indicators represent agricultural and forest drought across Europe? *Environmental Research Letters* 13(3): 034042.
- Bajgain, R; Xiao, X; Wagle, P; Basara, J; Zhou, Y. 2015. Sensitivity analysis of vegetation indices to drought over two tallgrass prairie sites. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 108: 151-160.
- Barnston, AG; Tippett, MK; van den Dool, HM; Unger, DA. 2015. Toward an Improved Multimodel ENSO Prediction. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 54(7): 1579-1595.
- Barreiro, M. 2010. Influence of ENSO and the South Atlantic Ocean on climate predictability over Southeastern South America. *Climate Dynamics* 35(7): 1493-1508.
- Bartalis, Z; Wagner, W; Naeimi, V; Hasenauer, S; Scipal, K; Bonekamp, H; Figa, J; Anderson, C. 2007. Initial soil moisture retrievals from the METOP-A Advanced Scatterometer (ASCAT). *Geophysical Research Letters* 34(20).
- Beck, HE; Vergopolan, N; Pan, M; Levizzani, V; van Dijk, AIJM; Weedon, GP; Brocca, L; Pappenberger, F; Huffman, GJ; Wood, EF. 2020. Global-Scale Evaluation of 22 Precipitation Datasets Using Gauge Observations and Hydrological Modeling. *In* Levizzani, V; Kidd, C; Kirschbaum, DB; Kummerow, CD; Nakamura, K y Turk, FJ (eds.), *Satellite Precipitation Measurement: Volume 2*. Springer International Publishing, Cham, p. 625-653.
- Becker-Reshef, I; Barker, B; Humber, M; Puricelli, E; Sanchez, A; Sahajpal, R; McGaughey, K; Justice, C; Baruth, B; Wu, B; Prakash, A; Abdolreza, A; Jarvis, I. 2019. The GEOGLAM crop monitor for AMIS: Assessing crop conditions in the context of global markets. *Global Food Security* 23: 173-181.
- Becker-Reshef, I; Justice, C; Barker, B; Humber, M; Rembold, F; Bonifacio, R; Zappacosta, M; Budde, M; Magadzire, T; Shitote, C; Pound, J; Constantino, A; Nakalembe, C; Mwangi, K; Sobue, S; Newby, T; Whitcraft, A; Jarvis, I; Verdin, J. 2020. Strengthening agricultural decisions in countries at risk of food insecurity: The GEOGLAM Crop Monitor for Early Warning. *Remote Sensing of Environment* 237: 111553.
- Beguería, S; Vicente-Serrano, SM; Reig, F; Latorre, B. 2013. Standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) revisited: parameter fitting, evapotranspiration models, tools, datasets and drought monitoring. *International Journal of Climatology* 34: 3001-3023.
- Belayneh, A; Adamowski, J; Khalil, B; Quilty, J. 2016. Coupling machine learning methods with wavelet transforms and the bootstrap and boosting ensemble approaches for drought prediction. *Atmospheric Research* 172-173: 37-47.
- Bohnenstengel, SI; Schlünzen, KH; Beyrich, F. 2011. Representativity of in situ precipitation measurements – A case study for the LITFASS area in North-Eastern Germany. *Journal of Hydrology* 400(3): 387-395.
- Boult, VL; Black, E; Saado Abdillahi, H; Bailey, M; Harris, C; Kilavi, M; Kniveton, D; MacLeod, D; Mwangi, E; Otieno, G; Rees, E; Rowhani, P; Taylor, O; Todd, MC. 2022. Towards drought impact-based forecasting in a multi-hazard context. *Climate Risk Management* 35: 100402.
- Brasseur, GP; Gallardo, L. 2016. Climate services: Lessons learned and future prospects. *Earth's Future* 4(3): 79-89.
- Brocca, L; Filippucci, P; Hahn, S; Ciabatta, L; Massari, C; Camici, S; Schüller, L; Bojkov, B; Wagner, W. 2019. SM2RAIN-ASCAT (2007–2018): global daily satellite rainfall data from ASCAT soil moisture observations. *Earth System Science Data* 11(4): 1583-1601.
- Brocca, L; Zhao, W; Lu, H. 2023. High-resolution observations from space to address new applications in hydrology. *The Innovation* 4(3): 100437.
- Bruno Soares, M; Alexander, M; Dessai, S. 2018. Sectoral use of climate information in

- Europe: A synoptic overview. *Climate Services* 9: 5-20.
- Buytaert, W; Celleri, R; Willems, P; Bièvre, BD; Wyseure, G. 2006. Spatial and temporal rainfall variability in mountainous areas: A case study from the south Ecuadorian Andes. *Journal of Hydrology* 329(3): 413-421.
- Buytaert, W; Zulkafli, Z; Grainger, S; Acosta, L; Bastiaensen, J; De Bièvre, B; Bhusal, J; Chanie, T; Clark, J; Dewulf, A; Foggin, M; Hannah, DM; Hergarten, C; Isaeva, A; Karpouzoglou, T; Pandey, B; Paudel, D; Sharma, K; Steenhuis, T; Tilahun, S; Van Hecken, G; Zhumanova, M. 2014. Citizen science in hydrology and water resources: opportunities for knowledge generation, ecosystem service management, and sustainable development. *Frontiers in Earth Science* 2.
- Cai, W; McPhaden, MJ; Grimm, AM; Rodrigues, RR; Taschetto, AS; Garreaud, RD; Dewitte, B; Poveda, G; Ham, Y-G; Santoso, A; Ng, B; Anderson, W; Wang, G; Geng, T; Jo, H-S; Marengo, JA; Alves, LM; Osman, M; Li, S; Wu, L; Karamperidou, C; Takahashi, K; Vera, C. 2020. Climate impacts of the El Niño–Southern Oscillation on South America. *Nature Reviews Earth & Environment* 1(4): 215-231.
- Cammalleri, C; McCormick, N; Toreti, A. 2022. Analysis of the relationship between yield in cereals and remotely sensed fAPAR in the framework of monitoring drought impacts in Europe. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 22(11): 3737-3750.
- Carrão, H; Naumann, G; Barbosa, P. 2016. Mapping global patterns of drought risk: An empirical framework based on sub-national estimates of hazard, exposure and vulnerability. *Global Environmental Change* 39: 108-124.
