

NOTA TÉCNICA N° IDB-TN-2838

# Modelos de manejo de sequías basados en enfoques participativos en Chile

## Autores:

Ben Lord, Juliana Corrales, Enrique Triana, Anarug Srivastava, Fekadu Moreda, Marcello Basani, Giulia Carscasci, Jihoon Lee, Raúl Muñoz Castillo

## Editores:

Eveline Vasquez-Arroyo, Jose Rosales

Banco Interamericano de Desarrollo  
División de Agua y Saneamiento

Diciembre 2023



# Modelos de manejo de sequías basados en enfoques participativos en Chile

## Autores:

Ben Lord, Juliana Corrales, Enrique Triana, Anarug Srivastava, Fekadu Moreda, Marcello Basani, Giulia Carscasci, Jihoon Lee, Raúl Muñoz Castillo

## Editores:

Eveline Vasquez-Arroyo, Jose Rosales

Banco Interamericano de Desarrollo  
División de Agua y Saneamiento

Diciembre 2023



Catalogación en la fuente proporcionada por la Biblioteca Felipe Herrera del Banco Interamericano de Desarrollo Modelos de manejo de sequías basados en enfoques participativos en Chile / Ben Lord, Juliana Corrales, Enrique Triana, Anarug Srivastava, Fekadu Moreda, Marcello Basani, Giulia Carscasci, Jihoon Lee, Raúl Muñoz Castillo; editores, Eveline Vásquez, José Rosales. p. cm. — (Nota técnica del BID ; 2838) Incluye referencias bibliográficas.

1. Droughts-Management-Chile. 2. Watershed management-Chile-Computer simulation. 3. Water resources development-Chile. I. Lord, Benjamin. II. Corrales, Juliana. III. Triana, Enrique. IV. Srivastava, Anarug. V. Moreda, Fekadu. VI. Basani, Marcelo. VII. Carscasci, Giulia. VIII. Lee, Jihoon. IX. Muñoz-Castillo, Raúl. X. Vásquez, Eveline, editora. XI. Rosales, José, editor. XII. Banco Interamericano de Desarrollo. División de Agua y Saneamiento. XIII. Serie.

IDB-TN-2838

Palabras clave: Sequía, Modelización, Hydro-BID, WaterALLOC, Planes de Gestión

Códigos JEL: I14, I18, I31, I38, O21, Q10, Q25, Q54, Q55, Q56, Q57, R20

<http://www.iadb.org>

Copyright © 2023 Banco Interamericano de Desarrollo (BID). Esta obra se encuentra sujeta a una licencia Creative Commons CC BY 3.0 IGO (<https://creativecommons.org/licenses/by/3.0/igo/legalcode>). Se deberá cumplir los términos y condiciones señalados en el enlace URL y otorgar el respectivo reconocimiento al BID.

En alcance a la sección 8 de la licencia indicada, cualquier mediación relacionada con disputas que surjan bajo esta licencia será llevada a cabo de conformidad con el Reglamento de Mediación de la OMPI. Cualquier disputa relacionada con el uso de las obras del BID que no pueda resolverse amistosamente se someterá a arbitraje de conformidad con las reglas de la Comisión de las Naciones Unidas para el Derecho Mercantil (CNUDMI). El uso del nombre del BID para cualquier fin distinto al reconocimiento respectivo y el uso del logotipo del BID, no están autorizados por esta licencia y requieren de un acuerdo de licencia adicional.

Note que el enlace URL incluye términos y condiciones que forman parte integral de esta licencia.

Las opiniones expresadas en esta obra son exclusivamente de los autores y no necesariamente reflejan el punto de vista del BID, de su Directorio Ejecutivo ni de los países que representa.



# Pilotaje de Modelos Basados en Enfoques Participativos de Gestión de Sequías en Chile

Autores:

*Ben Lord, Juliana Corrales, Pedro Coli, Enrique Triana,  
Anarug Srivastava, Fekadu Moreda, Marcello Basani,  
Giulia Carscasci, Jihoon Lee, Raúl Muñoz Castillo*

Editores:

*Eveline Vásquez, José Rosales*

**2023**





# TABLA DE CONTENIDOS

<b>RESUMEN</b> .....	<b>1</b>
<b>ABREVIATURAS</b> .....	<b>2</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>3</b>
1.1. Antecedentes .....	3
1.2. Objetivos .....	4
<b>2. TEORÍA DE LA GESTIÓN DE SEQUÍAS</b> .....	<b>5</b>
2.1. Caracterización de la sequía mediante índices .....	5
2.2. Índice de Precipitación Estandarizado (SPI) .....	7
<b>3. GESTIÓN DE LA SEQUÍA EN WaterALLOC</b> .....	<b>8</b>
3.1. Herramientas de modelización .....	8
3.1.1 Hydro-BID .....	8
3.1.2 WaterALLOC .....	9
3.2. Calculadora del Índice de Sequía .....	10
3.3. Mapeador de Índices de Sequía .....	11
3.4. Cuadros de comparación de años .....	13
3.5. Estimación de los Índices de Sequía en la Cuenca del Maipo .....	16
3.5.1. Análisis detallado del SPI .....	18
3.6. Impactos de la sequía en la cuenca del Río Maipo .....	19
3.7. Plan de gestión de la sequía .....	22
<b>4. CAPACITACIÓN</b> .....	<b>27</b>
<b>REFERENCIAS</b> .....	<b>29</b>
<b>APÉNDICE 1 - Tutorial de las características de sequías de WaterALLOC</b> .....	<b>30</b>

# TABLA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> Selección de índices de sequía con diversa complejidad, tomada de la Organización Meteorológica Mundial (Svoboda et al., 2012) .....	6
<b>Figura 2</b> Formulario de configuración de la calculadora del Índice de Sequía .....	11
<b>Figura 3</b> Interfaz de mapas WaterALLOC con módulo de mapeo de índices de sequía .....	12
<b>Figura 4</b> Simbología SPI utilizada en el Módulo de Gestión de Sequías .....	12
<b>Figura 5</b> Cuadro comparativo de todos los años en la Estación 14 de la Cuenca del Maipo .....	13
<b>Figura 6</b> Precipitación media anual y variación espacial de la temperatura en la Cuenca del Maipo (1990 - 2017) .....	15
<b>Figura 7</b> Red MODSIM desarrollada para la Cuenca del Río Maipo en WaterALLOC .....	15
<b>Figura 8</b> Valores SPI a corto plazo (izquierda) y largo plazo (derecha) para la Cuenca del Maipo el 1 de agosto de 1996 .....	16
<b>Figura 9</b> SPI a corto y largo plazo, graficado en función de las precipitaciones mensuales .....	17
<b>Figura 10</b> Vista detallada del SPI a 12 meses de 1994 a 2000 .....	18
<b>Figura 11</b> Cuadro comparativo de años en Estación 14 .....	19
<b>Figura 12</b> Escasez total en el escenario de base frente a los valores del SPI a 12 meses .....	20
<b>Figura 13</b> Localización de áreas de escasez simuladas en la Cuenca del Maipo .....	21
<b>Figura 14</b> Distribución de la escasez por sector .....	22
<b>Figura 15</b> Escasez total en el escenario de referencia frente a los valores del SPI de 12 meses, lo que pone de relieve los períodos en los que se desencadenaron las condiciones de sequía .....	24
<b>Figura 16</b> Escasez total en la Cuenca del Maipo en diferentes niveles de reducción de la gestión de la demanda .....	24
<b>Figura 17</b> Porcentaje de reducción de la escasez en diferentes escenarios de reducción de la demanda .....	25
<b>Figura 18</b> Distribución de la escasez total por sectores, para diferentes estrategias de reducción de la gestión de la demanda .....	26
<b>Figura 19</b> Caudal medio mensual durante la sequía en el Río Angostura .....	26
<b>Figura 20</b> Tópicos cubiertos por el programa de entrenamiento de capacidades .....	28



## Pilotaje de enfoques basados en modelos participativos de gestión de sequías en Chile

*Autores: Ben Lord, Juliana Corrales, Pedro Coli, Enrique Triana, Anarug Srivastava, Fekadu Moreda, Marcello Basani, Giulia Carscasci, Jihoon Lee, Raúl Muñoz Castillo*

*Editores: Eveline Vásquez, José Rosales*

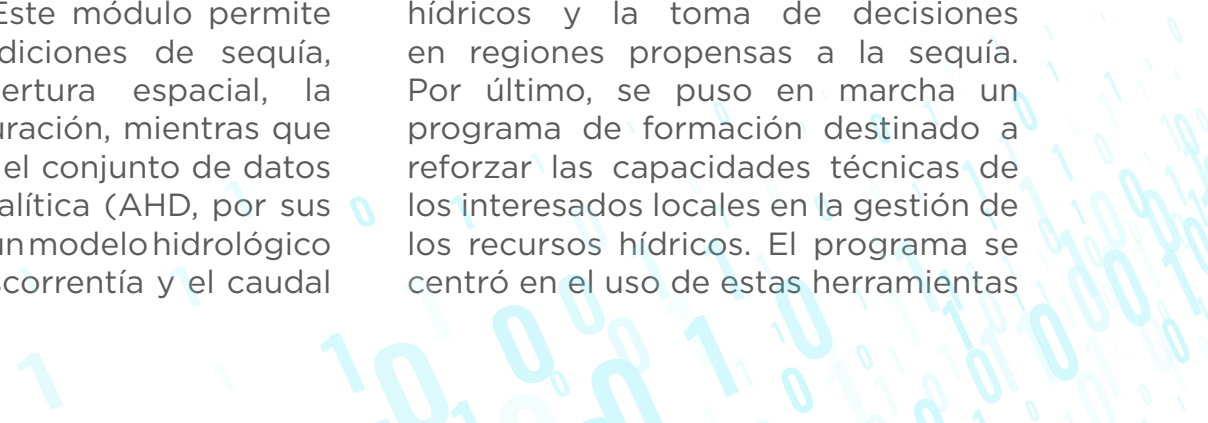
Códigos JEL: I14, I18, I31, I38, O21, Q10, Q25, Q54, Q55, Q56, Q57, R20,

**Palabras clave:** Sequía, Modelaje, Hydro-BID, WaterALLOC, Planes de Manejo de Sequías

### RESUMEN

La singular geografía y las zonas climáticas de Chile, que incluyen el árido desierto de Atacama en el norte y la fría y húmeda zona patagónica en el sur, representan un reto para la gestión de los recursos hídricos. Las sequías, y en particular las megasequías, se han vuelto más frecuentes e intensas, afectando no sólo al norte sino también a regiones centrales como la Cuenca del Maipo, situada en la Región Metropolitana. Para abordar estos temas, este proyecto tiene como objetivo desarrollar un Plan de Manejo de Sequías (PMS) para la Cuenca del Maipo, y para apoyar un análisis de las condiciones de sequía, incluyendo la caracterización de la cobertura espacial, intensidad y duración, se ha implementado un módulo de Manejo de Sequías en WaterALLOC, combinando los sistemas de modelación Hydro-BID y MODSIM. Este módulo permite analizar las condiciones de sequía, incluida la cobertura espacial, la intensidad y la duración, mientras que Hydro-BID utiliza el conjunto de datos de hidrografía analítica (AHD, por sus siglas en inglés) y un modelo hidrológico para simular la escorrentía y el caudal

base. Este caso de estudio se centra en la cuenca del Río Maipo en Chile, utilizando el módulo de Gestión de la Sequía en WaterALLOC para simular etapas de respuesta y mitigar los impactos de la sequía. Las herramientas de vigilancia de sequías existentes, como el Observatorio Chileno de Sequías y el Boletín Meteorológico de Sequías, proporcionan información a nivel nacional utilizando el Índice de Precipitación Estandarizado (SPI). La configuración del modelo en la cuenca del Maipo, parte de un proyecto de seguridad hídrica, integra Hydro-BID y WaterALLOC para evaluar la eficiencia hídrica, valorar los impactos climáticos y desarrollar planes de seguridad hídrica. El estudio destaca la importancia de las herramientas integradas y los sistemas de modelización para mejorar la planificación de los recursos hídricos y la toma de decisiones en regiones propensas a la sequía. Por último, se puso en marcha un programa de formación destinado a reforzar las capacidades técnicas de los interesados locales en la gestión de los recursos hídricos. El programa se centró en el uso de estas herramientas



analíticas para mejorar la planificación y evaluación de los recursos hídricos. En el programa participaron múltiples interesados, entre ellos el CEA, la UDD, la UDEC y la Fundación Chile. Además,

se llevó a cabo una sesión para introducir el Módulo de Gestión de Sequías en WaterALLOC, presentando la teoría, el desarrollo y un estudio de caso en la Cuenca del Maipo.

## ABREVIATURAS

<b>AHD</b>	Datos de Hidrografía Analítica (Analytical Hydrography Dataset)
<b>ASI</b>	Índice de Estrés Agrícola (Agricultural Stress Index)
<b>BID</b>	Banco Interamericano de Desarrollo
<b>CDIT</b>	Herramienta de interpolación de datos climáticos (Climate Data Interpolation Tool)
<b>CEA</b>	Centro de Ecología Aplicada (Applied Ecology Center)
<b>ET</b>	Evapotranspiración
<b>FAO</b>	Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (Food and Agriculture Organization)
<b>GUI</b>	Interfaz gráfica de usuario (Graphical User Interface)
<b>GWLF</b>	Función de carga generalizada de cuencas hidrográficas (Generalized Watershed Loading Function)
<b>IRI</b>	Instituto Internacional de Investigación para el Clima y la Sociedad (International Research Institute for Climate and Society)
<b>NDVI</b>	Índice de vegetación de diferencia normalizada (Normalized Difference Vegetation Index)
<b>OMM</b>	Organización Meteorológica Mundial
<b>PDSI</b>	Índice de Severidad de la Sequía de Palmer (Palmer Drought Severity index)
<b>PMS</b>	Plan de Manejo de Sequías
<b>SIG</b>	Sistema de Información Geográfica (Geographical Information System)
<b>SPI</b>	Índice de Precipitación Estandarizado (Standardized Precipitation Index)
<b>VCI</b>	Índice de Condición de la Vegetación (Vegetation Condition Index)

# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1. ANTECEDENTES

Chile es un país peculiar. Tiene una longitud de 4.270 km, mientras que su anchura máxima es de sólo 445 km. Además, su proximidad al mar da lugar a una gran diversidad de zonas climáticas: el árido y seco desierto de Atacama en el norte; la zona patagónica meridional en el sur, cuyo clima es mucho más frío y húmedo; y climas intermedios, como el mediterráneo o el oceánico, o incluso la tundra de la cordillera de los Andes.

Estas diferencias climáticas hacen que la gestión adecuada de los recursos hídricos sea algo complicada de llevar a cabo. La existencia de un desierto en el país también puede implicar marcadas temporadas de sequía en sus inmediaciones, situación que ocurre en Chile de manera regular. En las últimas décadas se han recopilado datos sobre diversas sequías, generalmente referidas a las regiones desérticas de Atacama y Coquimbo, pero ocasionalmente extendidas también a otras regiones.

Los datos sobre sequía que se han ido recopilando a lo largo de los años muestran que las sequías afectan actualmente no sólo a la parte norte del país, sino también a las regiones centrales. Estas sequías han sido tan severas, que su denominación ha llegado a identificarse como megasequía. En 2019, cinco regiones del país se encontraban en estado de emergencia agrícola por estrés hídrico. La Cuenca del Maipo, ubicada en la Región Metropolitana, es una de las zonas de Chile más afectadas por la sequía severa.

A pesar de que Chile es un país donde las épocas de sequía siempre han sido comunes, el cambio climático está teniendo un efecto innegable en su frecuencia e intensidad (Aguayo et al., 2021). La necesidad de tomar medidas para mitigar estos efectos es evidente, y un buen punto de partida es promover un enfoque de gestión integrada de los recursos hídricos para las cuencas críticas; desarrollar planes de gestión de sequías que se basen en datos empíricos sobre las condiciones actuales y proyectadas; y crear capacidad técnica local para una adecuada gestión y planificación de los recursos hídricos y los eventos de sequía.

## 1.2. OBJETIVOS

El objetivo general de este proyecto es apoyar el desarrollo de un Plan de Manejo de Sequías (PMS) para la Cuenca del Maipo que buscará minimizar los impactos ambientales, económicos y sociales de los episodios de sequía.

El objetivo general del plan se persigue a través de los siguientes objetivos específicos:

- Preservar los servicios esenciales y minimizar los impactos adversos de una emergencia en el suministro de agua sobre la salud y seguridad públicas, actividades económicas, recursos ambientales y estilo de vida de las personas.
- Evitar o minimizar los efectos negativos de la sequía en la cuenca, como situaciones de deterioro temporal de las masas de agua o caudales ecológicos.
- Minimizar los efectos negativos sobre las actividades económicas.

## 2. TEORÍA DE LA GESTIÓN DE SEQUÍAS

Las sequías son fenómenos naturales que se caracterizan generalmente por condiciones más secas que la media y precipitaciones anormalmente bajas. Aunque no existe una definición única para las sequías, un marco útil es categorizarlas según su impacto, por ejemplo:

- Meteorológico: reducción de las precipitaciones, mayores tasas de evapotranspiración
- Hidrológico: reducción del caudal de los ríos, derretimiento más rápido de nieve o hielo
- Agrícola: reducción de la humedad del suelo, disminución del crecimiento de la vegetación

La caracterización de la sequía puede variar mucho según el lugar, dependiendo del clima local y de la distribución de las precipitaciones durante un año normal. Por ejemplo, los climas templados con precipitaciones uniformes a lo largo del año pueden experimentar sequía si las precipitaciones son escasas en el transcurso de dos o tres meses. Los climas mediterráneos, que pueden ser muy estacionales, pueden experimentar normalmente cuatro o más meses sin precipitaciones. No se puede aplicar una única definición para caracterizar la sequía en ambas cuencas hidrográficas sin tener en cuenta la historia climática local.

### 2.1. CARACTERIZACIÓN DE LA SEQUÍA MEDIANTE ÍNDICES

Las sequías se clasifican a menudo mediante índices, que pueden combinar múltiples factores, como la precipitación, el caudal y la humedad del suelo, para cuantificar la severidad en un contexto local utilizando datos históricos. Existen numerosos índices, que varían enormemente en cuanto a necesidades de datos, complejidad e idoneidad para aplicaciones específicas. El Manual de indicadores e índices de sequía de la Organización Meteorológica Mundial (OMM) (Svoboda et al., 2012) cataloga muchos de los enfoques más populares y científicamente aceptados para cuantificar la sequía (**Figura 1**). Entre los más utilizados se encuentran:

#### **Análisis estadísticos de registros pluviométricos:**

Consiste en comparar registros recientes con medias históricas anuales, estacionales o mensuales.

