

INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

“La planeación de los recursos hídricos requiere de modelos previos que simulen el comportamiento del agua, considerando todos los factores climáticos, físicos y antrópicos, para lograr optimizar la disponibilidad-demanda bajo diversos escenarios” (Hervis Granda, et al., 2018, pág. 1).

Conocer la cantidad de agua disponible en una región es importante, porque permite planificar acciones, medidas y estrategias que aprovechen y optimicen el recurso hídrico de una cuenca que repercute en el desarrollo de la vida. Con el pasar del tiempo, la disponibilidad del agua dulce escasea en varias regiones del mundo, debido principalmente al incremento de la temperatura del ambiente causante del cambio climático. Que genera mayor incertidumbre al cuantificar los recursos hídricos de una cuenca y conlleva a la siguiente interrogante ¿Cuál es la cantidad de agua que se va a contar en un futuro próximo en una cuenca dada?

Las sequías hidrológicas son una parte normal del clima y pueden darse en todos los regímenes climáticos del mundo, incluso en desiertos y bosques lluviosos. Son uno de los peligros naturales más costosos, año tras año: sus efectos son considerables y generalizados, al perjudicar a muchos sectores económicos y personas en cada ocasión.

El rastro de las sequías (o la zona afectada) suele ser mayor que el de otros peligros, que generalmente se circunscribe a llanuras inundables, regiones costeras, la trayectoria de la tormenta o las zonas de fallas. Las sequías hacen factible que se observen los cambios en la precipitación, la temperatura y la situación general de las reservas de agua superficial y de agua subterránea en una región. Los indicadores o los índices de sequía se utilizan en muchas ocasiones para facilitar el seguimiento de las sequías, y varían en función de la región y estación. Por lo general, los sistemas de alerta temprana de la sequía tienen por objeto seguir y evaluar las condiciones y tendencias climáticas, hidrológicas e hídricas, y suministrar información pertinente al

respecto. La finalidad es proporcionar información puntual antes de la fase incipiente de la sequía, o durante ella, para adoptar medidas.

A nivel departamental se ha desarrollado el estudio “Balance hídrico integral para la cuenca del río Guadalquivir” elaborado por el ministerio de medio ambiente y agua MMAyA. Cuyo objetivo es desarrollar y aplicar una metodología de balance hídrico en la cuenca del río Guadalquivir adecuado al contexto y generar proyecciones de balance hídrico de acuerdo a los escenarios climáticos existentes para su aplicación en la planificación hídrica y territorial de la cuenca.

En julio del 2021, la plataforma interinstitucional de la cuenca del río Guadalquivir, con el apoyo del ministerio de medio ambiente y agua MMAyA, publicó un informe titulado “Plan director de la Cuenca del Río Guadalquivir”. Este informe tiene como objetivo mejorar la seguridad hídrica de la cuenca del río Guadalquivir en un contexto de mayor incertidumbre climática. Implica la reducción del deterioro ambiental de la cuenca, asegurando el agua en calidad y cantidad suficiente para el consumo humano, el riego, la industria y los ecosistemas; al igual que un saneamiento mejorado, aplicando el marco normativo, institucional y regulatorio existente e impulsando procesos de fortalecimiento de la gobernanza e institucionalidad.

Todos los documentos mencionados anteriormente servirán de base para guiar y apoyar el estudio de pronosticar sequías hidrológicas bajo escenarios de cambio climático, mediante la modelación hidrológica en la zona de la cuenca alta del río Guadalquivir.

1.2 Alcance

Este estudio se dirige a la población de Tarija y pretende aportar información actualizada sobre el estado de la disponibilidad hídrica en la cuenca alta del río Guadalquivir y su proyección futura, basado en escenarios climáticos de alta resolución y evaluación de algunos indicadores de sequía hidrológica. Se implementó la herramienta Hydro-BID para generar las series de tiempo de caudales bajo el clima actual y bajo las proyecciones climáticas futuras obtenidas de un modelo de circulación

global; esta información servirá como base para la planificación y la gestión de la oferta hídrica superficial en la cuenca estudiada para un mediano y largo plazo.

1.2.1 Delimitación temporal

Los datos que serán considerados para la realización del trabajo de investigación serán enmarcados dentro del periodo 1980-2014 (actual) y 2021-2040 (para los diferentes escenarios de cambio climático).

1.2.2 Delimitación espacial

La cuenca de la zona alta del río Guadalquivir se encuentra ubicada al oeste del departamento de Tarija, tiene una extensión de 933,50 km² y se alberga dentro de los municipios de Tarija, San Lorenzo y El Punte.

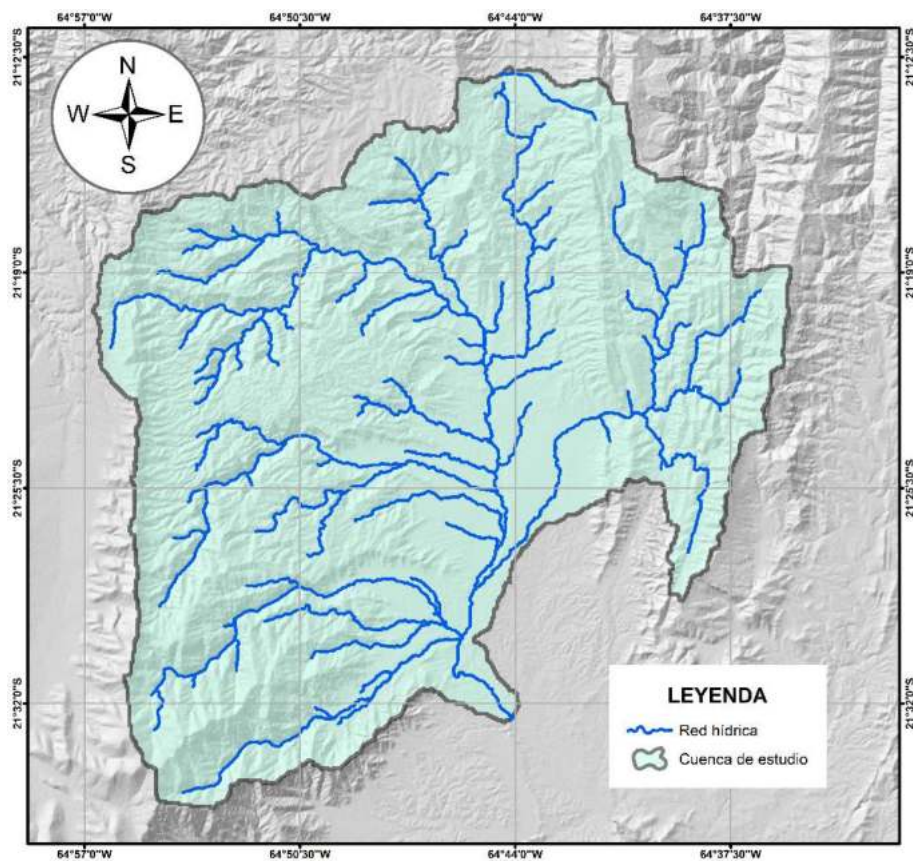


Figura 1: Cuenca alta del río Guadalquivir.

1.3 Planteamiento del problema

El problema es la falta de índices de sequía y estudios sobre los cambios que vaya a presentar el cambio climático en la oferta hídrica, producto del cambio climático a futuro.

¿Cómo es la variabilidad espacio-temporal de las sequías en la cuenca alta del río Guadalquivir y cuál será el comportamiento que tendrá para el periodo 2021-2040?

1.4 Justificación

La zona de la cuenca alta del río Guadalquivir, no se encuentra ajena a los eventos extremos climáticos como consecuencia del cambio climático; por el contrario, en esta cuenca cobra mayor fuerza realizar estudios respecto al cambio climático mediante la variabilidad espacio-temporal de las sequías a través de índices de sequía.

La presente investigación es viable, pues se dispone de los recursos humanos y de fuentes de información necesarios para llevarla a cabo.

En el aspecto social este estudio se dirige a la población de Tarija y pretende aportar información actualizada sobre el estado de la disponibilidad hídrica en la cuenca alta del río Guadalquivir y su proyección futura, basado en escenarios climáticos de alta resolución y evaluación de algunos indicadores de sequía hidrológica.

El trabajo tiene una utilidad metodológica, ya que podrían realizarse futuras investigaciones que usaran metodologías compatibles, de manera que se posibilitan análisis conjuntos, comparaciones entre periodos temporales concretos y evaluaciones de las intervenciones que se estuvieran llevando a cabo.

En el aspecto disciplinario, el estudio pretende contribuir a los estudios que se realizan a nivel nacional, y en particular en la zona de la cuenca alta del río Guadalquivir, sobre la importancia de estudio respecto al cambio climático mediante

la variabilidad espacio-temporal de las sequías a través de índices de sequía, para mejorar la planificación del recurso hídrico.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo general

Analizar escenarios futuros y obtener índices de sequías hidrológicas bajo escenarios de cambio climático, mediante la modelación hidrológica de la cuenca alta del río Guadalquivir con el modelo Hydro-BID.

1.5.2 Objetivos específicos

- Obtener y analizar las series temporales de precipitación y temperatura del periodo 1980 a 2021 perteneciente a la zona de la cuenca alta del río Guadalquivir.
- Calibrar el modelo Hydro-BID, para la zona de la cuenca alta del río Guadalquivir, para un periodo de 1980 a 2010, con la estación hidrométrica perteneciente a la zona.
- Simular y validar para un periodo de 2010 a 2014 la aplicación del modelo Hydro-BID a la zona de la cuenca alta del río Guadalquivir.
- Generar escenarios de cambio climático a escala reducida de la cuenca a partir de simulaciones del clima global para la caracterización y obtención de factores de incremento o disminución de precipitación y temperatura de la misma.
- Clasificar la severidad y duración de las sequías hidrológicas empleando el índice estandarizado de caudal de 12 meses, en el periodo 2021 a 2040 para los diferentes escenarios de cambio climático.

1.6 Hipótesis

El estudio de los índices de sequía bajo escenarios de cambio climático en la cuenca alta del río Guadalquivir, mediante la herramienta Hydro-BID, permitirá observar la variabilidad espacio-temporal y el comportamiento de las sequías.

MARCO TEÓRICO

2.1 Estado del arte

En la **Tabla 1** se muestra la compilación de resultados obtenidos en otras investigaciones relacionadas con el tema de análisis.

Tabla 1: *Antecedentes de investigación.*

Datos del estudio	Objetivos - Principales hallazgos
<p><u>Título:</u> Modelación Hidrológica para el Pronóstico de Sequías en la Cuenca del Río Pamplonita Bajo Escenarios de Cambio Climático.</p> <p><u>Autor:</u> Díaz González, Suárez Rodríguez</p> <p><u>Año y lugar:</u> 2019, Bogotá.</p>	<p><u>Objetivo general:</u> Pronosticar sequías hidrológicas bajo escenarios de cambio climático, mediante la modelación hidrológica en la cuenca del río Pamplonita.</p> <p><u>Principales hallazgos:</u> Para el final del siglo la temperatura aumenta de 2 a 3 grados Celsius, lo que representa un consecuente aumento de fenómenos naturales, como sequías en las diferentes regiones del país, que no se encuentran en condiciones para afrontar este tipo de fenómenos y una mayor demanda del recurso hídrico.</p>
<p><u>Título:</u> Aplicación del modelo hidrológico Hydro-BID para la estimación de Caudales Medios Mensuales en la cuenca del río Guadalquivir, Subcuenca del río Tolomosa, río Yesera, río Camacho, Cuenca Alta del río Guadalquivir.</p> <p><u>Autor:</u> Mamani López, Fuentes Carrizo</p> <p><u>Año y lugar:</u> 2020, Tarija – Bolivia.</p>	<p><u>Objetivo general:</u> Evaluar el desempeño del modelo hidrológico Hydro-BID, en la cuenca del río Guadalquivir, así como las subcuencas del río Tolomosa, río Yesera, río Camacho y la cuenca Alta del río Guadalquivir.</p> <p><u>Principales hallazgos:</u> Se realizó de manera satisfactoria la validación de las subcuencas del río Tolomosa y la cuenca alta del río Guadalquivir, se estimaron los caudales anuales para el período 1980-2010, además de los caudales medios mensuales.</p>
<p><u>Título:</u> Uso del Modelo Hydro-BID para la caracterización Hidrológica y Evaluación del Cambio Climático en la cuenca del Río Porce (Colombia).</p> <p><u>Autor:</u> Roldán Bedoya</p> <p><u>Año y lugar:</u> 2021, Alcalá,</p>	<p><u>Objetivo general:</u> Modelación hidrológica de la cuenca del río Porce en Antioquia, Colombia, mediante la herramienta Hydro-BID para la caracterización de la cuenca de estudio y evaluación del cambio climático.</p> <p><u>Principales hallazgos:</u> Los resultados obtenidos muestran a Hydro-BID se consideran aptos para la zona de estudio, ya que la correlación entre los datos observados y simulados fue buena, lo que genera confiabilidad en los resultados del estudio.</p>
<p><u>Título:</u> Análisis de Escenarios y Estrategias con el modelo hidrológico WEAP en la cuenca alta del río Guadalquivir.</p> <p><u>Autor:</u> Lozano Velásquez</p> <p><u>Año y lugar:</u> 2020, Tarija – Bolivia.</p>	<p><u>Objetivo general:</u> Analizar escenarios futuros y estrategias que mitiguen los efectos del cambio climático en los recursos hídricos de la cuenca alta del río Guadalquivir con el modelo WEAP.</p> <p><u>Principales hallazgos:</u> Los estudios demuestran que el calentamiento global, está generando variaciones climáticas en el planeta, elevando la incertidumbre en la precipitación, afectando la disponibilidad de agua en la cuenca.</p>

2.2 Marco conceptual

2.2.1 Cambio climático

El cambio climático es un proceso natural del ciclo climático del planeta. Sucede a escalas de miles de años, cursando periodos de calentamiento y de enfriamiento.

2.2.2 Impacto del cambio climático, riesgos e impactos

En los últimos decenios, los cambios del clima han causado impactos en los sistemas naturales y humanos en todos los continentes y océanos. Los impactos se deben al cambio climático observando.

La emisión continua de gases de efecto invernadero causará un mayor calentamiento y cambios duraderos en todos los componentes del sistema climático, lo que hará que aumente la probabilidad de impactos graves, generalizados e irreversibles para las personas y los ecosistemas. Para contener el cambio climático sería necesario reducir de forma sustancial y sostenida las emisiones de gases de efecto invernadero, lo cual, junto con la adaptación, puede limitar los riesgos del cambio climático. (IPCC³, 2014, pág. 8)

2.2.3 Cambios proyectados en el sistema climático

En todos los escenarios de emisiones evaluados, las proyecciones señalan que la temperatura en superficie continuara aumentando a lo largo del siglo XXI. Es muy probable que las olas de calor ocurran con mayor frecuencia y duren más, y que los episodios de precipitación y temperatura sean más intensos y frecuentes en muchas regiones. El océano se seguirá calentando y acidificando, y el nivel medio global del mar continuará elevándose. (IPCC, 2014, pág. 10).

³ El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) es el órgano internacional encargado de evaluar los conocimientos científicos relativos al cambio climático.

2.2.4 Efectos del cambio climático en el ciclo del agua

Los cambios en las precipitaciones en un mundo donde se calienta no serán uniformes los posibles efectos serán.

- Es probable que, para el final de este siglo, en las latitudes altas y en el océano Pacífico ecuatorial se experimente un aumento en la precipitación media anual en el marco del escenario RCP8,5⁴. (IPCC, 2014, pág. 11)
- Es probable que, en el marco del escenario RCP8,5, la precipitación media disminuya en muchas regiones secas de latitud media y subtropicales, mientras que es probable que en muchas regiones húmedas de latitud media la precipitación media aumente. (IPCC, 2014, pág. 11)
- Es muy probable que sean más intensos y más frecuentes los episodios de precipitación extrema en la mayoría de las masas terrestres de latitud media y en las regiones tropicales húmedas a medida que vaya aumentando la temperatura media global en superficie. (IPCC, 2014, pág. 11)

2.2.5 Cambio climático en Bolivia

Los impactos más fuertes del cambio climático previstos por el modelo PRECIS se producen a través de cambios de patrones de precipitación. El modelo sugiere que las áreas más secas se vuelvan aún más secas y las áreas húmedas aún más húmedas. Esto indicara aumentos en sequías en el Altiplano y aumentos en inundaciones en las tierras bajas. La excepción es que el Chaco, que ahora es relativamente seco, también recibirá más precipitación. (Andersen y Mamani, 2009, pág. 34).

2.2.6 Sequías

No existe una definición universalmente aceptable de la sequía debido a la compleja naturaleza del fenómeno, encontrándose más de 150 definiciones para las sequías, según la disciplina científica desde la que se analiza al fenómeno. Así, algunas

⁴ En el Quinto Informe IPCC se han definido 4 nuevos escenarios de emisión, las denominadas Trayectorias de Concentración Representativas (RCP, por sus siglas en inglés).

de las definiciones comúnmente usadas provienen de las entidades relacionadas con el estudio del fenómeno: (Vega Jácome, 2018, pág. 4)

Para la Organización Meteorológica Mundial (OMM), la sequía es considerada como un periodo de condiciones meteorológicas anormales secas, suficientemente prolongado como para que la falta de precipitación cause un grave desequilibrio hidrológico (OMM, 1992, pág. 12)

La convención de las Naciones Unidas de Lucha contra la Desertificación (CLD⁵), define la sequía como un fenómeno natural del clima, causado por el déficit de la precipitación en condiciones considerablemente inferior a los niveles normales registrados, causando un agudo desequilibrio hídrico que perjudica los sistemas de producción del recurso tierra (CLD, 2004, pág. 25)

La enciclopedia del clima y el tiempo (Schneider , et al., 2011) define una sequía como "un período prolongado - una estación, un año o varios años" de lluvia deficiente en relación con el promedio estadístico de varios años para una región.

La sequía es un fenómeno natural que se extiende de manera irregular a través del tiempo y el espacio, tiene la particularidad de ser de lento desarrollo temporal y amplia cobertura espacial, su ocurrencia no provoca el colapso ni la falla destructiva de la infraestructura; sin embargo, puede condicionar las operaciones de los sistemas de recursos hídricos imponiendo muchas veces condiciones más exigentes que las de diseño con graves consecuencias económicas y sociales. (Fernandez Larrañaga, 1997, pág. 37)

Para el presente trabajo adoptaremos la definición de (Ravelo , et al., 2012), quienes definen la sequía como un evento extremo que se origina por el déficit de la precipitación sobre un periodo extendido de tiempo, esta variabilidad ocasiona que los escenarios se vean todo áridos, secos, los niveles de embalse bajos, entre otros. De

⁵ CLD Convención de las Naciones Unidas de Lucha contra la Desertificación en los países afectados por sequía grave o desertificación, en particular en África,

manera que este fenómeno ocurre casi en todas las zonas climáticas, aún en aquellas que tengan exceso de precipitación.

2.2.7 Tipos de sequías

Las sequías tienen su origen dentro del ciclo hidrológico en una deficiencia de la cantidad de precipitación, la cual provoca de forma directa una disminución de la presencia de agua en todos los estados del ciclo hidrológico (Bras, 1990, pág. 25). A esta deficiencia de la precipitación puede sumarse factores como una alta temperatura, presencia de fuertes vientos, una baja humedad relativa con una alta radiación solar, características del suelo y cobertura vegetal. Todo ello tiene en común el aumento de la evaporación y la transpiración que acentúa la disminución de la presencia de agua en la superficie terrestre y en el proceso del ciclo hidrológico. Así, Wilhite y Glantz, (1985) agruparon diversas definiciones de sequías, en cuatro grupos según la disciplina científica desde la cual se analiza el fenómeno: sequía meteorológica, agrícola, hidrológica y socioeconómica.

1) Sequía meteorológica

Relacionada con la disminución de las precipitaciones, siendo evaluada mediante la comparación entre la precipitación del periodo de análisis y un indicador estadístico de la serie temporal que generalmente es la media. Existen diversas definiciones de la sequía meteorológica que han sido desarrolladas para regiones específicas, debido a que las variaciones en los regímenes de precipitación tienen una fuerte influencia de las características climáticas de cada región. (Valiente, 2001, pág. 60).

2) Sequía agrícola

Se expresa en función a la deficiencia de humedad en el suelo disponible para las plantas, en muchos casos es valorada de acuerdo a los daños provocados sobre la producción agrícola. Debido a que la cantidad de agua es diferente para cada cultivo, y varía a lo largo de las fases de crecimiento de los cultivos, es complejo definir umbrales de sequía incluso para una misma región (Valiente, 2001, pág. 61). Este tipo de sequía

no solo depende de las condiciones meteorológicas, sino también de las características biológicas del cultivo y las propiedades del suelo. Por lo que no es equivalente a la sequía meteorológica. Si los niveles de humedad del suelo son suficientes para sustentar el crecimiento de un determinado cultivo durante el periodo que se presente sequía meteorológica, la sequía agrícola no se producirá.

3) Sequía hidrológica

Se asocia a la deficiencia en el caudal o volumen de aguas superficiales y subterráneas, así como el volumen de almacenamiento. Las sequías hidrológicas tienen un desfase entre la ocurrencia de las sequías meteorológica o agrícola, puesto que se requiere de un desfase temporal para que se propaguen las anomalías pluviométricas a los diversos componentes del ciclo hidrológico (Valiente, 2001, pág. 61).

A diferencia de la sequía agrícola que tiene lugar al poco tiempo de presentarse la sequía meteorológica, la sequía hidrológica puede tardar de meses a años a meses dependiendo de la región desde el inicio de la sequía meteorológica; y si las lluvias retornan en poco tiempo, la sequía hidrológica no llegará a manifestarse.

La capacidad de gestión de los recursos hídricos influye sobre la sequía hidrológica, debido a que el déficit no solo depende de la disponibilidad del recurso hídrico superficial o subterráneo, sino también de la forma de uso del agua.

4) Sequía socioeconómica

Se produce cuando la disponibilidad de agua disminuye hasta el punto de producir daños (económicos o personales) a la población de la zona afectada por la escasez de lluvias. Para hablar de sequía socioeconómica no es necesario que se produzca una restricción del suministro de agua, sino que basta con que algún sector económico se vea afectado por la escasez hídrica. La pujante presión antrópica sobre el recurso agua hace que cada vez sea mayor la incidencia de la sequía socioeconómica, con pérdidas económicas crecientes, incluso en el caso de una sequía meteorológica leve (Valiente, 2001, pág. 63).

Las clases enunciadas se presentan en el orden de aparición del evento y con el consecuente impacto negativo **Figura 2**.



Figura 2: Causas y consecuencias de las distintas clases de sequías.

Fuente: Adaptado de “Atlas de Sequía de la República Argentina (pág. 4),” por Ravelo et al., 2014.

2.2.8 Descripción de índices de sequía

En forma breve se describe a continuación en que se basan cada uno de los índices:

a) Índice de severidad de sequía de palmer (PDSI)

El PDSI fue desarrollado para estimar las condiciones de la humedad edáfica e identificar situaciones de exceso, normalidad o deficiencia hídrica. Se basa en el concepto de demanda-suministro de agua o balance hídrico. El procedimiento de cálculo requiere datos de precipitación, evapotranspiración potencial y capacidad de

retención de agua del suelo. La situación hídrica mensual se determina teniendo en cuenta las desviaciones de la humedad edáfica actual con respecto a un valor medio de la serie. La **Tabla 2** presenta las clases del PDSI (desde sequía extrema a humedad extrema), sus rangos de valores y la escala cromática usada en la representación cartográfica (Valiente, 2001, pág. 6).

b) Índice estandarizado de precipitación (SPI)

El SPI se basa en una probabilidad estadística de ocurrencia de precipitación y fue diseñado para comportarse como un indicador temporal y espacial de la sequía (McKee et al., 1993, pág. 179). El SPI se lo calcula mediante precipitaciones de un período suficientemente largo, el que es primero ajustado a una distribución Gamma, dado que es la que mejor ajusta a las series de precipitaciones mensuales. A posteriori, la probabilidad acumulada obtenida con la distribución Gamma es transformada a una distribución normal con una media igual a cero y una desviación estándar igual a uno. El SPI puede ser obtenido para diferentes escalas de tiempo (1, 3, 6, 12 y 24 meses), lo cual permite evaluar los déficits de precipitación en las diferentes fuentes de agua (agua subterránea, embalses, humedad del suelo y escurrimientos superficiales). Se consideran que un período de sequía comienza cuando el SPI alcanza un valor de -0,5 y que el mismo termina cuando los valores de SPI se tornan nuevamente positivos. En la se presentan las distintas clases del SPI (desde sequía extrema a humedad extrema), sus rangos de valores y la escala cromática usada en la representación cartográfica (Valiente, 2001, pág. 7).

c) Índice de vegetación de diferencia normalizada del sensor satelital MODIS (NDVI)
















El NDVI es uno de los índices de vegetación más usado y se lo obtiene utilizando los valores digitales de reflectancia del infra-rojo cercano, banda que no es absorbida por la vegetación en el proceso fotosintético y la de banda roja que es absorbida por la clorofila para la síntesis de materia orgánica. Estos valores son suministrados por el sensor MODIS a bordo de los satélites TERRA y AQUA (Gallo et al., 2005, pág. 22).