- Carrão, H; Naumann, G; Dutra, E; Lavaysse, C; Barbosa, P. 2018. Seasonal Drought Forecasting for Latin America Using the ECMWF S4 Forecast System. *Climate* 6(2): 48.
- Carvalho, MÂ; Uliana, EM; Silva, DD; Aires, UR; Martins, CA; Sousa Junior, MF; Cruz, IF; Mendes, MA. 2020. Drought Monitoring Based on Remote Sensing in a Grain-Producing Region in the Cerrado–Amazon Transition, Brazil. *Water* 12(12).
- Christian, JI; Basara, JB; Hunt, ED; Otkin, JA; Furtado, JC; Mishra, V; Xiao, X; Randall, RM. 2021. Global distribution, trends, and drivers of flash drought occurrence. *Nature Communications* 12(1): 6330.
- Christian, JI; Martin, ER; Basara, JB; Furtado, JC; Otkin, JA; Lowman, LEL; Hunt, ED; Mishra, V; Xiao, X. 2023. Global projections of flash drought show increased risk in a warming climate. *Communications Earth & Environment* 4(1): 165.
- Colliander, A; Reichle, RH; Crow, WT; Cosh, MH; Chen, F; Chan, S; Das, NN; Bindlish, R; Chaubell, J; Kim, S; Liu, Q; Neill, PEO; Dunbar, RS; Dang, LB; Kimball, JS; Jackson, TJ; Al-Jassar, HK; Asanuma, J; Bhattacharya, BK; Berg, AA; Bosch, DD; Bourgeau-Chavez, L; Caldwell, T; Calvet, JC; Collins, CH; Jensen, KH; Livingston, S; Lopez-Baeza, E; Martínez-Fernández, J; McNairn, H; Moghaddam, M; Montzka, C; Notarnicola, C; Pellarin, T; Greimeister-Pfeil, I; Pulliainen, J; Hernández, JGR; Seyfried, M; Starks, PJ; Su, Z; Velde, Rvd; Zeng, Y; Thibeault, M; Vreugdenhil, M; Walker, JP; Zribi, M; Entekhabi, D; Yueh, SH. 2022. Validation of Soil Moisture Data Products From the NASA SMAP Mission. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing* 15: 364-392.
- Cools, J; Mishra, A; Verbist, K. 2023. Best practices on flood and drought risk management. UNESCO, Paris, France.
- Crossman, ND. 2019. Drought resilience, adaptation and management policy framework: supporting technical guidelines. United Nations Convention to Combat Desertification, Bonn, Germany.
- Cruz, G; Baethgen, W; Bartaburu, D; Bidegain, M; Giménez, A; Methol, M; Morales, H; Picasso, V; Podestá, G; Taddei, R; Terra, R; Tiscornia, G; Vinocur, M. 2018. Thirty Years of Multilevel Processes for Adaptation of Livestock Production to Droughts in Uruguay. *Weather, Climate, and Society* 10(1): 59-74.

- Dai, A. 2013. Increasing drought under global warming in observations and models. *Nature Climate Change* 3(1): 52-58.
- de Medeiros, FJ; Gomes, RdS; Coutinho, MDL; Lima, KC. 2022. Meteorological droughts and water resources: Historical and future perspectives for Rio Grande do Norte state, Northeast Brazil. *International Journal of Climatology* 42(13): 6976-6995.
- DeJonge, KC; Thorp, KR; Marek, GW. 2020. The apples and oranges of reference and potential evapotranspiration: Implications for agroecosystem models. *Agricultural & Environmental Letters* 5(1): e20011.
- Delgado-Torres, C; Donat, MG; Gonzalez-Reviriego, N; Caron, L-P; Athanasiadis, PJ; Bretonnière, P-A; Dunstone, NJ; Ho, A-C; Nicoli, D; Pankatz, K; Paxian, A; Pérez-Zanón, N; Cabré, MS; Solaraju-Murali, B; Soret, A; Doblas-Reyes, FJ. 2022. Multi-Model Forecast Quality Assessment of CMIP6 Decadal Predictions. *Journal of Climate* 35(13): 4363-4382.
- Doblas-Reyes, FJ; García-Serrano, J; Lienert, F; Biescas, AP; Rodrigues, LRL. 2013. Seasonal climate predictability and forecasting: status and prospects. *WIREs Climate Change* 4(4): 245-268.
- Drumond, A; Stojanovic, M; Nieto, R; Gimeno, L; Liberato, MLR; Pauliquevis, T; Oliveira, M; Ambrizzi, T. 2021. Dry and Wet Climate Periods over Eastern South America: Identification and Characterization through the SPEI Index, *Atmosphere*.
- Duel, H; Wolters, H; Timboe, I; ter Maat, J; Matthews, J. 2022. Principles for Drought Risk Management under a Changing Climate.
- Catalysing actions for enhancing climate resilience., High-level Experts and Leaders Panel on Water and Disasters (HELP).
- Dutra, E; Pozzi, W; Wetterhall, F; Di Giuseppe, F; Magnusson, L; Naumann, G; Barbosa, P; Vogt, J; Pappenberger, F. 2014. Global meteorological drought – Part 2: Seasonal forecasts. *Hydrology and Earth System Sciences* 18(7): 2669-2678.
- Enenkel, M; Osgood, D; Anderson, M; Powell, B; McCarty, J; Neigh, C; Carroll, M; Wooten, M; Husak, G; Hain, C; Brown, M. 2019. Exploiting the Convergence of Evidence in Satellite Data for Advanced Weather Index Insurance Design. *Weather, Climate, and Society* 11(1): 65-93.
- Eswar, R; Das, N; Poulsen, C; Behrangi, A; Swigart, J; Svoboda, M; Entekhabi, D; Yueh, S; Doorn, B; Entin, J. 2018. SMAP Soil Moisture Change as an Indicator of Drought Conditions. *Remote Sensing* 10(5): 788.
- FAO. 2019. Proactive approaches to drought preparedness – Where are we now and where do we go from here?, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy.
- FAO. 2021. Global outlook on climate services in agriculture – Investment opportunities to reach the last mile. Food and Agriculture Organization, Rome.