- Puede inducir a error, ya que depende en gran medida del contexto local



## Índice de precipitación normalizado (SPI):

- Basado únicamente en las precipitaciones, utiliza un enfoque probabilístico
- Recomendado por la Organización Meteorológica Mundial como “punto de partida para la vigilancia meteorológica de la sequía”
- Cálculo relativamente simple mediante el procedimiento de la OMM

## Índice de Severidad de la Sequía de Palmer (PDSI)

- Requiere registros completos de precipitación, temperatura y humedad del suelo
- Método relativamente complejo

Meteorología	Página	Facilidad de uso	Parámetros de entrada	Información adicional
Índice de anomalía de aridez (AAI)	11	Verde	P, T, PET, ET	Disponible operativamente para India
Deciles	11	Verde	P	Fácil de calcular; los ejemplos de Australia son útiles
Índice Keetch-Byram de Sequía (KBDI)	12	Verde	P, T	Los cálculos se basan en el clima de la zona de interés
Porcentaje de precipitación normal	12	Verde	P	Cálculos simples
Índice de precipitación estandarizado (SPI)	13	Verde	P	Destacado por la Organización Meteorológica Mundial como punto de partida para la vigilancia meteorológica de la sequía
Anomalía de precipitación normalizada ponderada (WASP)	15	Verde	P, T	Utiliza datos reticulares para el seguimiento de la sequía en regiones tropicales
Índice de aridez (AI)	15	Amarillo	P, T	También puede utilizarse en clasificaciones climáticas
Índice Z de China (CZI)	16	Amarillo	P	Destinado a mejorar los datos SPI
Índice de humedad de los cultivos (CMI)	16	Amarillo	P,T	Se requieren valores semanales
Índice de área de sequía (DAI)	17	Amarillo	P	Da una indicación del rendimiento de la estación monzónica
Índice de reconocimiento de sequía (DRI)	17	Amarillo	P, T	Se necesitan datos mensuales de temperatura y precipitaciones
Índice de Sequía Efectiva (EDI)	18	Amarillo	P	Programa disponible mediante contacto directo con el creador
Coficiente Hidrotérmico de Selyaninov (HTC)	19	Amarillo	P, T	Cálculos sencillos y varios ejemplos en la Federación Rusa
Índice de Sequía NOAA (NDI)	19	Amarillo	P	Se utiliza mejor en aplicaciones agrícolas
Índice de Severidad de la Sequía de Palmer (PDSI)	20	Amarillo	P, T, AWC	No es verde debido a la complejidad de los cálculos y a la necesidad de datos completos en serie

Figura 1. Selección de índices de sequía con diversa complejidad, tomada de la Organización Meteorológica Mundial (Svoboda et al., 2012)



## 2.2. ÍNDICE DE PRECIPITACIÓN ESTANDARIZADO (SPI)

La OMM recomienda el Índice de Precipitación Estandarizado (SPI) como “primer paso” para iniciar un programa de vigilancia y gestión de la sequía. El SPI presenta numerosas ventajas con respecto a otros índices de sequía, como la economía de datos necesarios (sólo precipitaciones), un método estandarizado (la OMM proporciona documentación clara y paquetes de software para su cálculo) y una amplia aceptación entre la comunidad meteorológica.

El SPI también ofrece una gran flexibilidad para caracterizar la sequía en un contexto local. Dada una escala temporal especificada por el usuario y una serie temporal de precipitaciones de entrada, se calcula la probabilidad de precipitación en cada paso temporal. A continuación, los valores de probabilidad se convierten en un índice, con las interpretaciones que figuran en el cuadro 1:

**Tabla 1. Valores SPI y su Interpretación**

Valor SPI	Clasificación
2.0+	Extremadamente húmedo
1.5 a 1.99	Muy húmedo
1.0 a 1.49	Moderadamente húmedo
-.99 a .99	Casi Normal
-1.0 a -1.49	Moderadamente Seco
-1.5 a -1.99	Severamente Seco
-2 o menos	Extremadamente Seco

Nótese que el SPI clasifica las precipitaciones en función de la varianza histórica, lo que significa que puede utilizarse para clasificar la extremidad tanto de las condiciones húmedas como de las secas. Además, el SPI está diseñado para permitir la clasificación de las precipitaciones en distintas escalas temporales (desde un mes hasta 48 meses o más). La escala temporal específica utilizada para calcular el SPI debe seleccionarse en función del contexto de la aplicación. La Guía del Usuario del índice de precipitación normalizado (Svoboda et al., 2012) ofrece orientación sobre la selección de la escala temporal. En general, las escalas temporales cortas pueden ser útiles para proporcionar alertas tempranas de sequías meteorológicas o para su aplicación en zonas con escasa estacionalidad de las precipitaciones. Las escalas temporales más largas son necesarias para cuantificar los impactos en el caudal de los ríos y en la agricultura, y son más apropiadas para su aplicación en zonas con precipitaciones muy estacionales.

## 3. GESTIÓN DE LA SEQUÍA EN WaterALLOC

Para apoyar el análisis de las condiciones de sequía, incluida la caracterización de la cobertura espacial, la intensidad y la duración, se ha implementado un módulo de Gestión de Sequías en WaterALLOC, una herramienta integrada de gestión de recursos hídricos basada en mapas que integra Hydro-BID (Moreda et al., 2014) y MODSIM (Labadie, 2006).

### 3.1. HERRAMIENTAS DE MODELIZACIÓN

#### 3.1.1. Hydro-BID

El sistema de modelización Hydro-BID para la simulación cuantitativa de la hidrología y el cambio climático tiene tres componentes principales: el Conjunto de Datos de Hidrografía Analítica (AHD), la base de datos, y el modelo hidrológico. El AHD es una representación digital de los límites de las cuencas hidrográficas y de los segmentos de los cursos de agua de toda la región de ALC, que contiene más de 230.000 cuencas con un tamaño medio de 83 km<sup>2</sup> para América del Sur y de 23 km<sup>2</sup> para América Central y el Caribe. El AHD es una plataforma regional de datos espaciales utilizada para integrar los datos dispares necesarios para apoyar la modelización hidrológica. Proporciona un marco para la parametrización coherente de los modelos, proporciona la conectividad necesaria de las redes fluviales y almacena los datos necesarios para mostrar los resultados en un formato de Sistema de Información Geográfica (SIG). La base de datos contiene información asociada a cada cuenca, incluida la zona de drenaje, la longitud del curso de agua la pendiente, los usos del suelo y los tipos de suelo. El modelo hidrológico es una versión mejorada del modelo de función de carga de cuenca generalizada (GWLF) de precipitación-escorrentía (Haith & Shoemaker, 1987), junto con una novedosa metodología de enrutamiento retardado desarrollada por RTI (Moreda et al., 2014).

El modelo calcula la escorrentía y el caudal base por cuenca. La GWLF calcula la escorrentía utilizando el método del número de curva del Servicio de Conservación del Suelo de Estados Unidos. Los números de curvas de las cuencas se almacenan en la base de datos y vienen determinados por la combinación de las condiciones del suelo y de la cubierta terrestre de la cuenca, que se representan como grupos hidrológicos del suelo, tipo de cubierta, tratamiento y condición hidrológica. Después de las estimaciones de escorrentía, el exceso de precipitación se infiltra en la capa no saturada, donde está sujeto a la evaporación. Con el tiempo, el agua infiltrada se filtra desde la capa no saturada hacia abajo para reponer

el almacenamiento saturado. El agua de la capa saturada entra en el cauce del río como caudal de base, donde se combina con la escorrentía de la cuenca y con las entradas procedentes de las cuencas aguas arriba para proporcionar el caudal del río para el día.

Un preprocesador denominado herramienta de interpolación de datos climáticos (CDIT), integrado en el sistema de modelización Hydro-BID, automatiza la interpolación de las series temporales diarias de temperatura y precipitación entre estaciones. Hydro-BID puede simular caudales en cuencas hidrográficas no alteradas en condiciones históricas, actuales y futuras en función del uso del suelo, las precipitaciones y la temperatura. Las salidas del modelo de los caudales previstos se guardan en un formato fácilmente utilizable, de valores separados por comas (.csv), en un paso de tiempo diario o mensual. El sistema cuenta con una interfaz gráfica de usuario (GUI) para facilitar la carga y el procesamiento de los datos de entrada del modelo, así como para mostrar los resultados del modelo tanto en forma gráfica como tabulada. El modelo hidrológico utiliza la estructura de datos y las topologías de cuencas y redes de ríos del AHD para generar estimaciones de caudal a la salida de cualquier cuenca seleccionada por el usuario. Además de la generación de caudales, Hydro-BID incluye otros módulos para 1) la simulación de embalses, 2) el transporte de sedimentos y 3) las interacciones entre aguas superficiales y subterráneas mediante MODFLOW.

### 3.1.2. WaterALLOC

WaterALLOC proporciona una nueva interfaz basada en SIG que utiliza la representación de ríos AHD para crear una red de simulación MODSIM e importa los resultados de Hydro-BID para agilizar el acoplamiento de los dos sistemas de modelización. MODSIM, desarrollado por la Universidad del Estado de Colorado, es un sistema de apoyo a la toma de decisiones que utiliza la optimización en una red de ríos para ayudar a los gestores de cuencas hidrográficas en el análisis del abastecimiento de agua ante la incertidumbre hidrológica y el crecimiento de la demanda (<http://modsim.engr.colostate.edu/>).

WaterALLOC agiliza el procesamiento de datos entre Hydro-BID y MODSIM, ofreciendo una solución para realizar análisis de disponibilidad de agua, incluyendo operaciones fluviales y de embalses con simulación de permisos y prioridades de agua, utilizando todas las herramientas de operaciones fluviales y la personalización proporcionada por MODSIM. WaterALLOC mejora la experiencia de usuario tanto de Hydro-BID como de MODSIM, permitiendo al usuario de Hydro-BID utilizar la interfaz SIG para ejecutar el sistema y añadir diálogos de entrada fáciles de usar para las demandas agrícolas y municipales para MODSIM. Esta herramienta crea automáticamente la red de simulación MODSIM a partir de la red AHD, utilizando las cuencas y ríos para definir los enlaces y nodos de la red MODSIM. WaterALLOC vincula los resultados de la escorrentía local de Hydro-BID a los nodos de entrada de MODSIM para simular el encaminamiento de los flujos en los ríos de una cuenca.

Con la herramienta se pueden crear nodos de demanda georreferenciados para simular la toma y el consumo de agua en función de la disponibilidad de agua en distintos puntos de la cuenca y de acuerdo con los permisos, prioridades y limitaciones físicas e hidráulicas del sistema. WaterALLOC también permite crear y simular el funcionamiento de sistemas de embalses, simulando operaciones de suministro de agua y generación de energía.

La nueva y robusta plataforma de modelización ofrece una solución racionalizada para la gestión de datos entre los modelos, y la capacidad de realizar análisis exhaustivos del balance hídrico que incluyan las normas de funcionamiento de las infraestructuras hídricas, las prioridades de asignación del agua y las limitaciones administrativas y sociales. Además, la plataforma permite simular cambios dinámicos en la ocupación del suelo, la demanda de agua, la población, las interacciones entre aguas superficiales y subterráneas y el clima.

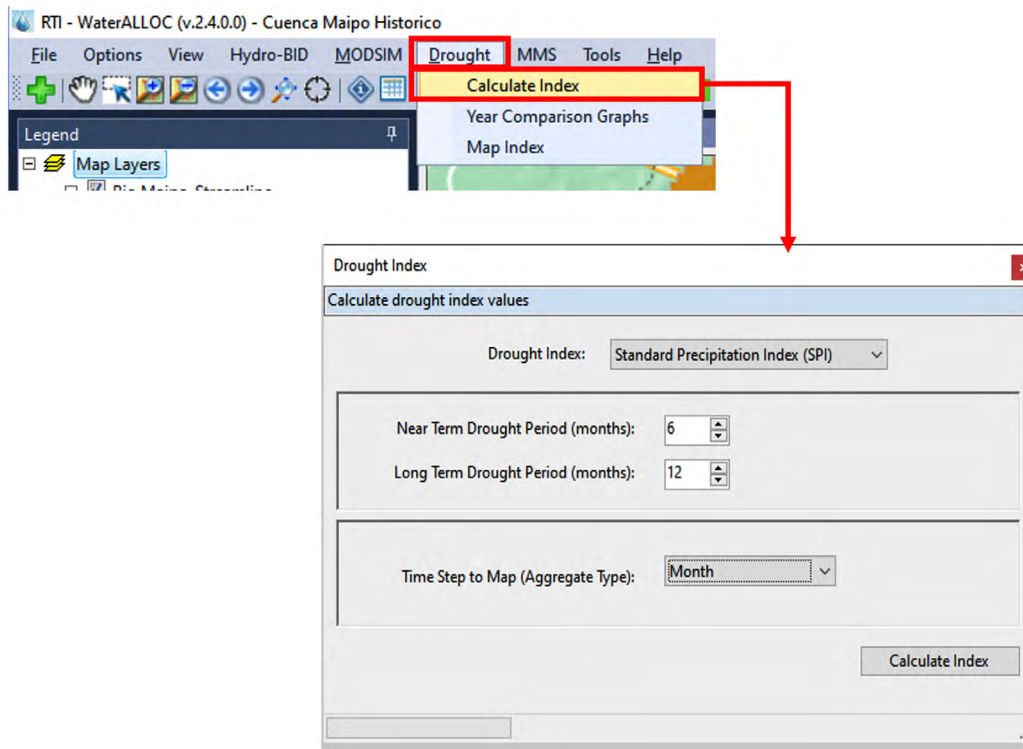
Esta implementación inicial del módulo se ha diseñado para mantener la compatibilidad con modelos WaterALLOC más antiguos. Los datos de entrada del módulo de gestión de sequías proceden de las bases de datos Hydro-BID y de los *shapefiles* AHD, lo que significa que no se necesitan nuevos datos de entrada de los usuarios de WaterALLOC con proyectos en funcionamiento.

## 3.2. CALCULADORA DEL ÍNDICE DE SEQUÍA

La primera característica importante del módulo de Gestión de Sequías es un formulario que permite a los usuarios configurar y calcular los valores del Índice de Sequía. Actualmente, el índice de precipitación estandarizado (SPI) es el único que admite el módulo. El trabajo de desarrollo futuro podría incluir la adición de índices de sequía más complejos, como el Índice de Severidad de la Sequía de Palmer. El SPI es una excelente primera aplicación del módulo porque está ampliamente aceptado y recomendado por la OMM (véase la Sección 2), y el cálculo sólo requiere datos de precipitación. Los datos de precipitación de entrada se proporcionan al calculador desde la base de datos Hydro-BID utilizando la tabla de datos meteorológicos activos definida durante la configuración del modelo.

Para empezar, los usuarios deben abrir el nuevo menú desplegable “Sequía” de la barra de herramientas y hacer clic en “Sequía” y, a continuación, en “Calcular índice”. Se abrirá un cuadro de diálogo con opciones para parametrizar el cálculo (**Figura 2**). Actualmente, SPI es la única opción que aparece en el campo Índice de Sequía.

Los valores del índice se calculan para dos periodos de tiempo, a corto plazo y a largo plazo, que deben ser definidos por los usuarios. En Svoboda et al., 2012, se puede encontrar más orientación sobre la selección de períodos a corto y largo plazo para la evaluación. Además, los cálculos pueden evaluarse con una cadencia semanal o mensual. Un marco temporal mensual es apropiado para la mayoría de las aplicaciones de WaterALLOC para la planificación de los recursos hídricos a largo plazo.



**Figura 2. Formulario de configuración de la calculadora del Índice de Sequía**

Una vez que el usuario haya configurado el índice, el procesamiento comenzará simplemente pulsando “Calcular índice”. Debe tenerse en cuenta que el cálculo del SPI puede tardar varios minutos en completarse. Los usuarios también deben tener presente que los índices de sequía requieren períodos de registro suficientemente largos (más de dos décadas) para lograr una precisión aceptable. Sin embargo, períodos más largos de datos meteorológicos también pueden dar lugar a cálculos más lentos.

El resultado de la calculadora del índice de sequía es una serie temporal de valores del índice a corto y largo plazo para cada cuenca presente en la tabla de datos meteorológicos de entrada. Estas series temporales se cargan en la base de datos del proyecto WaterALLOC para su uso en el Mapeador de Índices de Sequía.

### 3.3. MAPEADOR DE ÍNDICES DE SEQUÍA

Los valores pueden visualizarse para cualquier paso temporal utilizando el Mapeador de índices de sequía una vez que se haya ejecutado la Calculadora de Índices de Sequía y se haya cargado una tabla de resultados en la base de datos del proyecto WaterALLOC. Para comenzar el proceso de mapeo, los usuarios deben activar primero el Mapeador de Índices de Sequía haciendo clic en el menú desplegable “Sequía” y seleccionando “Mapear índice”. Se añadirá una barra de herramientas en la parte inferior del panel del mapa con varios campos que los usuarios podrán rellenar (**Figura 3**).



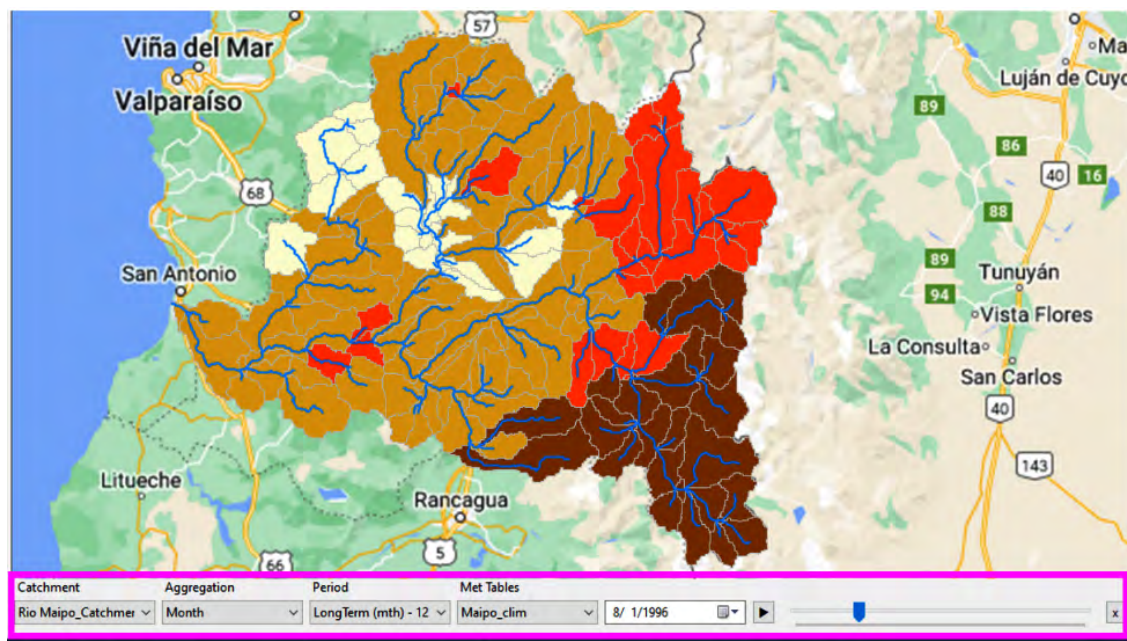


Figura 3. Interfaz de mapas WaterALLOC con módulo de mapeo de índices de sequía (resaltado en rosa)

En el Mapeador de Índices de Sequía, los usuarios deben especificar lo siguiente:

- Captación: Corresponde a la capa de captación de AHD cargada en WaterALLOC. Puede tener que ser definida manualmente por el usuario.
- Agregación: Debe coincidir con el Paso de tiempo a mapa seleccionado en la Calculadora del índice de sequía. Se recomienda utilizar Mes para la mayoría de las aplicaciones.
- Período: Corto plazo o Largo plazo.
- Tablas meteorológicas: Si el índice se ha calculado para varias tablas meteorológicas, cada una de ellas se mostrará aquí. Los usuarios deben seleccionar la Tabla Met que se utilizó para calcular los valores del Índice.