El NDVI se lo obtiene mediante la **Ecuación (1)**.

$$NDVI = \frac{(IR_{cercano} - Rojo)}{(IR_{cercano} + Rojo)} \quad (1)$$

El NDVI tiene la ventaja sobre los índices obtenidos con observaciones de estaciones meteorológicas y/o agro-meteorológicas que al ser calculado mediante los valores digitales suministrado por sensores remotos que forman parte de las plataformas satelitales tiene una gran cobertura espacial uniforme a macro escala y obtenidos prácticamente en tiempo real. La **Tabla 2** presenta la escala cromática utilizada para evaluar el NDVI en situaciones de exceso, normalidad o deficiencia hídrica (Valiente, 2001, pág. 7).

Tabla 2: Clases, valores y asignación cromática del PDSI, SPI y NDVI.

PDSI		SPI		NDVI
 -3,00 o inferior	Sequía extrema	 -2,00 o inferior	Extremadamente seco	 DEFICIENCIAS HIDRICAS NORMAL EXCESOS HIDRICOS
 -2,00 a 3,00	Sequía severa	 -1,50 a -1,99	Severamente seco	
 3,00 a 2,00	Sequía moderada	 -1,00 a -1,49	Moderadamente seco	
 -1,00 a 1,00	Normal	 -0,99 a 0,99	Normal	
 1,00 a 2,00	Humedad moderada	 1,00 a 1,49	Moderadamente húmedo	
 2,00 a 3,00	Humedad excesiva	 1,50 a 1,99	Muy húmedo	
 3,00 a superior	Humedad extrema	 2,00 a superior	Extremadamente húmedo	

Fuente: Adaptado de “Atlas de Sequía de la República Argentina (pág. 6),” por Ravelo et al., 2014.

2.2.9 Duración de la sequía

La duración de un evento de sequía, se define como el periodo consecutivo e ininterrumpido de meses que dura un evento de sequía, registrado en un periodo de tiempo relativamente largo.

Dependiendo de la región, la duración de la sequía puede variar entre una semana y algunos años. Debido a la naturaleza dinámica de la sequía, una región puede experimentar temporadas húmedas y secas simultáneamente al considerar varias escalas temporales (Zargar et al. , 2011, pág. 5).

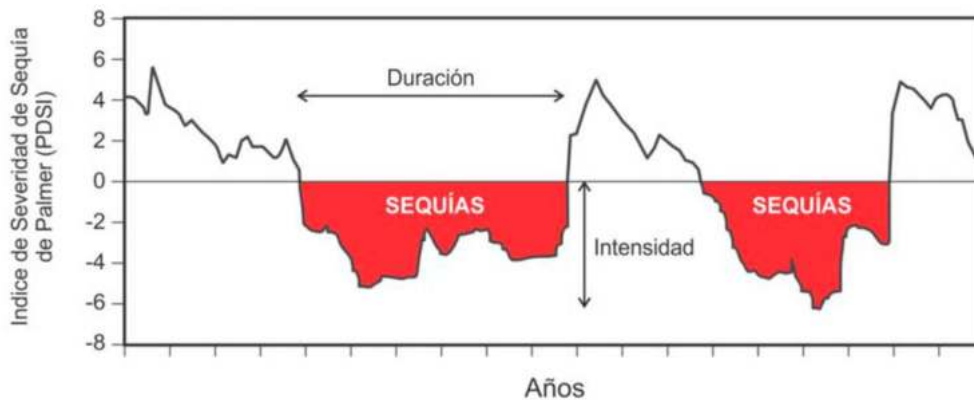


Figura 3: Representación de la ocurrencia de sequías con indicación de su duración e intensidad.

Fuente: Adaptado de “Atlas de Sequía de la República Argentina (pág. 3),” por Ravelo et al., 2014.

2.2.10 Intensidad de la sequía

Es un parámetro muy usual que se utiliza en la caracterización de sequías, algunos autores la calculan como la magnitud entre la duración de la sequía y corresponde entonces a la intensidad promedio, en otros casos se define como el máximo valor del déficit ocurrido durante el evento de sequía, conocido como intensidad máxima.

2.2.11 Severidad de la sequía

Este término hace referencia al déficit acumulado de agua (precipitación) por debajo de cierto umbral durante un evento de sequía; el cual se cuantifica mediante la acumulación de la sucesión negativa.

2.2.12 Modelo de circulación global (GCM)

Los modelos climáticos globales (GCM: General Circulation Model por sus siglas en inglés) son las herramientas fundamentales para entender los cambios climáticos globales en el futuro. Los GCMs proporcionan estimaciones cuantitativas del futuro cambio climático a gran escala en largos periodos de tiempo, estos modelos están compuestos de celdas de grilla que representan la superficie de la tierra. (Bhuvandas et al., 2014, pág. 1). En la **Figura 4** se presenta un Esquema conceptual de un GCM.

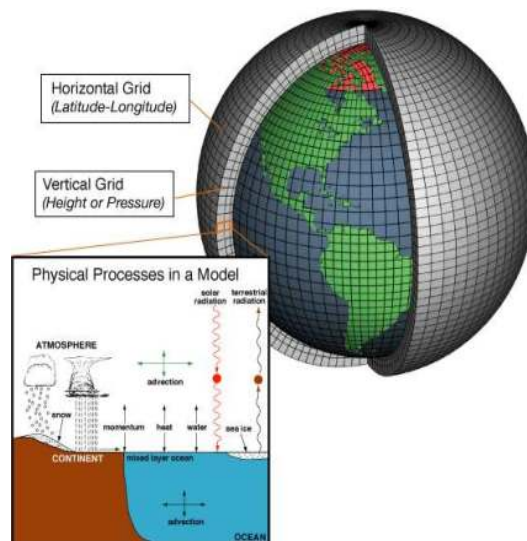


Figura 4: Esquema conceptual de un GCM

Fuente: Tomada de "Esquema conceptual de un GCM [Fotografía]," National Oceanic and Atmospheric Administration, 2019, www.noaa.gov

Los modelos climáticos Globales o también denominados Modelos de Circulación General (GCM) son la herramienta disponible más avanzada actualmente, para simular la respuesta del sistema climático global al aumento de las concentraciones de gases de efecto invernadero. Los GCM's corresponden, por tanto, a modelos numéricos que representan los procesos climáticos, donde se vinculan procesos físicos, químicos y biológicos de la atmósfera, el océano, la criósfera y la superficie terrestre, en sus interacciones y funciones de retroalimentación. Actualmente los modelos de circulación general acoplados Océano - Atmósfera (MCGAAO) ofrecen la más completa representación del sistema climático. (Roa, 2010, pág. 7)

2.2.13 Método de reducción de escala

Los modelos climáticos globales presentan información en escalas espaciales y temporales mayores que las requeridas por los modelos hidrológicos, y son por lo tanto inadecuados para evaluar el efecto local del cambio climático. Se requiere realizar un proceso de reducción de escala sobre las proyecciones de los modelos climáticos, este proceso es conocido como reducción de escala (downscaling en inglés). (Duarte Prieto, 2017, pág. 23)

“El método de reducción de escala consiste en establecer relaciones entre las variables simuladas por el GCM y los valores históricos de precipitación en estaciones meteorológicas en superficie”. (Bernal Suarez et al., 2000, pág. 88)

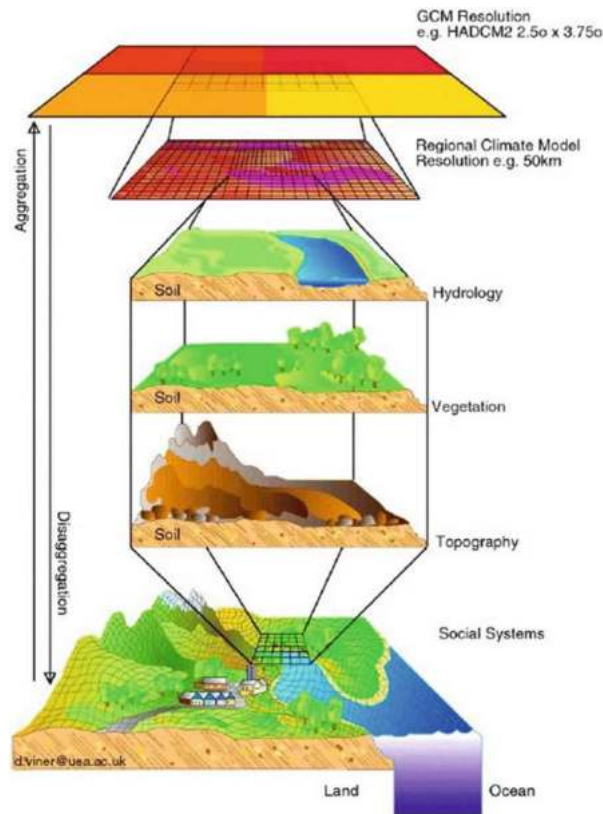


Figura 5: El concepto de reducción de escala espacial.

Fuente: Unidad de Investigación Climática, Universidad de East Anglia, Reino Unido.

La reducción de escala o downscaling (en inglés), es un método para obtener información climática o de cambio climático de alta resolución desde modelos climáticos globales (GCM) de resolución relativamente gruesa, los GCM tienen una

resolución de 150 - 300 km por 150 - 300 km. Muchos modelos de impactos requieren información a escala de 50 km o menos, por lo que se necesita algún método para estimar la información a menor escala. La reducción de escala estadística primero deriva las relaciones estadísticas entre las pequeñas escalas observadas (a menudo, nivel de estación) y variables de escala más grandes (GCM), utilizando métodos analógicos (tipificación de circulación), análisis de regresión o métodos de redes neuronales. Las variables obtenidas de las proyecciones GCM del clima futuro se utilizan para conducir las relaciones estadísticas y así estimar los detalles a menor escala del clima futuro

2.2.14 Modelo matemático

Un modelo matemático es una de las clasificaciones de los modelos científicos y se define como una descripción desde el punto de vista matemático de un hecho o fenómeno real, tomando en cuenta parámetros como la población, fenómenos físicos, fenómenos sociológicos, etc. El objetivo del modelo es entender ampliamente el fenómeno en estudio y tal vez predecir con un nivel de precisión aceptable su comportamiento en el futuro. (Lema Changoluisa y Plaza Quezada, 2009, pág. 18)

“El modelo matemático identifica variables (dependientes o independientes) y establece hipótesis lo más simples posibles para que sean tratadas de forma matemática” (Lema Changoluisa y Plaza Quezada, 2009, pág. 18).

2.2.15 Modelación hidrológica

La modelación hidrológica se define como el uso de modelos matemáticos conceptuales para la simulación de los procesos de transporte de agua que ocurren dentro de una cuenca. Estos modelos pueden estar basados en las ecuaciones físicas que rigen el comportamiento de las variables dentro de una cuenca o pueden ser de naturaleza conceptual, donde se representan los procesos que ocurren dentro de la cuenca a través de esquemas y algoritmos simplificados (Cortés Soruco, 2010, pág. 3).

El modelo hidrológico es una aplicación de los modelos matemáticos estocásticos, se utilizan para estudiar situaciones extremas, difícilmente observables en la realidad, como por ejemplo los efectos de precipitaciones muy intensas y

prolongadas en cuencas hidrográficas, en su estado natural, o en las que ha intervenido la mano del hombre con la construcción de obras como canales, represas, caminos, puentes, etc. (Lema Changoluisa y Plaza Quezada, 2009, pág. 20)

2.2.16 Modelamiento hidrológico

Según el IDEAM un modelamiento hidrológico es una representación simplificada de un sistema real complejo, bajo forma física o matemática. En un modelo hidrológico generalmente se modela una cuenca hidrográfica y cada elemento que forma parte de su ciclo hidrológico, para tomar decisiones respecto a la temática es necesario tener conocimientos de las entradas (inputs) y las salidas (outputs) que derivan del sistema, para ver si el modelo es representativo del sistema real.

Las salidas (outputs) de los modelos varían dependiendo de los objetivos de este, algunos modelos son utilizados para crear escenarios de escorrentía, otros para evaluar tormentas individuales, generalmente los resultados más comunes son los hidrogramas y hietogramas. (Ramírez Estrada, 2021, pág. 52)

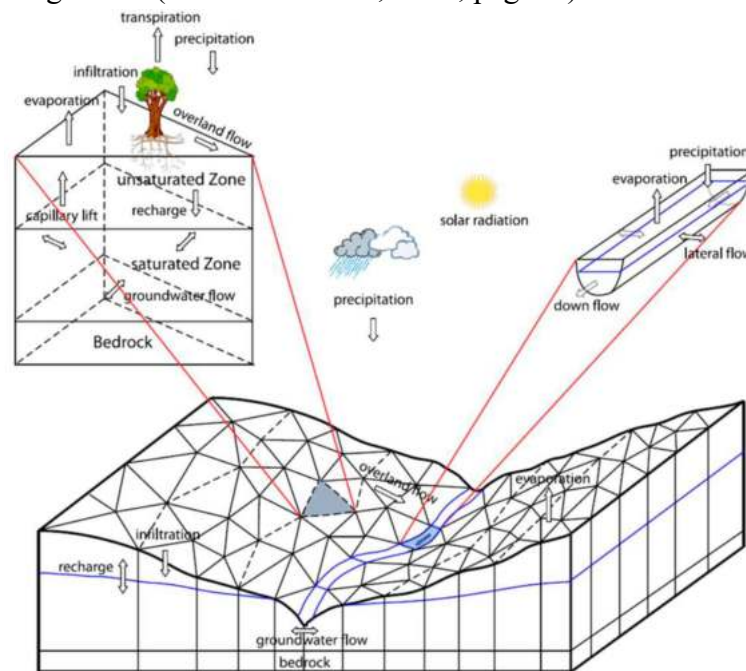


Figura 6: Esquema conceptual de los procesos hidrológicos.

Fuente: Unidad de Investigación Climática, Universidad de East Anglia, Reino Unido.

2.3 Modelo hidrológico Hydro-BID

Hydro-BID es un software desarrollado por el Banco Interamericano de Desarrollo para la gestión del recurso hídrico en América Latina y el Caribe, Hydro-BID se construyó sobre la Base de Datos de Hidrología Analítica (AHD), además, utiliza la estructura de datos y las topologías de red de cuencas y corrientes de la AHD. Éste incorpora datos de uso de tierras, tipos de suelos, precipitaciones y temperatura dentro del área de estudio, así como los flujos de corrientes observados para usarlos en calibración. Hydro-BID.

Hydro-BID puede ser utilizado con datos climáticos históricos o proyecciones climáticas futuras para el modelaje de flujos de agua superficiales en toda la cuenca, para evaluar los impactos potenciales del cambio climático en los flujos de aguas y la infraestructura, y apoyar el diseño de proyectos y estrategias de adaptación. Las opciones de adaptación incluyen respuestas a los descensos en los flujos de aguas a largo plazo; al incremento de los flujos; al incremento en la variación de flujos de estación e interanuales. Hydro-BID ha sido desarrollado para servir de herramienta clave de planificación para:

- Agencias de planificación y manejo de recursos hídricos
- Autoridades de control de drenaje/inundación
- Autoridades de irrigación
- Proveedores de energía hidroeléctrica
- Servicios de suministro de agua y saneamiento
- Usuarios de agua industriales

2.3.1 Análisis de requerimientos de Hydro-BID

Hydro-BID es una herramienta de simulación que utiliza como información de entrada datos meteorológicos (precipitación y temperatura media diaria) ingresados por el usuario y datos de uso y cobertura de suelo de cada una de las cuencas que han sido delimitadas para la región de Latinoamérica y el Caribe. (Moreda, et al., 2014, pág. 14).

Los datos de la cobertura terrestre son de la encuesta geológica de los Estados Unidos (USGS, en inglés) y los datos de tipo de suelo son de la base de datos mundial de suelos armonizados (HWSD, por sus siglas en inglés), raster de resolución de 30 arc-segundo que combina actualizaciones de información de suelos, regionales y nacionales, con la información contenida en la escala 1: 5 000 000 del Mapa de suelos FAO-UNESCO (FAO, 2012). Estos datos de suelo ya se encuentran almacenados en la base hidrológica AHD (AHD). Esta base funciona con la plataforma SQLite, la misma que es de acceso libre y se puede descargar del link <http://www.sqlite.org/>. Además se puede ingresar otros parámetros como diseño de embalses, sedimentos y factores de escenarios climáticos dependiendo del alcance del estudio que se desea realizar. La metodología que usa Hydro-BID para la simulación hidrológica es la de Factor de Carga de Cauces Generalizados (GWLF). Finalmente, los resultados del modelo se obtienen a través de gráficos y series de tiempo en escala diaria o mensual de los caudales simulados vs los caudales observados. En la **Figura 7**, se presenta el diagrama de flujo de funcionamiento de HydroBID.

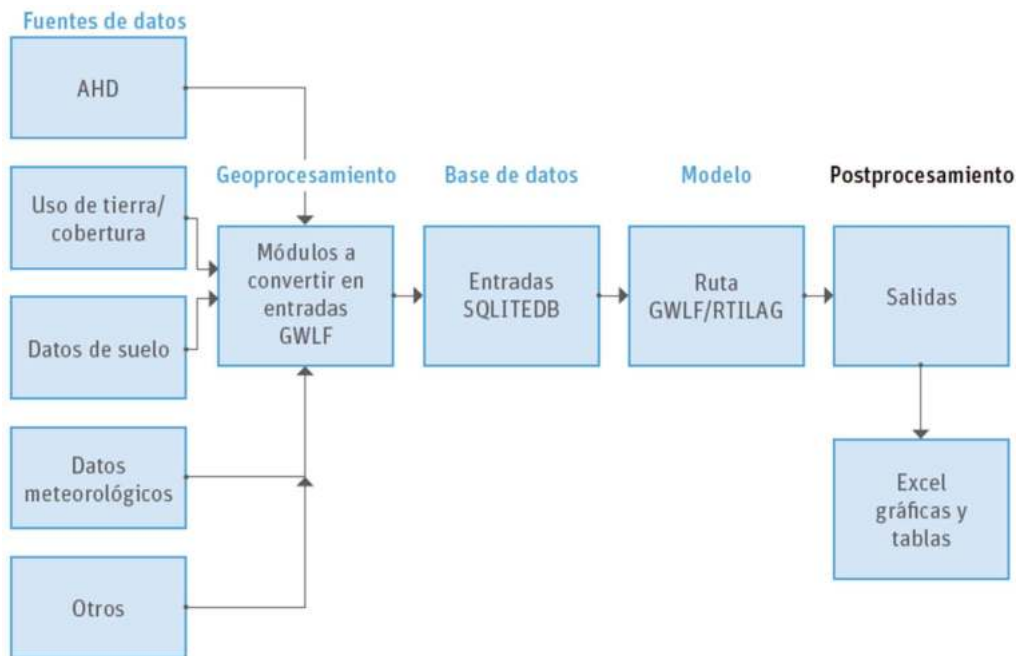


Figura 7: Diagrama de flujo del funcionamiento de Hydro-BID.

Fuente: Adaptado de “Nota Técnica Hydro-BID (pág. 31),” por Moreda et al., 2014.

2.3.2 Base de datos de hidrología analítica

La Base de Datos de Hidrología Analítica (AHD) está conformada por aproximadamente 300 mil sub-cuencas en formato Shapefile, localizadas en toda Latinoamérica y el Caribe. Además, esta base de datos cuenta con segmentos fluviales obtenidos con Modelos de Elevación Digital (DEM) de resolución de 15 arc segundo que incluye la dirección y acumulación del flujo. (Rineer, et al., 2014, pág. 12)

Los elementos de la AHD se describen con más detalle en la **Tabla 3**.

Tabla 3: Elementos de la base de datos analítica (AHD) de Hydro-BID.

ELEMENTO	DETALLE
Delineación de cuencas	Polígonos que tienen un código único de identificación. La información de la AHD fue obtenida a partir de imágenes satelitales STRM, Misión de la NASA, el tamaño promedio de las cuencas es de 90 km ² .
Pendiente	Calculadas por la diferencia en las elevaciones mínimas y máximas de cada segmento fluvial dividido por la longitud del segmento fluvial.
Segmentos fluviales	La hidrología de la AHD se basa en la data de elevación modificada hidrológicamente de HydroSHEDS (USGS,2011), la cual es distribuida por el Servicio geológico de Estados Unidos (USGS, por sus siglas en inglés). La AHD incluye más de 200 000 segmentos fluviales y cauces en formato de líneas-vectores.
Límites regionales y límites de las cuencas	Se relacionan con la hidrología superficial, de acuerdo con la demarcación de las cuencas hidrográficas sin considerar los límites nacionales.

Fuente: Adaptado de Nota Técnica Hydro-BID (pág. 35), por Moreda et al., 2014.

2.3.3 Base de datos SQLITE

Es un modelo gratuito disponible en línea, que permite organizar y formular bases de datos. Para Hydro-BID esta base de datos está relacionada con las sub-cuencas del AHD y contiene información sobre las características y tipos de suelos y permite ingresar datos de clima.

2.3.4 Modelo de hidrológico lluvia-escorrentía GWLF (Factor Estándar de Carga de Cauces Generalizados)

El modelo calcula la escorrentía y los flujos base por cuenca de captación: la escorrentía se genera en forma de exceso de infiltración y el flujo base es una liberación

gradual de la capa saturada. Tras tomar en cuenta la escorrentía proveniente de las precipitaciones, toda agua que excede un volumen calculado de evaporación se infiltra a la capa no saturada. Con el tiempo, el agua infiltrada se pasa desde la capa no saturada hacia abajo para reponer el volumen almacenado de la capa saturada. (Moreda, et al , 2014, pág. 16)

El agua de la capa saturada entra en el canal de corriente como flujo de base donde se combina con la escorrentía de la cuenca y otros flujos de entrada provenientes de las cuencas de aguas arriba para proporcionar el volumen de flujo de corriente para el día. Cabe destacar que la capa saturada, o agua disponible como flujo de base, puede agotarse por medio de la filtración a un acuífero subterráneo más profundo. (Moreda, et al , 2014, pág. 17)

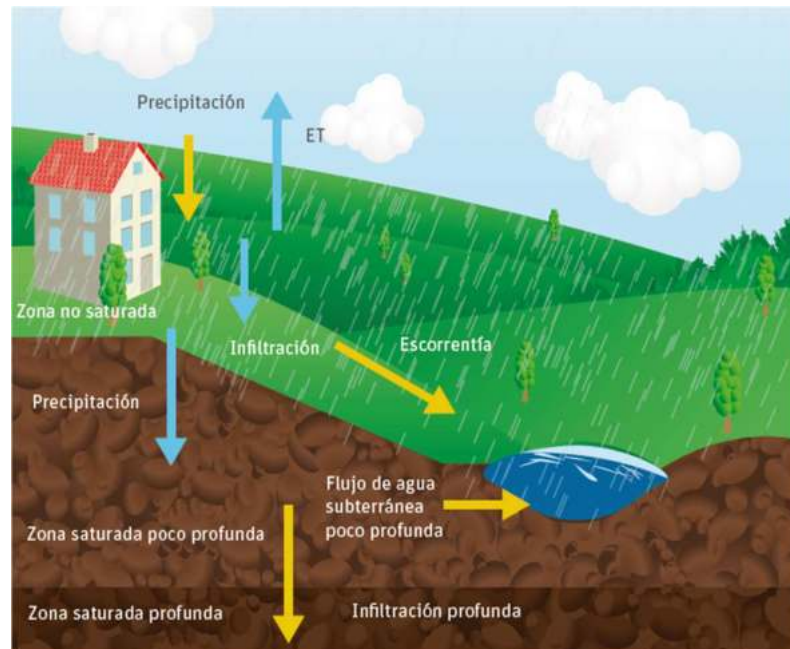


Figura 8: Representación esquemática del modelo GWLF.

Fuente: Adaptado de “Nota Técnica Hydro-BID (pág. 17),” por Moreda et al., 2014.

En la **Figura 8** se observa el funcionamiento del modelo de precipitación escorrentía componente de GWLF.