- Fatholouloumi, S; Karimi Firozjaei, M; Biswas, A. 2022. Improving spatial resolution of satellite soil water index (SWI) maps under clear-sky conditions using a machine learning approach. *Journal of Hydrology* 615: 128709.
- Feldman, AF; Short Gianotti, DJ; Dong, J; Akbar, R; Crow, WT; McColl, KA; Konings, AG; Nippert, JB; Tumber-Dávila, SJ; Holbrook, NM; Rockwell, FE; Scott, RL; Reichle, RH; Chatterjee, A; Joiner, J; Poulter, B; Entekhabi, D. 2023. Remotely Sensed Soil Moisture Can Capture Dynamics Relevant to Plant Water Uptake. *Water Resources Research* 59(2): e2022WR033814.
- Fernández Long, ME; Spescha, L; Barnatán, I; Murphy, G. 2012. Modelo de Balance Hidrológico Operativo para el agro (BHOA). *Agronomía & Ambiente, Revista de la Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires* 32(1-2): 31-47.
- Fuganti, G; Minelli, M; Rojas, Ó. 2020. Guía práctica para la formulación de planes de alerta y acción temprana ante la sequía agrícola. 978-92-5-133160-6, FAO, Ciudad de Panamá.
- Funk, C; Peterson, P; Landsfeld, M; Pedreros, D; Verdin, J; Shukla, S; Husak, G; Rowland, J; Harrison, L; Hoell, A; Michaelsen, J. 2015. The climate hazards infrared precipitation with stations—a new environmental record for monitoring extremes. *Scientific Data* 2: 150066.
- Garreaud, RD; Boisier, JP; Rondanelli, R; Montecinos, A; Sepúlveda, HH; Veloso-Aguila, D. 2020. The Central Chile

- Mega Drought (2010–2018): A climate dynamics perspective. *International Journal of Climatology* 40(1): 421-439.
- Gaupp, F; Hall, J; Mitchell, D; Dadson, S. 2019. Increasing risks of multiple breadbasket failure under 1.5 and 2 °C global warming. *Agricultural Systems* 175: 34-45.
- Gaupp, F; Hall, J; Hochrainer-Stigler, S; Dadson, S. 2020. Changing risks of simultaneous global breadbasket failure. *Nature Climate Change* 10(1): 54-57.
- Geirinhas, JL; Russo, A; Libonati, R; Sousa, PM; Miralles, DG; Trigo, RM. 2021. Recent increasing frequency of compound summer drought and heatwaves in Southeast Brazil. *Environmental Research Letters* 16(3): 034036.
- Ghazaryan, G; Dubovyk, O; Graw, V; Kussul, N; Schellberg, J. 2020a. Local-scale agricultural drought monitoring with satellite-based multi-sensor time-series. *GIScience & Remote Sensing* 57(5): 704-718.
- Ghazaryan, G; König, S; Rezaei, EE; Siebert, S; Dubovyk, O. 2020b. Analysis of Drought Impact on Croplands from Global to Regional Scale: A Remote Sensing Approach. *Remote Sensing* 12(24).
- Godfray, HCJ; Beddington, JR; Crute, IR; Haddad, L; Lawrence, D; Muir, JF; Pretty, J; Robinson, S; Thomas, SM; Toulmin, C. 2010. Food Security: The Challenge of Feeding 9 Billion People. *Science* 327(5967): 812-818.
- Gorelick, N; Hancher, M; Dixon, M; Ilyushchenko, S; Thau, D; Moore, R. 2017. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment* 202: 18-27.
- Grimm, AM; Scortegagna Almeida, A; Assis Beneti, CA; Alvim Leite, E. 2020. The combined effect of climate oscillations in producing extremes: the 2020 drought in southern Brazil. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos / Brazilian Journal of Water Resources* 25: e48.
- Hagenlocher, M; Naumann, G; Meza, I; Blauhut, V; Cotti, D; Döll, P; Ehlert, K; Gaupp, F; Van Loon, AF; Marengo, JA; Rossi, L; Sabino Simons, AS; Siebert, S; Tsehayu, AT; Toreti, A; Tsegai, D; Vera, C; Vogt, J; Wens, M. 2023. Tackling Growing Drought Risks—The Need for a Systemic Perspective. *Earth's Future* 11(9): e2023EF003857.
- Haile, GG; Tang, Q; Li, W; Liu, X; Zhang, X. 2020. Drought: Progress in broadening its understanding. *WIREs Water* 7(2): e1407.
- Hain, CR; Anderson, MC. 2017. Estimating morning change in land surface temperature from MODIS day/night observations: Applications for surface energy balance modeling. *Geophysical Research Letters* 44(19): 9723-9733.
- Hao, Z; AghaKouchak, A. 2013. Multivariate Standardized Drought Index: A parametric multi-index model. *Advances in Water Resources* 57(0): 12-18.
- Hao, Z; Singh, VP. 2015. Drought characterization from a multivariate perspective: A review. *Journal of Hydrology* 527: 668-678.
- Hao, Z; Hao, F; Singh, VP. 2016. A general framework for multivariate multi-index drought prediction based on Multivariate Ensemble Streamflow Prediction (MESP). *Journal of Hydrology* 539: 1-10.
- Hao, Z; Hao, F; Singh, VP; Ouyang, W; Cheng, H. 2017a. An integrated package for drought monitoring, prediction and analysis to aid drought modeling and assessment. *Environmental Modelling & Software* 91: 199-209.
- Hao, Z; Yuan, X; Xia, Y; Hao, F; Singh, VP. 2017b. An Overview of Drought Monitoring and Prediction Systems at Regional and Global Scales. *Bulletin of the American Meteorological Society* 98(9): 1879-1896.
- Hao, Z; Singh, VP; Xia, Y. 2018. Seasonal Drought Prediction: Advances, Challenges, and Future Prospects. *Reviews of Geophysics* 56(1): 108-141.
- Harrison, L; Landsfeld, M; Husak, G; Davenport, F; Shukla, S; Turner, W; Peterson, P; Funk, C. 2022. Advancing early warning capabilities with CHIRPS-compatible NCEP GEFS precipitation forecasts. *Scientific Data* 9(1): 375.