Una vez rellenada la información anterior, los valores del Índice de Sequía se pueden mapear para cualquier paso temporal en la tabla de datos Met. Las cuencas se simbolizan de acuerdo con la **Figura 4**, que se deriva de la Guía del usuario del SPI (Svoboda et al., 2012; **Tabla 1**).

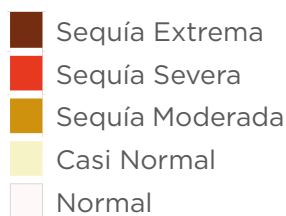


Figura 4. Simbología SPI utilizada en el Módulo de Gestión de Sequías

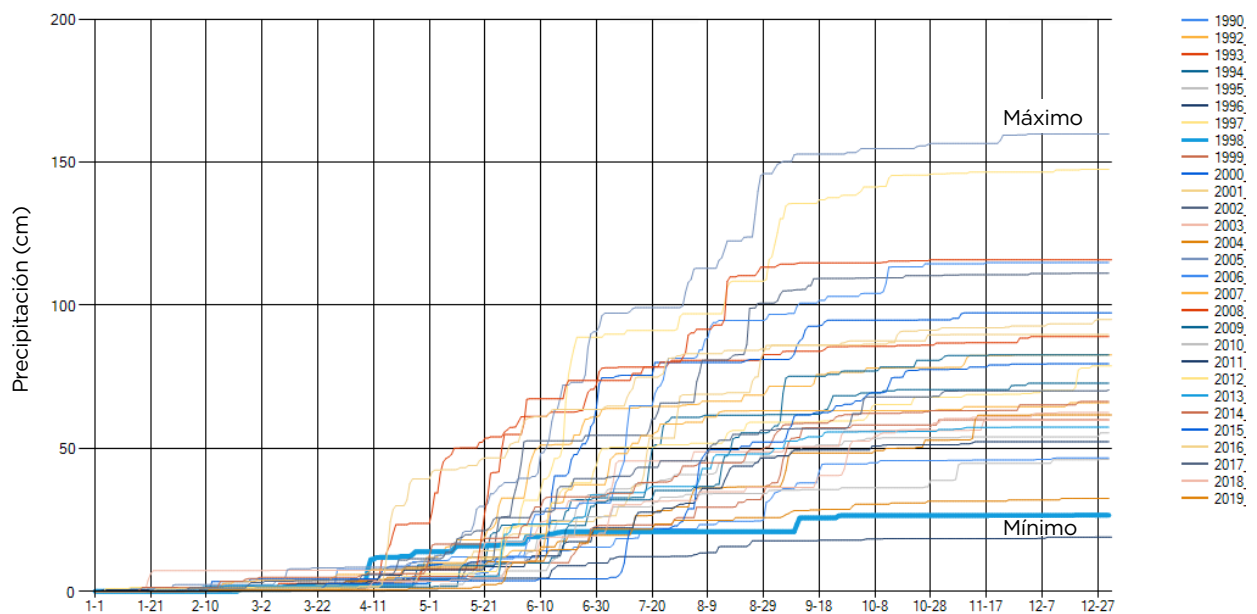


El campo “Date” (Fecha) permite a los usuarios seleccionar un paso temporal determinado para la cartografía. El control deslizante de la derecha permite una rápida visualización y comparación de las condiciones de sequía en toda la cuenca en diferentes pasos temporales. Además, los usuarios pueden hacer clic en el botón “Play” (Reproducir) para automatizar el mapeo y visualizar dinámicamente la sequía a lo largo del periodo del modelo.

Las herramientas de mapeo permiten a los usuarios visualizar los impactos de la sequía en el espacio y en el tiempo. Las sequías pueden clasificarse no sólo por intensidad, sino también por localización y duración de sus impactos. Observar cómo los patrones de sequía se forman, migran y se disipan a través de la cuenca puede informar las estrategias de gestión.

### 3.4. CUADROS DE COMPARACIÓN DE AÑOS

La última función añadida al módulo inicial de Gestión de Sequías son los gráficos de Comparación de Años. Estos permiten a los usuarios visualizar la acumulación de precipitaciones a lo largo del año y contextualizar diferentes años de sequía. En la **Figura 5** se muestra un ejemplo de estos gráficos.



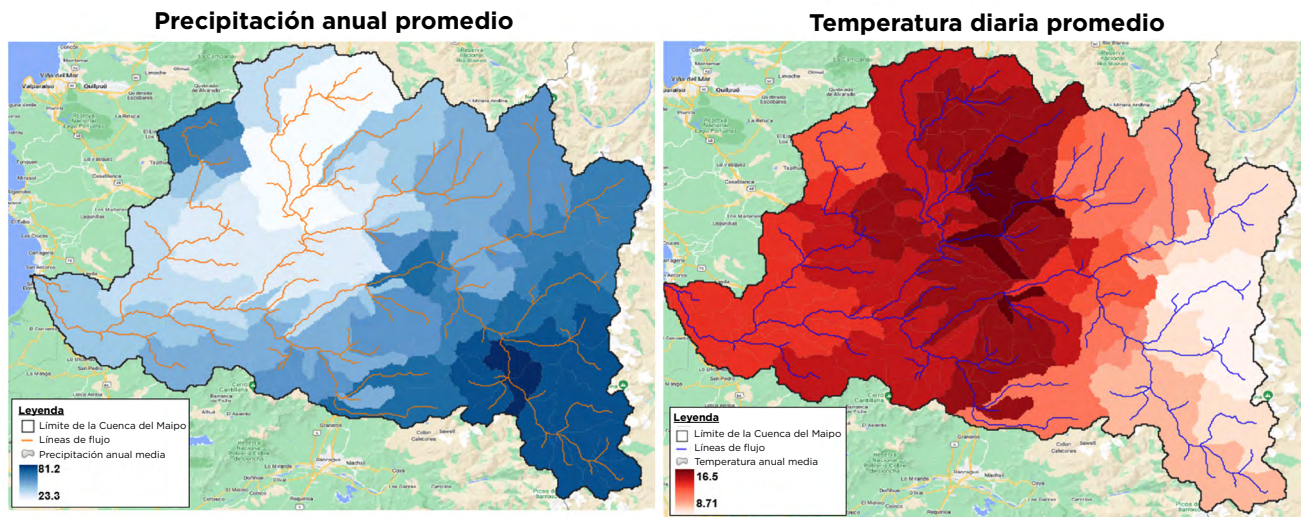
**Figura 5. Cuadro comparativo de todos los años en la Estación 14 de la Cuenca del Maipo. La línea resaltada muestra la precipitación acumulada de 1998, el segundo año más seco. Nótese que el eje de las “x” está etiquetado en incrementos de 20 días**

Estos gráficos muestran la precipitación acumulada diaria para cada año de simulación en una cuenca determinada. Cada año se representa con una sola línea, con el mínimo y el máximo etiquetados para contextualizar. Cada año puede evaluarse rápidamente en relación con los demás. En el ejemplo de la Cuenca del Maipo, la mayor parte de las precipitaciones se producen entre abril y septiembre. Esto se puede ver claramente en la **Figura 5**, donde la mayoría de las líneas se mantienen cerca de cero y luego aumentan bruscamente a partir de abril para después aplanarse de nuevo en septiembre. El valor situado más a la derecha de cada línea indica la precipitación acumulada total del año correspondiente. Se pueden resaltar líneas/años individuales para dar un contexto adicional.

En el ejemplo anterior se ha resaltado 1998, que fue el segundo año más lluvioso de la simulación (como indica el valor final de la línea). En abril de 1998 se registraron precipitaciones superiores a la media, pero el resto de la estación húmeda fue muy poco lluvioso, lo que dio lugar a un año de sequía.

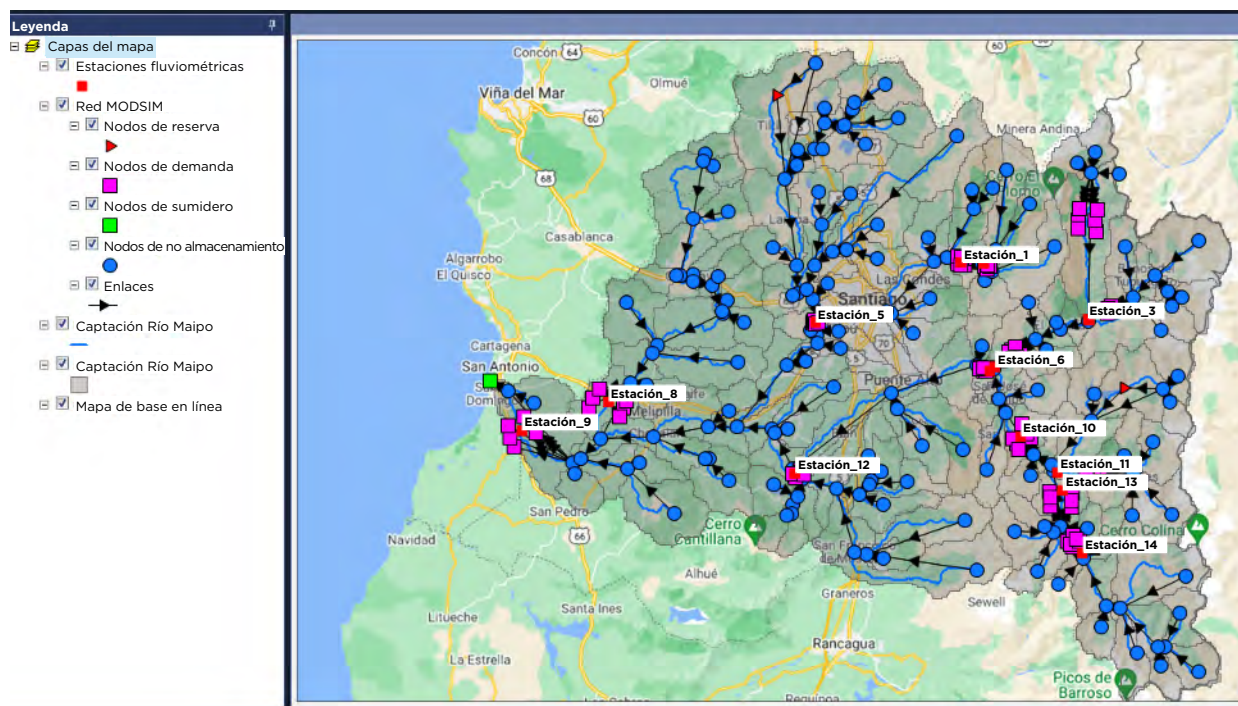
### Características del desarrollo del modelo:

- Los datos climáticos incluyeron datos de aforos y estimaciones de precipitación y temperatura derivadas de cuadrículas del período comprendido entre 1990 y 2017. La **Figura 6** muestra la variabilidad espacial de la precipitación y la temperatura en la Cuenca del Maipo.
- El caudal natural generado se simuló con Hydro-BID para las 176 zonas de captación de la cuenca.
- El modelo fue calibrado usando caudales naturalizados en 14 estaciones hidrológicas principalmente ajustando parámetros de calibración del modelo hidrológico incorporado en Hydro-BID.
- Se configuraron las demandas de agua de los sectores doméstico, agrícola, industrial, minero, ganadero y energético, y se agruparon en cada uno de los 14 puntos de calibración.
- Se incluyeron en el modelo las operaciones de dos embalses principales: El Yeso y Rungue.
- También se incorporó en el modelo la contribución glaciar.
- El modelo incluyó escenarios históricos y futuros para evaluar la sequía histórica y los posibles impactos de los cambios proyectados en el clima y la demanda.



**Figura 6. Precipitación media anual y variación espacial de la temperatura en la Cuenca del Maipo (1990 - 2017)**

La **Figura 7** presenta la red de caudales MODSIM creada en WaterALLOC para representar el sistema de recursos hídricos de la cuenca del Río Maipo. La red se compone de nodos de no almacenamiento (círculos azules) para cada zona de captación simulada, que permiten simular las entradas a la red fluvial; nodos de demanda (cuadrados rosados) que representan el uso consuntivo del agua (es decir, agrícola, doméstico, industrial, etc.) agrupados en los puntos de calibración; nodos de embalse (triángulos rojos) para modelar las operaciones de almacenamiento de los embalses; y un nodo de sumidero (cuadrado verde) que se requiere para simular los flujos aguas abajo que salen de la red fluvial.



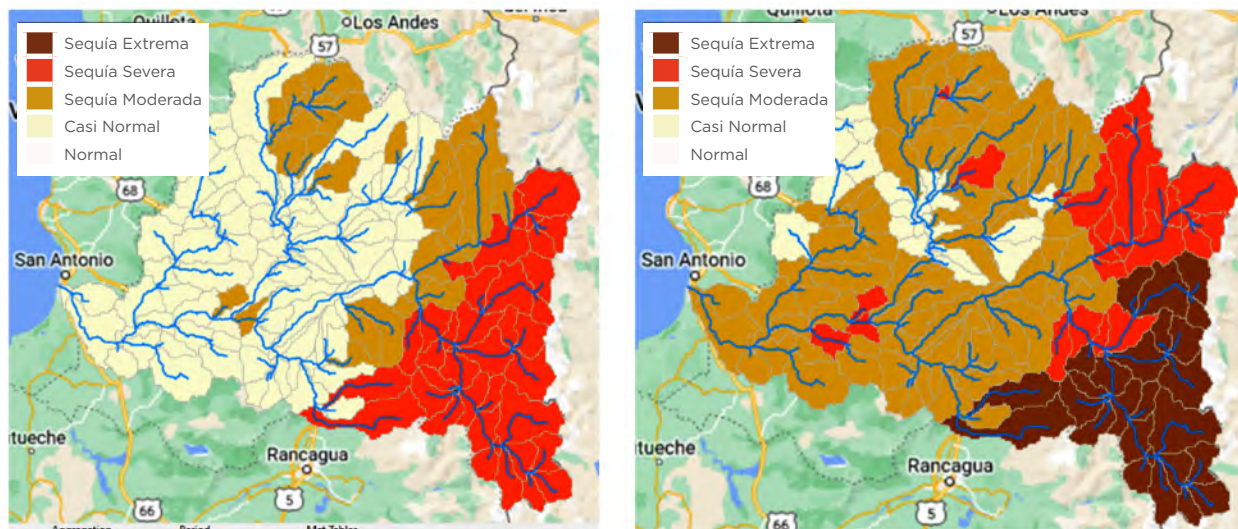
**Figura 7. Red MODSIM desarrollada para la Cuenca del Río Maipo en WaterALLOC**



### 3.5. ESTIMACIÓN DE LOS ÍNDICES DE SEQUÍA EN LA CUENCA DEL MAIPO

Para cuantificar la sequía en la Cuenca del Maipo, utilizamos el módulo de gestión de la sequía desarrollado en WaterALLOC (Sección 3) para calcular el SPI de todas las zonas de captación de la cuenca. Siguiendo las orientaciones de la Guía del Usuario del SPI (Svoboda et al., 2012), el SPI se calculó en dos escalas temporales: seis meses (corto plazo) y 12 meses (largo plazo).

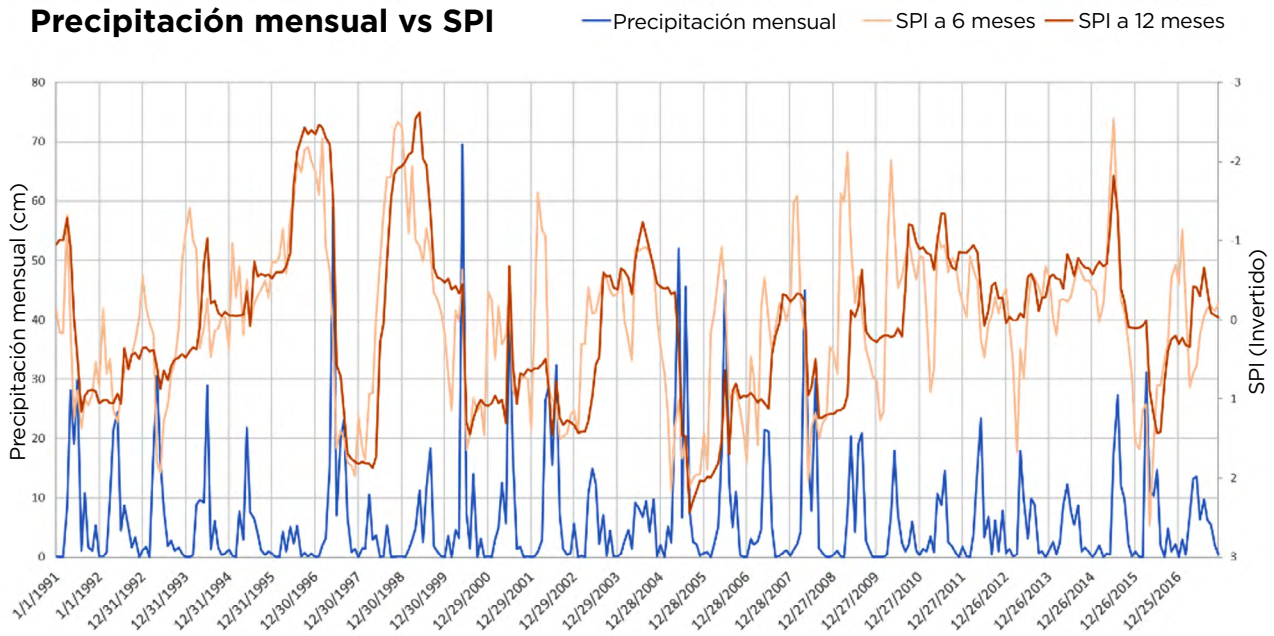
La duración a corto plazo de seis meses permite a los planificadores visualizar los déficits de precipitaciones en períodos cortos. Esto resulta especialmente útil para supervisar las condiciones de sequía durante los meses lluviosos de invierno en la cuenca. La duración a largo plazo de 12 meses recoge la precipitación total del último año calendario, que también incluirá la estación lluviosa del año anterior. En una cuenca con precipitaciones muy estacionales como la del Maipo, el SPI a largo plazo puede captar implícitamente los efectos del manto de nieve y la humedad del suelo en la cabecera. En la **Figura 8** se muestra un ejemplo de los valores del SPI durante condiciones de sequía para ambas duraciones.