2.3.5 Cálculos del modelo de GWLF

a) Deshielo

La precipitación se clasifica como lluvia o nieve, mediante la comparación de la temperatura media diaria (T_t) y un valor límite de 0°C . El agua de deshielo genera infiltración y percolación al subsuelo. En la **Ecuación (2)** se muestra el balance de la cobertura de nieve del área en estudio.

$$SNO_t = SNO_{t-1} + R_t - SNO_{mlt} \quad (2)$$

$$SNO_{mlt} = 0,45T_t \quad (3)$$

Donde:

SNO_t : contenido de agua de la capa de nieve en un día dado.

R_t : cantidad de precipitación en un día.

SNO_{mlt} : cantidad de deshielo estimada.

b) Evapotranspiración potencial

La evapotranspiración potencial (PET, por sus siglas en inglés) se estima mediante el método desarrollado por Hamon (1962). El cálculo de PET se realiza según la **Ecuación (4)**.

$$PET_t = \frac{0,021H_t^2 e_t}{T_t + 273} \quad (4)$$

Donde:

H_t : número de horas de luz solar por día durante el mes que contenga el día t.

e_t : presión de vapor de agua en saturación en milibars en el día t.

T_t : temperatura en el día t ($^\circ\text{C}$).

La PET se ajusta mediante un factor de cobertura que depende del uso de suelo, como lo muestra la **Ecuación (5)**. Además, la PET real es calculada de la PET ajustada, pero con la limitante dada por la presencia de humedad en el suelo.

$$PET_{Adj(t)} = CV * PET_t \quad (5)$$

Donde:

PET_{Adj(t)}: PET de cobertura ajustada.

CV: factor de cobertura.

c) Escorrentía

La escorrentía superficial se genera tanto de la lluvia como del deshielo se calcula usando la **Ecuación (6)** del número de curva del U. S. Soil Conservation Service:

$$RO_t = \left(\frac{R_t - 0,2D_t}{R_t + 0,8D_t} \right)^2 \quad (6)$$

Donde:

RO_t: escorrentía (cm).

R_t: suma de lluvia y deshielo (cm).

D_t: parámetro de detención (cm), calculado con la **Ecuación (7)**.

$$D_t = \frac{2540}{CN_t} - 25,4 \quad (7)$$

Donde:

CN_t es el número de curva asignado por uso de suelos y ajustado cada día

Los números de curva son asignados a cada categoría individual de uso de suelos y al grupo hidrológico del suelo correspondiente considerado en el modelo. Por ejemplo, los usos de las tierras de áreas de selvas/bosques que yacen sobre suelos de buen drenaje tendrán un número de curva diferente que el mismo uso de tierras que las que yacen sobre suelos de pobre drenaje. Aunque los números de curva están establecidos dentro del modelo antes de correr el modelo, cada día el número de curva para un uso de tierras/grupo de suelos es modificado en base a la condición de humedad antecedente del suelo, tal como se muestra en la **Figura 9** (Moreda, et al , 2014, pág. 20).

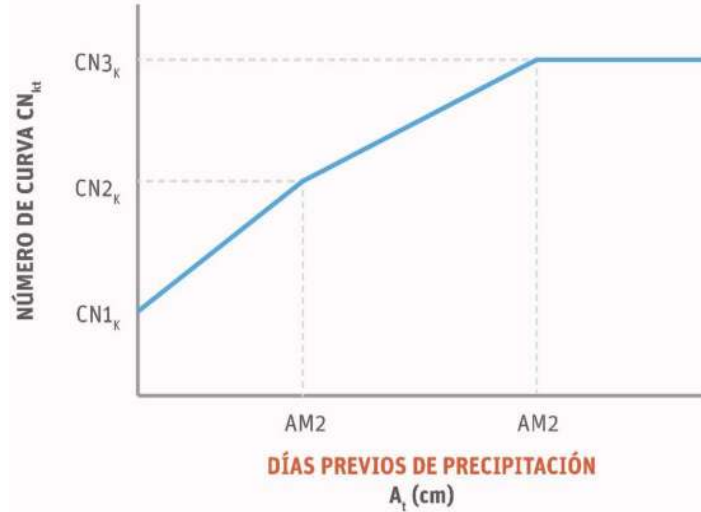


Figura 9: Los números de curva se seleccionan como funciones de la humedad
Fuente: Adaptado de “Nota Técnica Hydro-BID (pág. 20),” por Moreda et al., 2014.

Para calcular el número de curva para un día determinado, la humedad antecedente del suelo se calcula acumulando la lluvia y el deshielo de los últimos 5 días:

$$Amc5_t = \sum_{x=1}^5 R_{(t-x)} \quad (8)$$

Donde $Amc5_t$ es la precipitación antecedente de los últimos 5 días.

Los números de curva para condiciones de humedad antecedente secas, promedio y húmedas son $CN1_k$, $CN2_k$, y $CN3_k$, respectivamente. En base a la **Figura 9** el número de curva real para el día t , $CN2_k$, es seleccionado como una función lineal de la precipitación antecedente de 5 días $Amc5_t$ dada en la **Ecuación (8)**.

El modelo requiere especificar $CN2_k$. Los valores para $CN1_k$ y $CN3_k$ son calculados de las aproximaciones de (Hawkins et al., 2010, pág. 6)

$$CN1_k = \frac{CN2_k}{2,334 - 0,01334CN2_k} \quad (9)$$

$$CN3_k = \frac{CN2_k}{0,4036 - 0,0059CN2_k} \quad (10)$$

d) Percolación

Se calculan los balances diarios de agua dentro de ambos compartimientos del suelo. La ecuación para la capa no saturada es la **Ecuación (11)**:

$$U_{t+1} = U_t + R_t + M_t - Q_t - E_t - P_t \quad (11)$$

En forma similar, el balance de agua para el área saturada se calcula con la **Ecuación (12)**:

$$S_{t+1} = S_t + P_t - G_t - D_t \quad (12)$$

Donde:

U_t : humedad del suelo de la zona no saturada.

S_t : humedad del suelo de la zona superficial en el comienzo del día t.

Q_t : escorrentía de la cuenca.

E_t : evapotranspiración real.

P_t : percolación hacia la zona saturada poco profunda.

G_t : flujo/volumen de aguas subterráneas hacia el arroyo (i.e., flujo base).

D_t : infiltración hacia la zona saturada profunda en el día t (cm).

La percolación ocurre cuando el agua en la zona no saturada sobrepasa la capacidad disponible de agua del suelo U^* (cm), como lo muestra la **Ecuación (13)**.

$$P_t = \text{Max}(0, (U_t + R_t + M_t - Q_t - E_t - U^*)) \quad (13)$$

La capacidad de agua del suelo U^* tiene que ser definida como una característica de la capa de suelo no saturada. Este parámetro puede estimarse a partir de esta propiedad del suelo.

La evapotranspiración está limitada por la humedad disponible en la zona no saturada:

$$E_t = \text{Min}((CV_t * PET_t), (U_t + R_t + M_t - Q_t)) \quad (14)$$

El modelo asemeja la zona saturada poco profunda con un embalse lineal simple. El flujo/volumen de agua subterránea y la infiltración profunda se obtienen mediante las **Ecuaciones (15) y (16)**.

$$G_t = rS_t \quad (15)$$

$$D_t = sS_t \quad (16)$$

Donde:

r: constante de recesión de agua subterránea (d^{-1}).

s: constante de percolación, que controla la tasa de percolación hacia el acuífero de aguas subterráneas profundas (d^{-1}).

Estos dos parámetros tienden a tener una alta correlación.

e) Flujo o Caudal

El flujo total generado por la cuenca de captación, F_t , es la adición de la escorrentía (RO_t) y del flujo del agua subterránea (G_t), se calcula con la **Ecuación (17)**.

$$F_t = RO_t + G_t \quad (17)$$

f) Cálculo Hidráulico

En Hydro-BID, el flujo que se genera para cada cuenca es dirigido hasta la salida de alguna cuenca aguas abajo y se aplica la metodología de tiempo de retardo-enrutamiento (lag-routing) de RTI. El tiempo de retardo se determina como el periodo que se demora el flujo generado en una cuenca hasta llegar a otra cuenca localizada aguas abajo y se obtiene de la división de la longitud del río para la velocidad promedio (se establece un valor por defecto de 0,5 m/s) (Moreda, et al , 2014, pág. 22). Un ejemplo se muestra en la **Figura 10**.



Figura 10: Movimiento de los flujos a través de la red de la AHD
 Fuente: Adaptado de “Nota Técnica Hydro-BID (pág. 23),” por Moreda et al., 2014.

2.3.5.1 Parametrización y datos

- **Parámetros del GWLF**

La mayoría de los parámetros requeridos por el GWLF se acoplan en una base de datos para cada cuenca de la AHD, incluyendo el área de captación y la longitud del arroyo. Los parámetros principales del GWLF se describen en la **Tabla 4:**

Tabla 4: Principales parámetros del GWLF que están relacionados con la generación de flujos

Parámetros	Descripción	Método de Estimación
Capacidad disponible de Agua del Suelo (U*)	Este parámetro activa el inicio de la percolación	Puede ser estimado por las características del suelo.
Número de Curva (CN)	Controla la cantidad inicial de abstracción y usada para calcular la detención	Se escoge usando el uso del suelo y el tipo de clasificación del suelo
Coficiente de la Curva de Evaporación (CV)	Representa la variación estacional de la evaporación debido al crecimiento de la vegetación	Se estima mensualmente.
Coficiente de Recesión de Aguas Subterráneas (r)	Controla la tasa de flujo de agua subterránea desde la zona saturada	En estaciones de aforo en las cuencas, el parámetro de recesión puede ser estimado usando técnicas de separación hidrográfica.
Parámetro de Percolación (s)	Controla la tasa de percolación hacia el acuífero de aguas subterráneas profundas	Dependiendo de la formación geológica, los valores de percolación pueden ser muy variables

Fuente: Adaptado de Nota Técnica Hydro-BID (pág. 24), por Moreda et al., 2014.

- **Número de curva (CN)**

Se requieren dos conjuntos de datos para establecer una tabla para ver números de curva: el uso del suelo y los datos del suelo. Para determinar el número de curva para una cuenca en la tabla de consulta **Tabla 5** se deben identificar el uso de tierra/suelo y el grupo hidrológico dominante de suelo.

Tabla 5: Grupos hidrológicos del suelo.

Grupo Hidrológico del Suelo	Infiltración en estado húmedo	Características	Textura
A	Rápida	Alta capacidad de infiltración > 76 mm/h	Arenosa, Arenosa-Limosa, Franca
B	Moderada	Capacidad de infiltración 76-38 mm/h	Franco Arcillosa-Arenosa, Franco-Limosa
C	Lenta	Capacidad de infiltración 36-13 mm/h	Franco-Arcillosa, Franco-Arcillo-Limosa, Arcillo-Arenosa
D	Muy lenta	Capacidad de infiltración < 13mm/h	Arcillosa

Nota: Características de infiltración y textura asociada a cada tipo de grupo hidrológico de suelo.
Fuente: Adaptado de SCS, 1964 en (Bradbury et al., 2000).

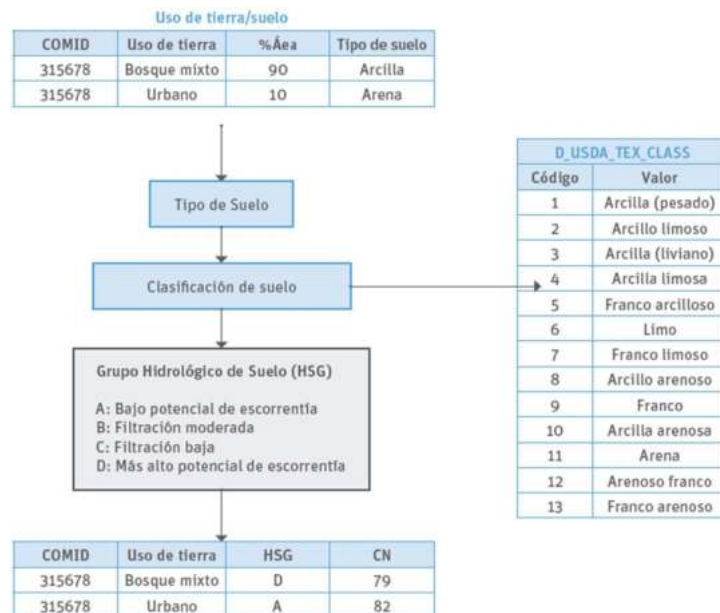


Figura 11: Representación esquemática de la estimación del número de curva.

Nota: El ejemplo aquí dado es para una sola Cuenca de la AHD COMID=315678 que tiene dos tipos de usos de tierras (Bosque mixto y Urbano) y cada uso de tierra tiene un solo tipo de suelo dominante.
Fuente: Adaptado de Nota Técnica Hydro-BID (pág. 26), por Moreda et al., 2014.

Tabla 6: Consulta del número de curva

Tipo de Uso de Suelo	Grupo Hidrológico del Suelo			
	A	B	C	D
Tierras Urbanas y asentamientos humanos	82	88	92	93
Tierras agrícolas secas y pastizales	64	75	82	85
Tierras agrícolas Irrigadas y Pastizales	64	75	82	85
Tierras agrícolas mixtas secas/irrigadas y pastizales	40	64	75	81
Agricultura/Mosaico de Pastizales	40	64	75	81
Agricultura /Mosaicos de bosques claros	40	64	75	81
Pastizales	49	70	80	87
Bosques de Arbustos	45	57	68	74
Bosques mixtos de Arbustos/Pastizales	45	57	68	74
Sabana	49	70	80	87
Bosque Deciduo de hoja ancha	36	60	73	79
Bosque Deciduo de hoja acicular	36	60	73	79
Bosque Siempre verde de hoja ancha	36	60	73	79
Bosque Siempre verde de hoja acicular	36	60	73	79
Bosque Mixto	36	60	73	79
Cuerpos de agua	100	100	100	100
Humedales Herbáceos	49	70	80	87
Humedales Arbolados	49	70	80	87
Infértil o de poca vegetación	77	86	91	94
Tundra Herbácea	45	57	68	74
Tundra Arbolada	45	57	68	74
Tundra Mixta	45	57	68	74
Tundra sin vegetación	77	86	91	94
Nieve o Hielo	100	100	100	100

Fuente: adaptada del U.S. Department of Agriculture por USDA⁶, 1972.

Los valores de número de curva cercanos a 20 corresponden a suelos con condiciones de permeabilidad muy alta, mientras que los valores cercanos a 100 tiene condiciones de impermeabilidad. Los suelos se dividen en cuatro grupos hidrológicos expresados en la **Tabla 5**.

⁶ Información y Servicios del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA por sus siglas en inglés)

2.3.6 Calibración del modelo

Para llevar a cabo el proceso de calibración de Hydro-BID este incluye una serie de parámetros **Tabla 7** que permiten ajustar el modelo a la serie de datos observados los cuales son los registros de caudales obtenidos de las estaciones limnimétricas, para que de esta forma disminuir el porcentaje de error del modelo.

Tabla 7: *Parámetros de calibración de Hydro-BID*

Parámetro	Descripción
Número de curva (NC)	Caracteriza el tipo de suelo de la cuenca y su hidrología; oscila entre 0 y 1, en donde un valor de 1 representa que toda el agua que llueve se convierte en escorrentía y 0 representa una completa infiltración.
Contenido de agua en el suelo (AWC)	Representa la cantidad de agua que puede ser almacenada en el suelo para ser usada por las plantas, afectando la infiltración hacia el agua subterránea. En la interfaz puede ingresarse como un multiplicador que altera el valor anidado en la AHD puede ingresarse de forma directa.
Coeficiente de Recesión (R)	Evidencia cómo el agua subterránea que se encuentra cerca de la superficie contribuye a los caudales de los ríos o corrientes superficiales después de un evento de lluvia. En la interfaz puede ingresarse como un multiplicador que altera el valor anidado en la AHD puede ingresarse de forma directa como resultado de una medición en campo.
Seepage o coeficiente de permeabilidad	Representa el intercambio entre las aguas subterráneas cerca de la superficie con los cuerpos de agua más profundos, en donde la cantidad de agua que se le atribuye a este parámetro se considera como una salida de la modelación. También puede ser ingresado como un multiplicador o en un valor directo.
Factor ET de la estación de cultivo	Caracteriza el factor de evapotranspiración de las plantas durante la etapa de cultivo. Se puede ingresar como multiplicador o como un valor directo.
Factor ET de la estación de latencia	Corresponde al factor de evapotranspiración en la etapa de latencia o en la etapa en la que no se encuentra cultivada la zona. En la interfaz puede ingresarse como un multiplicador que altera el valor anidado en la AHD puede ingresarse de forma directa como resultado de una medición en campo.
Porcentaje de la cobertura impermeable	Porcentaje estimado de la porción impermeable de la cuenca y está disponible en algunas de las versiones del programa.

Fuente: Adaptado de “Nota Técnica Hydro-BID (pág. 50),” por Moreda et al., 2014.

Para evaluar el desempeño de la simulación, Hydro-BID cuenta con una serie de métricas bajo los supuestos de que tanto en la serie de datos generados como los históricos no hay ningún dato faltante en el periodo de análisis además de estar en una temporalidad diaria (ver **Tabla 8**).

Tabla 8: Métricas de desempeño Hydro-BID

Métrica de desempeño	Fórmula	Valor óptimo
Volumen general de error		
Error del volumen anual	$ove = \frac{\sum_{t=1}^N S_t - \sum_{t=1}^N O_t}{\sum_{t=1}^N O_t} * 100$	Más cercano a 0
Error de volumen mensual		
Correlación r	$r = \frac{N \sum_{t=1}^N O_t S_t - \sum_{t=1}^N O_t \sum_{t=1}^N S_t}{\sqrt{[N \sum_{t=1}^N S_t^2 - (\sum_{t=1}^N S_t)^2][N \sum_{t=1}^N O_t^2 - (\sum_{t=1}^N O_t)^2]}}$	Más cercano a 1
Coefficiente de correlación modificado	$r_{mod} = r \frac{\min(S_{sim} * S_{obs})}{\max(S_{sim} * S_{obs})}$	Más cercano a 1
Índice de Eficiencia de Nash-Sutcliffe	$r^2 = 1 - \frac{\sum_{t=1}^N (S_t - O_t)^2}{\sum_{t=1}^N (O_t - \mu_o)^2}$	<0,2 es insuficiente 0,2 – 0,4 es satisfactorio 0,4 – 0,6 es Bueno 0,6 – 0,8 es Muy bueno >0,8 es Excelente

Fuente: Adaptado de “Nota Técnica Hydro-BID (pág. 52),” por Moreda et al., 2014.

2.3.7 Proyecciones de cambio climático

Hydro-BID permite las siguientes proyecciones de escenarios de cambio climático:

- Uso directo de la precipitación y la temperatura diaria dentro de un solo archivo.
- Uso de datos de referencia climática con la habilidad de perturbar los datos mediante datos mensuales climáticos futuros.
- Incremento/disminución global de precipitación/temperatura por un factor.
- Factores de incremento o disminución mensual.

Las primeras dos opciones se aplican a un solo archivo de entrada (input) de series de tiempo, mientras que las dos últimas se aplican a la base de datos para todas las cuencas en el dominio del modelo.

- **Uso directo de la precipitación y temperatura diaria dentro de un solo archivo**

Hydro-BID tiene una opción de usar las series de tiempo diarias de precipitación y temperatura. Las proyecciones de clima obtenidas de modelos de circulación general pueden ser usadas directamente si los valores diarios se consideran precisos. Sin embargo, los valores diarios de modelos de circulación global basados en resoluciones bajas no son usualmente confiables.

Por lo tanto, se usa datos de precipitación y temperatura mensual o anual para proyecciones futuras generando valores diarios usando series de tiempo diaria históricas.

- **Permitir el incremento/disminución global de la precipitación/temperatura**

En ausencia de datos climáticos proyectados a futuro, los análisis de sensibilidad de los impactos de un cambio climático a nivel de cuenca completa se pueden estudiar. Hydro-BID permite un incremento o una disminución de la precipitación mediante un valor en porcentaje y un incremento o disminución de la temperatura mediante un valor absoluto. Este incremento/disminución puede aplicarse tanto a los datos climáticos en celdas como a los datos de aforos.

- **Permitir factores de incremento o disminución mensual**

También Hydro-BID permite capturar la variabilidad estacional del clima proyectado. Por ejemplo, si los modelos de proyección de clima muestran un cambio diferente de precipitación en el verano comparado con el invierno, o una variación mensual de los cambios de precipitación/clima, el sistema puede perturbar dicho clima mediante el uso de unos factores mensuales específicos como se muestra en la **Figura 12**.

Temp +/-		Precip Mult	
January:	<input type="text" value="1"/>	January:	<input type="text" value="0.8"/>
February:	<input type="text" value="1"/>	February:	<input type="text" value="0.8"/>
March:	<input type="text" value="1"/>	March:	<input type="text" value="0.8"/>
April:	<input type="text" value="1"/>	April:	<input type="text" value="0.8"/>
May:	<input type="text" value="2"/>	May:	<input type="text" value="0.8"/>
June:	<input type="text" value="2"/>	June:	<input type="text" value="1.1"/>
July:	<input type="text" value="2"/>	July:	<input type="text" value="1.1"/>
August:	<input type="text" value="2"/>	August:	<input type="text" value="1.1"/>
September:	<input type="text" value="2"/>	September:	<input type="text" value="1.1"/>
October:	<input type="text" value="1"/>	October:	<input type="text" value="0.8"/>
November:	<input type="text" value="1"/>	November:	<input type="text" value="0.8"/>
December:	<input type="text" value="1"/>	December:	<input type="text" value="0.8"/>

Figura 12: *Desviaciones mensuales*

Fuente: Adaptado de “Nota Técnica Hydro-BID (pág. 50),” por Moreda et al., 2014.

METODOLOGÍA Y DESARROLLO

La metodología se basa en el uso del algoritmo de hidrología en Hydro-BID, el cual requiere datos de entrada de clima y la parametrización, para generar los valores de caudal. Este procedimiento se calcula, como cualquier modelo, contiene incertidumbre en las diferentes etapas de recolección y procesamiento de datos.

En este proyecto de grado se divide en 3 fases metodológicas principales:

- Primero, se recolecta la información requerida para el modelo, los datos deben representar de la mejor manera las características climáticas de la cuenca, luego se realiza una calibración y validación de datos en Hydro-BID
- Segundo, se realizó un análisis de cambio climático y modelación de caudales futuros a partir de escenarios de cambio climático.
- Por último, se realiza un indicador de sequía hidrológica de la cuenca alta del río Guadalquivir.

Cada una de estas fases consta de sus correspondientes actividades que se evidencian en la **Figura 13** y que se describirán a continuación.

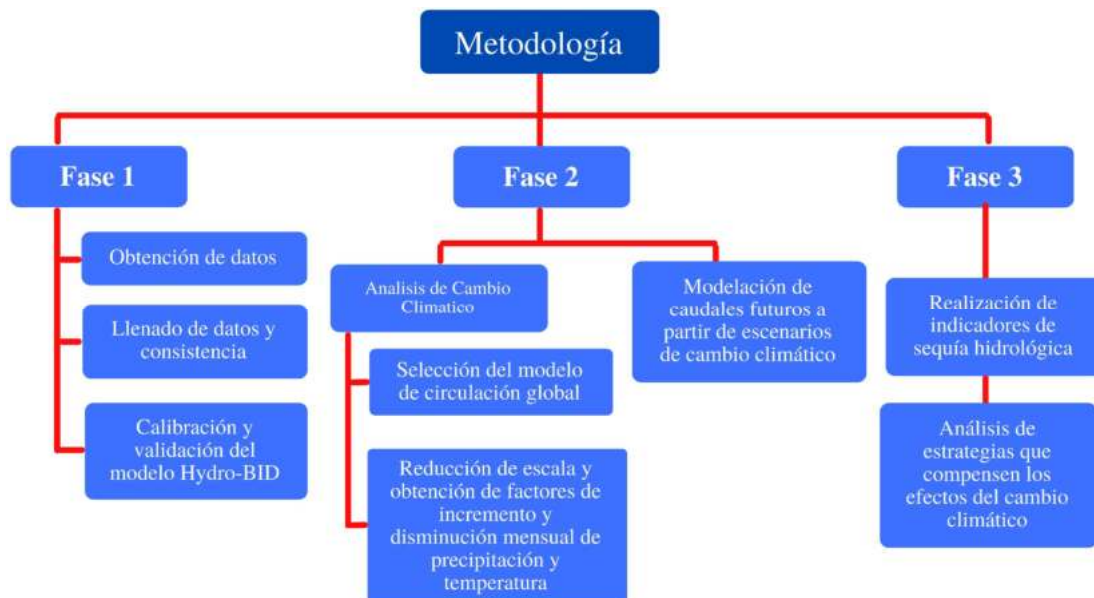


Figura 13: Estructura metodológica para la modelación hidrológica.