- Hayes, MJ; Svoboda, MD; Wilhite, DA; Vanyarko, OV. 1999. Monitoring the 1996 drought using the standardized precipitation index. *Bulletin of the American Meteorological Society* 80(3): 429-438.
- Hayes, MJ; Svoboda, M; Wall, N; Widhalm, M. 2011. The Lincoln Declaration on Drought Indices: Universal Meteorological Drought

- Index Recommended. Bulletin of the American Meteorological Society 92(4): 485-488.
- Hewitt, CD; Golding, N; Zhang, P; Dunbar, T; Bett, PE; Camp, J; Mitchell, TD; Pope, E. 2020. The Process and Benefits of Developing Prototype Climate Services—Examples in China. *Journal of Meteorological Research* 34(5): 893-903.
- Hoogenboom, G; Jones, JW; Wilkens, PW; Porter, CH; Batchelor, WD; Hunt, LA; Boote, KJ; Singh, U; Uryasev, O; Bowen, WT; Gijsman, AJ; du Toit, A; J., W; Tsuji, GY. 2004. Decision support system for agrotechnology transfer version 4.0. Honolulu, University of Hawaii.
- Hu, X; Eichner, J; Gong, D; Barreiro, M; Kantz, H. 2023. Combined impact of ENSO and Antarctic Oscillation on austral spring precipitation in Southeastern South America (SESA). *Climate Dynamics* 61: 399-412.
- Huete, A; Justice, C; Liu, H. 1994. Development of vegetation and soil indices for MODIS-EOS. *Remote Sensing of Environment* 49(3): 224-234.
- Huete, A; Didan, K; Miura, T; Rodriguez, EP; Gao, X; Ferreira, LG. 2002. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment* 83(1-2): 195-213.
- Huffman, GJ; Bolvin, DT; Braithwaite, D; Hsu, K-L; Joyce, RJ; Kidd, C; Nelkin, EJ; Sorooshian, S; Stocker, EF; Tan, J; Wolff, DB; Xie, P. 2020. Integrated Multi-satellite Retrievals for the Global Precipitation Measurement (GPM) Mission (IMERG). *In* Levizzani, V; Kidd, C; Kirschbaum, DB; Kummerow, CD; Nakamura, K y Turk, FJ (eds.), *Satellite Precipitation Measurement: Volume 1*. Springer, Cham, p. 343-353.
- Johnson, SJ; Stockdale, TN; Ferranti, L; Balmaseda, MA; Molteni, F; Magnusson, L; Tietsche, S; Decremmer, D; Weisheimer, A; Balsamo, G; Keeley, SPE; Mogensen, K; Zuo, H; Monge-Sanz, BM. 2019. SEAS5: the new ECMWF seasonal forecast system. *Geoscientific Model Development* 12(3): 1087-1117.
- Joyce, RJ; Janowiak, JE; Arkin, PA; Xie, P. 2004. CMORPH: A Method that Produces Global Precipitation Estimates from Passive Microwave and Infrared Data at High Spatial and Temporal Resolution. *Journal of Hydrometeorology* 5(3): 487-503.
- Karbasi, M; Jamei, M; Malik, A; Kisi, O; Yaseen, ZM. 2023. Multi-steps drought forecasting in arid and humid climate environments: Development of integrative machine learning model. *Agricultural Water Management* 281: 108210.
- Kidd, C; Levizzani, V; Laviola, S. 2013. Quantitative Precipitation Estimation from Earth Observation Satellites. *In* Testik, FY y Gebremichael, M (eds.), *Rainfall: State of the Science*. Geophysical Monograph Series. American Geophysical Union, Washington, D.C., USA, p. 127-158.
- Kogan, F; Sullivan, J. 1993. Development of global drought-watch system using NOAA/AVHRR data. *Advances in Space Research* 13(5): 219-222.
- Kogan, F; Goldberg, M; Schott, T; Guo, W. 2015. Suomi NPP/VIIRS: improving drought watch, crop loss prediction, and food security. *International Journal of Remote Sensing* 36(21): 5373-5383.
- Kogan, F; Guo, W; Yang, W. 2019. Drought and food security prediction from NOAA new generation of operational satellites. *Geomatics, Natural Hazards and Risk* 10(1): 651-666.
- Kogan, F; Guo, W; Yang, W. 2020. Near 40-year drought trend during 1981-2019 earth warming and food security. *Geomatics, Natural Hazards and Risk* 11(1): 469-490.
- Kubota, T; Shige, S; Hashizume, H; Aonashi, K; Takahashi, N; Seto, S; Hirose, M; Takayabu, YN; Ushio, T; Nakagawa, K; Iwanami, K; Kachi, M; Okamoto, Ki. 2007. Global Precipitation Map Using Satellite-Borne Microwave Radiometers by the GSMaP Project: Production and Validation. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 45(7): 2259-2275.
- Lavaysse, C; Vogt, J; Pappenberger, F. 2015. Early warning of drought in Europe using the monthly ensemble system from ECMWF. *Hydrology and Earth System Sciences* 19(7): 3273-3286.
- Lavaysse, C; Stockdale, T; McCormick, N; Vogt, J. 2020. Evaluation of a New Precipitation-Based Index for Global Seasonal Forecasting of Unusually Wet and

- Dry Periods. *Weather and Forecasting* 35: 1189-1202.
- Libonati, R; Geirinhas, JL; Silva, PS; Russo, A; Rodrigues, JA; Belém, LBC; Nogueira, J; Roque, FO; DaCamara, CC; Nunes, AMB; Marengo, JA; Trigo, RM. 2022. Assessing the role of compound drought and heatwave events on unprecedented 2020 wildfires in the Pantanal. *Environmental Research Letters* 17(1): 015005.
- Lin, J; Qian, T. 2019. A New Picture of the Global Impacts of El Nino-Southern Oscillation. *Scientific Reports* 9(1): 17543.
- Liu, HQ; Huete, A. 1995. A feedback based modification of the NDVI to minimize canopy background and atmospheric noise. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 33(2): 457-465.