**Figura 8. Valores SPI a corto plazo (izquierda) y largo plazo (derecha) para la Cuenca del Maipo el 1 de agosto de 1996. Los valores SPI a largo plazo indican una sequía más severa que los valores a corto plazo. 1996 es el año con menor precipitación en el modelo**

El SPI se consideró en un único punto de la cuenca en lugar de en todos los puntos para el plan de gestión de la sequía. Esto permite a los gestores simplificar el análisis, pero se debe tener cuidado al seleccionar la ubicación. La Estación 14, situada en la cabecera sudeste, fue seleccionada para un análisis más detallado. Esta estación se encuentra en una zona de alta precipitación y es un indicador eficaz de las condiciones en toda la cuenca. Los mapas anteriores muestran consistentemente a la Estación 14 como un indicador líder de las condiciones de sequía en el resto de la cuenca.

La **Figura 9** muestra las series temporales de los valores del SPI a corto plazo (seis meses) y a largo plazo (12 meses) junto con las precipitaciones mensuales desde 1991 hasta 2017. Ambas tendencias del SPI dependen en gran medida de las precipitaciones. Tras periodos de escasez de precipitaciones, ambas tendencias del SPI muestran la aparición de condiciones de sequía. Si las condiciones permanecen secas, el SPI se intensifica y entra en fases de sequía más severas. Los valores del SPI se acercan lentamente a valores positivos a medida que llueve y las condiciones se aproximan a la media.

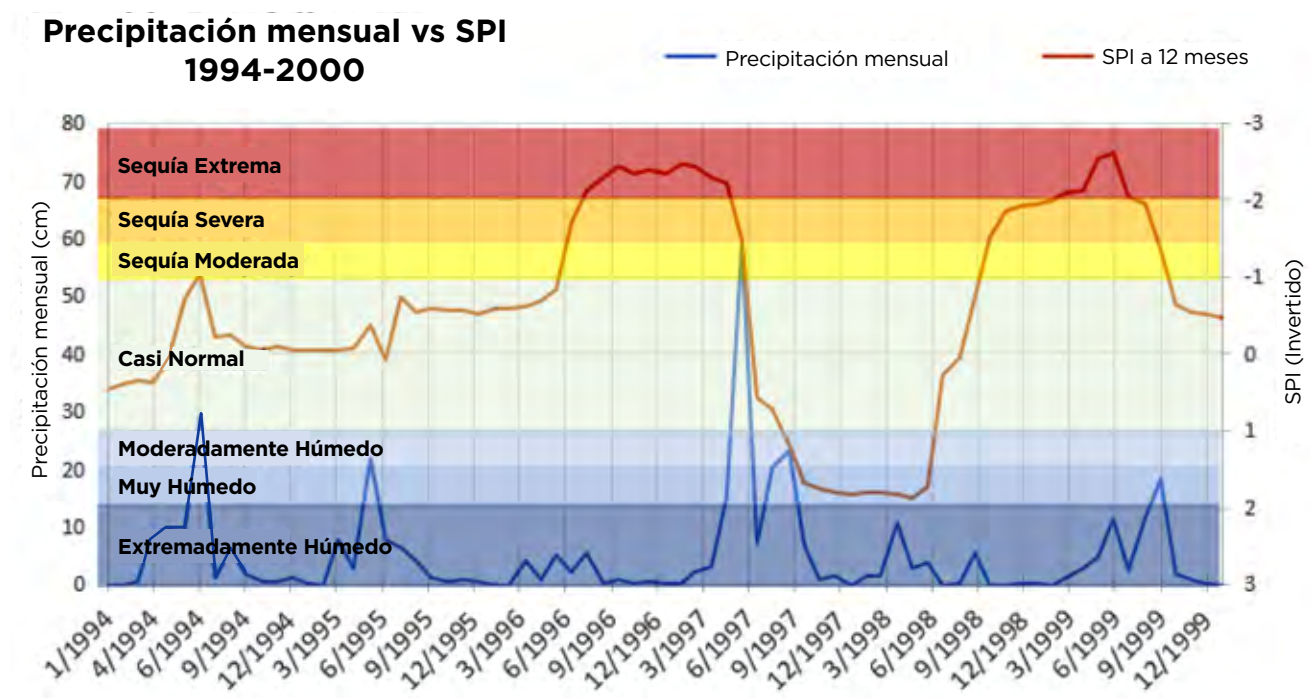


**Figura 9. SPI a corto y largo plazo, graficado en función de las precipitaciones mensuales. Téngase en cuenta que SPI está en el eje del lado derecho y está invertido para facilitar la visualización**

Aunque ambas series temporales del SPI siguen la misma tendencia general, la tendencia a seis meses es mucho más ruidosa que la tendencia a 12 meses. La sequía a corto plazo clasificada por el SPI se caracteriza por la rápida aparición y desaparición de las condiciones de sequía. Por el contrario, el SPI de 12 meses es menos reactivo a las precipitaciones a corto plazo y estabiliza las tendencias en un marco temporal anual. A efectos de la gestión de la sequía y el análisis de los acontecimientos históricos, el SPI de 12 meses es más apropiado en la Cuenca del Maipo.

### 3.5.1. Análisis detallado del SPI

En la **Figura 10** puede observarse una visión más detallada de los valores del SPI de 12 meses y de las precipitaciones mensuales de 1994 a 2000. Este periodo recoge múltiples eventos extremos. En 1995 y 1994 se dan condiciones casi normales en la cuenca (valores del SPI entre -1 y 1). La estacionalidad de las precipitaciones es claramente visible, con picos anuales de precipitaciones correspondientes a las estaciones lluviosas. Sin embargo, la estación lluviosa de 1996 presenta precipitaciones significativamente inferiores a las de años anteriores, lo que indica el posible inicio de condiciones de sequía. El SPI disminuye rápidamente en abril y mayo de 1996, confirmando la rápida intensificación de la sequía. De julio de 1996 a junio de 1997, el SPI de 12 meses caracteriza condiciones “Extremadamente secas” en la cuenca.

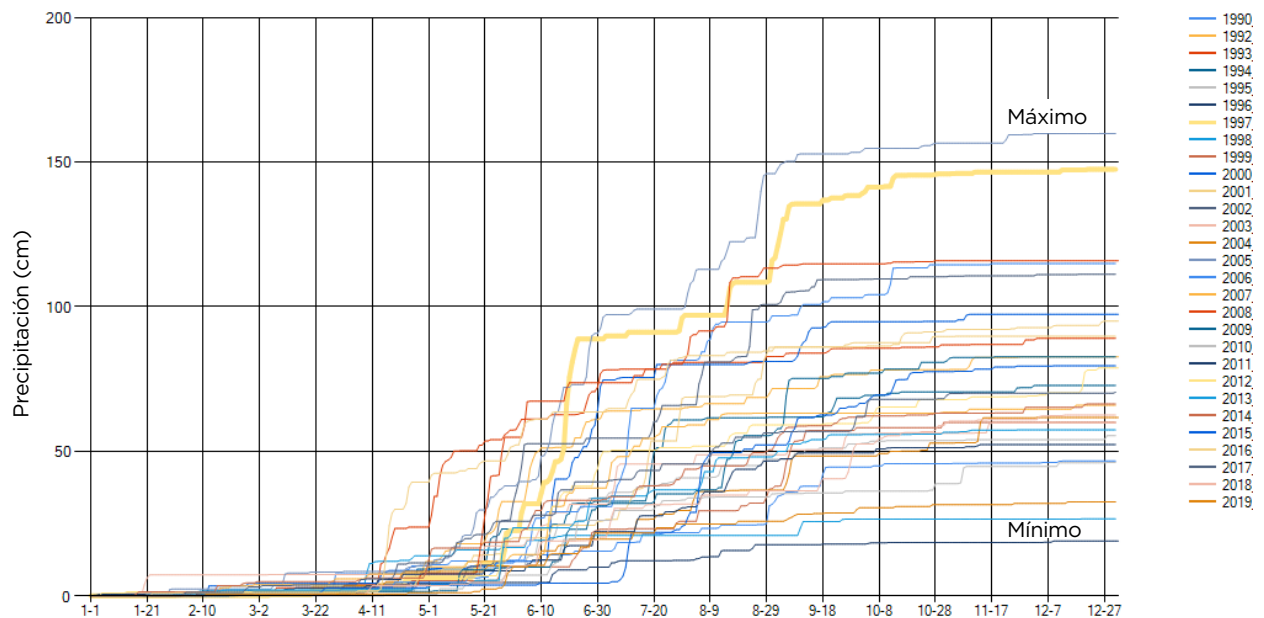


**Figure 10. Vista detallada del SPI a 12 meses de 1994 a 2000. Obsérvense las grandes fluctuaciones en el valor del SPI entre 1996 y 1998, lo que indica el inicio y el retroceso de las condiciones de sequía**

En 1997, un mes de julio extremadamente húmedo alivia las condiciones de sequía. El SPI aumenta rápidamente a medida que los meses siguientes siguen aportando grandes cantidades de precipitaciones. A finales de 1997, el SPI indica que la cuenca ha entrado en condiciones “muy húmedas”. Sin embargo, otra estación de lluvias anormalmente seca en 1998 hace que la cuenca vuelva a entrar en condiciones de sequía. Obsérvese que los cambios rápidos en las condiciones de sequía se producen principalmente durante la estación húmeda. Los meses con escasas o nulas precipitaciones en condiciones normales tienen un efecto extremadamente pequeño sobre el SPI. Dado que la mayoría de las precipitaciones se producen durante la estación húmeda, cualquier desviación de la normalidad en este período tendrá un impacto amplificado en los valores del SPI.

Un análisis más detallado mediante el gráfico comparativo de años (**Figura 11**) confirma estos resultados. 1996 fue el año más seco registrado (mostrado como el mínimo), mientras que 1997 fue el segundo más lluvioso. A continuación, 1998 fue el segundo año más seco registrado (**Figura 5**).

Dado que la gravedad de las consecuencias de la sequía varía enormemente en función de su ubicación, momento y extensión, y que la tendencia del SPI varía según la estación, entre las recomendaciones para el trabajo futuro se incluye la realización de un análisis de vulnerabilidad de la sequía a largo plazo y de los patrones climáticos extremos que permita comprender mejor los patrones espaciales y temporales de la sequía en toda la Cuenca del Maipo.



**Figura 11. Cuadro comparativo de años en Estación 14. 1996 es el año mínimo. 1997 está resaltado en amarillo y es el segundo año más lluvioso. Téngase en cuenta que el eje x está marcado en incrementos de 20 días**

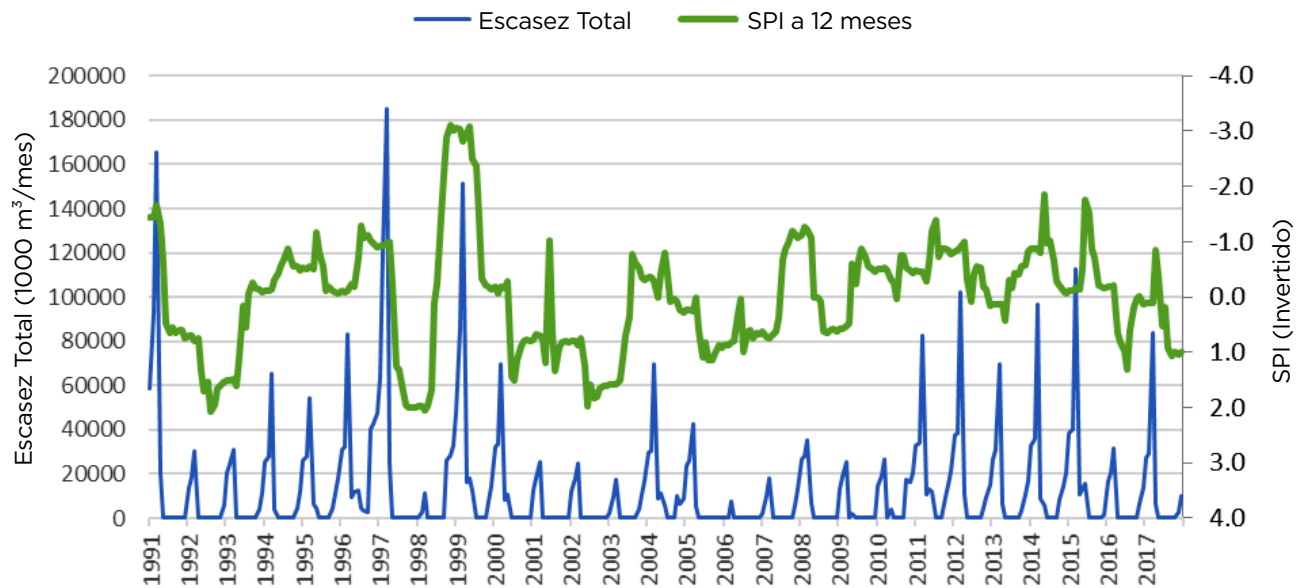
### 3.6. IMPACTOS DE LA SEQUÍA EN LA CUENCA DEL RÍO MAIPO

Para evaluar los impactos de la sequía en la cuenca del Maipo, establecimos un escenario de referencia en WaterALLOC. El escenario de referencia nos permite comprender las condiciones de referencia que se utilizarán a efectos de comparación y para evaluar los impactos de las condiciones futuras en la cuenca. Asimismo, el escenario base nos permite conocer el valor de los indicadores al momento de iniciar las acciones planificadas; es decir, establece el punto de partida de una intervención o estrategia para mitigar las sequías.



La simulación del escenario de base supone la demanda actual de agua superpuesta al contexto hidrológico histórico. Esta simulación representa las condiciones de asignación de agua que se habrían producido si los niveles de demanda actuales se hubieran exigido en la hidrología pasada. Se supuso que los niveles de demanda actuales tenían el mismo nivel que la demanda mensual de 2017 para cada año de la simulación.

Los resultados del escenario base muestran que la escasez promedio mensual simulada fue de  $13 \text{ hm}^3$  para toda la Cuenca del Maipo. La escasez se estima por la diferencia entre demanda y suministro de agua y sólo se observa cuando la demanda es superior a la cantidad de agua suministrada. La escasez puede estimarse para cada nodo y tipo de demanda, en cada punto de calibración y/o a escala de cuenca. Es importante señalar que el suministro de agua simulado a las demandas incluidas en el modelo no sólo depende de la cantidad de agua disponible en la cuenca, sino también de la distribución prioritaria configurada en el modelo. La **Figura 12** muestra los valores del SPI de 12 meses y las escaseces mensuales para el periodo de simulación 1991-2017. Los picos medios de escasez se produjeron durante los episodios de sequía de 1996/97 y 1998/99, en los que puede observarse que el SPI de 12 meses es inferior a -1.



**Figura 12. Escasez total en el escenario de base frente a los valores del SPI a 12 meses**

La escasez se observa principalmente en la parte media y baja de la cuenca (**Figura 13**), concretamente en los nodos de demanda alrededor de las estaciones de calibración 12, 8, 9 y 5, que representan el 70%, 17%, 11% y 1% de la escasez total simulada en la cuenca, respectivamente (**Tabla 2**).

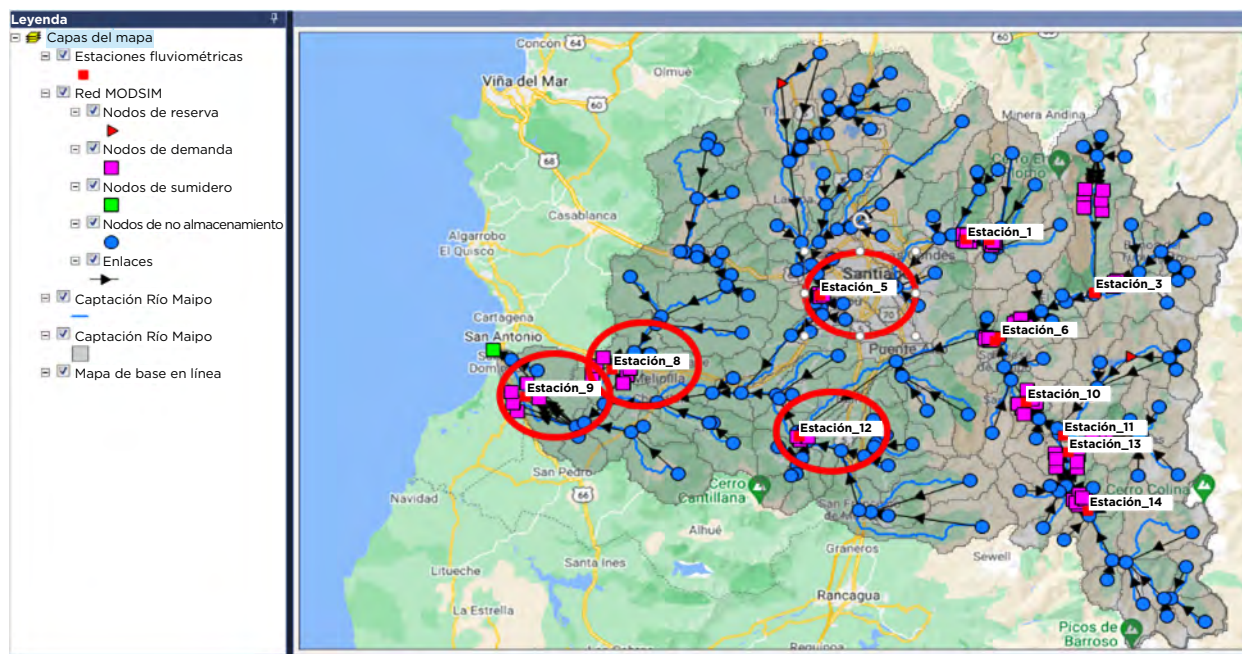


Figura 13. Localización de áreas de escasez simuladas en la Cuenca del Maipo

Tabla 2. Escasez total simulada alrededor de cada uno de los puntos de calibración

Punto de Calibración	Nombre de la Localidad	Escasez Total (1000 m <sup>3</sup> )	% de Escasez Total
Estación_1	Río Mapocho Alto	8,357	0%
Estación_2	Río Mapocho Alto	4,094	0%
Estación_3	Río Maipo Alto	0	0%
Estación_4	Río Maipo Alto	0	0%
Estación_5	Río Mapocho Bajo	66,594	1%
Estación_6	Río Maipo Alto (Hasta después de unión con Río Colorado)	0	0%
Estación_7	Río Maipo Medio	7	0%
Estación_8	Río Maipo Bajo (Entre Río Mapocho y Desembocadura)	853,268	17%
Estación_9	Río Maipo Bajo (Entre Río Mapocho y Desembocadura)	548,756	11%
Estación_10	Río Maipo Alto	0	0%
Estación_11	Río Maipo Alto	0	0%
Estación_12	Río Maipo Medio	3,512,785	70%
Estación_13	Río Maipo Alto (Hasta después de unión con Río Colorado)	0	0%
Estación_14	Río Maipo Alto (Hasta después de unión con Río Colorado)	0	0%
<b>Total</b>		<b>4,993,860</b>	

En el conjunto de la cuenca, el sector agrícola representa el 93% de la escasez total y el sector doméstico el 6%. No obstante, como se muestra en la **Figura 14**, la distribución de la escasez por sectores puede variar en cada punto de calibración. La escasez simulada en el sector doméstico es mayor en torno a la estación de calibración 5, principalmente porque es donde se encuentra la ciudad de Santiago.