3.1 Obtención de datos y desarrollo del modelo base

3.1.1 Ubicación geográfica de la cuenca

Por otro lado, la delimitación y procesamiento de la cuenca se realizó implementando la base de datos de hidrología analítica (AHD) del software Hydro-BID. Se empleó el sistema de información geográfico de código libre QGIS para visualizar y editar la base de datos, para lo cual se cargó las capas de “catchment” y “AHD”. En primer lugar, se realizó un acercamiento a la zona del departamento de Tarija y se demarcó la cuenca alta del río Guadalquivir por medio de un elemento denominado navegador AHD que proporciona las subcuencas con su respectivo número identificador (COMID), los ríos principales, la dirección del caudal y datos de la geometría de la cuenca como el área, la longitud del cauce principal y el perímetro. Por otro lado, usando las herramientas de geometría de QGIS se hallaron los centroides de cada una de las subcuencas, paso que es fundamental en la modelación para la interpolación climática que permite distribuir los datos de temperatura y precipitación a lo largo de la cuenca.



Figura 14: Cuenca alta del río Guadalquivir perteneciente al COMID (31332190).



Figura 15: Mapa de la ubicación de la cuenca de estudio.

3.1.2 Ámbito geográfico

La cuenca de la zona alta del río Guadalquivir, comprende los municipios de San Lorenzo, y en pequeña proporción Cercado y El Puente.

Geográficamente, se encuentra delimitada por la serranía de Sama al oeste y la serranía del Gamoneda al oeste y la salida de la cuenca en obrajes, abarcando aproximadamente 933,50 km². La altura varía desde los 4 674 msnm que corresponde al pico del cerro Negro del Chiquiro en la serranía de Sama, hasta los 1 926 msnm en la estación hidrométrica de Obrajes.

3.1.3 Topografía

La cuenca es irregular con variadas altitudes y pendientes, como se detalla en la **Tabla 9**.

Tabla 9: *Relieve topográfico en la cuenca alta del río Guadalquivir.*

Tipo de relieve	Pendiente %
Terrenos escarpados	50 a 75
Fuertemente ondulados y quebrados	12 a 25
Ligeramente ondulados	3 a 9
Terrenos casi planos	2 a 3

3.1.4 Geología

La cuenca del río Guadalquivir tiene como divisoria de aguas a las serranías de Sama y la serranía de Gamoneda.

En la parte central de la cuenca se tiene depositados sedimentos fluviolacustres no consolidados de edad Cuaternaria.

El valle central de Tarija se encuentra cubierto por sedimento de origen fluviolacustres, los mismos que fueron depositados en varias lagunas que se formaron a lo largo de la historia Pleistocena. Estos depósitos se caracterizan por presentar dos miembros diferenciados. El primer miembro basal que tiene sedimentos finos y donde la ocurrencia de lentes arenosos es muy escasa. Hacia el tope de este miembro se puede

apreciar algunos horizontes blanquecinos de cenizas volcánicas (MMAyA, 2016, pág. 8).

3.1.5 Parámetros morfométricos y características de la cuenca

El río Guadalquivir tiene una longitud aproximada de 70 km desde la naciente en el río Trancas, en la parte alta de la serranía de Sama hasta el Angosto de San Luis. La dirección del río es Noreste. Los tributarios de la serranía de Sama se caracterizan por discurrir por terrenos con afloramientos de rocas consolidadas Paleozoicas, que influyen a que el escurrimiento superficial sea intermitente, encauzado por los valles controlados por las estructuras que predominan en la región, la permeabilidad es baja en consecuencia la escorrentía superficial es mucho mayor que la infiltración. El diseño de drenaje es dendrítico grueso.

Tabla 10: *Parámetros de forma cuenca alta río Guadalquivir.*

Parámetro	Valor	Descripción
Área de la cuenca [A]	933,50 km ²	Cuenca intermedia
Perímetros de la cuenca [P]	199,40 km	
Longitud del cauce principal [Lc]	52,62 km	
Ancho promedio [B]	17,48 km	
Coefficiente de forma [Ff]	0,33	Ligeramente alargada
Índice de forma o coeficiente de Gravelius [Cg]	1,80	Cuenca oval oblonga a rectangular oblonga
Relación de elongación [Re]	0,65	Fuertes relieves y pendientes pronunciadas.
Rectángulo equivalente [L], [l]	L = 85,83 km L = 10,72 km	
Pendiente media del cauce [S]	2,47 %	Suave
Curva hipsométrica Altura media de la cuenca [m.s.n.m.]	2 663,68 m.s.n.m.	Según la gráfica es una cuenca sedimentaria.

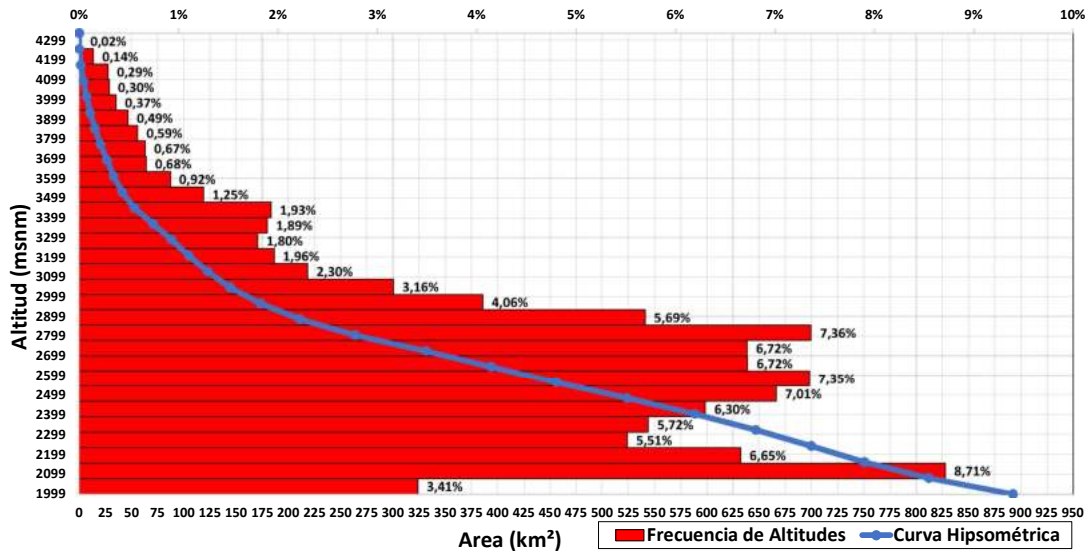


Figura 16: Curva hipsométrica y frecuencia de altitudes de la cuenca alta del río Guadalquivir.

3.1.6 Selección de escalas y período de estudio

Debido a que los procesos hidrológicos ocurren a distintas escalas, como ser el estudio del comportamiento de una cuenca que abarca varias regiones hasta terminar en su punto de aforo o descarga, a este estudio se lo denomina “escala espacial” y el estudio que persiste por varios años como es el caso de la precipitación se lo denomina “escala temporal”.

3.1.7 Escala temporal

La elección de esta escala está definida por la complejidad del estudio y la disponibilidad de información. Con el objetivo de generar herramientas para la gestión y planificación de los recursos, proveer asesoramiento en cuanto a cambios en el clima, cambios en la cobertura y uso de tierra y proveer medios para la construcción de series de caudales para el diseño de infraestructura básica, para el aprovechamiento de recursos hídricos, se adopta una resolución mensual donde la información es media (MMAyA⁷ y VRHR⁸, 2016, pág. 16).

⁷ (MMAyA) Ministerio de Medio Ambiente y Agua

⁸ (VRHR) Viceministerio de Recursos Hídricos y Riego

Según la “Guía metodológica para la elaboración de balances hídricos” del MMAyA y VRHR, 2016, nos indica que para un estudio de balance hídrico en una cuenca se debe considerar las siguientes escalas temporales:

- Escalas diarias (horarias), mensuales y anuales, para el análisis y procesamiento de la información hidrometeorológica.
- Escala media mensual para las principales variables del sistema (P , ET , Q). Se elegirá una escala mayor (semanal, diurna), cuando aquello se considera importante. Aquello determinará una demanda de información a mayor detalle a nivel con respecto a los parámetros meteorológicos, hidrológicos, suelos y otros.
- Escala media mensual (medias históricas) para la demanda de agua para los distintos usos.
- Escala media mensual para series de variables que describen los escenarios climáticos.
- Escala estacional, interanual o década para el estudio de detección de cambios de uso de suelo.

Para el estudio en la zona de la cuenca alta del río Guadalquivir se consideró las siguientes escalas temporales, en función de la información que se pudo obtener:

- Escala diaria, para datos de precipitación, temperatura e hidrométricos.

3.1.8 Escala espacial

El Plan Nacional de Cuencas (PNC) distingue las siguientes categorías: Macrocuena (superficie mayor a 500 000 Km²); gran cuenca (100 000 a 500 000 Km²); cuenca (10 000 a 100 000 Km²); subcuenca (2 000 a 10 000 Km²); mesocuenca (150 a 2 000 Km²); microcuena (superficie menor a 150 Km²).

La cuenca de estudio tiene un área de 933,50 Km², según la clasificación de la escala espacial que propone el PNC, la zona de la cuenca alta del río Guadalquivir sería una mesocuenca.

3.1.9 Periodo histórico de estudio

El periodo histórico de estudio para la zona de la cuenca alta del río Guadalquivir se definió con base en la información meteorológica administrada por el SENAMHI que definen un periodo de estudio de enero de 1980 al mes de diciembre de 2021.

A partir de la elección del periodo de estudio se realizó el análisis de la información pluviométrica y de temperatura disponible para cuenca alta del río Guadalquivir.

3.1.10 Búsqueda de información

La información de las estaciones presentes en la cuenca y sus alrededores que se analizarán en el presente estudio, además de los datos tanto de precipitación, como de temperatura diaria que serán analizados, fueron obtenidos del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología de Bolivia (SENAMHI).

Esta recopilación de datos se realizó de la siguiente manera:

- Se recolectaron datos meteorológicos, hidrométricos, de información temática.

3.1.11 Información meteorológica

La información de datos meteorológicos se obtuvo gracias a la institución del SENAMHI, esta información se la utiliza para alimentar al modelo hidrológico a partir de datos como la precipitación y la temperatura.

De la totalidad de estaciones disponibles en la cuenca, se observa que su registro es discontinuo y el periodo de medición es variable, ya que se presentan estaciones con periodos de mediciones mayores a 30 años; sin embargo, otras cuentan con menos de 10 años de registro, como se puede apreciar en la **Tabla 11**.

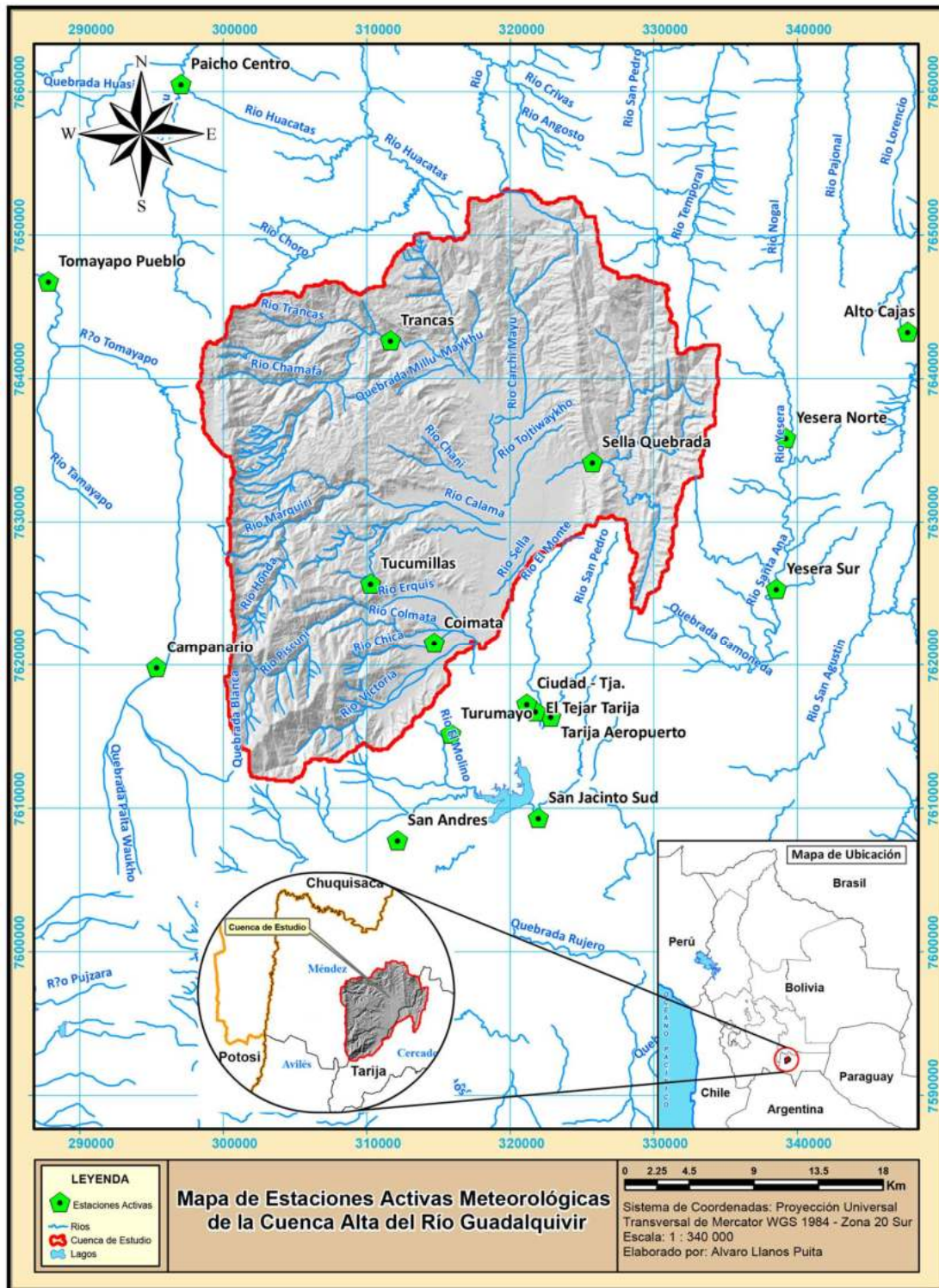


Figura 17: Ubicación geográfica de las estaciones activas meteorológicas.

Tabla 11: Estaciones meteorológicas activas identificadas.

Estación	Latitud	Longitud	Altitud (m.s.n.m.)	Coordenadas UTM (X)	Coordenadas UTM (Y)	Periodo de datos
Tarija Aeropuerto	-21,5467	-64,7108	1 849	322 831,229	7 616 377,672	1944 - 2021
El Tejar Tarija	-21,5431	-64,7211	1 859	321 762,246	7 616 765,769	1970 - 2021
San Jacinto Sud	-21,6103	-64,7200	1 820	321 959,527	7 609 324,399	1975 - 2021
San Andrés	-21,6233	-64,8150	1 987	312 140,421	7 607 767,081	1975 - 2021
Tucumillas	-21,4611	-64,8311	2 557	310 261,594	7 625 708,994	1978 - 2021
Yesera Norte	-21,3722	-64,5508	2 267	339 212,192	7 635 863,468	1977 - 2021
Coimata	-21,4992	-64,7889	2 027	314 685,879	7 621 546,125	1980 - 2021
Sella Quebrada	-21,3864	-64,6811	2 145	325 719,235	7 634 156,141	1980 - 2021
Tomayapo Pueblo	-21,2683	-65,0450	2 720	287 814,327	7 646 780,742	1981 - 2016
Trancas	-21,3081	-64,8158	2 198	311 649,166	7 642 673,576	1984 - 2021
Ciudad - Tja.	-21,5383	-64,7269	1 864	321 152,226	7 617 281,920	1985 - 2014
Campanario	-21,5125	-64,9756	3 460	295 362,045	7 619 836,795	1990 - 2021
Alto Cajas	-21,3061	-64,4683	2 422	347 698,812	7 643 264,398	1977 - 2020
Turumayo	-21,5567	-64,7783	1 978	315 852,139	7 615 192,270	1999 - 2021
Yesera Sur	-21,4672	-64,5583	2 092	338 538,954	7 625 338,472	2002 - 2021
Paicho Centro	-21,1453	-64,9544	2 570	297 044,791	7 660 524,899	2005 - 2020

En el departamento se cuenta también con 87 estaciones cerradas de las cuales 15 están ubicadas en la cuenca y zonas cercanas a la misma, hecho que se puede observar en la **Figura 18**. Como se muestra en la algunas presentan un período de registro de mediciones mayor a los 20 años pese a que actualmente no se encuentran en funcionamiento.

Esta información de las estaciones presentes en la cuenca y sus alrededores que se analizarán en el presente estudio, además de los datos tanto de precipitación, como de temperatura diaria que serán analizados, fueron obtenidos del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología de Bolivia (SENAMHI).

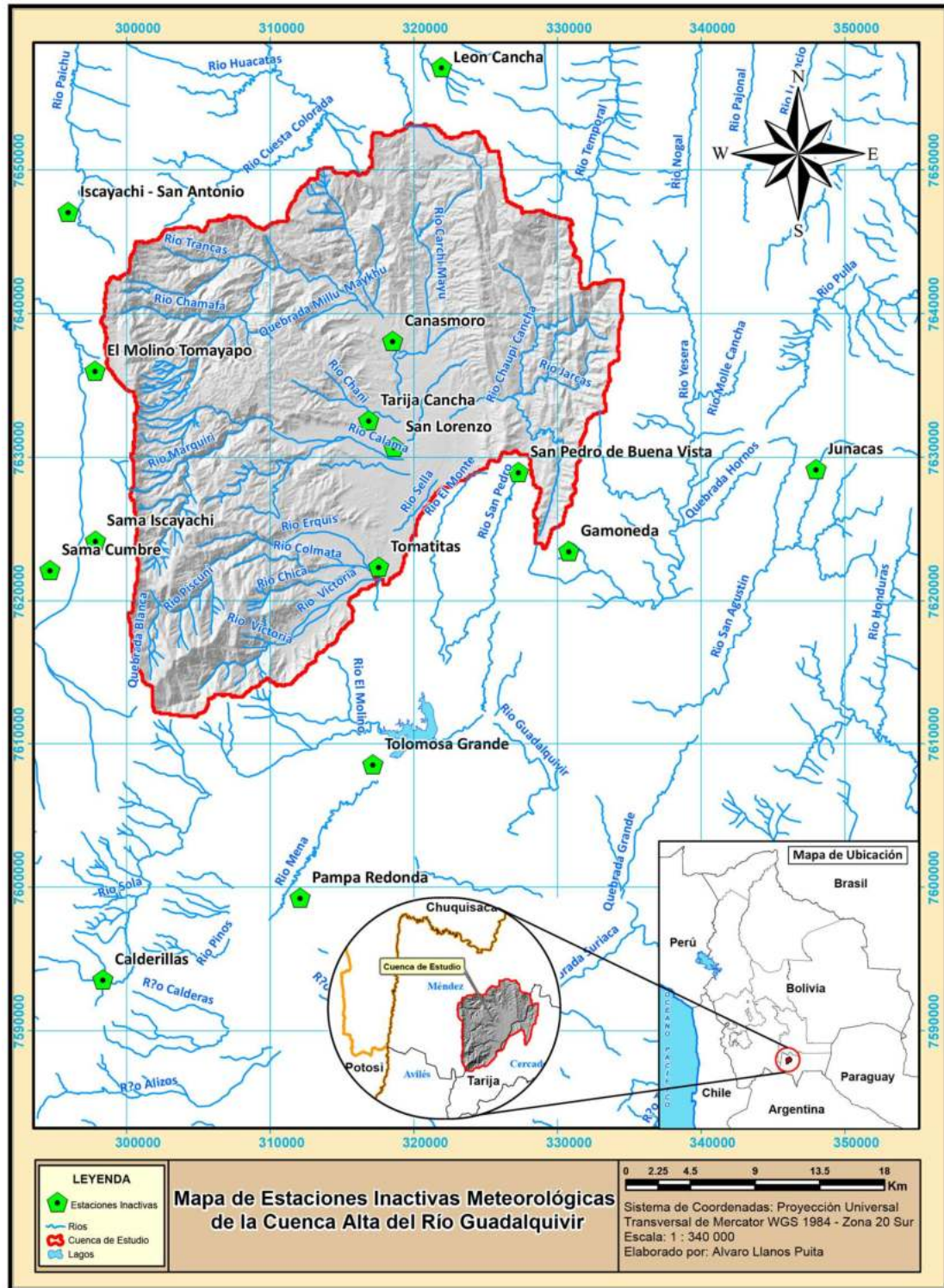


Figura 18: Ubicación geográfica de las estaciones inactivas meteorológicas.

Tabla 12: Estaciones meteorológicas inactivas identificadas.

Estación	Latitud	Longitud	Altitud (m.s.n.m.)	Coordenadas UTM (X)	Coordenadas UTM (Y)	Periodo de datos
León Cancha	-21,1783	-64,7153	2 729	321 926,031	7 657 152,338	1976 - 2011
Canasmoro	-21,5333	-64,7500	2 080	318 531,066	7 638 106,945	1944 - 2003
Calderillas	-21,7500	-64,9500	2 800	298 340,037	7 593 572,159	1975 - 2003
Pampa Redonda	-21,7000	-64,8167	1 950	312 067,256	7 599 276,363	1966 - 1994
Junacas	-21,4333	-64,4667	2 300	348 003,112	7 629 181,948	1977 - 2003
Tolomosa Grande	-21,6167	-64,7667	1 900	317 135,900	7 608 562,864	1968 - 1993
Gamoneda	-21,4833	-64,6333	2 150	330 785,206	7 623 475,531	1979 - 2003
El Molino Tomayapo	-21,3667	-64,9500	3 410	297 809,020	7 636 017,585	1981 - 2003
Iscayachi - San Antonio Sama	-21,2667	-64,9667	3 450	295 942,176	7 647 068,569	1975 - 1994
Cumbre	-21,4917	-64,9819	3 820	294 670,798	7 622 135,243	1980 - 1999
San Lorenzo	-21,4167	-64,7500	1 900	318 613,289	7 630 725,884	1975 - 1993
San Pedro de Buena Vista Sama	-21,4333	-64,6667	2 195	327 272,208	7 628 974,756	1979 - 2001
Iscayachi	-21,4736	-64,9514	3 440	297 812,313	7 624 174,305	1979 - 1993
Tarija Cancha	-21,4000	-64,7667	2 050	316 864,619	7 632 551,797	1979 - 1991
Tomatitas	-21,4919	-64,7611	1 928	317 555,091	7 622 378,442	1999 - 2013

El acopio de datos meteorológicos para que estos puedan ser útiles para futuras investigaciones, requiere de gran constancia para lograr series continuas y rigor en la medición, ya que las faltas en esa constancia y rigor, junto con algunos inconvenientes como ser cambios eventuales de observador o de aparato de registro, son inevitables cuando se estudian periodos amplios que provocan la obtención de periodos de registro variados y discontinuos como es el caso de las estaciones presentes en la cuenca alta del río Guadalquivir.

Al recopilar la información de los datos históricos de la precipitación, temperaturas máximas y mínimas a nivel diario de las estaciones tanto activas como inactivas presentes, en la cuenca alta del río Guadalquivir y sus alrededores, se pudo detallar el registro de las mismas.

Tabla 13: Periodo de registro de precipitación diaria - estaciones abiertas.

REGISTRO DE PRECIPITACIÓN DIARIA

ESTACIONES ABIERTAS

N°	ESTACIÓN	AÑO																																																					
		1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021												
1	Alto Cajas						3								8											9			9	8		7	6									3	3	9											
2	Campanario														1			3	2																		1																		
3	Ciudad - Tja.						9			1	1																									9	3																		
4	Coimata																																																						
5	El Tejar Tarija																									6																													
6	Paicho Centro																											10																											
7	San Andres					1																																																	
8	San Jacinto Sud																1	1																																					
9	Sella Quebrada					1		7												8	1																																		
10	Tarija Aeropuerto																																																						
11	Tomayapo Pueblo		3																																																				
12	Trancas					1		10		1			9																																										
13	Tucumillas																																																						
14	Turumayo																																																						
15	Yesera Norte												6																																										
16	Yesera Sur																																																						

	Años completos de la estación
1,2,3, est.	Número de meses sin registro

Tabla 14: Período de registro de temperatura máxima diaria - estaciones abiertas.