- Liu, Q; Yao, F; Garcia-Garcia, A; Zhang, J; Li, J; Ma, S; Li, S; Peng, J. 2023. The response and sensitivity of global vegetation to water stress: A comparison of different satellite-based NDVI products. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 120: 103341.
- Liu, WT; Kogan, FN. 1996. Monitoring regional drought using the Vegetation Condition Index. *International Journal of Remote Sensing* 17(14): 2761-2782.
- Lloyd-Hughes, B; Saunders, MA. 2002. A drought climatology for Europe. *International Journal of Climatology* 22: 1571-1592.
- Lloyd-Hughes, B. 2014. The impracticality of a universal drought definition. *Theoretical and Applied Climatology* 117(3): 607-611.
- Lyon, B; Bell, MA; Tippett, MK; Kumar, A; Hoerling, MP; Quan, X-W; Wang, H. 2012. Baseline Probabilities for the Seasonal Prediction of Meteorological Drought. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 51(7): 1222-1237.
- Madrugá de Brito, M; Kuhlicke, C; Marx, A. 2020. Near-real-time drought impact assessment: a text mining approach on the 2018/19 drought in Germany. *Environmental Research Letters* 15(10): 1040a9.
- Maggioni, V; Meyers, PC; Robinson, MD. 2016. A Review of Merged High-Resolution Satellite Precipitation Product Accuracy during the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) Era. *Journal of Hydrometeorology* 17(4): 1101-1117.
- Marengo, JA; Torres, RR; Alves, LM. 2017. Drought in Northeast Brazil—past, present, and future. *Theoretical and Applied Climatology* 129(3): 1189-1200.
- Marengo, JA; Galdos, MV; Challinor, A; Cunha, AP; Marin, FR; Vianna, MdS; Alvares, RCS; Alves, LM; Moraes, OL; Bender, F. 2022. Drought in Northeast Brazil: A review of agricultural and policy adaptation options for food security. *Climate Resilience and Sustainability* 1(1): e17.
- Massari, C; Brocca, L; Pellarin, T; Abramowitz, G; Filippucci, P; Ciabatta, L; Maggioni, V; Kerr, Y; Fernandez Prieto, D. 2020. A daily 25 km short-latency rainfall product for data-scarce regions based on the integration of the Global Precipitation Measurement mission rainfall and multiple-satellite soil moisture products. *Hydrology and Earth System Sciences*. 24(5): 2687-2710.
- McKee, TB; Doesken, NJ; Kleist, J. 1993. The relationship of drought frequency and duration to time scales, Eighth Conference on Applied Climatology. American Meteorological Society, Anaheim, California, pp. 179-184.
- Meza, FJ. 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.
- Min, X; Li, D; Shangguan, Y; Tian, S; Shi, Z. 2023. Characterizing the accuracy of satellite-based products to detect soil moisture at the global scale. *Geoderma* 432: 116388.
- Mishra, A; Vu, T; Veetil, AV; Entekhabi, D. 2017. Drought monitoring with soil moisture active passive (SMAP) measurements. *Journal of Hydrology* 552(Supplement C): 620-632.
- Mishra, AK; Singh, VP. 2010. A review of drought concepts. *Journal of Hydrology* 391(1-2): 202-216.
- Mohseni, F; Mirmazloumi, SM; Mokhtarzade, M; Jamali, S; Homayouni, S. 2022. Global Evaluation of SMAP/Sentinel-1 Soil Moisture Products. *Remote Sensing* 14(18): 4624.

- Montecinos, A; Díaz, AF; Aceituno, P. 2000. Seasonal diagnostics and predictability of rainfall in subtropical South America based on tropical Pacific SST. *Journal of Climate* 13: 746-758.
- Mukherjee, S; Wang, S; Hirschfeld, D; Lisonbee, J; Gillies, R. 2022. Feasibility of Adding Twitter Data to Aid Drought Depiction: Case Study in Colorado. *Water* 14(18): 2773.
- Nguyen, H; Wheeler, MC; Otkin, JA; Cowan, T; Frost, A; Stone, R. 2019. Using the evaporative stress index to monitor flash drought in Australia. *Environmental Research Letters* 14(6): 064016.
- Nguyen, P; Ombadi, M; Sorooshian, S; Hsu, K; AghaKouchak, A; Braithwaite, D; Ashouri, H; Thorstensen, AR. 2018. The PERSIANN Family of Global Satellite Precipitation Data: A Review and Evaluation of Products. *Hydrology and Earth System Sciences* 22(11): 5801-5816.
- O'Connor, P; Murphy, C; Matthews, T; Wilby, RL. 2023. Relating drought indices to impacts reported in newspaper articles. *International Journal of Climatology* 43(4): 1796-1816.
- Oertel, M; Meza, FJ; Gironás, J. 2020. Observed trends and relationships between ENSO and standardized hydrometeorological drought indices in central Chile. *Hydrological Processes* 34(2): 159-174.
- Otkin, JA; Anderson, MC; Hain, C; Mladenova, IE; Basara, JB; Svoboda, M. 2013. Examining Rapid Onset Drought Development Using the Thermal Infrared-Based Evaporative Stress Index. *Journal of Hydrometeorology* 14(4): 1057-1074.
- Otkin, JA; Anderson, MC; Hain, C; Svoboda, M. 2014. Examining the Relationship between Drought Development and Rapid Changes in the Evaporative Stress Index. *Journal of Hydrometeorology* 15(3): 938-956.
- Otkin, JA; Anderson, MC; Hain, C; Svoboda, M. 2015a. Using Temporal Changes in Drought Indices to Generate Probabilistic Drought Intensification Forecasts. *Journal of Hydrometeorology* 16(1): 88-105.
- Otkin, JA; Shafer, M; Svoboda, M; Wardlow, B; Anderson, MC; Hain, C; Basara, J. 2015b. Facilitating the Use of Drought Early Warning Information through Interactions with Agricultural Stakeholders. *Bulletin of the American Meteorological Society* 96(7): 1073-1078.
- Otto, FEL; Philip, S; Kew, S; Li, S; King, A; Cullen, H. 2018. Attributing high-impact extreme events across timescales—a case study of four different types of events. *Climatic Change* 149(3): 399-412.