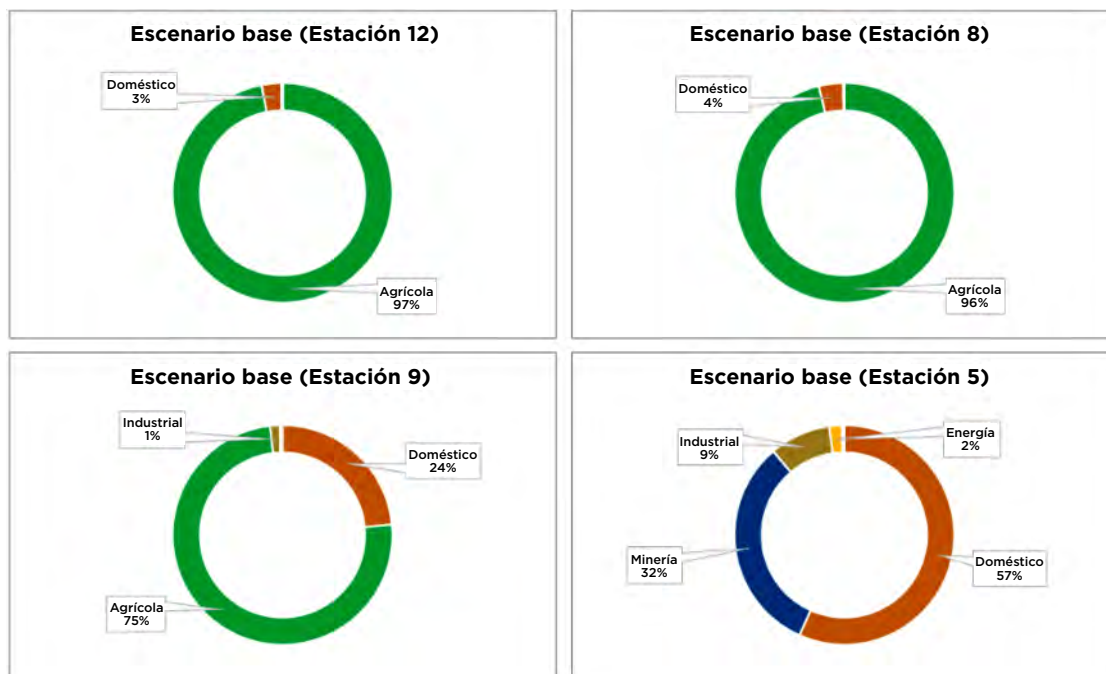


Figura 14. Distribución de la escasez por sector

### 3.7. PLAN DE GESTIÓN DE LA SEQUÍA

Para el desarrollo de un Plan de Gestión de Sequías, llevamos a cabo los siguientes pasos estandarizados (Watercare, 2020):

1. Clasificar la fase de sequía utilizando un indicador local apropiado, como los niveles de almacenamiento de los embalses, el caudal observado o los valores del índice de sequía

La declaración de un episodio de sequía depende del contexto. Por ejemplo, la severidad de un episodio de sequía pasado suele medirse por la suma de las pérdidas monetarias debidas a los impactos negativos ocurridos; mientras que la detección de la sequía se basa en umbrales, por lo que se vigilan las variables relacionadas con la sequía, como las precipitaciones y el caudal de los cursos de agua (Oertel et al., 2021). Es posible minimizar los impactos negativos de la sequía si los episodios de sequía se detectan lo antes posible. La detección temprana de la sequía es un reto constante en la investigación sobre dicho fenómeno, y en los últimos años se han presentado varias mejoras en los métodos de detección.

Los métodos de detección de sequías se han basado principalmente en el análisis de los registros de precipitaciones. Los índices de sequía son herramientas utilizadas para sintetizar la información y presentarla como un valor único, que puede utilizarse fácilmente con fines de comunicación. La variedad de índices de sequía refleja la diversidad de definiciones y clasificaciones de la misma; por lo tanto, no existe un único índice de sequía que satisfaga todos los requisitos. Dado el número de índices diferentes y la complejidad del fenómeno, a efectos ilustrativos, seleccionamos para este estudio de caso el SPI de 12 meses como indicador de sequía para la Cuenca del Maipo. En la sección 4.3 se ofrecen más detalles sobre la selección.

2. Identificar los umbrales del indicador a partir de los cuales es necesario adoptar medidas para mitigar los impactos

El umbral fijado para nuestro análisis fue -1, que se utiliza con frecuencia para determinar los periodos de sequía severa (Guttman 1998). Con más tiempo y los comentarios de las partes interesadas, se podría seleccionar un umbral del SPI más preciso para la Cuenca del Maipo comparando los valores calculados del SPI con las experiencias observadas durante episodios históricos de sequía. Esto se llevó a cabo para este análisis comparando los niveles de escasez simulados con los valores del SPI.

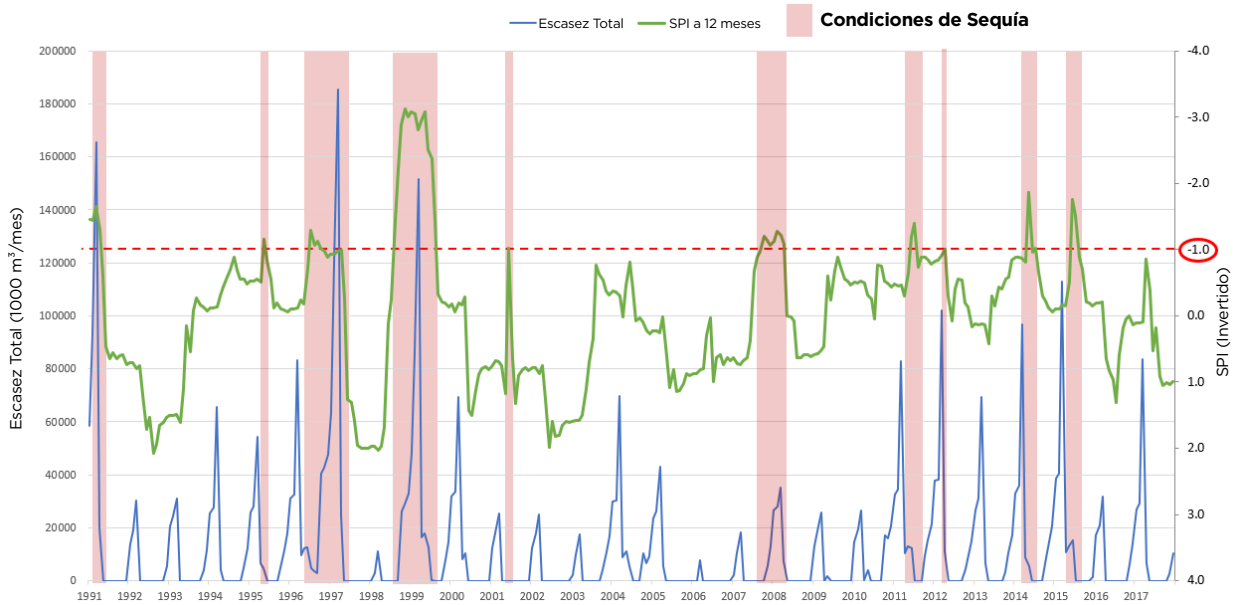
3. Identificar los impactos clave que deben evitarse (por ejemplo, la pérdida de suministro de agua para uso doméstico o el mantenimiento de la navegabilidad en un tramo del curso de agua).

Las variables que seleccionamos para evaluar los impactos de la sequía en este estudio de caso fueron la pérdida de agua para los usuarios – en otras palabras, déficit o escasez de agua – y la reducción del caudal del Río Angostura.

4. Desarrollar estrategias para mitigar los impactos clave, como la gestión de la demanda o el diseño de infraestructuras

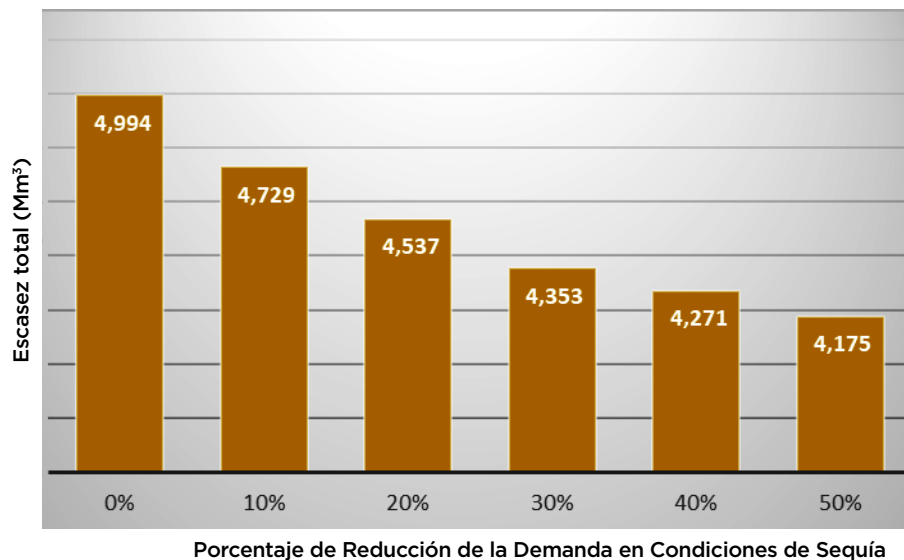
Nuestra estrategia de mitigación consistió en un sistema de gestión de la demanda basado en reglas, en el que se aplicaron restricciones a la demanda de agua cuando el indicador de sequía (SPI de 12 meses) se situó por debajo del umbral seleccionado de -1. Las restricciones a la demanda de agua se aplicaron en toda la cuenca, para todos los nodos de demanda representados en el modelo, independientemente de si estaban experimentando escasez. Esto implica una responsabilidad compartida entre los sectores para reducir el consumo de agua en caso de sequía. Realizamos un análisis de sensibilidad para evaluar el impacto de diferentes niveles de restricciones de la demanda de agua: al 10%, 20%, 30%, 40% y 50% de reducción de la demanda respecto a las condiciones de referencia.

La **Figura 15** resalta cuando el SPI indica condiciones moderadamente secas en el escenario de referencia y, por lo tanto, se desencadenaron condiciones de sequía y se implementaron estrategias de gestión de la demanda en la cuenca.



**Figura 15. Escasez total en el escenario de referencia frente a los valores del SPI de 12 meses, lo que pone de relieve los períodos en los que se desencadenaron las condiciones de sequía**

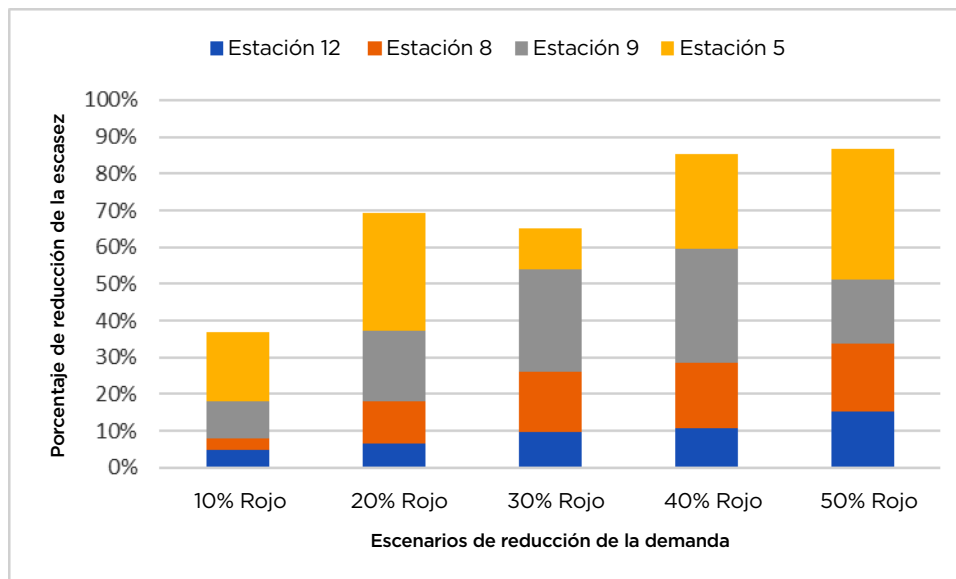
Los resultados del análisis de sensibilidad muestran que con medidas suaves de gestión de la demanda, como la reducción de la demanda en toda la cuenca en un 10% cuando se desencadenan condiciones de sequía, la escasez total de agua se redujo en un 5%. En cambio, con medidas severas, como la reducción de la demanda en un 50%, es posible reducir la escasez en un 16% (**Figura 16**).



**Figura 16. Escasez total en la Cuenca del Maipo en diferentes niveles de reducción de la gestión de la demanda**



Aunque existe una relación directamente proporcional entre las medidas de reducción de la demanda y los déficits o escaseces de agua a nivel de cuenca, lo que se observa es que cuanto más estrictas son las medidas de reducción de la demanda, mayores son las reducciones de los déficits de agua. Sin embargo, debemos señalar que esta relación no se mantiene en algunos puntos de calibración. Por ejemplo, en el punto de calibración Estación 9, la mayor reducción de la escasez de agua se consigue con un escenario de reducción de la demanda del 40%, y en el caso de Estación 8, no hay cambios significativos en la escasez con los escenarios de reducción de la demanda del 40% y del 50% (**Figura 17**).



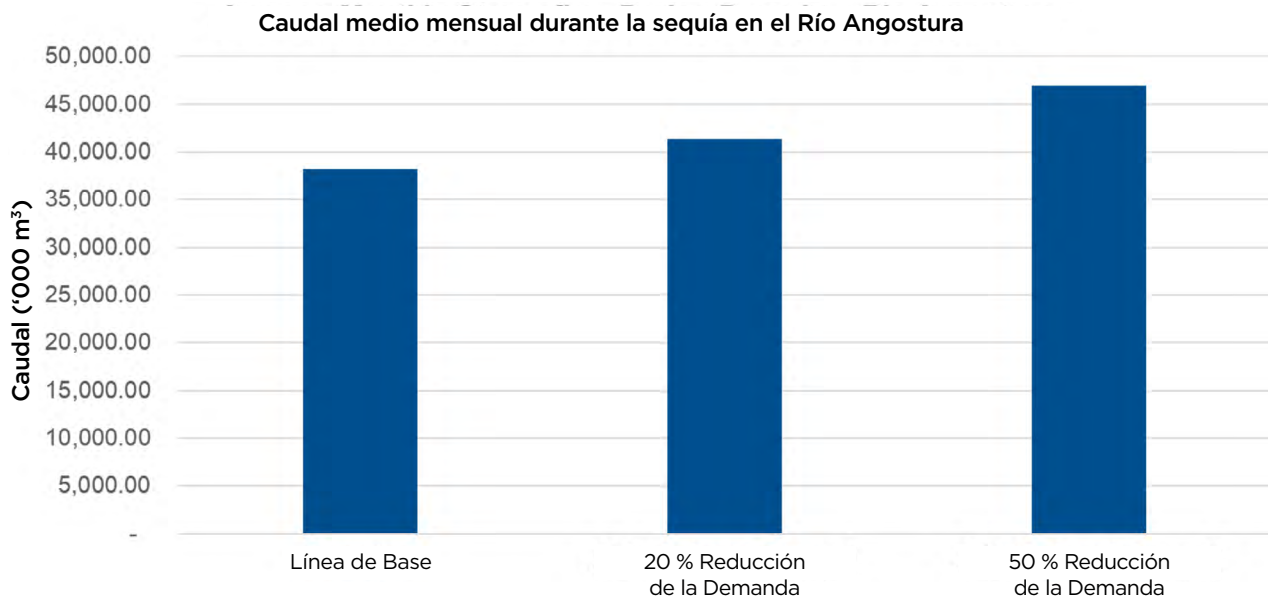
**Figura 17. Porcentaje de reducción de la escasez en diferentes escenarios de reducción de la demanda**

Adicionalmente, la distribución de la escasez por sectores productivos no varía entre los escenarios de gestión de la demanda en las estaciones de calibración 12 y 8, ubicadas en la parte media y baja del Río Maipo, respectivamente, donde predominan las actividades agrícolas (**Figura 18**). Por otro lado, la distribución de la escasez por sectores productivos en las estaciones 9 y 5 cambia significativamente dependiendo del escenario de gestión de la demanda. Por ejemplo, en Estación 9, el 75% de la escasez se observa en el sector agrícola en condiciones de referencia, pero en los escenarios de reducción de la demanda del 10%, 20% y 50%, la escasez de agua en el sector agrícola es del 20%, 67% y 81%, respectivamente. Es importante señalar que estos resultados dependen en gran medida de las configuraciones del costo (prioridades) de la asignación de agua asignadas en el modelo para satisfacer la demanda hídrica. Por ejemplo, se observó que todas las demandas del modelo se establecieron con la misma prioridad para la asignación de agua, lo que no es óptimo para lograr una solución de red viable, especialmente en escenarios de escasez de agua. Los detalles de la configuración del modelo pueden consultarse en el informe (CEA, 2021), donde se describen las configuraciones Hydro-BID y WaterALLOC.



**Figura 18. Distribución de la escasez total por sectores, para diferentes estrategias de reducción de la gestión de la demanda**

En la **Figura 19** se presenta el efecto de la aplicación de las estrategias de gestión de la sequía en los caudales del Río Angostura. El caudal en el cauce puede ser importante para la gestión de los ecosistemas acuáticos, los acuerdos políticos y la navegabilidad. Este es un enfoque de demostración; otros lugares de la cuenca pueden ser más importantes para los responsables de la toma de decisiones.



**Figura 19. Caudal medio mensual durante la sequía en el Río Angostura**



## 4. CAPACITACIÓN

Se impartió un programa de formación de capacidades utilizando herramientas analíticas, con el objetivo de reforzar las capacidades técnicas de las partes interesadas locales en la gestión y planificación de los recursos hídricos. Esta actividad se llevó a cabo paralelamente a otras actividades del proyecto, para que los funcionarios locales pudieran adquirir los conocimientos y las competencias técnicas necesarios sobre preparación de datos, configuración y aplicación de los modelos de evaluación de los recursos hídricos.

En el marco del programa de formación impartido, los funcionarios locales recibieron capacitación para:

- Aplicar Hydro-BID y WaterALLOC como herramientas para una gestión eficiente de los recursos hídricos.
- Evaluar los efectos del cambio climático, el crecimiento demográfico y los cambios en la demanda sobre la disponibilidad y variabilidad de los recursos hídricos.
- Desarrollar análisis especializados en las cuencas que incluyan la simulación de demandas e infraestructura hídrica (embalses, trasvases, plantas potabilizadoras, entre otros).
- Elaborar series de datos para configurar modelos y analizar resultados obtenidos con estas herramientas que sirvan de insumo para la elaboración de planes de manejo de cuencas.