REGISTRO DE TEMPERATURA MÁXIMA DIARIA

ESTACIONES ABIERTAS

N°	ESTACIÓN	AÑO																																																
		1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021							
1	Alto Cajas																																																	
2	Campanario														4			3	4																						2									
3	Ciudad - Tja.																																																	
4	Coimata	3												4																																				
5	El Tejar Tarija																									6																			9	4	1			
6	Paicho Centro																																												5					
7	San Andres				9													1																							1					1				
8	San Jacinto Sud	4						2									8																													2				
9	Sella Quebrada													5	6																																			
10	Tarija Aeropuerto																																														4			
11	Tomayapo Pueblo																																																	
12	Trancas						10	1	1				9				8																																	1
13	Tucumillas																																																	
14	Turumayo																																																	1
15	Yesera Norte													6																																				
16	Yesera Sur																																																	

	Años completos de la estación
1,2,3, est.	Número de meses sin registro

Tabla 17: *Periodo de registro de temperatura máxima diaria - estaciones cerradas.*

REGISTRO DE TEMPERATURA MÁXIMA DIARIA

ESTACIONES CERRADAS

N°	ESTACIÓN	AÑO																																																	
		1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021								
1	Calderillas																																																		
2	Canasmoro		1	6			6	5	2		10	8			4	1		6	3	4	3			1	8																										
3	El Molino Tomayapo																																																		
4	Gamoneda																																																		
5	Iscayachi - San Antonio														2																																				
6	Junacas																																																		
7	León Cancha																																																		
8	Pampa Redonda																																																		
9	Sama Cumbre																																																		
10	Sama Iscayachi																																																		
11	San Lorenzo																																																		
12	San Pedro de Buena Vista																																																		
13	Tarija Cancha																																																		
14	Tolomosa Grande																																																		
15	Tomatitas																																																		


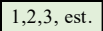
	Años completos de la estación
	1,2,3, est. Número de meses sin registro

Tabla 18: Período de registro de temperatura mínima diaria - estaciones cerradas.

REGISTRO DE TEMPERATURA MÍNIMA DIARIA

ESTACIONES CERRADAS

Nº	ESTACIÓN	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021												
	AÑO																																																						
1	Calderillas																																																						
2	Canasmoro		1	6				6	5	3		10	8			4	1		6	3	4	3			1	8																													
3	El Molino Tomayapo																																																						
4	Gamoneda																																																						
5	Iscayachi - San Antonio															2																																							
6	Junacas																																																						
7	León Cancha																																																						
8	Pampa Redonda																																																						
9	Sama Cumbre																																																						
10	Sama Iscayachi																																																						
11	San Lorenzo																																																						
12	San Pedro de Buena Vista																																																						
13	Tarija Cancha																																																						
14	Tolomosa Grande																																																						
15	Tomatitas																																																						

Años completos de la estación
 1,2,3, est. Número de meses sin registro

3.1.12 Información hidrométrica

Los datos hidrométricos son los más importantes en el modelo, a partir de ellos se realiza la calibración y validación, por eso, previo a iniciar el estudio se verificó si se contaba con datos de caudales y se observó que el SENAMHI, contaba con una serie de datos.

El intervalo inferior de caudales aforados parte de 1980, porque la variable precipitación y temperatura contiene información desde 1980 al 2021.

Tabla 19: Estaciones hidrométricas de la cuenca alta del río Guadalquivir.

Estación	Latitud	Longitud	Altitud (m.s.n.m.)	Coordenadas UTM (X)	Coordenadas UTM (Y)	Periodo de datos
Canasmoro	-21,350	-64,750	2 085	318 531,810	7 638 106,400	1977 - 2020
Sella Quebradas	-21,387	-64,684	2 119	325 402,070	7 638 121,000	1944 - 2003
Obrajes	-21,506	-64,763	1 922	317 399,070	7 620 838,950	1944 - 2003

3.1.12.1 Estación de obrajes

Para el presente estudio se identificó la estación hidrométrica de Obrajes, la cual cuenta con información de caudales aforados desde la fecha (8 de enero de 1980) hasta (31 de julio de 2018), como se muestra en la **Figura 19**, donde el caudal máximo registrado fue de 33,32 m³/s en la fecha (11 de marzo de 1993).

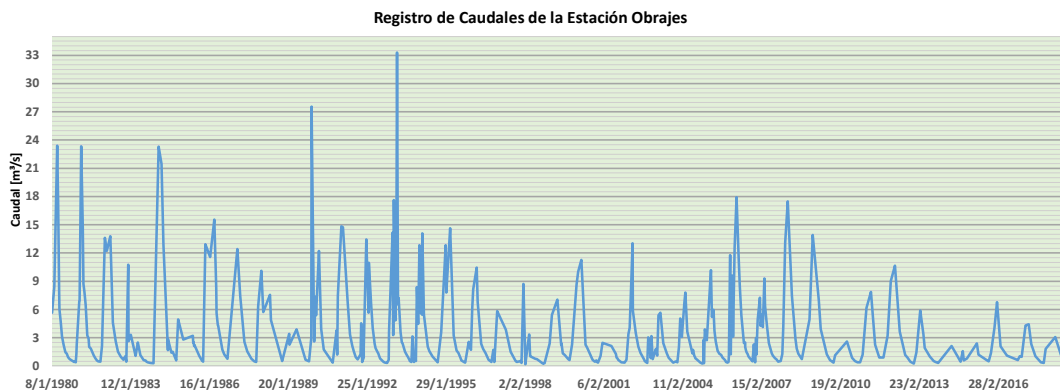


Figura 19: Registro histórico de caudales aforados de la estación Obrajes.

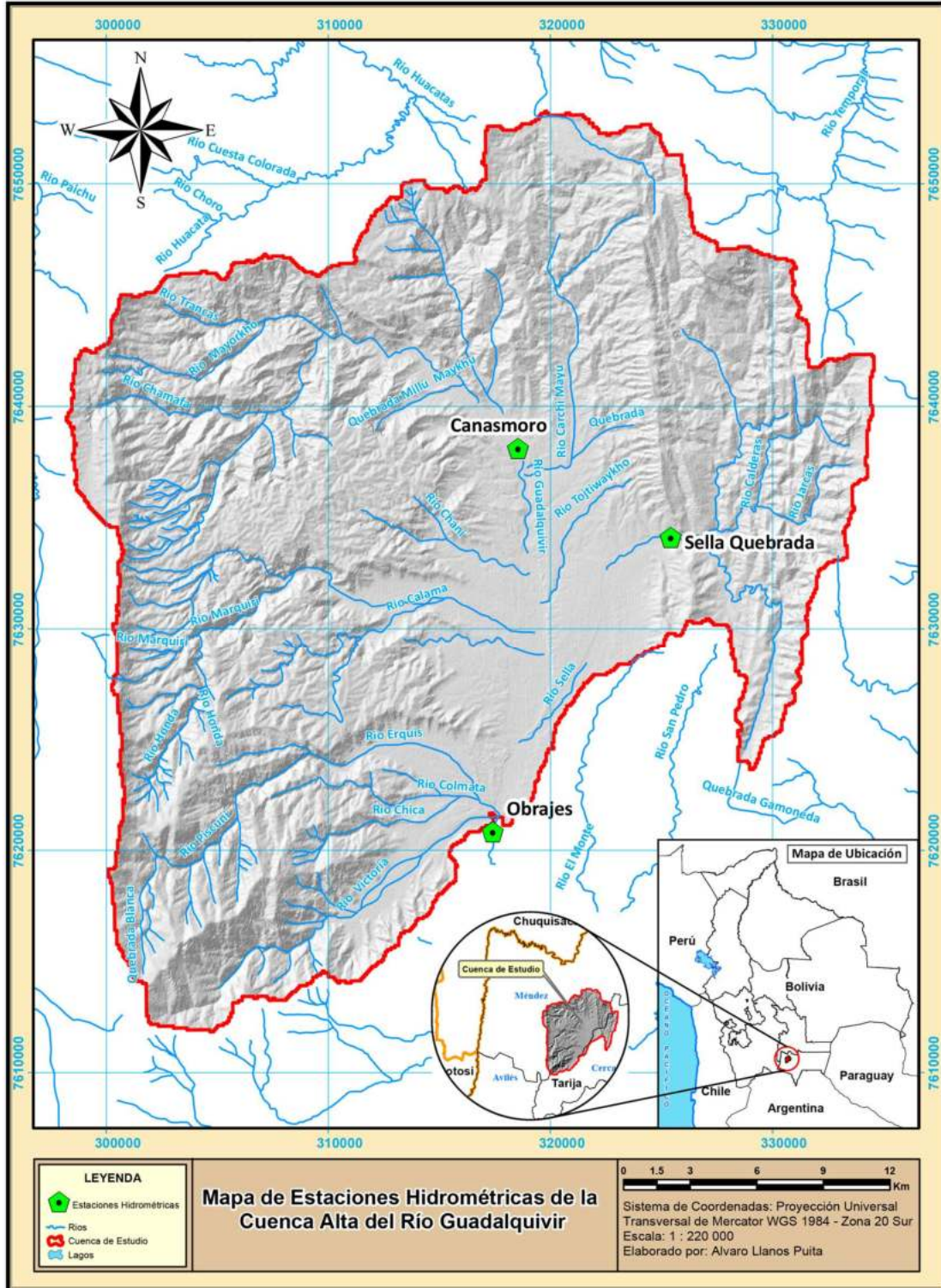


Figura 20: Estaciones hidrométricas en la zona de la cuenca alta del río Guadalquivir.

3.2 Llenado de datos y consistencia

3.2.1 Análisis exploratorio de datos

El análisis exploratorio de datos (AED), consiste en caracterizar las series de tiempo, empleando una variedad de técnicas (en su mayoría gráficos), para incrementar nuestro entendimiento sobre la variabilidad de los datos y visualizar las relaciones existentes entre las variables analizadas. El análisis exploratorio de datos se debe de realizar previo a la aplicación de cualquier técnica estadística. Entre los objetivos más relevantes de este tipo de análisis es:

- a) Maximizar nuestro entendimiento de los datos.
- b) Describir la estructura subyacente que ellos tienen (normalidad, multimodalidad, asimetría, curtosis, linealidad, homogeneidad entre grupos, etc.).
- c) Detectar las variables importantes.
- d) Detectar valores atípicos y anomalías.
- e) Comprobar los supuestos implícitos en los análisis.
- f) Determinar los ajustes óptimos de los factores.

3.2.2 Precipitaciones

A partir de las estaciones pluviométricas seleccionadas, y del periodo de estudio elegido que comprende desde el 1 de enero de 1980 a 31 de diciembre de 2021, cada estación debería contar con 15 341 datos de precipitaciones registradas.

En la **Tabla 20** se presenta la información con la que cuenta cada estación y el porcentaje de datos faltantes, también se puede observar que la estación más completa es la estación de Coimata a la que le faltan 3 datos para el periodo 1980 a 2021, y siendo que la estación de Alto Cajas la estación con mayores datos faltantes, unos 5 186 datos que representa un 39,76 %.

Tabla 20: Datos faltantes de precipitación de las estaciones pluviométricas.

N°	Estación Pluviométrica	N° Datos Faltantes	% Datos Faltantes
1	Alto Cajas	6 099	39,76
2	Campanario	3 876	25,27
3	Ciudad Tarija	5 101	33,25
4	Coimata	3	0,02
5	El Tejar Tarija	1 713	11,17
6	San Andrés	53	0,35
7	San Jacinto Sud	122	0,80
8	Sella Quebrada	884	5,76
9	Tarija Aeropuerto	124	0,81
10	Tomayapo Pueblo	2 742	1,87
11	Trancas	2 470	16,10
12	Tucumillas	80	0,52
13	Yesera Norte	946	6,17

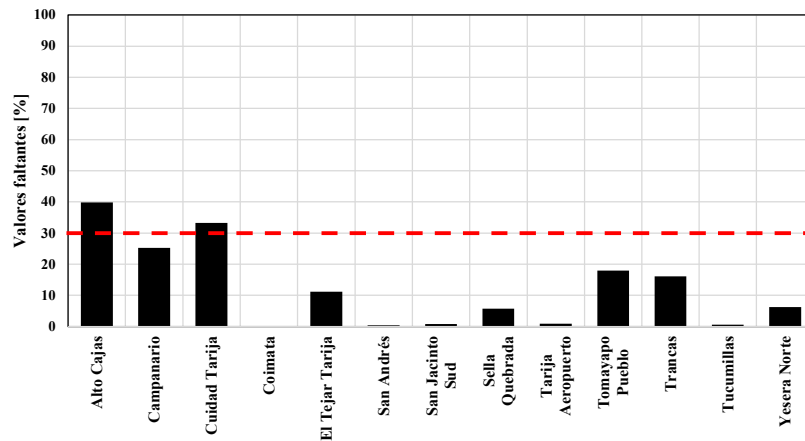


Figura 21: Valores perdidos de datos faltantes de precipitación.

En el presente trabajo solo se emplearán información de las estaciones que tengan una información faltante del 30 % o menos, por ello se desestima el uso de las estaciones de Alto Cajas y ciudad Tarija.

A simple vista, en la **Figura 22** no se puede identificar los datos atípicos, pero se sospecha que existen algunos valores de precipitación muy altos, los cuales podrían ser considerados como tal. Para determinar cuáles de estos valores pueden ser considerados como atípicos, se hace el uso del apartado del análisis exploratorio de diagrama de cajas con el paquete HydroTSM disponible en R.

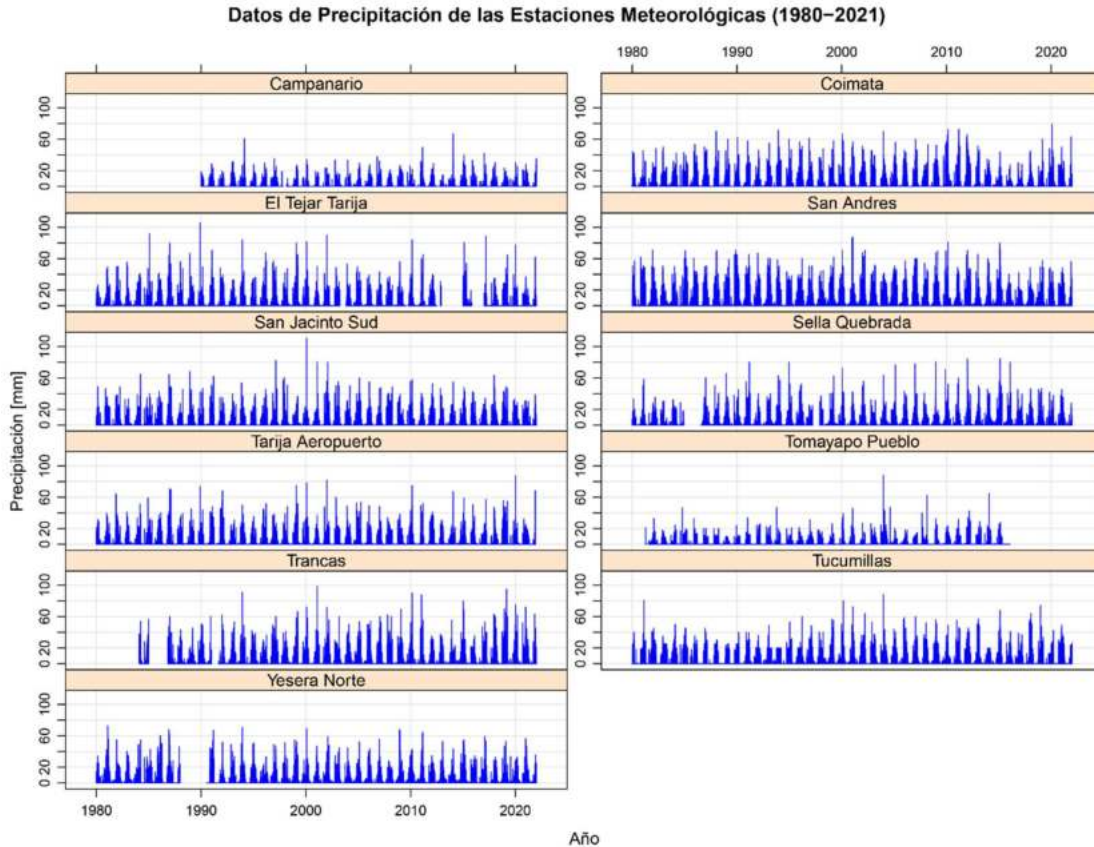


Figura 22: Series de precipitación diaria de las estaciones.

3.2.3 Temperaturas

Para la modelación en Hydro-BID se requiere información importante al igual que las precipitaciones, la temperatura media diaria, puesto en nuestro medio es frecuente la medición de temperatura mínima y máxima diaria, se precedió a recabar la información de ambos grupos de datos.

Al igual que para las precipitaciones, cada una de las 10 estaciones seleccionadas debería contar, con 13 515 datos para el periodo 1980 a 2021, en la **Tabla 21** se muestra la información disponible de las estaciones tanto de temperaturas máximas como mínimas.

Tabla 21: Datos faltantes de temperatura de las estaciones meteorológicas.

N°	Estación Meteorológica	N° Datos Faltantes T. min	N° Datos Faltantes T. máx	% Datos Faltantes T. min	% Datos Faltantes T. máx
1	Campanario	3 943	4 042	25,70	26,35
2	Coimata	1 755	1766	11,44	11,51
3	El Tejar Tarija	2 790	2 794	18,19	18,21
4	San Andrés	4 428	4 464	28,86	29,10
5	San Jacinto Sud	4 733	4 731	30,85	30,84
6	Sella Quebrada	4 842	4 843	31,56	31,57
7	Tarija Aeropuerto	230	478	1,50	3,12
8	Trancas	3 807	3 826	24,82	24,94
9	Tucumillas	7 387	7 388	48,15	48,16
10	Yesera Norte	4 098	4 119	26,71	26,85

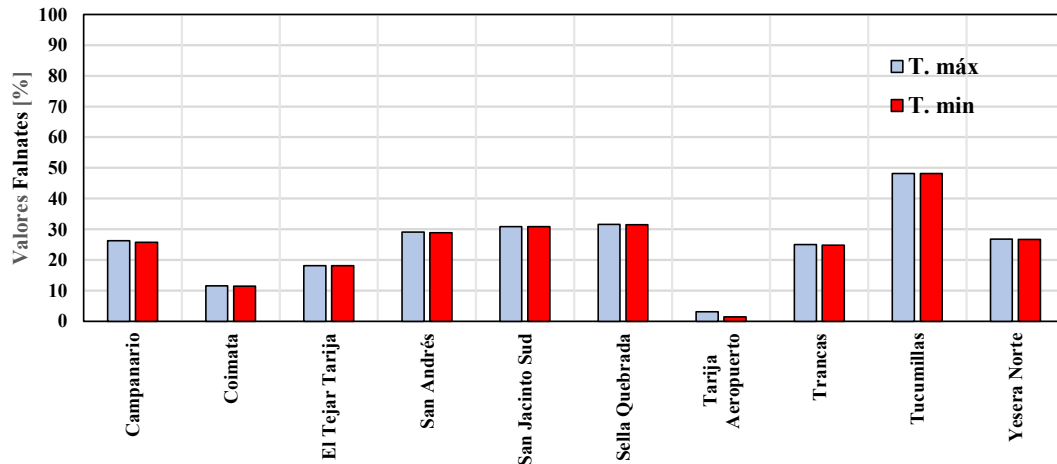


Figura 23: Valores perdidos de datos faltantes de temperatura.

De la **Tabla 21** se puede observar que la estación que cuenta con información es la estación Tarija Aeropuerto, con 230 datos faltantes de temperatura mínima y 478 de temperatura máxima, y la estación que más datos faltantes tiene es la estación Tucumillas, con 7 387 datos faltantes de temperatura mínima y 7 388 de temperatura máxima.

Respecto al porcentaje de datos faltantes que se considerara para completar los datos de las estaciones, se debe considerar varios factores, pues a diferencia de las precipitaciones la temperatura es una variable mucho más uniforme, pues depende además de factores locales de la cuenca, principalmente depende de la altura sobre el nivel del mar donde se encuentre esta última, debido al gradiente de temperatura que

se presenta en la troposfera donde la temperatura disminuye cerca de $0,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ por cada 100 m de ascenso.

Por ello, para el relleno de la información faltante se consideran las diez estaciones identificadas anteriormente.

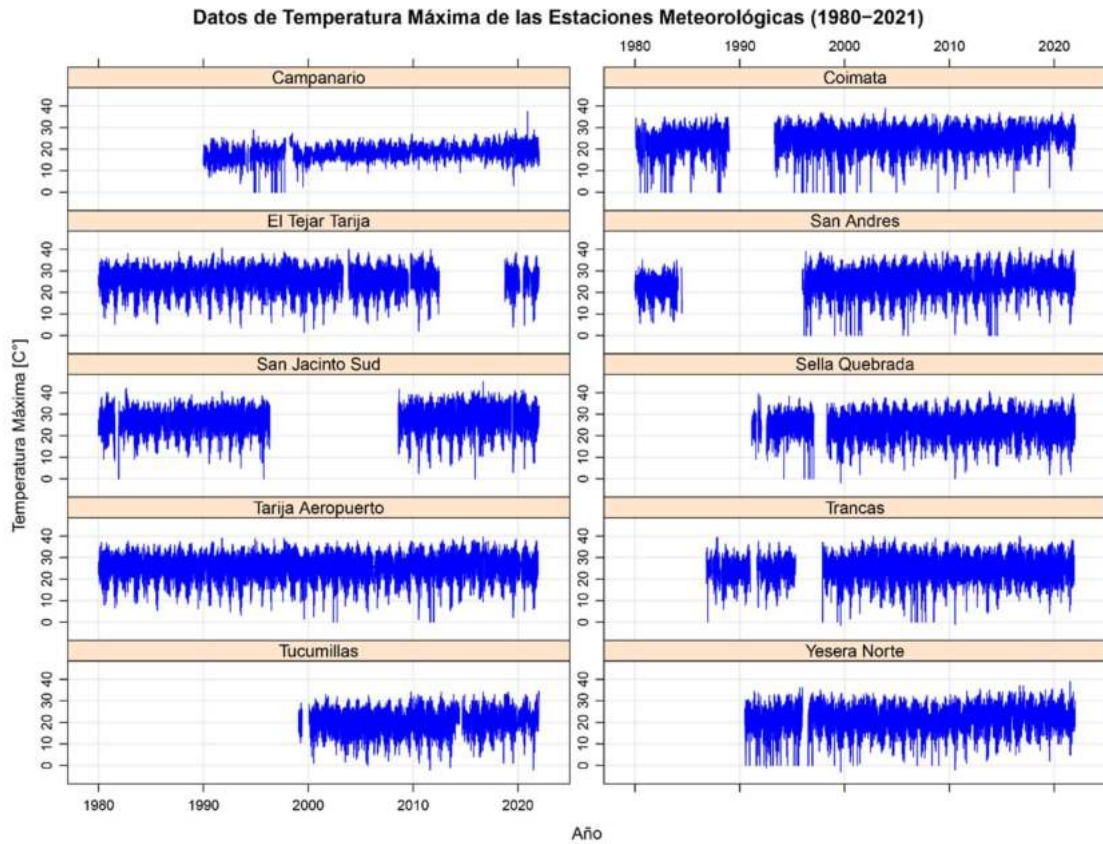


Figura 24: Series de temperatura máxima diaria de las estaciones.