- Peng, J; Muller, J-P; Blessing, S; Giering, R; Danne, O; Gobron, N; Kharbouche, S; Ludwig, R; Müller, B; Leng, G; You, Q; Duan, Z; Dadson, S. 2019. Can We Use Satellite-Based FAPAR to Detect Drought? *Sensors* 19(17): 3662.
- Peng, J; Albergel, C; Balenzano, A; Brocca, L; Cartus, O; Cosh, MH; Crow, WT; Dabrowska-Zielinska, K; Dadson, S; Davidson, MWJ; de Rosnay, P; Dorigo, W; Gruber, A; Hagemann, S; Hirschi, M; Kerr, YH; Lovergine, F; Mahecha, MD; Marzahn, P; Mattia, F; Musial, JP; Preusmann, S; Reichle, RH; Satalino, G; Silgram, M; van Bodegom, PM; Verhoest, NEC; Wagner, W; Walker, JP; Wegmüller, U; Loew, A. 2021. A roadmap for high-resolution satellite soil moisture applications – confronting product characteristics with user requirements. *Remote Sensing of Environment* 252: 112162.
- Pieper, P; Düsterhus, A; Baehr, J. 2021. Improving seasonal predictions of meteorological drought by conditioning on ENSO states. *Environmental Research Letters* 16(9): 094027.
- Pinzon, JE; Tucker, CJ. 2014. A Non-Stationary 1981–2012 AVHRR NDVI3g Time Series. *Remote Sensing* 6(8): 6929-6960.
- Potopová, V; Trnka, M; Hamouz, P; Soukup, J; Castraveț, T. 2020. Statistical modelling of drought-related yield losses using soil moisture-vegetation remote sensing and multiscalar indices in the south-eastern Europe. *Agricultural Water Management* 236: 106168.
- Pouyan, S; Bordbar, M; Ravichandran, V; Tiefenbacher, JP; Kherad, M; Pourghasemi, HR. 2023. Spatiotemporal monitoring of droughts in Iran using remote-sensing indices. *Natural Hazards* 117(1): 1-24.
- Poveda, G; Waylen, PR; Pulwarty, RS. 2006. Annual and inter-annual variability of the present climate in northern South America and

- southern Mesoamerica. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 234(1): 3-27.
- Pulwarty, RS; Sivakumar, MVK. 2014. Information systems in a changing climate: Early warnings and drought risk management. *Weather and Climate Extremes* 3(0): 14-21.
- Rassl, A; Michel, D; Hirschi, M; Duguay-Tetzlaff, A; Seneviratne, SI. 2022. Climatological Drought Monitoring in Switzerland Using EUMETSAT SAF Satellite Data. *Remote Sensing* 14(23): 5961.
- Ravelo, AC; Planchuelo, AM; Aroche, R; Douriet Cárdenas, JC; Hallack Alegría, M; Jimenez, R; Maureira, H; Peña Paz, T; Tiscornia, G; Zanvettor, R; Zimmermann, R. 2016. Monitoreo y Evaluación de las Sequías en América Central. Joint Research Centre (JRC), European Commission, Luxembourg.
- Reichle, RH; Liu, Q; Koster, RD; Crow, WT; De Lannoy, GJM; Kimball, JS; Ardizzone, JV; Bosch, D; Colliander, A; Cosh, M; Kolassa, J; Mahanama, SP; Prueger, J; Starks, P; Walker, JP. 2019. Version 4 of the SMAP Level-4 Soil Moisture Algorithm and Data Product. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems* 11(10): 3106-3130.
- Reyniers, N; Osborn, TJ; Addor, N; Darch, G. 2023. Projected changes in droughts and extreme droughts in Great Britain strongly influenced by the choice of drought index. *Hydrology and Earth Systems Sciences* 27(5): 1151-1171.
- Rippey, B; Fuchs, B; Simeral, D; Bathke, D; Heim, R; Svoboda, M. 2021. The Drought Monitor Comes of Age. *Weatherwise* 74(2): 29-37.
- Rivera, JA; Marianetti, G; Hinrichs, S. 2018. Validation of CHIRPS precipitation dataset along the Central Andes of Argentina. *Atmospheric Research* 213: 437-449.
- Rivera, JA; Hinrichs, S; Marianetti, G. 2019. Using CHIRPS Dataset to Assess Wet and Dry Conditions along the Semiarid Central-Western Argentina. *Advances in Meteorology* 2019: 8413964.
- Rojas, O. 2020. Agricultural extreme drought assessment at global level using the FAO-Agricultural Stress Index System (ASIS). *Weather and Climate Extremes* 27: 100184.
- Rojas, O. 2021. Next Generation Agricultural Stress Index System (ASIS) for Agricultural Drought Monitoring. *Remote Sensing* 13(5): 959.
- Ropelewski, CF; Bell, MA. 2008. Shifts in the Statistics of Daily Rainfall in South America Conditional on ENSO Phase. *Journal of Climate* 21(5): 849-865.
- Rossi, L; Wens, M; De Moel, H; Cotti, D; Sabino Simons, A-S; Toreti, A; Maetens, W; Masante, D; Van Loon, A; Hagenlocher, M; Rudari, R; Naumann, G; Meroni, M; Avanzi, F; Isabellon, M; Barbosa, P. 2023. European Drought Risk Atlas. Publications Office of the European Union, Luxembourg.
- Rossi, S; Niemeyer, S. 2012. Drought Monitoring with estimates of the Fraction of Absorbed Photosynthetically-active Radiation (fAPAR) derived from MERIS. *In* Wardlow, B; Anderson, M y Verdin, J (eds.), *Remote Sensing for Drought: Innovative Monitoring Approaches*. CRC Press-Taylor & Francis, Boca Raton, Florida, USA, p. 95-116.
- Rusticucci, M; Barrucand, M; Collazo, S. 2017. Temperature extremes in the Argentina central region and their monthly relationship with the mean circulation and ENSO phases. *International Journal of Climatology* 37(6): 3003-3017.
- Seneviratne, SI; Corti, T; Davin, EL; Hirschi, M; Jaeger, EB; Lehner, I; Orlowsky, B; Teuling, AJ. 2010. Investigating soil moisture-climate interactions in a changing climate: A review. *Earth-Science Reviews* 99(3): 125-161.