El programa de formación consistió en cuatro sesiones virtuales de dos horas y media a tres horas, realizadas en diciembre de 2020, que cubrieron teoría, configuración y aplicación de las herramientas de evaluación de los recursos hídricos, Hydro-BID y WaterALLOC. La **Figura 20** muestra los temas del programa de formación. Dicho programa se diseñó y se basó en el enfoque “aprender haciendo”, en el que los participantes pudieron procesar los datos requeridos y configurar y calibrar los modelos en las cuencas de interés mediante conceptos teóricos, ejercicios guiados y sesiones prácticas.

En el programa de capacitación participaron diferentes actores, entre ellos el CEA, la Universidad de Desarrollo (UDD), la Universidad de Concepción (UDEC), y Fundación Chile.

Además del programa de capacitación, el 30 de noviembre de 2021 se llevó a cabo una sesión sobre el Módulo de Gestión de Sequías desarrollado en WaterALLOC. Dicha sesión abarcó la teoría de la gestión de sequías, el desarrollo del módulo de sequías en WaterALLOC y una visión general del estudio de caso implementado en la Cuenca del Maipo. En esta sesión participaron las mismas partes interesadas mencionadas anteriormente. Durante esta sesión, se ofreció tiempo para debatir la metodología y las recomendaciones, pero no se obtuvieron comentarios de los participantes.

<b>Sesión 1</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Introducción a HydroBID, MODSIM y WaterALLOC</li> <li>• Instalación y configuración de un proyecto WaterALLOC</li> <li>• Espacio de trabajo y organización de archivos</li> </ul>
<b>Sesión 2</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ejercicio práctico WaterALLOC en la cuenca del Una</li> <li>• Creación de un proyecto</li> <li>• Carga de archivos shape</li> <li>• Ajustes de configuración del proyecto</li> <li>• Ejecutar HydroBID</li> <li>• Crear red MODSIM</li> <li>• Importar resultados de HydroBID</li> <li>• Ejecutar MODSIM</li> <li>• Revisión de resultados y comparación de caudales simulados (naturales) y observados</li> </ul>
<b>Sesión 3</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ejercicio práctico WaterALLOC en la cuenca del Una (Continuación)</li> <li>• Creación y parametrización de la demanda de agua</li> <li>• Creación y parametrización de la infraestructura hídrica</li> <li>• Revisión de los resultados y comparación de los caudales simulados (operativos) y observados</li> <li>• Revisión del modelo WaterALLOC desarrollado para la cuenca del Maule</li> </ul>
<b>Sesión 4</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ejercicio práctico WaterALLOC en la cuenca del Una (Continuación)</li> <li>• Visión general del proceso de calibración</li> </ul>

**Figura 20. Tópicos cubiertos por el programa de entrenamiento de capacidades**

# REFERENCIAS

Aguayo, R., León-Muñoz, J., Garreaud, R., & Montecinos, A. (2021) Hydrologic droughts in the southern Andes (40-45oS) from an ensemble experiment using CMIP5 and CMIP6 models. *Nature Scientific Reports* 11:5530.

Ayala, A., Farías-Barahona, D., Huss, M., Pellicciotti, F., McPhee, J., & Farinotti, D. (2020). Glacier runoff variations since 1955 in the Maipo River Basin, Semiarid Andes of Central Chile. *The Cryosphere*, 14, 2005-2027.

CEA. (2021). Informe de Modelo Conceptual y de Aplicación de Hydro-BID y Calibración en Cuencas Piloto - Maule y Maipo. Conservación y Protección de los Ecosistemas Hídricos para el Desarrollo del Plan Nacional de Seguridad Hídrica y en Cuencas. Centro de Ecología Aplicada. Santiago, Chile.

Guttman, N.B. (1998). Comparing the Palmer Drought Index and the Standardized Precipitation Index. *Journal of the American Water Resources Association*, 34:113-121.

Labadie, J.W. (2006). "MODSIM: decision support system for integrated river basin management."

Meza, F., Wilks, D., Gurovich, L., & Bambach, N. (2012). Impacts of climate change on irrigated agriculture in the Maipo Basin, Chile: Reliability of water rights and changes in the demand for irrigation. *Journal of Water Resource Planning Management*, 421-430. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)wr.1943-5452](https://doi.org/10.1061/(asce)wr.1943-5452).

Moreda, F., Miralles, F., & Muñoz, R. (2014). "Hydro-BID: An integrated system for modeling impacts of climate change on water resources. Part 2." Inter-American Development Bank, Tech. Rep. IDB-TN-529.

Oertel, M., Meza, F.J., & Gironás, J. (2021). Multivariate Standardized Drought Indices to identify drought events: Application in the Maipo River Basin. In: Ribbe, L., Haarstrick, A., Babel, M., Dehnavi, S., Biesalski, H.K. (eds). *Towards Water Secure Societies*. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-50653-7\\_11](https://doi.org/10.1007/978-3-030-50653-7_11).

Rosegrant, M.W., Ringler, C., McKinney, D.C., Cai, X., Keller, A., & Donoso, G. (2000). Integrated Economic-hydrologic Water Modeling at the Basin Scale: The Maipo River Basin. Environment and Production Technology Division. International Food Policy Research Institute. Washington, D.C.

Svoboda, M.D. & Fuchs, B.A. (2016). Handbook of drought indicators and indices (pp. 1-44). Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization. [https://www.droughtmanagement.info/literature/GWP\\_Handbook\\_of\\_Drought\\_Indicators\\_and\\_Indices\\_2016.pdf](https://www.droughtmanagement.info/literature/GWP_Handbook_of_Drought_Indicators_and_Indices_2016.pdf)

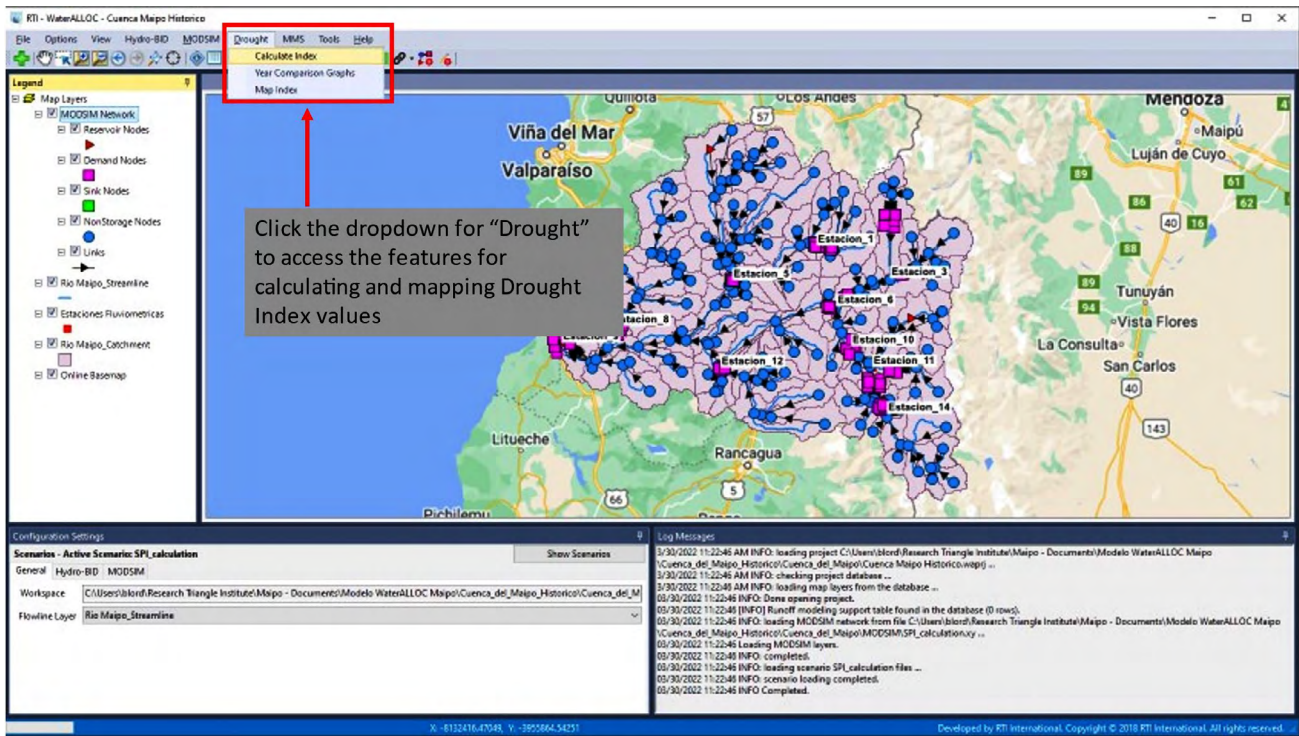
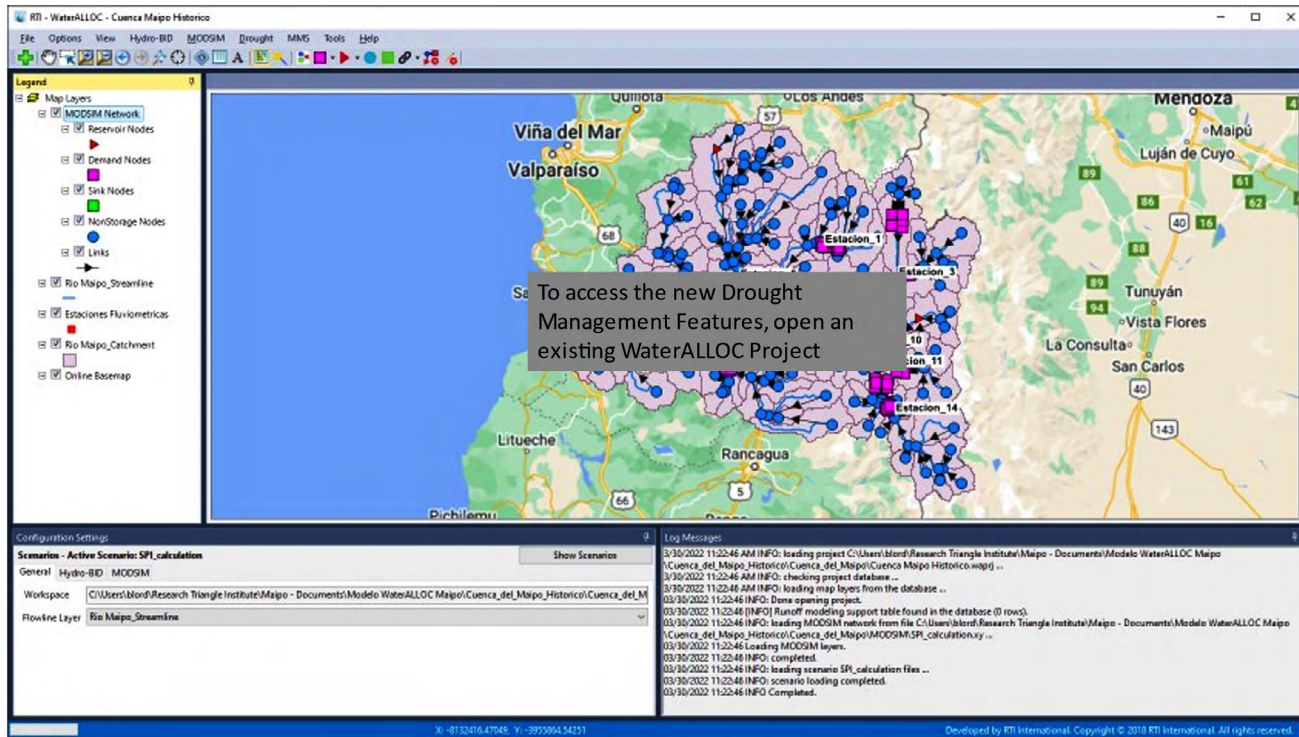
Svoboda, M., Hayes, M., & Wood, D.A. (2012). "Standardized precipitation index user guide." Drought Assessment, Management, and Planning: Theory and Case Studies | SpringerLink.

Watercare. (2020). Auckland Metropolitan Drought Management Plan.

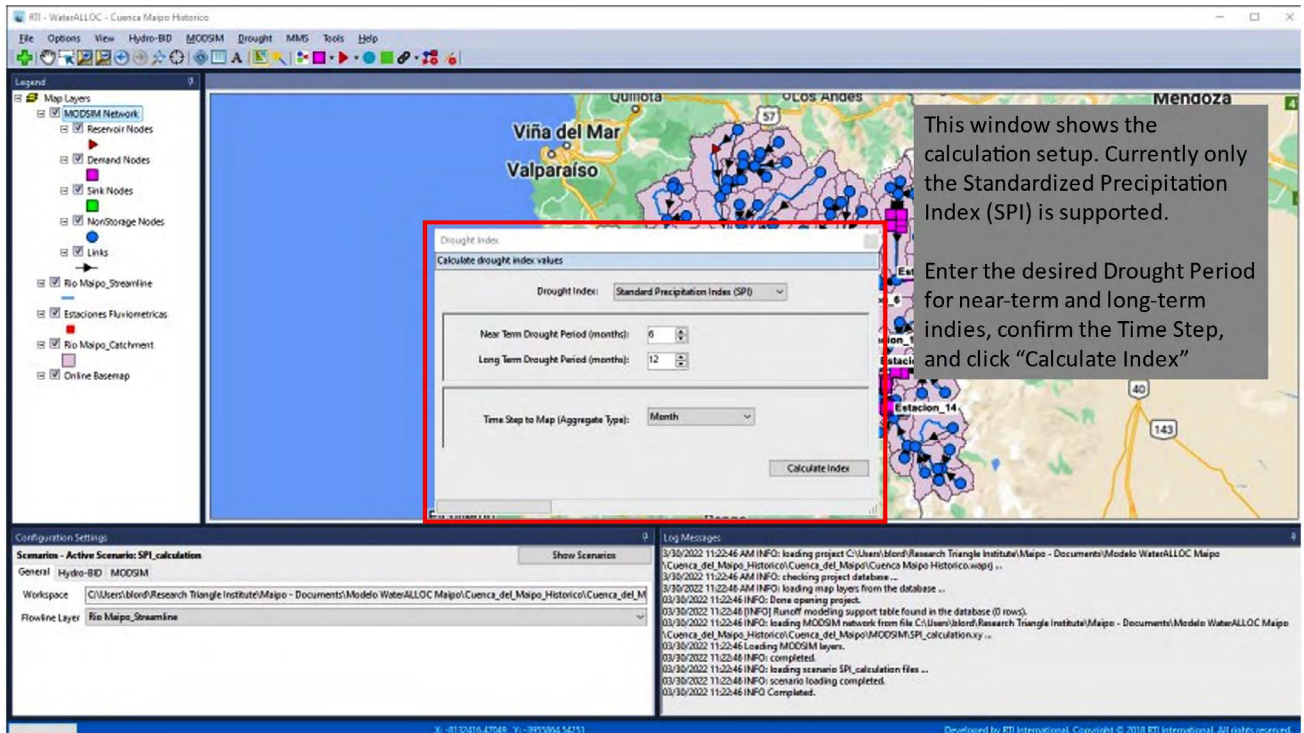
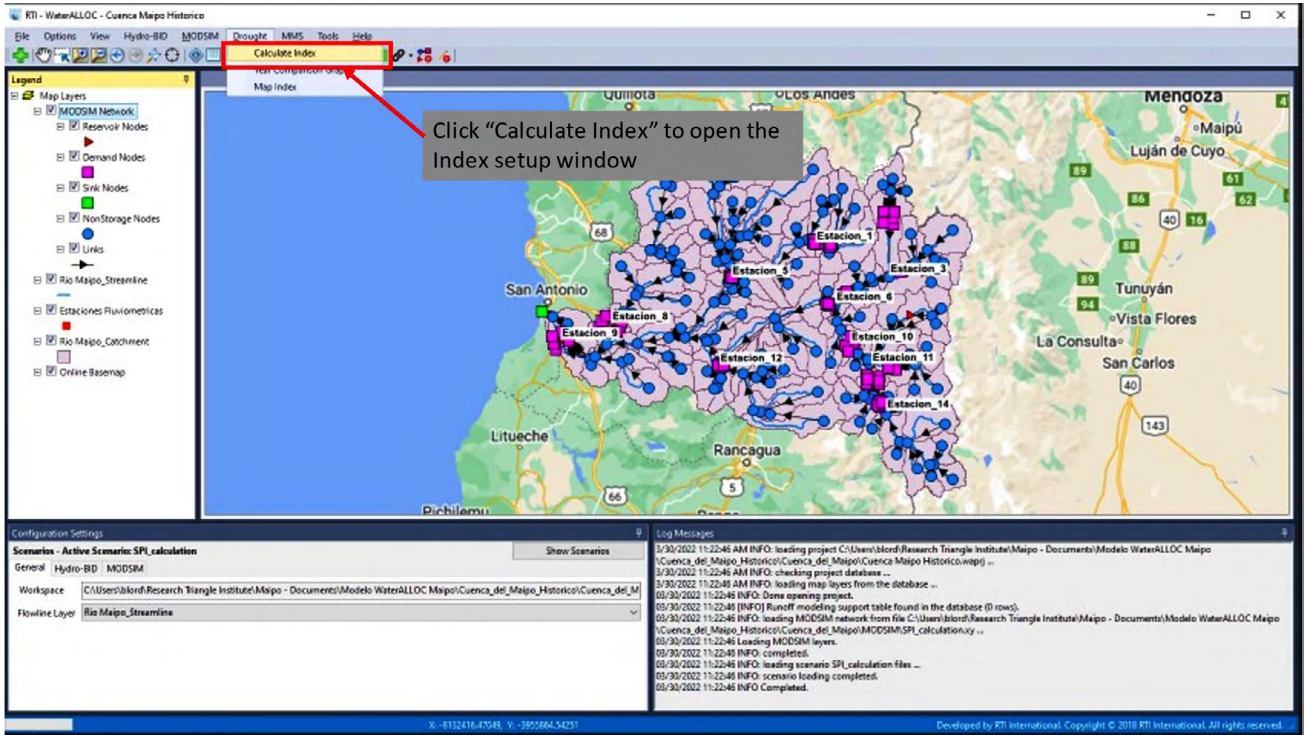


# APÉNDICE 1 – TUTORIAL DE LAS CARACTERÍSTICAS DE SEQUÍAS DE WaterALLOC

La siguiente guía (que comienza en la próxima página) proporciona a los usuarios un recorrido paso a paso de las nuevas funciones de gestión de la sequía en WaterALLOC.







WaterALOC - Cuenca Maipo Historico

File Options View Hydro-BD MODSIM Drought MMS Tools Help

Legend

- Map Layers
  - MODSIM Network
  - Reservoir Nodes
  - Demand Nodes
  - Sink Nodes
  - NonStorage Nodes
  - Links
  - Rio Maipo\_Streamline
  - Estaciones Fluviometricas
  - Rio Maipo\_Catchment
  - Online Basemap

Drought Index

Calculate drought index values

Drought Index: Standard Precipitation Index (SPI)

Near Term Drought Period (months): 1

Long Term Drought Period (months): 12

Time Step to Map (Aggregate type): Month

Calculate Index

calculating SPI 316736200-12 | 14/2521 ...