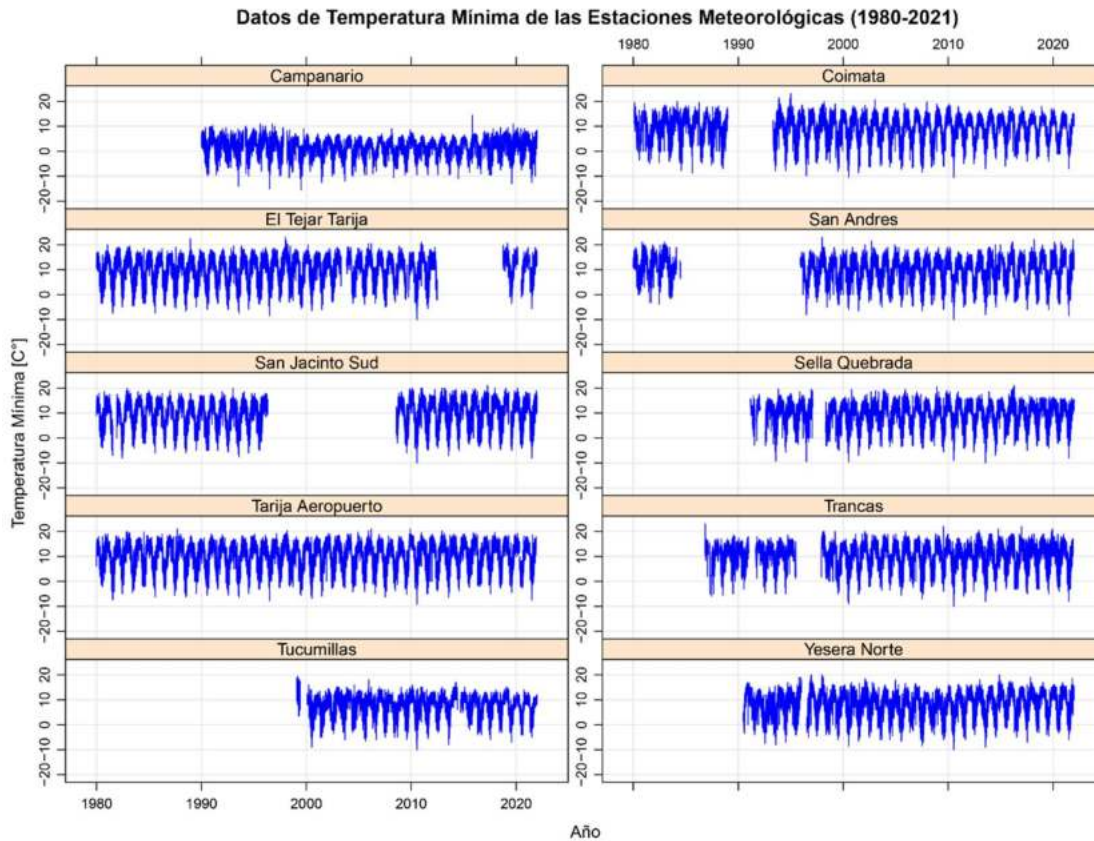


Figura 25: Series de temperatura mínima diaria de las estaciones.

3.2.4 Estadísticas

En la **Tabla 22** se muestra las estadísticas de las estaciones seleccionadas, siendo la estación Tomayapo Pueblo, con el menor promedio, con 0,76 mm y la estación San Andrés, con mayor promedio con 2,87 mm.

Tabla 22: Estadísticas de los valores de precipitación sin tratamiento.

Estación	Campanario	Coimata	El Tejar Tarija	San Andrés	San Jacinto Sud	Sella Quebrada	Tarija Aeropuerto	Tomayapo Pueblo	Trancas	Tucumillas	Yesera Norte
Nº Datos	11 465	15 338	13 628	15 288	15 219	14 457	15 217	12 599	12 871	15 261	14 395
Nº Total	15 341	15 341	15 341	15 341	15 341	15 341	15 341	15 341	15 341	15 341	15 341
Min	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Max	67,10	79,00	180,40	150,30	110,50	110,00	97,80	88,00	105,00	88,00	97,00
Primer Cuartil	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Mediana	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Promedio	0,95	1,88	1,83	2,87	1,65	1,71	1,58	0,76	2,31	2,12	1,79
Tercer Cuartil	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Desviación Estándar	3,48	6,23	6,36	8,32	5,76	5,93	5,61	3,41	7,38	6,43	5,95
Coficiente de Variación	3,65	3,32	3,47	2,90	3,50	3,47	3,55	4,47	3,20	3,03	3,33

3.2.5 Análisis gráfico

Para el análisis de series temporales hidrológicas de las precipitaciones y las temperaturas de las Estaciones, utilizamos el paquete HydroTSM disponible en R:

- **HydroTSM** desarrollado para el modelado de series temporales hidrológicas. Utilizamos la versión 0.6-0 (2017) para el manejo, análisis y ploteo de series temporales hidrológicas.

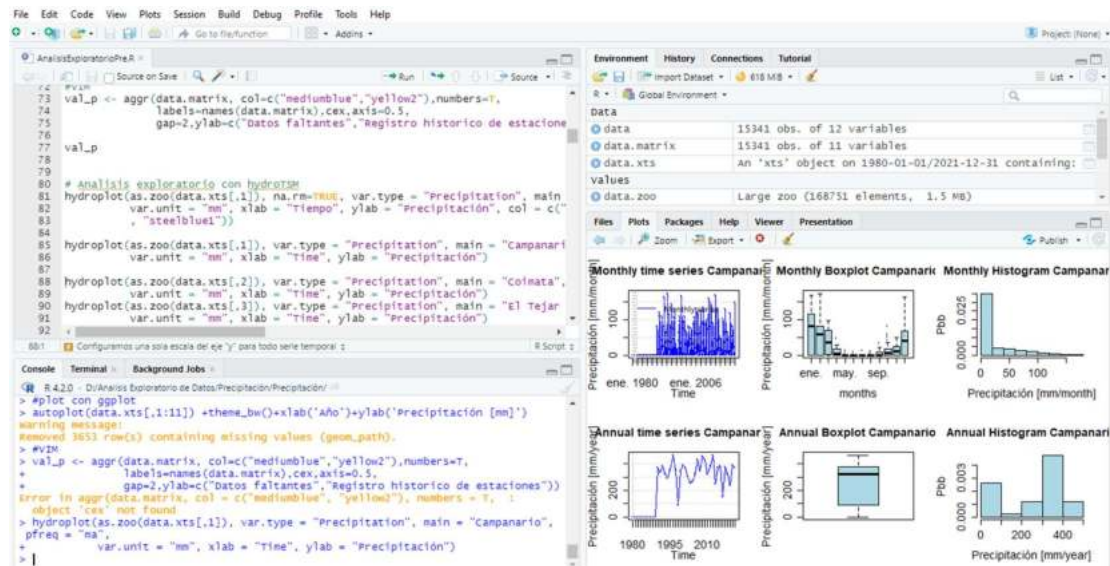


Figura 26: Script de código R del paquete HydroTSM.

Los Figura 27 a la Figura 37 se pueden apreciar los histogramas y diagrama de cajas mensuales de las estaciones de precipitación, temperatura máxima y mínima, por estación, en la cual se aprecia la distribución de los datos, que tan cercano estaría a una distribución normal.

El análisis minucioso de cada una de las gráficas sería el siguiente:

1.- Estación Campanario

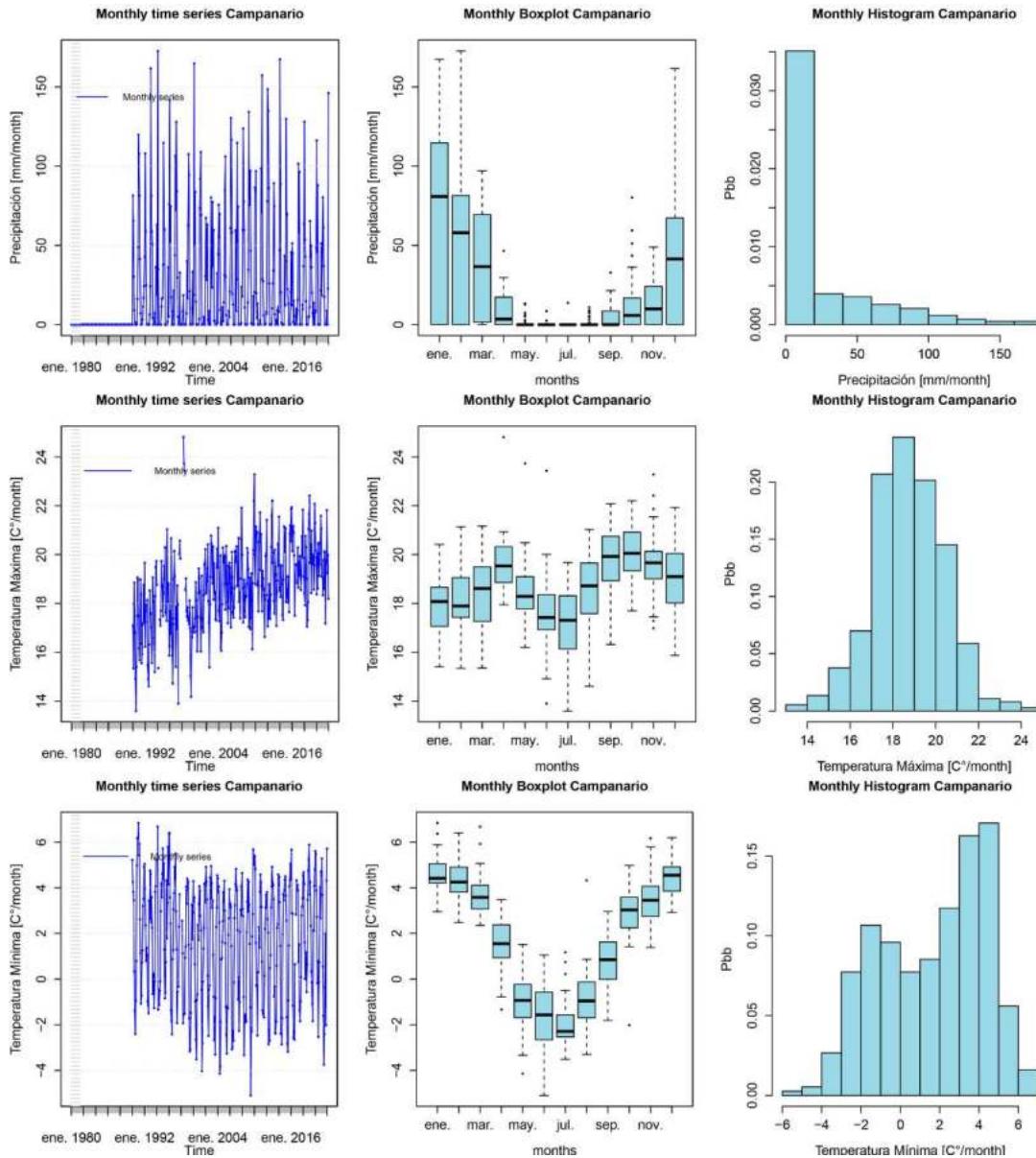


Figura 27: Series temporales estación Campanario de a) Precipitación, b) Temperatura máxima y c) Temperatura mínima.

- a) **Monthly Boxplot Campanario precipitación.** –En los diagramas de caja (Figura 27 a), para esta variable podemos ver la tendencia creciente de septiembre a abril y después, una disminución progresiva hasta septiembre.
- b) **Monthly Boxplot Campanario temperatura mínima.** –En estos diagramas de caja (Figura 27 b), podemos ver como la mediana de los datos de temperatura mínima están entre -3 a 5 C°.

c) **Monthly Boxplot Campanario temperatura mínima.** –En estos diagramas de caja (**Figura 27 c**), podemos ver como la mediana de los datos de temperatura mínima están entre -3 a 5 C°.

2.- Estación Coimata

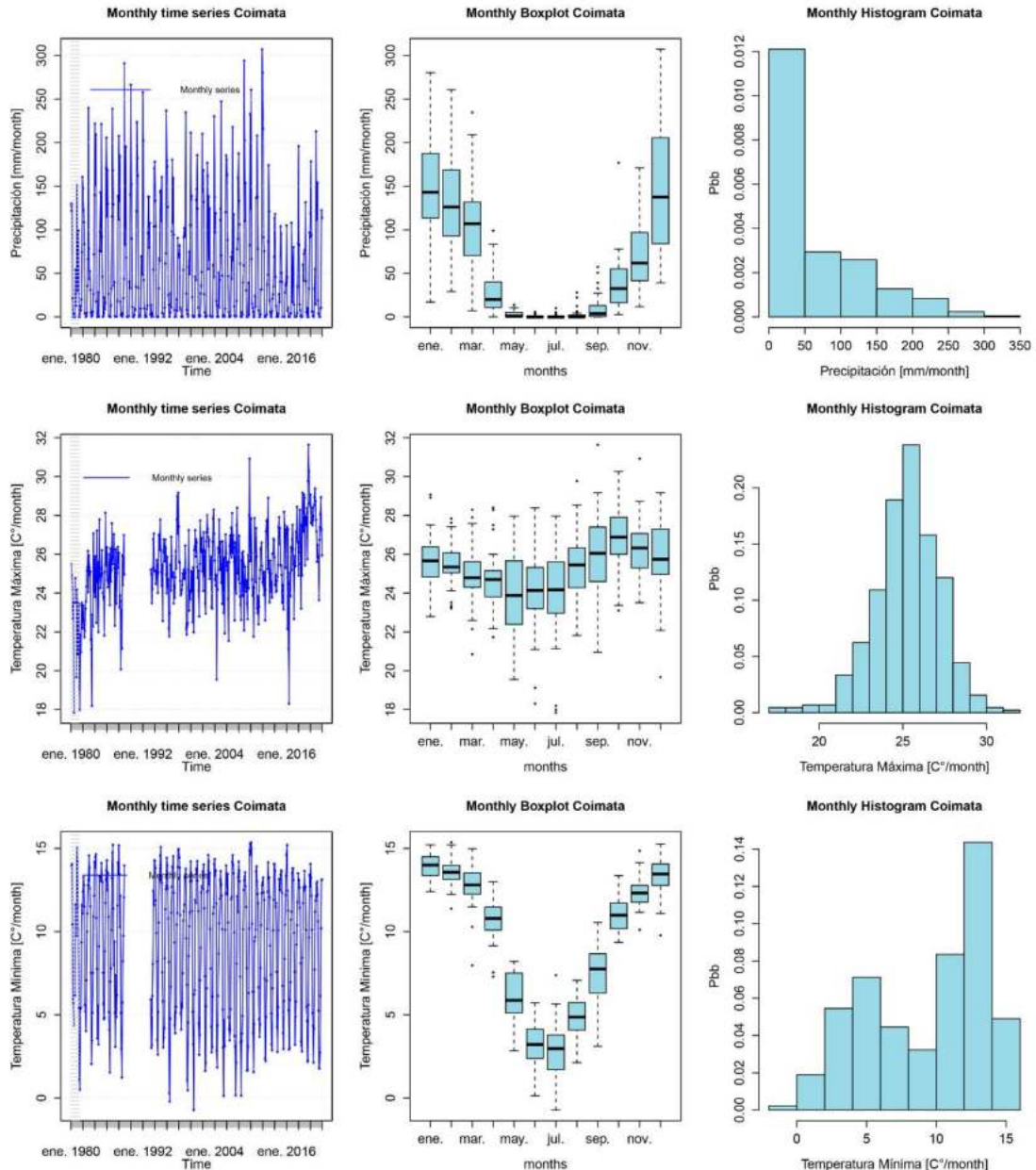


Figura 28: Series temporales estación Coimata de a) Precipitación, b) Temperatura máxima y c) Temperatura mínima.

a) **Monthly Boxplot Coimata precipitación.** –En los diagramas de caja (**Figura 28 a**), para esta variable podemos ver la tendencia creciente de septiembre a abril y después, una disminución progresiva hasta septiembre.

b) **Monthly Boxplot Coimata temperatura máxima.** –En estos diagramas de caja (Figura 28 b), podemos ver como la mediana de los datos de temperatura máxima están entre 24 a 27 C°.

c) **Monthly Boxplot Coimata temperatura mínima.** –En estos diagramas de caja (Figura 28 c), podemos ver como la mediana de los datos de temperatura mínima están entre 3 a 12 C°.

3.- El Tejar Tarija

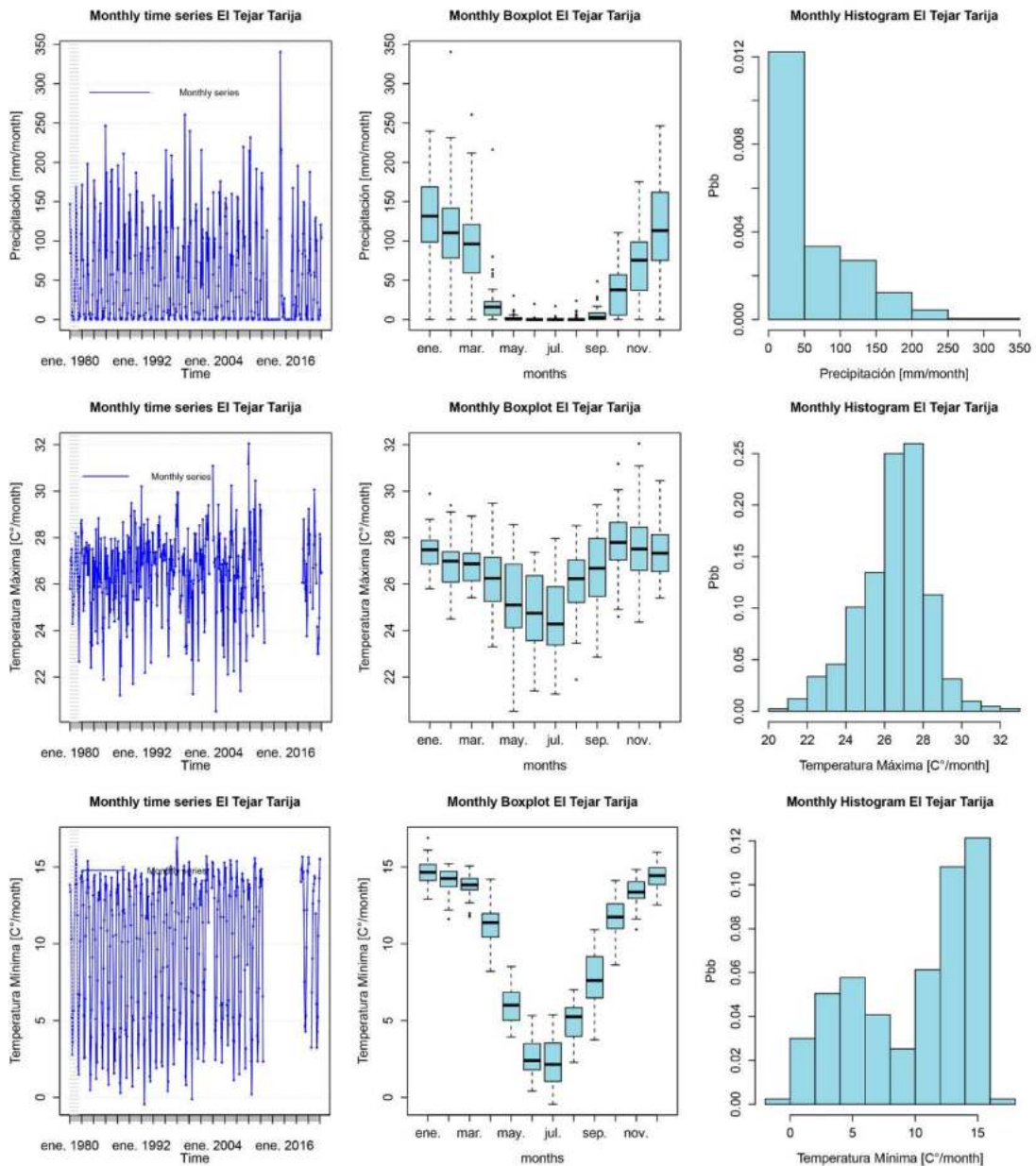


Figura 29: Series temporales estación El Tejar Tarija de a) Precipitación, b) Temperatura máxima y c) Temperatura mínima.

- a) **Monthly Boxplot el Tejar Tarija precipitación.** –En los diagramas de caja (**Figura 29 a**), para esta variable podemos ver la tendencia creciente de septiembre a abril y después, una disminución progresiva hasta septiembre.
- b) **Monthly Boxplot el Tejar Tarija temperatura máxima.** –En estos diagramas de caja (**Figura 29 b**), podemos ver como la mediana de los datos de temperatura máxima están entre 25 a 28 C°.
- c) **Monthly Boxplot el Tejar Tarija temperatura mínima.** –En estos diagramas de caja (**Figura 29 c**), podemos ver como la mediana de los datos de temperatura mínima están entre 2 a 15 C°.

4.- San Andrés

- a) **Monthly Boxplot San Andrés precipitación.** –En los diagramas de caja (**Figura 30 a**), para esta variable podemos ver la tendencia creciente de septiembre a abril y después, una disminución progresiva hasta septiembre.
- b) **Monthly Boxplot San Andrés temperatura máxima.** –En estos diagramas de caja (**Figura 30 b**), podemos ver como la mediana de los datos de temperatura máxima están entre 24 a 27 C°.
- c) **Monthly Boxplot San Andrés temperatura mínima.** –En estos diagramas de caja (**Figura 30 c**), podemos ver como la mediana de los datos de temperatura mínima están entre 3 a 15 C°.

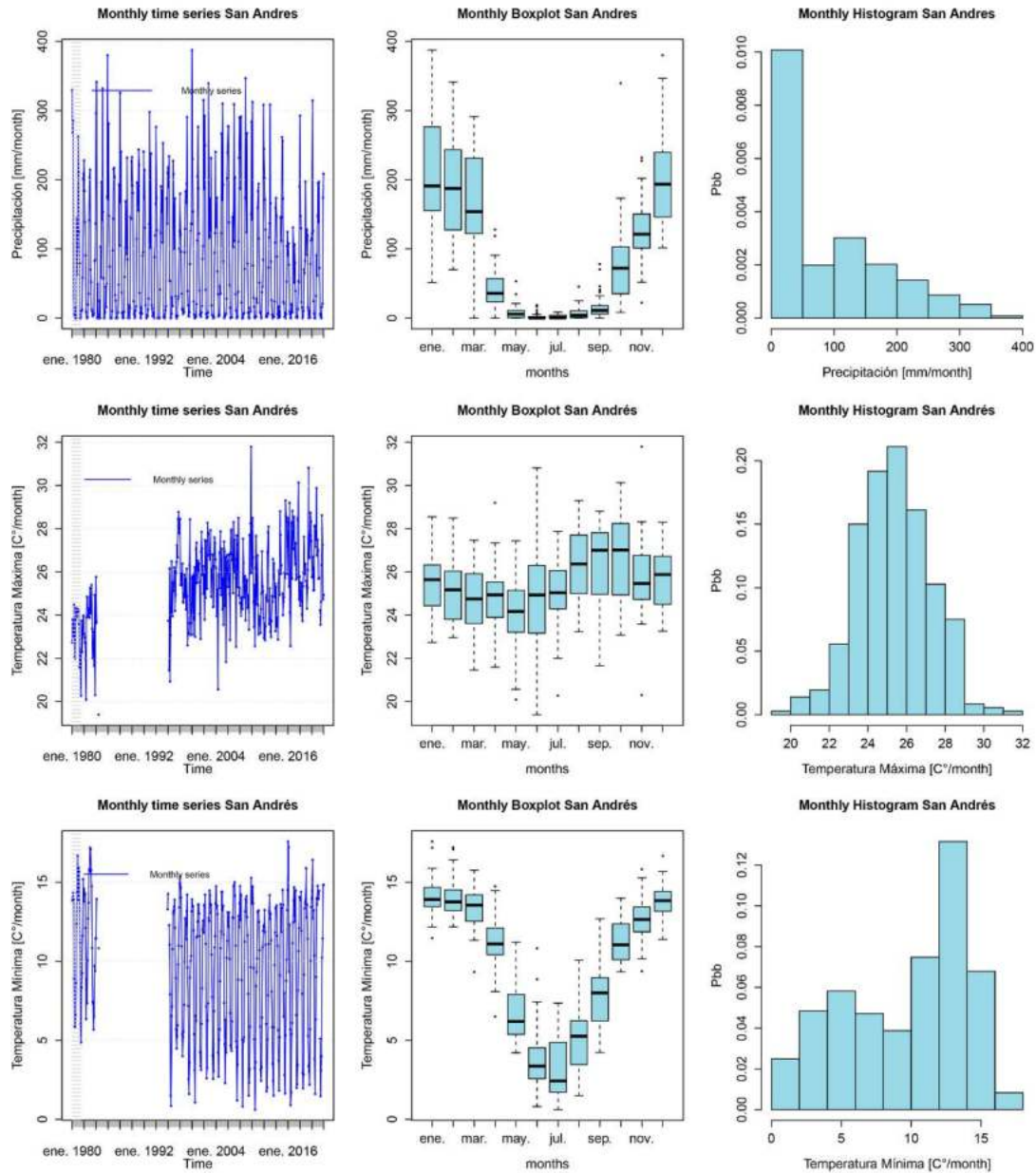


Figura 30: Series temporales estación San Andrés de a) Precipitación, b) Temperatura máxima y c) Temperatura mínima.

5.- San Jacinto Sud

a) **Monthly Boxplot San Jacinto Sud precipitación.** –En los diagramas de caja (**Figura 31 a**), para esta variable podemos ver la tendencia creciente de septiembre a abril y después, una disminución progresiva hasta septiembre.

b) **Monthly Boxplot San Jacinto Sud temperatura máxima.** –En estos diagramas de caja (**Figura 31 b**), podemos ver como la mediana de los datos de temperatura máxima están entre 27 a 29 C°.

c) **Monthly Boxplot San Jacinto Sud temperatura mínima.** –En estos diagramas de caja (**Figura 31 c**), podemos ver como la mediana de los datos de temperatura mínima están entre 3 a 15 C°.