- Seneviratne, SI; Zhang, X; Adnan, M; Badi, W; Dereczynski, C; Di Luca, A; Ghosh, S; Iskandar, I; Kossin, J; Lewis, S; Otto, F; Pinto, I; Satoh, T; Vicente-Serrano, SM; Wehner, M; Zhou, B. 2021. Weather and Climate Extreme Events in a Changing Climate. *In* Masson-Delmotte, V; Zhai, P; Pirani, A; Connors, SL; Péan, C; Berger, S; Caud, N; Chen, Y; Goldfarb, L; Gomis, MI; Huang, M; Leitzell, K; Lonnoy, E; Matthews, JBR; Maycock, TK; Waterfield, T; Yelekçi, O; Yu, R y Zhou, B (eds.), *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press,

- Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, p. 1513–1766.
- Sepulcre-Canto, G; Horion, S; Singleton, A; Carrao, H; Vogt, J. 2012. Development of a Combined Drought Indicator to detect agricultural drought in Europe. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 12(11): 3519-3531.
- Shyrokaya, A; Pappenberger, F; Pechlivanidis, I; Messori, G; Khatami, S; Mazzoleni, M; Di Baldassarre, G. 2023. Advances and gaps in the science and practice of impact-based forecasting of droughts. *WIREs Water*: e1698.
- Sivakumar, MVK; Stefanski, R; Bazza, M; Zelaya, S; Wilhite, D; Magalhaes, AR. 2014. High Level Meeting on National Drought Policy: Summary and Major Outcomes. *Weather and Climate Extremes* 3: 126-132.
- Smith, KH; Tyre, AJ; Tang, Z; Hayes, MJ; Akyuz, FA. 2020. Calibrating Human Attention as Indicator: Monitoring #drought in the Twittersphere. *Bulletin of the American Meteorological Society* 101(10): E1801-E1819.
- Sodoge, J; Kuhlicke, C; de Brito, MM. 2023. Automatized spatio-temporal detection of drought impacts from newspaper articles using natural language processing and machine learning. *Weather and Climate Extremes* 41: 100574.
- Solaraju-Murali, B; Bojovic, D; Gonzalez-Reviriego, N; Nicodemou, A; Terrado, M; Caron, L-P; Doblas-Reyes, FJ. 2022. How decadal predictions entered the climate services arena: an example from the agriculture sector. *Climate Services* 27: 100303.
- Sozzi, M; Kayad, A; Gobbo, S; Cogato, A; Sartori, L; Marinello, F. 2021. Economic Comparison of Satellite, Plane and UAV-Acquired NDVI Images for Site-Specific Nitrogen Application: Observations from Italy. *Agronomy* 11(11): 2098.
- Spennemann, PC; Fernández-Long, ME; Gattinoni, NN; Cammalleri, C; Naumann, G. 2020. Soil moisture evaluation over the Argentine Pampas using models, satellite estimations and in-situ measurements. *Journal of Hydrology: Regional Studies* 31: 100723.
- Spinoni, J; Barbosa, P; Bucchignani, E; Cassano, J; Cavazos, T; Christensen, JH; Christensen, OB; Coppola, E; Evans, J; Geyer, B; Giorgi, F; Hadjinicolaou, P; Jacob, D; Katzfey, J; Koenig, T; Laprise, R; Lennard, CJ; Kurnaz, ML; Li, D; Llopart, M; McCormick, N; Naumann, G; Nikulin, G; Ozturk, T; Panitz, H-J; Porfirio da Rocha, R; Rockel, B; Solman, SA; Syktus, J; Tangang, F; Teichmann, C; Vautard, R; Vogt, JV; Winger, K; Zittis, G; Dosio, A. 2020. Future Global Meteorological Drought Hot Spots: A Study Based on CORDEX Data. *Journal of Climate* 33(9): 3635-3661.
- Sun, Q; Miao, C; Duan, Q; Ashouri, H; Sorooshian, S; Hsu, K-L. 2018. A Review of Global Precipitation Data Sets: Data Sources, Estimation, and Intercomparisons. *Reviews of Geophysics* 56(1): 79-107.
- Svoboda, M; LeComte, D; Hayes, M; Heim, R; Gleason, K; Angel, J; Rippey, B; Tinker, R; Palecki, M; Stooksbury, D; Miskus, D; Stephens, S. 2002. The Drought Monitor. *Bulletin of the American Meteorological Society* 83(8): 1181-1190.
- Tedeschi, RG; Grimm, AM; Cavalcanti, IFA. 2015. Influence of Central and East ENSO on extreme events of precipitation in South America during austral spring and summer. *International Journal of Climatology* 35(8): 2045-2064.
- Tomasella, J; Cunha, APMA; Simões, PA; Zeri, M. 2023. Assessment of trends, variability and impacts of droughts across Brazil over the period 1980–2019. *Natural Hazards* 116(2): 2173-2190.
- Toreti, A; Bavera, D; Acosta Navarro, J; Arias Muñoz, C; Barbosa, P; de Jager, A; Di Ciollo, C; Fioravanti, G; Grimaldi, S; Hraest Essenfelder, A; Maetens, W; Magni, D; Masante, D; Mazzeschi, M; McCormick, N; Salamon, P; Spinoni, J. 2023. Drought in South America April 2023. Joint Research Centre, European Commission, Luxembourg.
- Tripathy, KP; Mukherjee, S; Mishra, AK; Mann, ME; Williams, AP. 2023. Climate change will accelerate the high-end risk of compound drought and heatwave events. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 120(28): e2219825120.
- United Nations Office for Disaster Risk Reduction. 2021. GAR Special Report on Drought 2021. UNDRR, Geneva, Switzerland.

- Vicente-Serrano, SM; Beguería, S; López-Moreno, JI. 2010a. A Multiscalar Drought Index Sensitive to Global Warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index. *Journal of Climate* 23(7): 1696-1718.
- Vicente-Serrano, SM; Beguería, S; López-Moreno, JI; Angulo, M; El Kenawy, A. 2010b. A New Global 0.5° Gridded Dataset (1901–2006) of a Multiscalar Drought Index: Comparison with Current Drought Index Datasets Based on the Palmer Drought Severity Index. *Journal of Hydrometeorology* 11(4): 1033-1043.