Configuration Settings

Scenario - Active Scenario: SPI\_calculation

General: Hydro-BD MODSIM

Workspace: C:\Users\blordf\Research Triangle Institute\Maipo - Documents\Modelo WaterALOC Maipo\Cuenca\_del\_Maipo\_Historico\Cuenca\_del\_Maipo

Flowline Layer: Rio Maipo\_Streamline

Log Messages

```

03/30/2022 11:22:46 AM INFO: loading project C:\Users\blordf\Research Triangle Institute\Maipo - Documents\Modelo WaterALOC Maipo
\Cuenca_del_Maipo_Historico\Cuenca_del_Maipo\Cuenca_Maipo_Historico.wapj ...
03/30/2022 11:22:46 AM INFO: checking project database ...
03/30/2022 11:22:46 AM INFO: loading map layers from the database ...
03/30/2022 11:22:46 AM INFO: Done opening project.
03/30/2022 11:22:46 AM INFO: Runoff modeling support table found in the database (0 rows).
03/30/2022 11:22:46 AM INFO: loading MODSIM network from file C:\Users\blordf\Research Triangle Institute\Maipo - Documents\Modelo WaterALOC Maipo
\Cuenca_del_Maipo_Historico\Cuenca_del_Maipo\MODSIM\SPI_calculation.xy ...
03/30/2022 11:22:46 AM Loading MODSIM layers.
03/30/2022 11:22:46 AM INFO: completed.
03/30/2022 11:22:46 AM INFO: loading scenario SPI_calculation files ...
03/30/2022 11:22:46 AM INFO: scenario loading completed.
03/30/2022 11:22:46 AM INFO: completed.
  
```

X: -813016.47048 Y: -3959854.54251

Developed by RTI International. Copyright © 2018 RTI International. All rights reserved.

WaterALOC - Cuenca Maipo Historico

File Options View Hydro-BD MODSIM Drought MMS Tools Help

Legend

- Map Layers
  - Rio Maipo\_Streamline
  - Estaciones Fluviometricas
  - MODSIM Network
  - Reservoir Nodes
  - Demand Nodes
  - Sink Nodes
  - NonStorage Nodes
  - Links
  - Rio Maipo\_Catchment
  - Online Basemap

Drought Index

Calculate drought index values

Drought Index: Standard Precipitation Index (SPI)

Near Term Drought Period (months): 1

Long Term Drought Period (months): 12

Time Step to Map (Aggregate type): Month

Calculate Index

completed

Configuration Settings

Scenario - Active Scenario: SPI\_calculation

General: Hydro-BD MODSIM

Workspace: C:\Users\blordf\Research Triangle Institute\Maipo - Documents\Modelo WaterALOC Maipo\Cuenca\_del\_Maipo\_Historico\Cuenca\_del\_Maipo

Flowline Layer: Rio Maipo\_Streamline

Log Messages

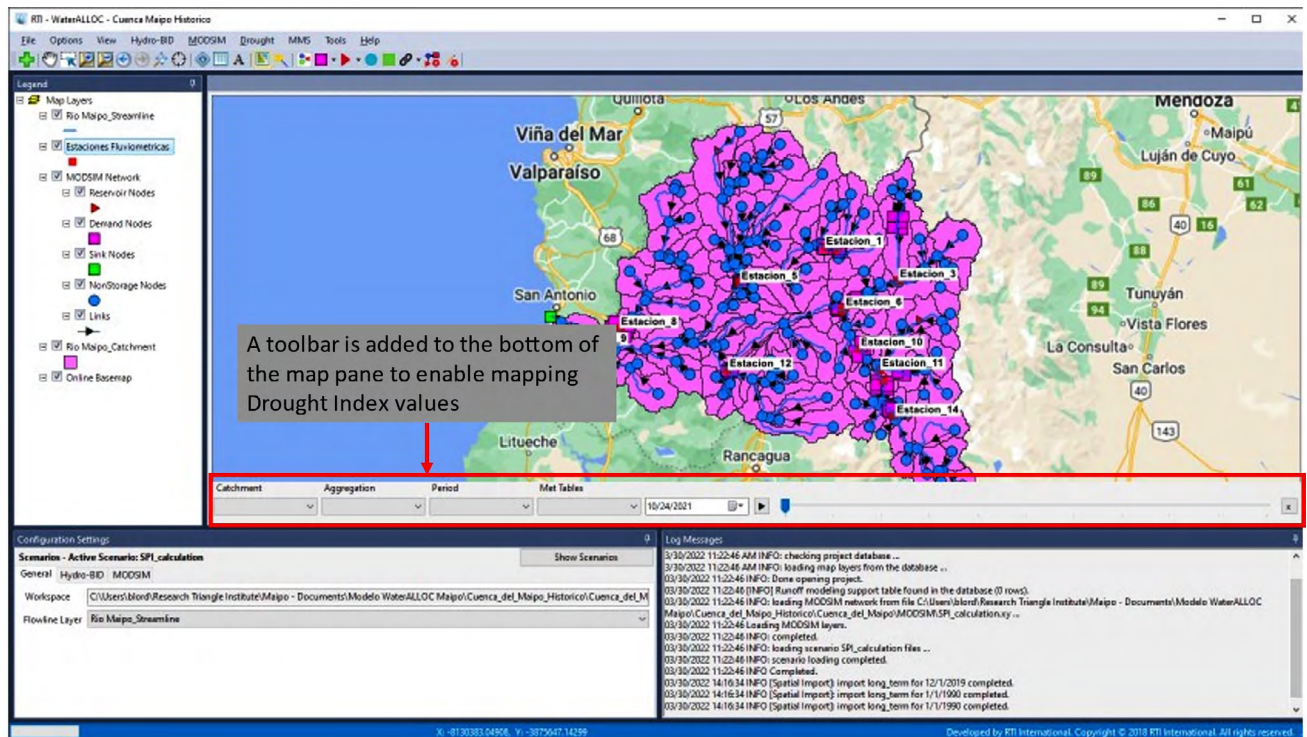
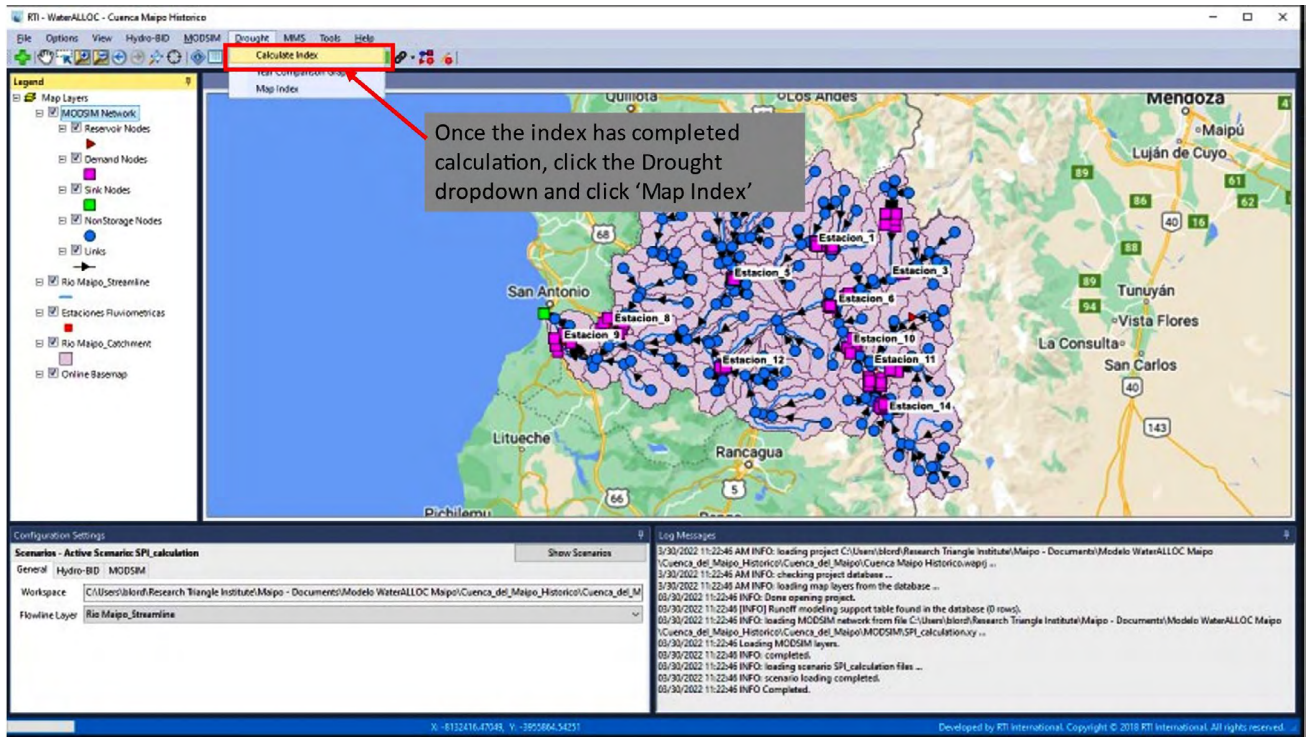
```

03/30/2022 2:41:55 PM INFO: loading project C:\Users\blordf\Research Triangle Institute\Maipo - Documents\Modelo WaterALOC Maipo\Cuenca_del_Maipo_Historico
\Cuenca_del_Maipo_Historico\Cuenca_Maipo_Historico.wapj ...
03/30/2022 2:41:55 PM INFO: checking project database ...
03/30/2022 2:41:55 PM INFO: loading map layers from the database ...
03/30/2022 2:41:55 PM INFO: Done opening project.
03/30/2022 2:41:55 PM INFO: Runoff modeling support table found in the database (0 rows).
03/30/2022 2:41:55 PM INFO: loading MODSIM network from file C:\Users\blordf\Research Triangle Institute\Maipo - Documents\Modelo WaterALOC Maipo
\Cuenca_del_Maipo_Historico\Cuenca_del_Maipo\MODSIM\SPI_calculation.xy ...
03/30/2022 2:41:55 PM Loading MODSIM layers.
03/30/2022 2:41:55 PM INFO: completed.
03/30/2022 2:41:55 PM INFO: loading scenario SPI_calculation files ...
03/30/2022 2:41:55 PM INFO: scenario loading completed.
03/30/2022 2:41:55 PM INFO: completed.
03/30/2022 2:41:55 PM INFO: completed.
03/30/2022 2:41:55 PM INFO: calculation time elapsed: 2822.7254277 seconds
  
```

X: -809442.70596 Y: -397201.88871

Developed by RTI International. Copyright © 2018 RTI International. All rights reserved.







Click the dropdown for each field to populate with the appropriate value. This should reflect the setup defined in the Drought Index calculator

- Catchment: corresponds to the AHD catchment layer loaded in WaterALLOC. May need to be manually defined by the user
- Aggregation: should match the Time Step to Map selected in the Drought Index Calculator. Recommended to use Month for most applications
- Period: Short Term or Long Term
- Met Tables: if the index has been calculated for multiple met tables, each will be shown here. Users should select the Met Table that was used to calculate the Index values

Configuration Settings:

Scenario: Active Scenario: SFI\_calculation

General: Hydro-BD: MODSIM

Workspace: C:\Users\lmon\Research Triangle Institute\Maipo - Documents\Modelo WaterALLOC\Maipo\Cuenca\_del\_Maipo\_Historico\Cuenca\_del\_Maipo

Flowline Layer: Rio Maipo\_Streamline

Log Messages:

```

03/30/2022 11:52:46 AM INFO: checking project database ...
03/30/2022 11:52:46 AM INFO: loading map layers from the database ...
03/30/2022 11:52:46 AM INFO: Done opening project.
03/30/2022 11:52:46 AM INFO: Runoff modeling support table found in the database (0 rows).
03/30/2022 11:52:46 AM INFO: loading MODSIM network from file C:\Users\lmon\Research Triangle Institute\Maipo - Documents\Modelo WaterALLOC\Maipo\Cuenca_del_Maipo_Historico\Cuenca_del_Maipo\MODSIM_networks\...
03/30/2022 11:52:46 AM INFO: Loading MODSIM layers.
03/30/2022 11:52:46 AM INFO: completed.
03/30/2022 11:52:46 AM INFO: loading scenario SFI_calculation files ...
03/30/2022 11:52:46 AM INFO: scenario loading completed.
03/30/2022 11:52:46 AM INFO: Completed.
03/30/2022 14:16:34 INFO [Spatial Import] import long_term for 12/1/2019 completed.
03/30/2022 14:16:34 INFO [Spatial Import] import long_term for 1/1/1990 completed.
03/30/2022 14:16:34 INFO [Spatial Import] import long_term for 1/1/1990 completed.
  
```

Once populated, the Index values for the first timestep will be automatically mapped

Configuration Settings:

Scenario: Active Scenario: SFI\_calculation

General: Hydro-BD: MODSIM

Workspace: C:\Users\lmon\Research Triangle Institute\Maipo - Documents\Modelo WaterALLOC\Maipo\Cuenca\_del\_Maipo\_Historico\Cuenca\_del\_Maipo

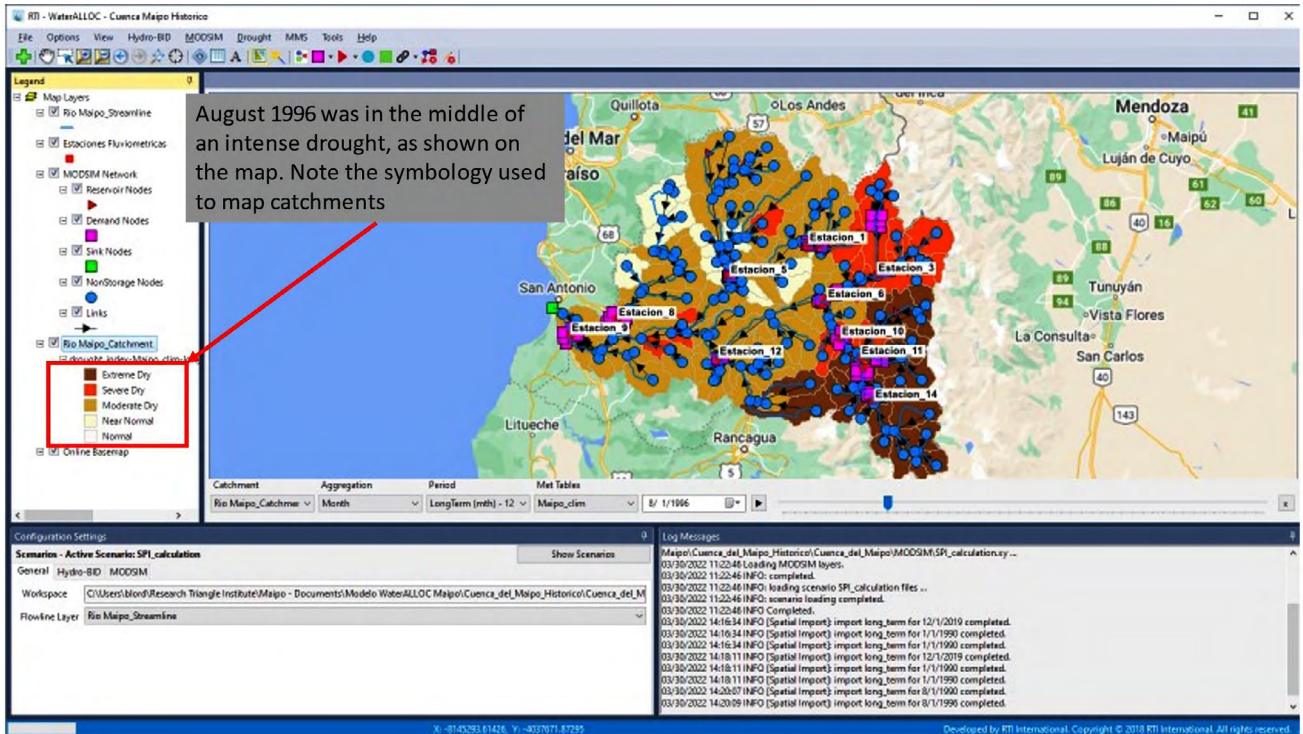
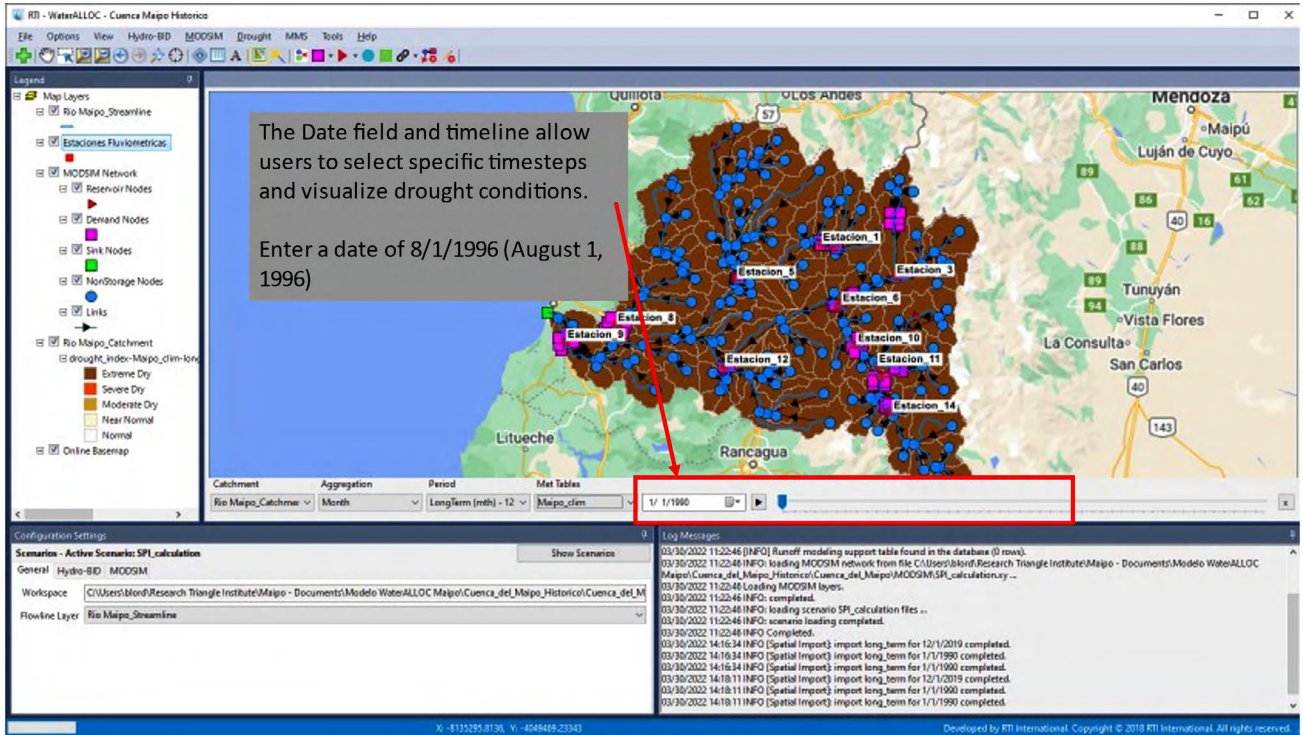
Flowline Layer: Rio Maipo\_Streamline