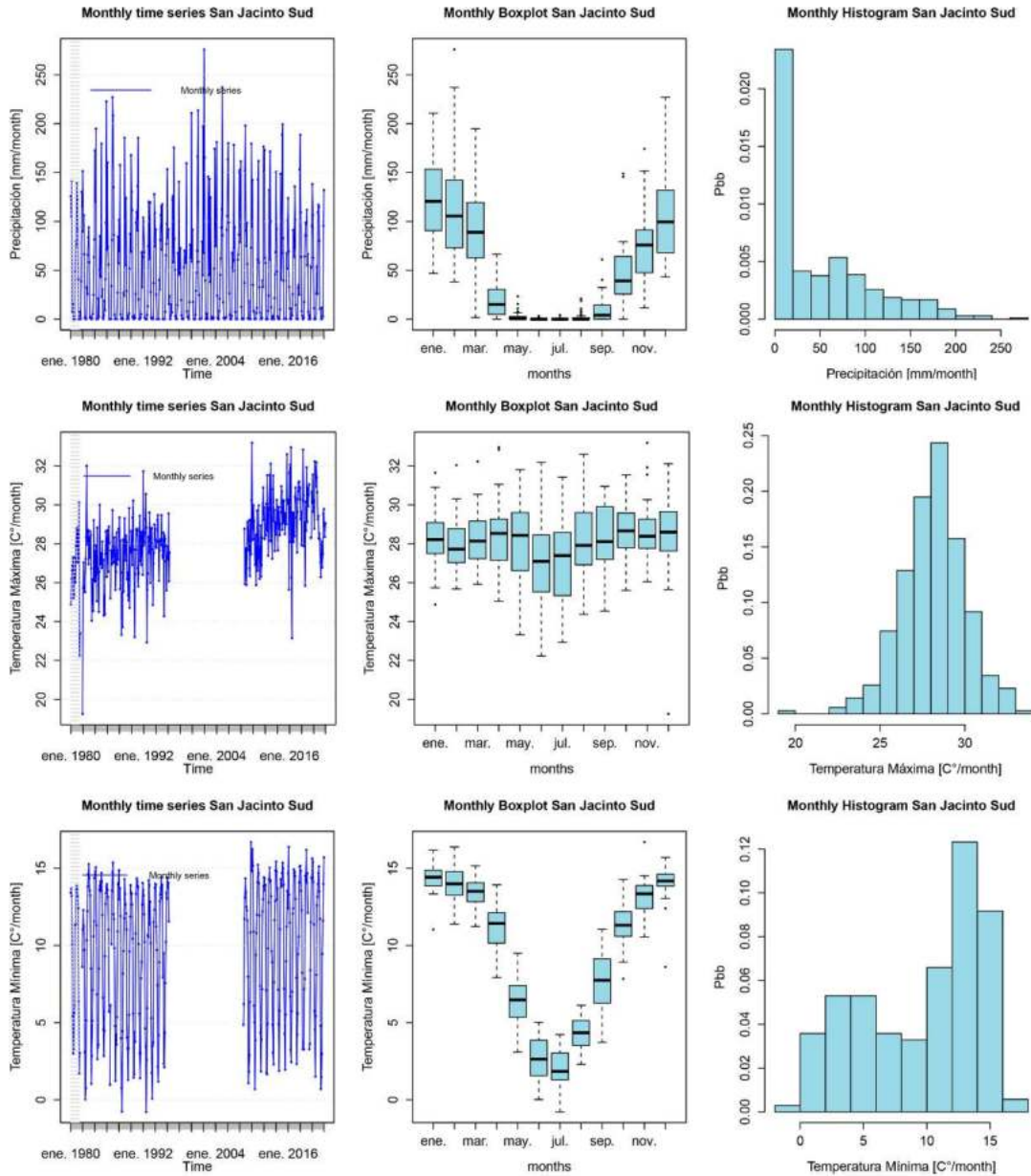


Figura 31: Series temporales estación San Jacinto Sud de a) Precipitación, b) Temperatura máxima y c) Temperatura mínima.

6.- Sella Quebrada

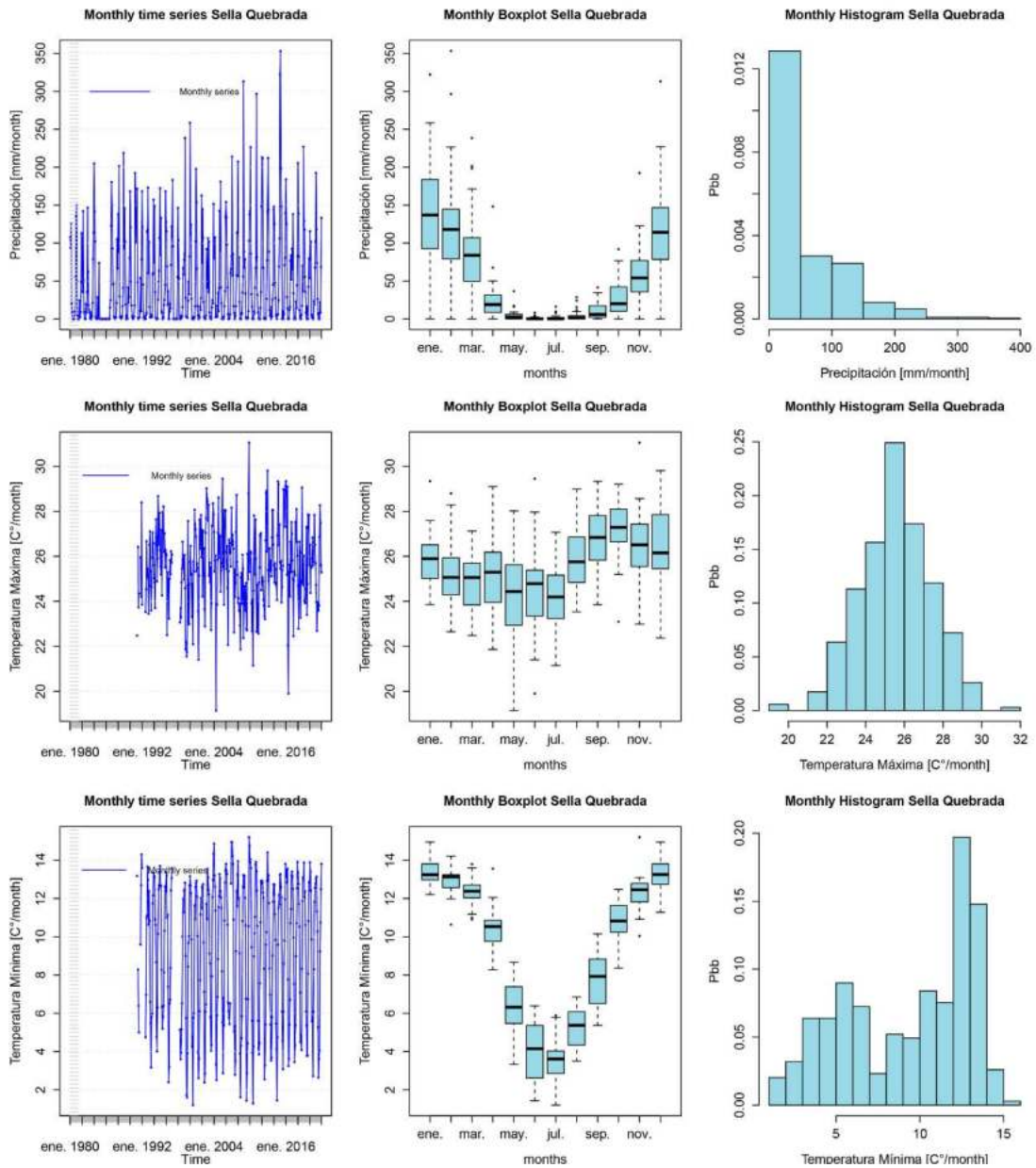


Figura 32: Series temporales estación Sella Quebrada de a) Precipitación, b) Temperatura máxima y c) Temperatura mínima.

a) **Monthly Boxplot Sella Quebrada precipitación.** –En los diagramas de caja (**Figura 32 a**), para esta variable podemos ver la tendencia creciente de septiembre a abril y después, una disminución progresiva hasta septiembre.

b) **Monthly Boxplot Sella Quebrada temperatura máxima.** –En estos diagramas de caja (**Figura 32 b**), podemos ver como la mediana de los datos de temperatura máxima están entre 24 a 28 C°.

c) **Monthly Boxplot San Jacinto Sud temperatura mínima.** –En estos diagramas de caja (**Figura 32 c**), podemos ver como la mediana de los datos de temperatura mínima están entre 3 a 14 C°.

7.- Tarija Aeropuerto

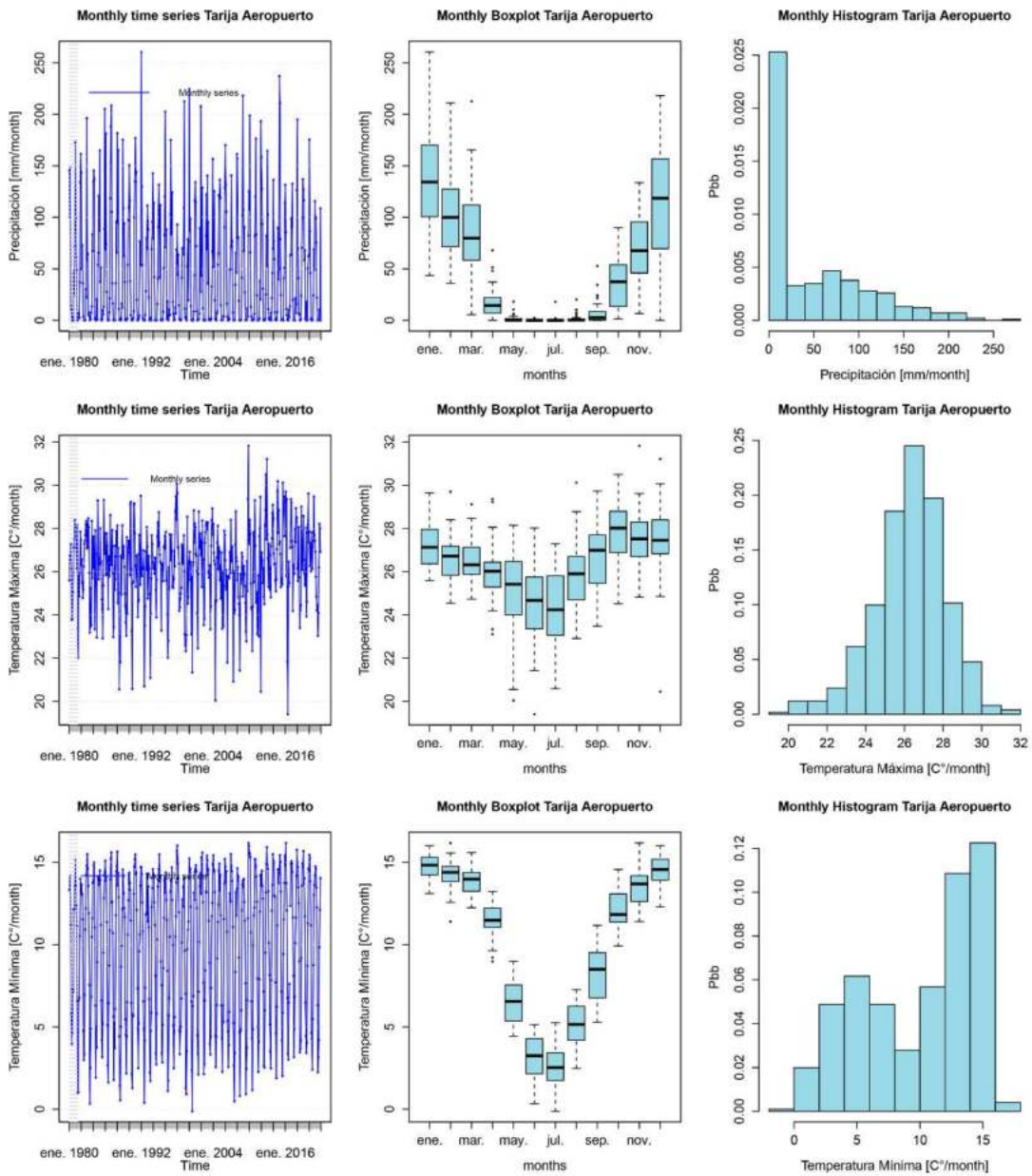


Figura 33: Series temporales estación Tarija Aeropuerto de a) Precipitación, b) Temperatura máxima y c) Temperatura mínima.

- a) **Monthly Boxplot Sella Quebrada precipitación.** –En los diagramas de caja (**Figura 33 a**), para esta variable podemos ver la tendencia creciente de septiembre a abril y después, una disminución progresiva hasta septiembre.
- b) **Monthly Boxplot Sella Quebrada temperatura máxima.** –En estos diagramas de caja (**Figura 33 b**), podemos ver como la mediana de los datos de temperatura máxima están entre 24 a 28 C°.
- c) **Monthly Boxplot San Jacinto Sud temperatura mínima.** –En estos diagramas de caja (**Figura 33 c**), podemos ver como la mediana de los datos de temperatura mínima están entre 3 a 14 C°.

8.- Tomayapo Pueblo

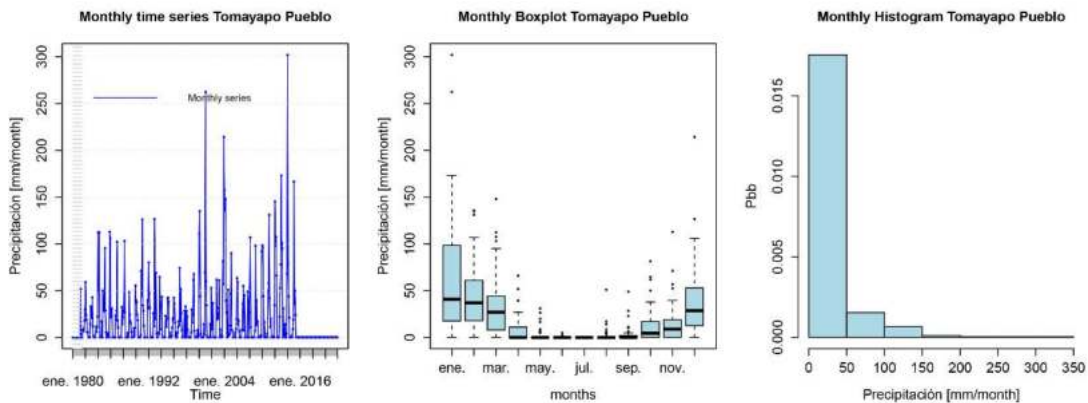


Figura 34: Series temporales estación Tomayapo Pueblo de Precipitación.

- a) **Monthly Boxplot Tomayapo Pueblo precipitación.** –En los diagramas de caja (**Figura 34**), para esta variable podemos ver la tendencia creciente de septiembre a abril y después, una disminución progresiva hasta septiembre.

9.- Trancas

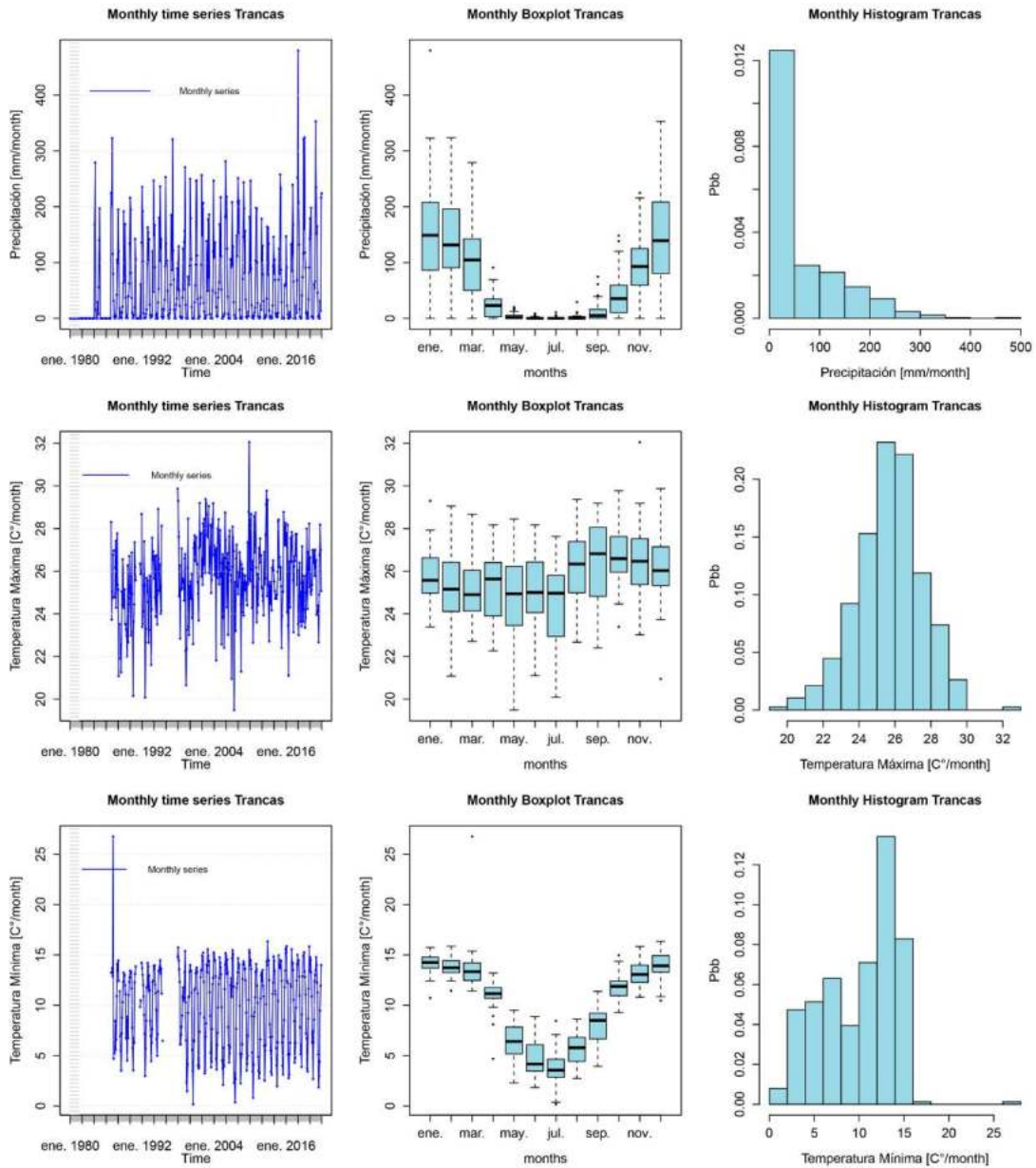


Figura 35: Series temporales estación Trancas de a) Precipitación, b) Temperatura máxima y c) Temperatura mínima.

a) **Monthly Boxplot Trancas precipitación.** –En los diagramas de caja (Figura 35 a), para esta variable podemos ver la tendencia creciente de septiembre a abril y después, una disminución progresiva hasta septiembre.

b) **Monthly Boxplot Trancas temperatura máxima.** –En estos diagramas de caja (Figura 35 b), podemos ver como la mediana de los datos de temperatura máxima están entre 24 a 27 C°.

c) **Monthly Boxplot Trancas temperatura mínima.** –En estos diagramas de caja (Figura 35 c), podemos ver como la mediana de los datos de temperatura mínima están entre 3 a 15 C°.

10.-Tucumillas

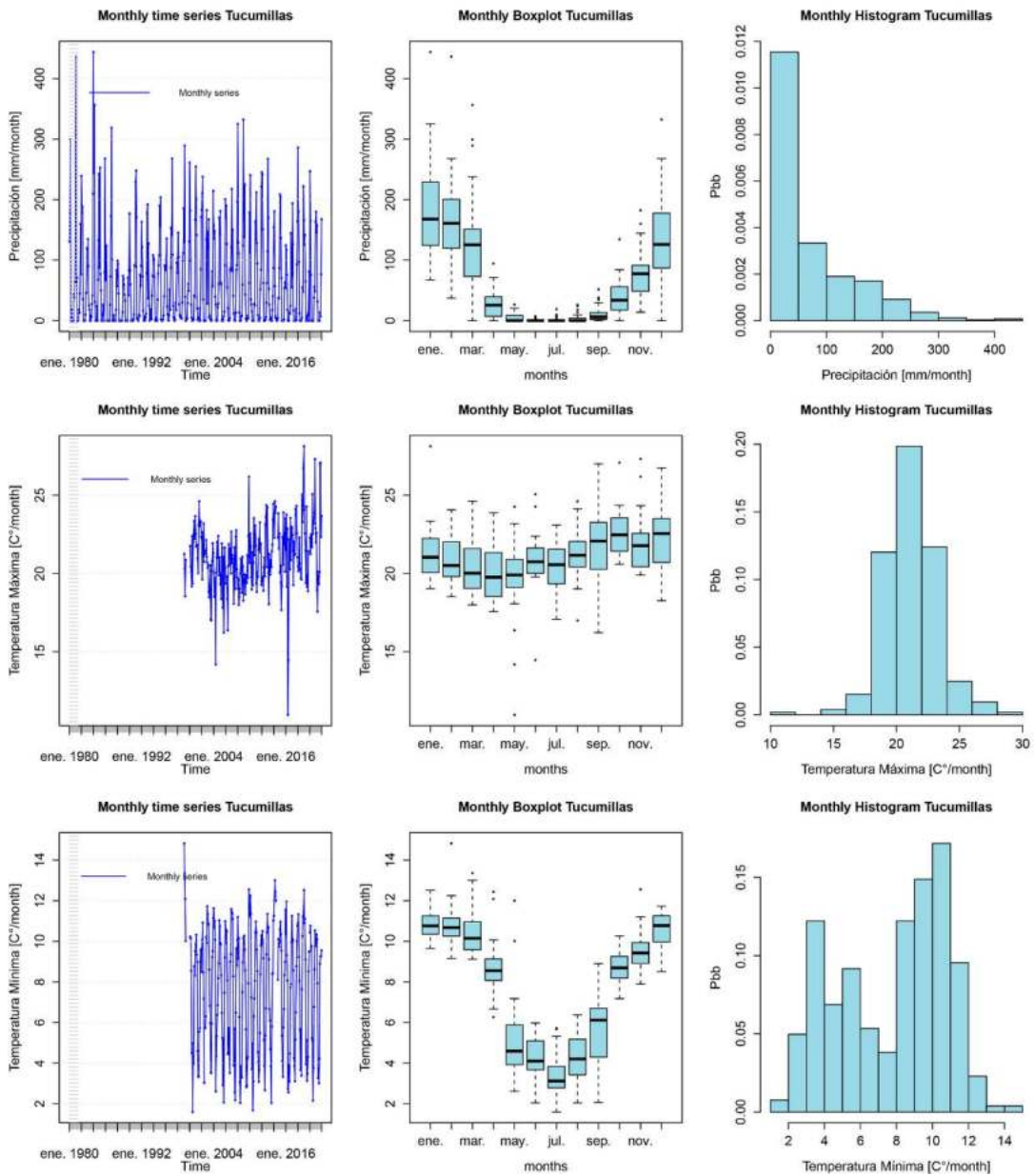


Figura 36: Series temporales estación Tucumillas de a) Precipitación, b) Temperatura máxima y c) Temperatura mínima.

- a) **Monthly Boxplot Tucumillas precipitación.** –En los diagramas de caja (**Figura 36 a**), para esta variable podemos ver la tendencia creciente de septiembre a abril y después, una disminución progresiva hasta septiembre.
- b) **Monthly Boxplot Tucumillas temperatura máxima.** –En estos diagramas de caja (**Figura 36 b**), podemos ver como la mediana de los datos de temperatura máxima están entre 20 a 24 C°.
- c) **Monthly Boxplot Tucumillas temperatura mínima.** –En estos diagramas de caja (**Figura 36 c**), podemos ver como la mediana de los datos de temperatura mínima están entre 3 a 11 C°.

11.-Yesera Norte

- a) **Monthly Boxplot Yesera Norte precipitación.** –En los diagramas de caja (**Figura 37 a**), para esta variable podemos ver la tendencia creciente de septiembre a abril y después, una disminución progresiva hasta septiembre.
- b) **Monthly Boxplot Yesera Norte temperatura máxima.** –En estos diagramas de caja (**Figura 37 b**), podemos ver como la mediana de los datos de temperatura máxima están entre 21 a 24 C°.
- c) **Monthly Boxplot Yesera Norte temperatura mínima.** –En estos diagramas de caja (**Figura 37 c**), podemos ver como la mediana de los datos de temperatura mínima están entre 3 a 14 C°.