- Vicente-Serrano, SM; Chura, O; López-Moreno, JI; Azorin-Molina, C; Sanchez-Lorenzo, A; Aguilar, E; Moran-Tejeda, E; Trujillo, F; Martínez, R; Nieto, JJ. 2015. Spatio-temporal variability of droughts in Bolivia: 1955–2012. *International Journal of Climatology* 35(10): 3024-3040.
- Vogt, JV; Naumann, G; Masante, D; Spinoni, J; Cammalleri, C; Erian, W; Pischke, F; Pulwarty, R; Barbosa, P. 2018. Drought risk assessment and management. A conceptual framework. EUR 29464 EN, Luxembourg.
- Ward, R; Lackstrom, K; Davis, C. 2022. Demystifying Drought: Strategies to Enhance the Communication of a Complex Hazard. *Bulletin of the American Meteorological Society* 103(1): E181-E197.
- Waylen, PR; Caviedes, CN. 1990. Annual and seasonal fluctuations of precipitation and streamflow in the Aconcagua River basin, Chile. *Journal of Hydrology* 120(1): 79-102.
- Wilhite, DA. 2000. Drought as a natural hazard: concepts and definitions. *In* Wilhite, DA (ed.), *Drought: a global assessment*. Routledge, New York, p. 1-18.
- Wilhite, DA; Svoboda, MD; Hayes, MJ. 2007. Understanding the complex impacts of drought: A key to enhancing drought mitigation and preparedness. *Water Resources Management* 21(5): 763-774.
- Wilhite, DA; Sivakumar, MVK; Pulwarty, R. 2014. Managing drought risk in a changing climate: The role of national drought policy. *Weather and Climate Extremes* 3(0): 4-13.
- WMO & GWP. 2014. National Drought Management Policy Guidelines: A Template for Action. World Meteorological Organization (WMO) & Global Water Partnership (GWP), Geneva, Switzerland and Stockholm, Sweden.
- Woloszyn, M; M. Skumanich, M; Lisonbee, J; Deheza, V; Hobbins, M; Hoell, A; Otkin, JA; Svoboda, M; Wang, H. 2021. Flash Drought: Current Understanding and Future Priorities. Report of the 2020 NIDIS Flash Drought Virtual Workshop., NOAA National Integrated Drought Information System.
- World Bank. 2019. Assessing Drought Hazard and Risk: Principles and Implementation Guidance. The World Bank, Washington, D.C.
- WMO (World Meteorological Organization). 2006. Drought monitoring and early warning: concepts, progress and future challenges. WMO-No. 1006. Ginebra, Suiza.
- WMO (World Meteorological Organization). 2012. Standardized Precipitation Index User Guide (M. Svoboda, M. Hayes and D. Wood). Ginebra, Suiza.
- WMO (World Meteorological Organization) & GWP (Global Water Partnership). 2016. Handbook of Drought Indicators and Indices. *In*: Svoboda, M y Fuchs, BA (eds.), *Integrated Drought Management Tools and Guidelines Series 2. Integrated Drought Management Programme (IDMP)*, Ginebra, Suiza.
- Wu, H; Svoboda, MD; Hayes, MJ; Wilhite, DA; Wen, F. 2007. Appropriate application of the standardized precipitation index in arid locations and dry seasons. *International Journal of Climatology* 27(1): 65-79.
- Yaseen, ZM; Ali, M; Sharafati, A; Al-Ansari, N; Shahid, S. 2021. Forecasting standardized precipitation index using data intelligence models: regional investigation of Bangladesh. *Scientific Reports* 11(1): 3435.
- Yuan, X; Wood, EF. 2013. Multimodel seasonal forecasting of global drought onset. *Geophysical Research Letters* 40: 2013GL057540.
- Yuan, X; Wang, Y; Ji, P; Wu, P; Sheffield, J; Otkin, JA. 2023. A global transition to flash droughts under climate change. *Science* 380(6641): 187-191.
- Yueh, SH; Entekhabi, D; O' Neill, PE; Entin, JK; Garcia, M. 2020. SMAP Mission Status and Plan, IGARSS 2020 - 2020 IEEE

- International Geoscience and Remote Sensing Symposium, pp. 3319-3322.
- Zambrano, F; Wardlow, B; Tadesse, T. 2016. Evaluating satellite-derived long-term historical precipitation datasets for drought monitoring in Chile, SPIE Remote Sensing 2016. SPIE, Edinburgh, United Kingdom, pp. 24.
- Zambrano, F; Wardlow, B; Tadesse, T; Lillo-Saavedra, M; Lagos, O. 2017. Evaluating satellite-derived long-term historical precipitation datasets for drought monitoring in Chile. Atmospheric Research 186: 26-42.
- Zaveri, E; Damania, R; Engle, N. 2023. Droughts and deficits: summary evidence of the global impact on economic growth. The World Bank, Washington D.C.
- Zhang, B; Schilder, F; Helm Smith, K; Hayes, MJ; Harms, S; Tadesse, T. 2022. TweetDrought: A Deep-Learning Drought Impacts Recognizer based on Twitter Data, arXiv:2212.04001.
- Zhang, R; Kim, S; Sharma, A; Lakshmi, V. 2021. Identifying relative strengths of SMAP, SMOS-IC, and ASCAT to capture temporal variability. Remote Sensing of Environment 252: 112126.
- Zhao, Z; Han, M; Yang, K; Holbrook, NJ. 2022. Signatures of midsummer droughts over Central America and Mexico. Climate Dynamics 60: 3523-3542.
- Zscheischler, J; Seneviratne, SI. 2017. Dependence of drivers affects risks associated with compound events. Science Advances 3(6): e1700263.
- Zscheischler, J; Martius, O; Westra, S; Bevacqua, E; Raymond, C; Horton, RM; van den Hurk, B; AghaKouchak, A; Jézéquel, A; Mahecha, MD; Maraun, D; Ramos, AM; Ridder, NN; Thiery, W; Vignotto, E. 2020. A typology of compound weather and climate events. Nature Reviews Earth & Environment 1(7): 333-347.