Log Messages:

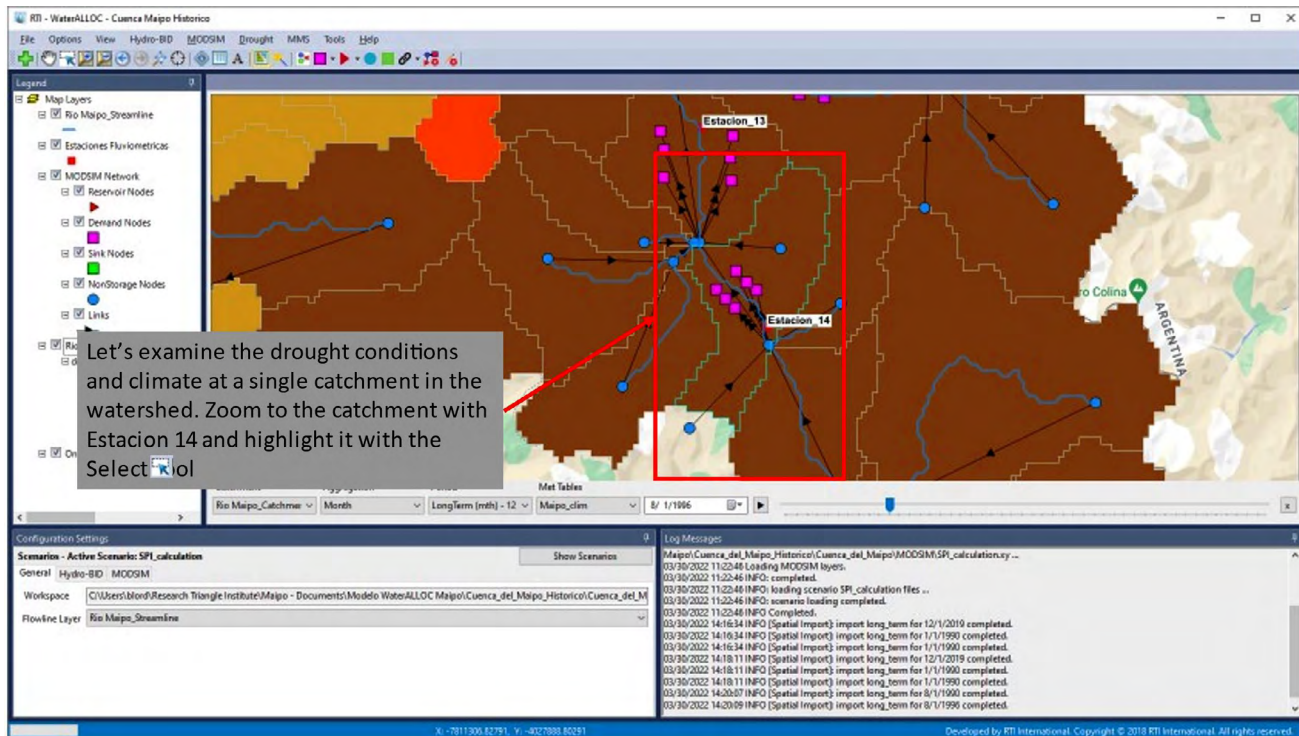
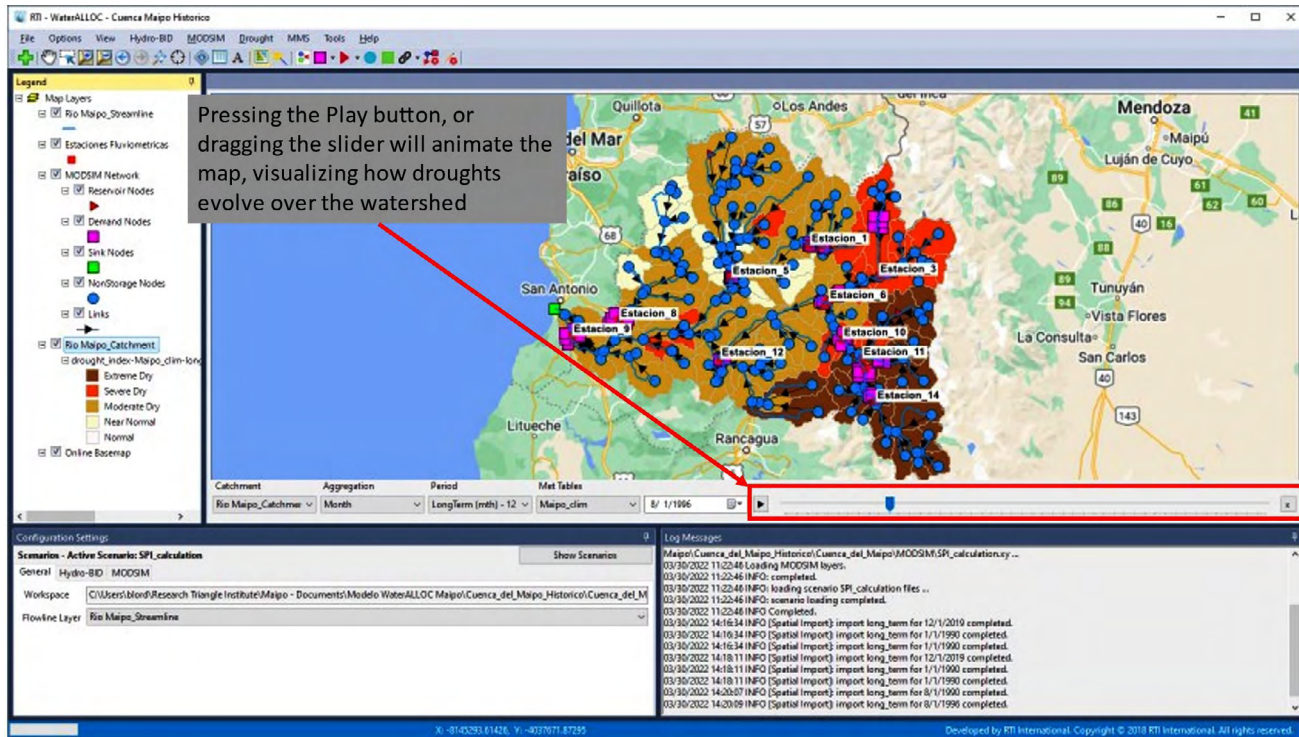
```

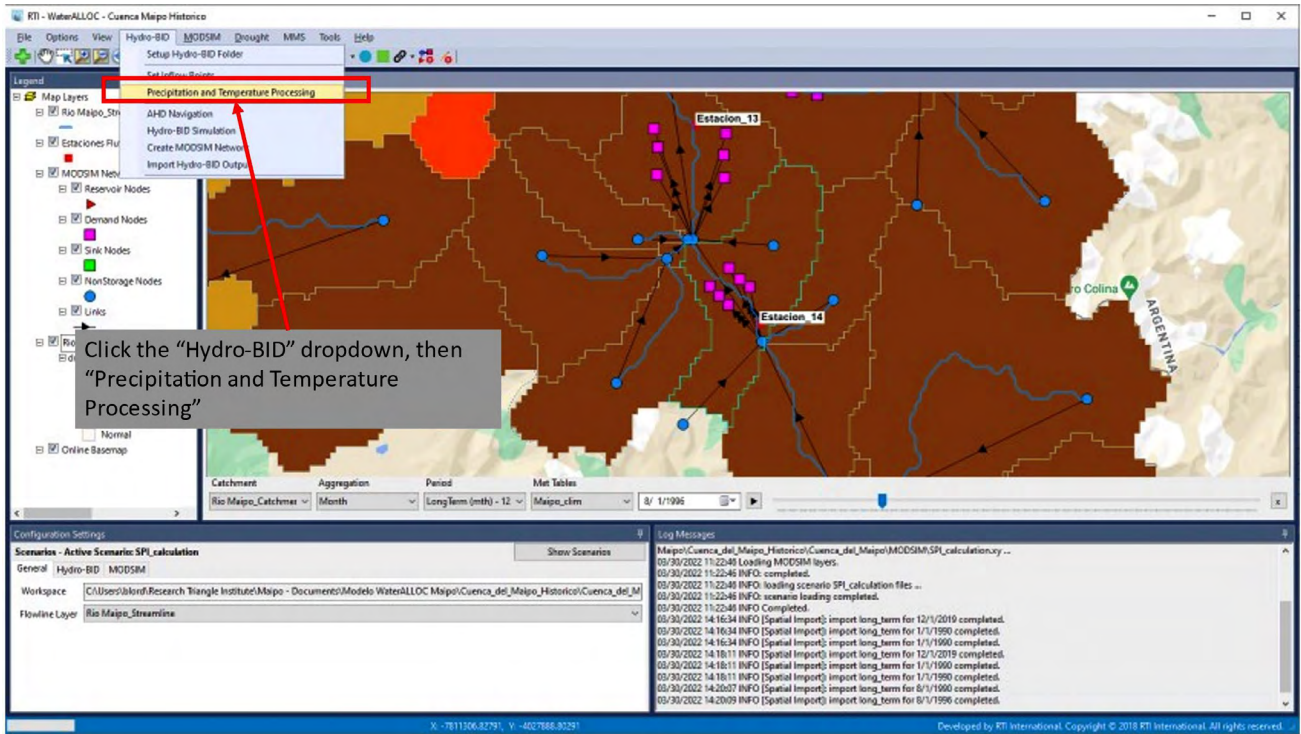
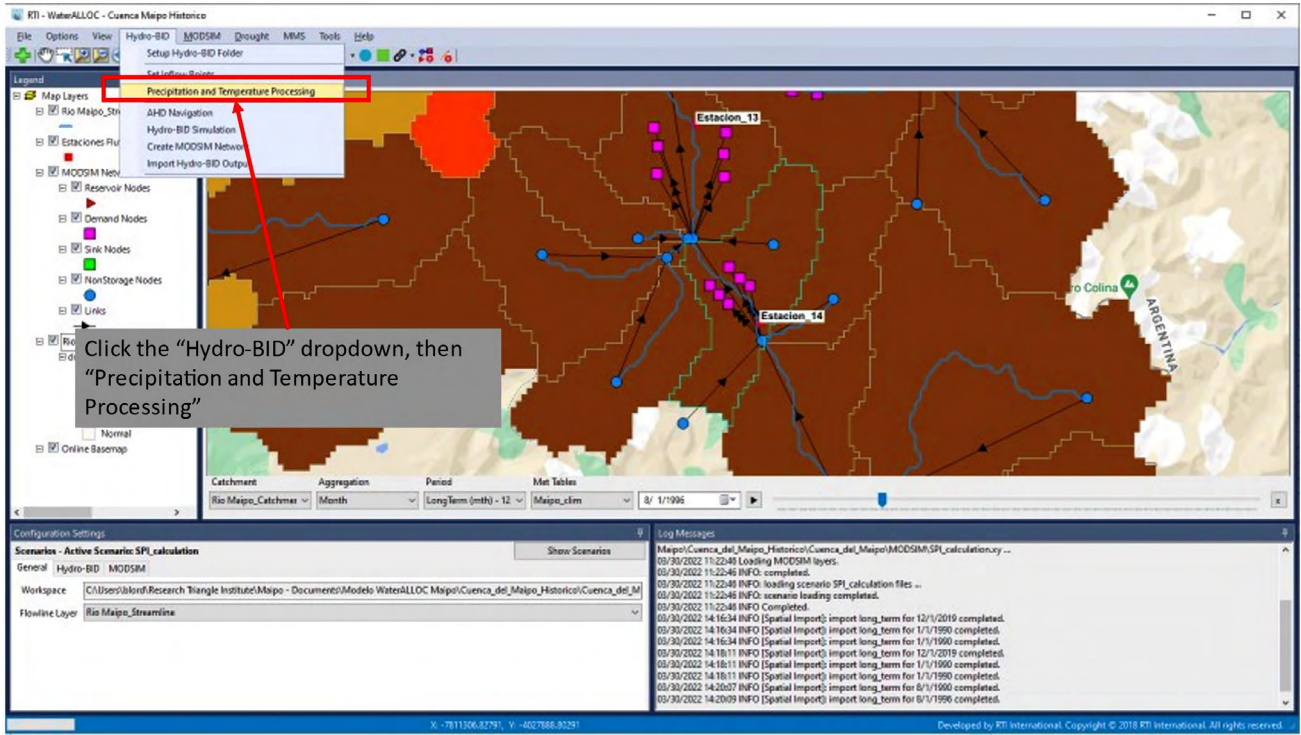
03/30/2022 11:52:46 AM INFO: Runoff modeling support table found in the database (0 rows).
03/30/2022 11:52:46 AM INFO: loading MODSIM network from file C:\Users\lmon\Research Triangle Institute\Maipo - Documents\Modelo WaterALLOC\Maipo\Cuenca_del_Maipo_Historico\Cuenca_del_Maipo\MODSIM_networks\...
03/30/2022 11:52:46 AM INFO: Loading MODSIM layers.
03/30/2022 11:52:46 AM INFO: completed.
03/30/2022 11:52:46 AM INFO: loading scenario SFI_calculation files ...
03/30/2022 11:52:46 AM INFO: scenario loading completed.
03/30/2022 11:52:46 AM INFO: Completed.
03/30/2022 14:16:34 INFO [Spatial Import] import long_term for 12/1/2019 completed.
03/30/2022 14:16:34 INFO [Spatial Import] import long_term for 1/1/1990 completed.
03/30/2022 14:16:34 INFO [Spatial Import] import long_term for 1/1/1990 completed.
03/30/2022 14:18:11 INFO [Spatial Import] import long_term for 12/1/2019 completed.
03/30/2022 14:18:11 INFO [Spatial Import] import long_term for 1/1/1990 completed.
  
```















Click the "Data Explorer" Tab

Hydro-BD Precipitation/Temperature Data Utilities

Tools to process and visualize HydroBD Meteorological Inputs

Selected Scenario Preferences

- activeScenarioName: SPI\_calculation
- Settings file: W:\ALLOCFiles\SPI\_calculation\SPI\_calculation.bat
- HydroBD DB: BD-ChileMaple
- Active Met Table: Maipo\_dtm

Spatial Data Processing: Data Explorer

Select inputs to process the spatial files for HydroBD database

R Script Executable Path: C:\Program Files\R\R-4.0.3\bin\Rscript.exe

Catchments Layer: [Empty]

PISCO Historical Forecast Data

Select inputs to process the PISCO Product for HydroBD database

Inputs and Files

Precipitation NetCDF File: [Empty]

Max. Temperature NetCDF File: [Empty]

Min. Temperature NetCDF File: [Empty]

\*R Script to spatially process the NetCDF files provided by: Harold Llavas Soto y Cesar Aylwin SUBDIRECCION DE ESTUDIOS E INVESTIGACIONES HIDROLOGICAS

Configuration Settings

Scenario - Active Scenario: SPI\_calculation

General Hydro-BD MODSIM

Workspace: C:\Users\Monif\Research Triangle Institute\Maipo - Documents\Modelo WaterALLOC Maipo\Cuenca del Maipo\_Historico\Cuenca\_del\_M

Flowline Layer: Rio Maipo\_Streamline

Log: 03/30/2022 11:52:46 INFO: loading scenario SPI\_calculation files ...  
 03/30/2022 11:52:48 INFO: scenario loading completed.  
 03/30/2022 11:52:46 INFO Completed.  
 03/30/2022 14:10:34 INFO [Spatial Import] import long\_term for 12/1/2019 completed.  
 03/30/2022 14:10:34 INFO [Spatial Import] import long\_term for 1/1/1990 completed.  
 03/30/2022 14:10:34 INFO [Spatial Import] import long\_term for 1/1/1990 completed.  
 03/30/2022 14:18:11 INFO [Spatial Import] import long\_term for 12/1/2019 completed.  
 03/30/2022 14:18:11 INFO [Spatial Import] import long\_term for 1/1/1990 completed.  
 03/30/2022 14:18:11 INFO [Spatial Import] import long\_term for 1/1/1990 completed.  
 03/30/2022 14:20:07 INFO [Spatial Import] import long\_term for 8/1/1990 completed.  
 03/30/2022 14:20:08 INFO [Spatial Import] import long\_term for 8/1/1990 completed.  
 03/30/2022 14:26:07 [Precip/Temp Util] WARNING: R software is required to use the PISCO processing utility. Default R path not found.  
 03/30/2022 14:27:50 [Precip/Temp Util] WARNING: R software is required to use the PISCO processing utility. Default R path not found.

In the Data Explorer, Tab, click "Check Selected COMID" to load data for the selected catchment

Hydro-BD Precipitation/Temperature Data Utilities

Tools to process and visualize HydroBD Meteorological Inputs

Selected Scenario Preferences

- activeScenarioName: SPI\_calculation
- Settings file: W:\ALLOCFiles\SPI\_calculation\SPI\_calculation.bat
- HydroBD DB: BD-ChileMaple
- Active Met Table: Maipo\_dtm

Data Processing: Data Explorer

Available Meteorological Data

- Maipo\_dtm

Parameter - TimeStep - Aggregate AVG

Plot Table

Temperature [Celsius]

1988-06-25 2000-12-13 2008-06-26 2011-11-25 2017-05-13

Check Selected COMID

Configuration Settings

Scenario - Active Scenario: SPI\_calculation

General Hydro-BD MODSIM

Workspace: C:\Users\Monif\Research Triangle Institute\Maipo - Documents\Modelo WaterALLOC Maipo\Cuenca del Maipo\_Historico\Cuenca\_del\_M

Flowline Layer: Rio Maipo\_Streamline

Log: 03/30/2022 11:52:46 INFO: loading scenario SPI\_calculation files ...  
 03/30/2022 11:52:48 INFO: scenario loading completed.  
 03/30/2022 11:52:46 INFO Completed.  
 03/30/2022 14:10:34 INFO [Spatial Import] import long\_term for 12/1/2019 completed.  
 03/30/2022 14:10:34 INFO [Spatial Import] import long\_term for 1/1/1990 completed.  
 03/30/2022 14:10:34 INFO [Spatial Import] import long\_term for 1/1/1990 completed.  
 03/30/2022 14:18:11 INFO [Spatial Import] import long\_term for 12/1/2019 completed.  
 03/30/2022 14:18:11 INFO [Spatial Import] import long\_term for 1/1/1990 completed.  
 03/30/2022 14:18:11 INFO [Spatial Import] import long\_term for 1/1/1990 completed.  
 03/30/2022 14:20:07 INFO [Spatial Import] import long\_term for 8/1/1990 completed.  
 03/30/2022 14:20:08 INFO [Spatial Import] import long\_term for 8/1/1990 completed.  
 03/30/2022 14:26:07 [Precip/Temp Util] WARNING: R software is required to use the PISCO processing utility. Default R path not found.  
 03/30/2022 14:27:50 [Precip/Temp Util] WARNING: R software is required to use the PISCO processing utility. Default R path not found.