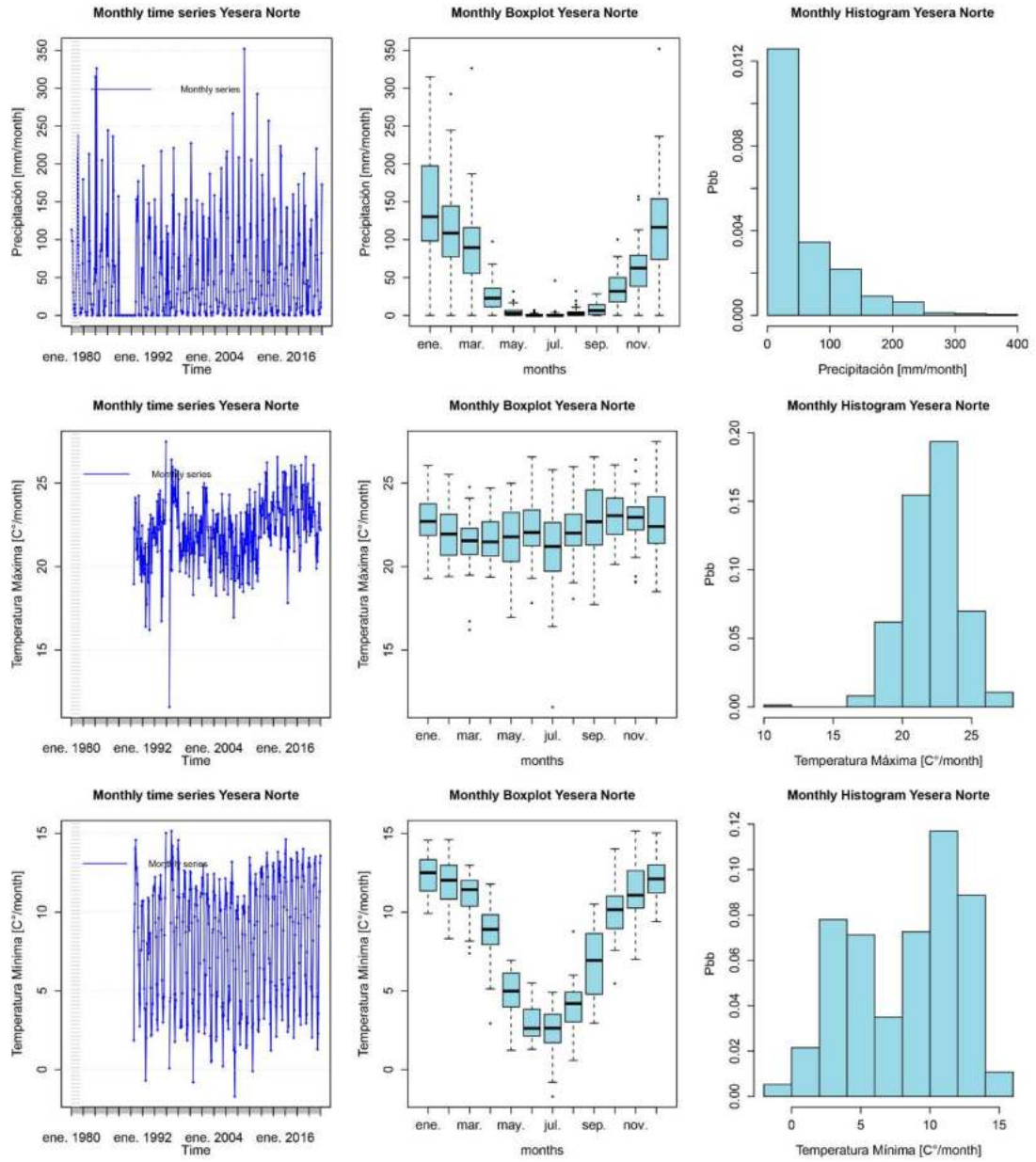


Figura 37: Series temporales estación Yesera Norte de a) Precipitación, b) Temperatura máxima y c) Temperatura mínima.

3.2.6 Relleno de series faltantes

Para el periodo 1980-2021, se utilizó las 11 estaciones abiertas (**Tabla 23**), para completar las series de datos faltantes se aplicó la herramienta Filldata que es un software desarrollado por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI), este permite la reconstrucción de lagunas en las series históricas de datos meteorológicos e hidrológicos aplicando métodos recomendados por la Organización Meteorológica Mundial, que son cuatro métodos univaridados y nueve métodos multivariados.

Tabla 23: Estaciones rellenadas.

N°	Estación	Provincia	Relleno
1	Campanario	MéndeZ	Método multivariado, razón o ratio normal
2	Coimata	MéndeZ	Método multivariado, razón o ratio normal
3	El Tejar Tarija	Cercado	Método multivariado, razón o ratio normal
4	San Andrés	Cercado	Método multivariado, razón o ratio normal
5	San Jacinto Sud	Cercado	Método multivariado, razón o ratio normal
6	Sella Quebrada	MéndeZ	Método multivariado, razón o ratio normal
7	Tarija Aeropuerto	Cercado	Método multivariado, razón o ratio normal
8	Tomayapo Pueblo	MéndeZ	Método multivariado, razón o ratio normal
9	Trancas	MéndeZ	Método multivariado, razón o ratio normal
10	Tucumillas	MéndeZ	Método multivariado, razón o ratio normal
11	Yesera Norte	Cercado	Método multivariado, razón o ratio normal

En este estudio se aplicó el método multivariado, razón o ratio normal (Paulhus y Kohler) que consiste en calcular el dato incompleto, $x(t)$, de una serie a partir de los datos de las series de estaciones vecinas y contemporáneas, que presenten un alto grado de correlación con la serie a completar.

3.2.6.1 Razón normal (NR)

Este método fue inicialmente propuesto por (Paulhus y Kohler, 1952) y modificado por (Young, 1992). Los pesos para las estaciones circundantes son estimados con la siguiente ecuación:

$$W_i = \frac{r_i^2(n_i - 2)}{1 - r_i^2} \quad (18)$$

Donde r es el coeficiente de correlación, n el número de estaciones usado para la correlación y W_i es el peso resultante. El peso de cada estación permite identificar las estaciones potenciales para aplicar el método NR. Y la ecuación de NR está definida de la siguiente manera:

$$P_x = \frac{1}{3} \left[\left(\frac{N_x}{N_1} \right) P_1 + \left(\frac{N_x}{N_2} \right) P_2 + \left(\frac{N_x}{N_3} \right) P_3 \right] \quad (19)$$

Donde P_x es la precipitación estimada para un paso de tiempo sin datos, N_x la precipitación promedio de la estación con datos faltantes, N_1, \dots, N_3 la precipitación promedio de las estaciones circundantes, y P_1, \dots, P_3 la precipitación observada en las estaciones circundantes en el mismo paso de tiempo que la estación sin datos. Las tres estaciones circundantes son seleccionados con el peso, W_i , estimado.

A continuación, se muestra los coeficientes de correlación a nivel diario determinados entre las distintas estaciones.

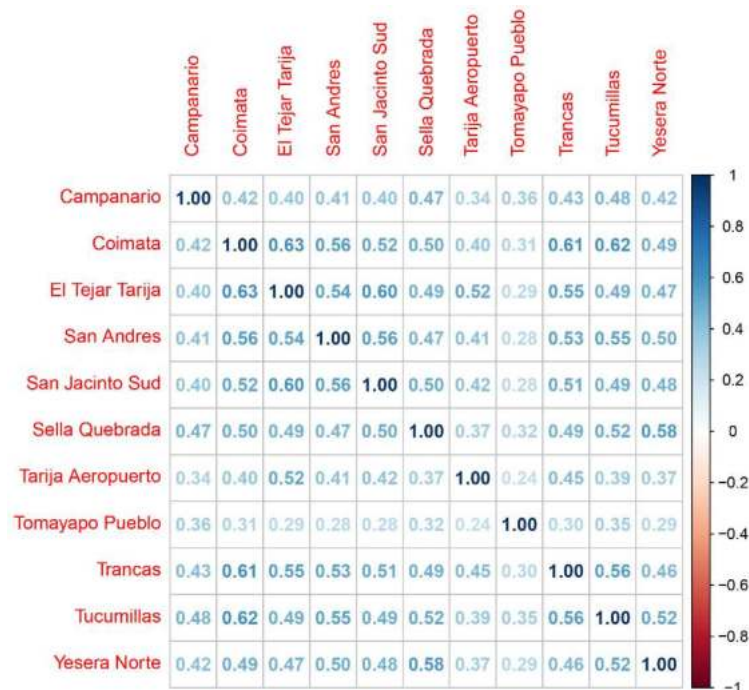


Figura 38: Matriz de correlaciones - Datos de precipitación sin la completación.

Además de esto, se les realizó a los datos de precipitación un análisis de consistencia a cada estación, por medio del método de la curva de doble masa, con el fin de observar cambios en la pendiente que pueda revelar algún tipo de error sistemático en la medición.

3.2.7 Resultado del relleno de datos faltantes

En los siguientes gráficos se presentan los resultados de la aplicación de la metodología elegida.

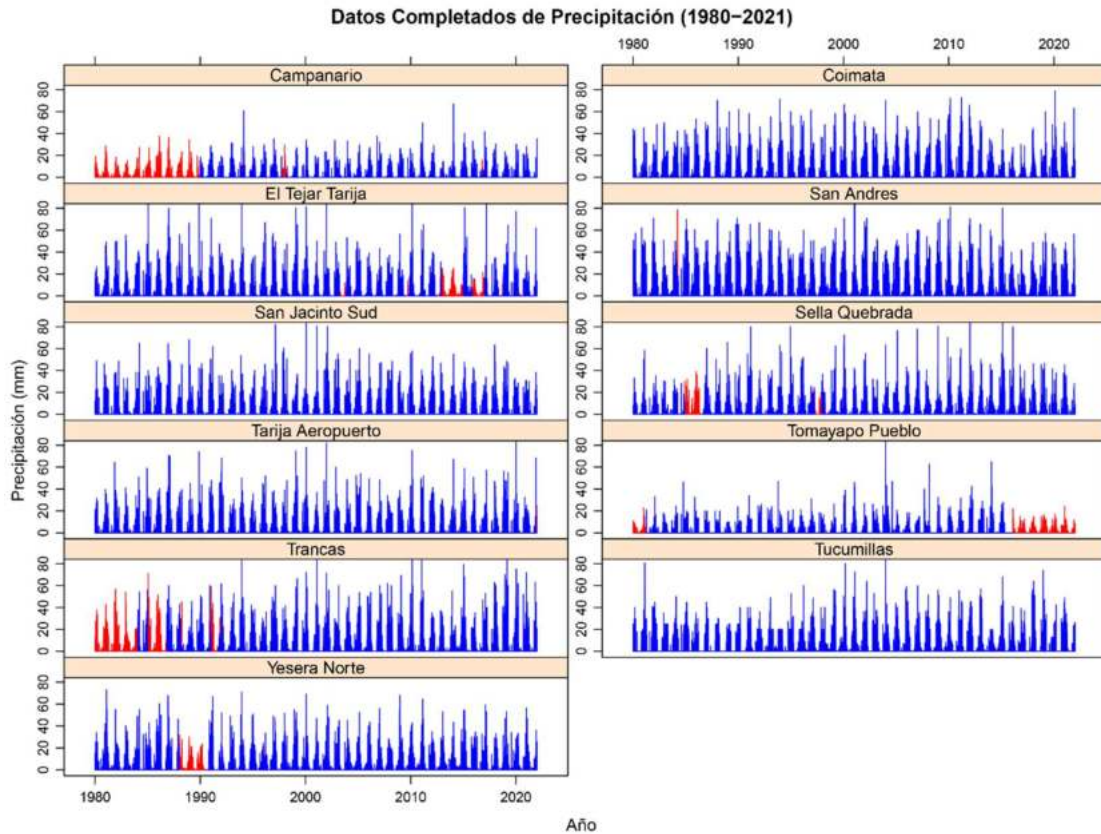


Figura 39: Series de precipitación diaria de datos completados.

Nota: En color azul datos observados y en color rojo datos rellenados.

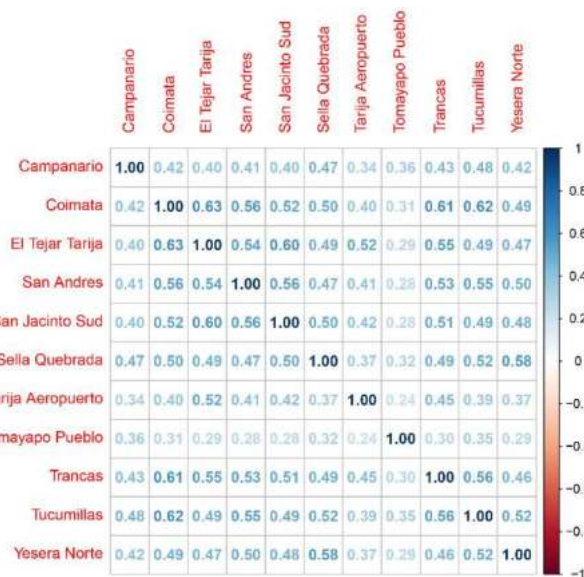


Figura 40: Matriz de correlaciones - Datos de precipitación diaria.

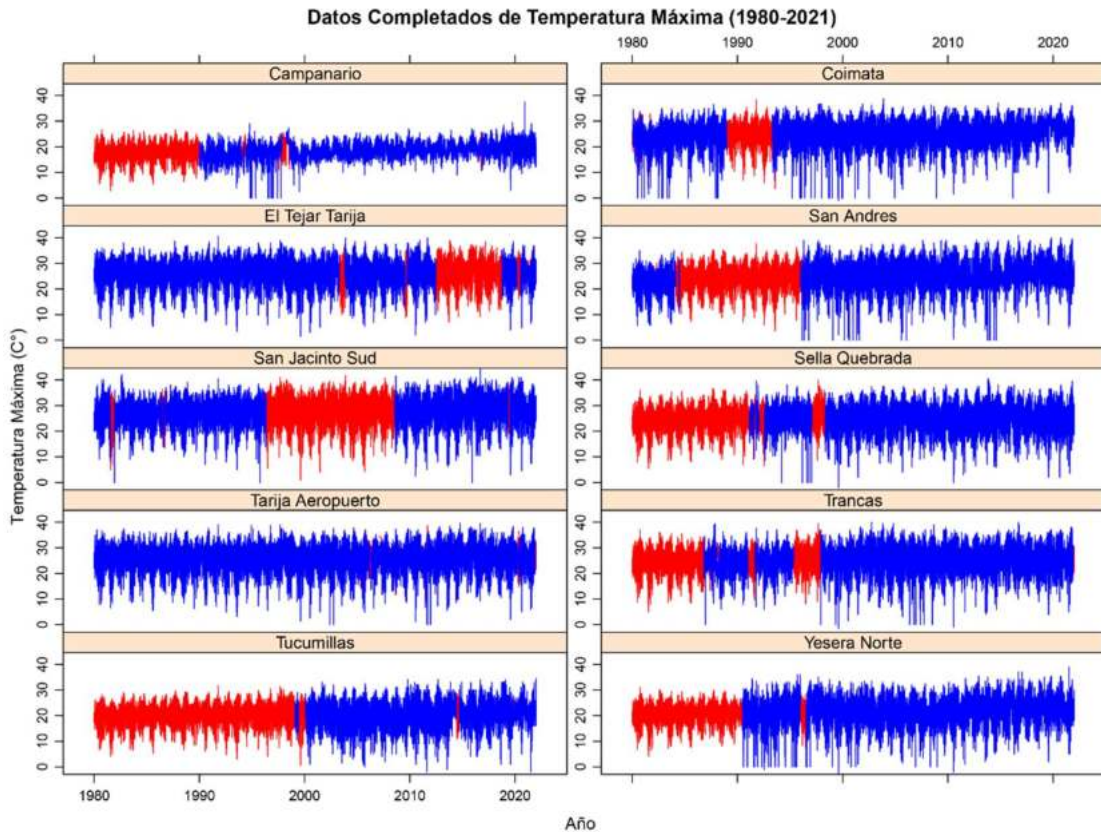


Figura 41: Series de temperatura máxima diaria de datos completados.

Nota: En color azul datos observados y en color rojo datos rellenados.

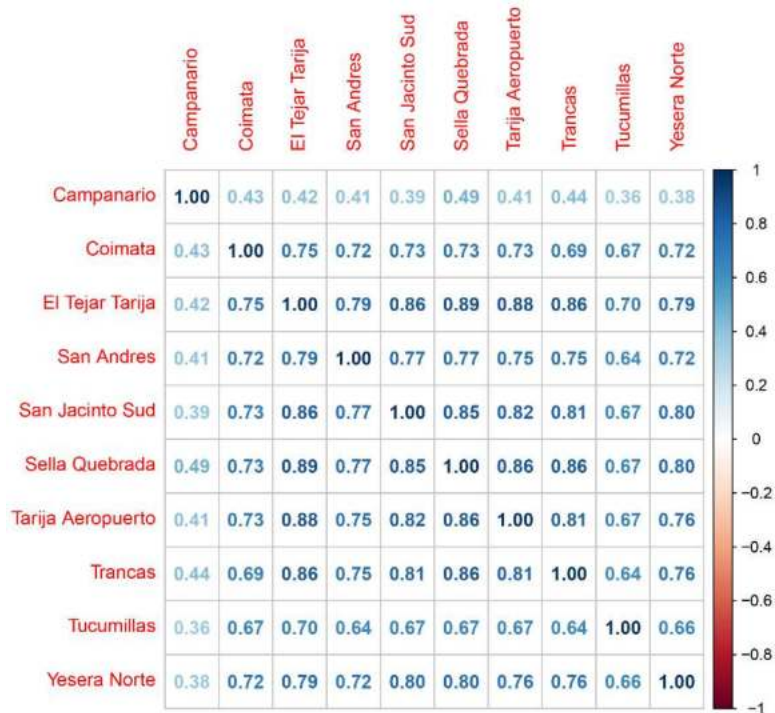


Figura 42: Matriz de correlaciones – Temperatura máxima.

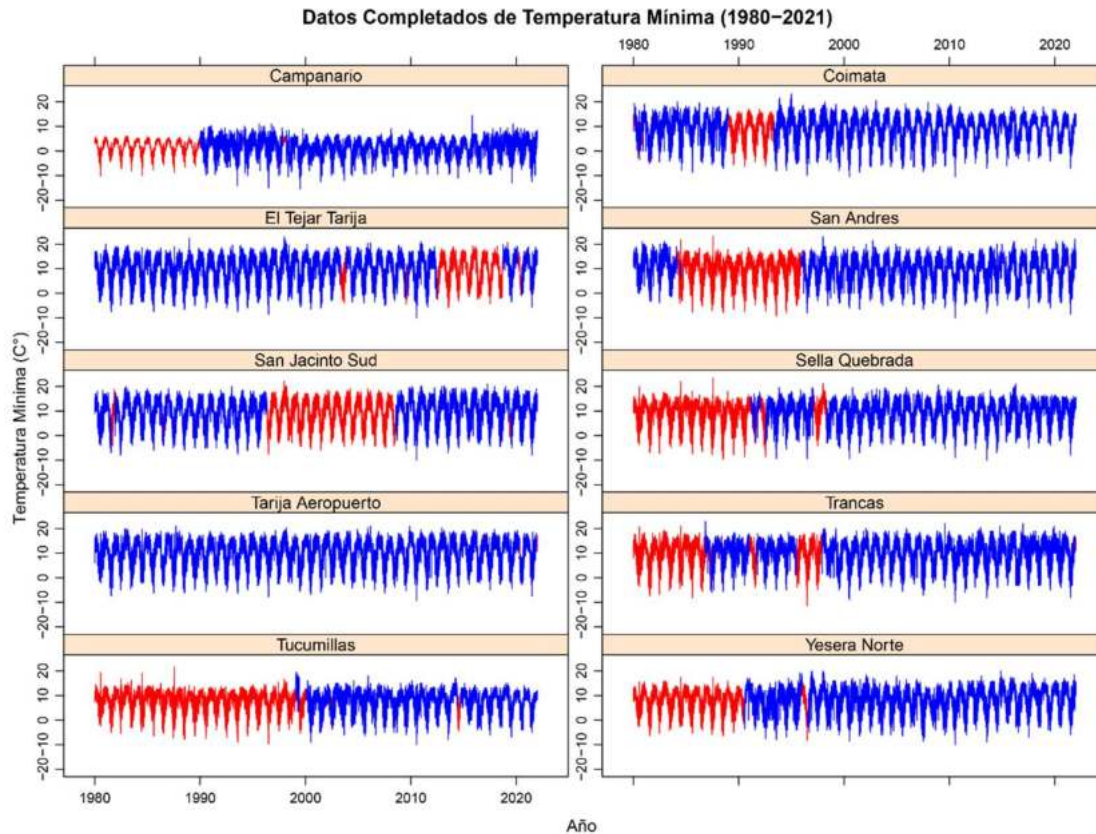


Figura 43: Series de temperatura mínima diaria de datos completados.

Nota: En color azul datos observados y en color rojo datos rellenados.



Figura 44: Matriz de correlaciones – Temperatura mínima.

3.3 Calibración y validación del modelo Hydro-BID

El software hidrológico Hydro-BID aplicado en este proyecto de grado, requiere como datos de entrada series de precipitación en centímetros, temperatura en grados Celsius y por último series de caudales en metros cúbicos por segundo, bajo una temporalidad diaria, en cuanto a datos climáticos.

La calibración del modelo se desarrolló para toda la cuenca alta del río Guadalquivir, desde aguas arriba hasta aguas abajo, para lograr llegar a la desembocadura del caudal, realizándose manualmente por ensayo y error. Se tuvo en cuenta un periodo de calibración para la estación de Obrajes, comprendido desde el 01/01/1980 hasta el 31/12/2010 y posteriormente se realizó una validación desde el 01/01/2011 hasta el 31/12/2014, dado que dicho periodo es el que registra los caudales más completos en la estación.

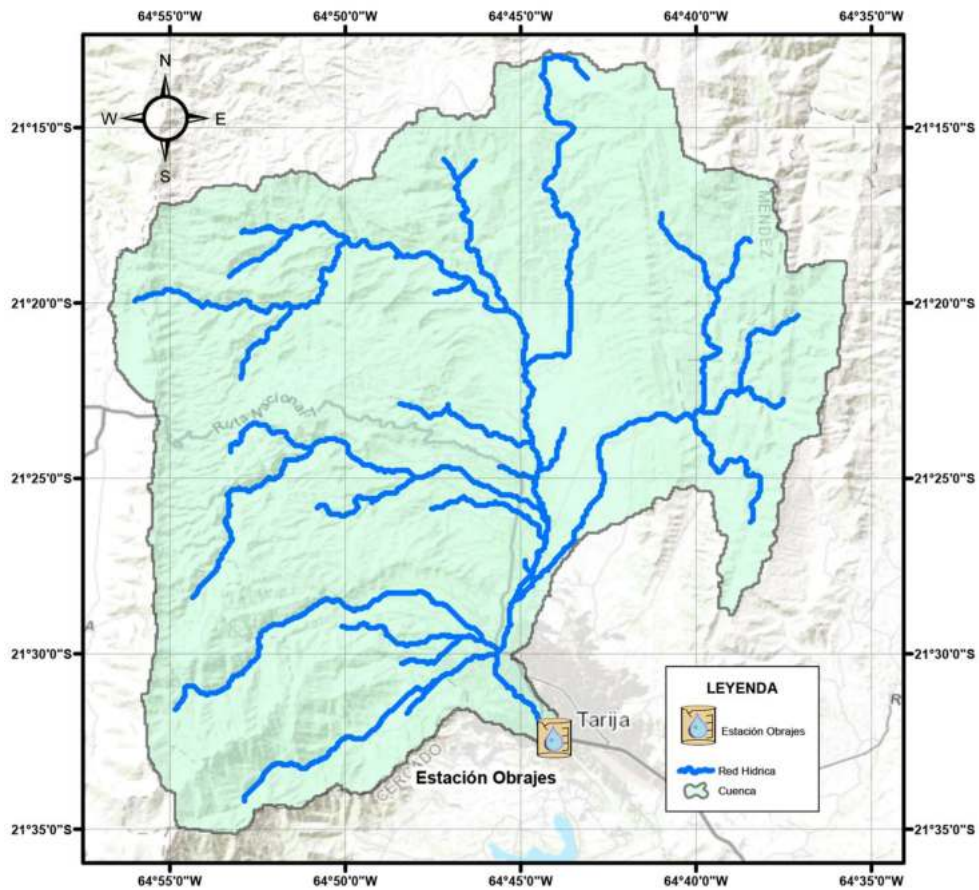


Figura 45: Estación hidrométrica de Obrajes.

3.3.1 Parámetros para realizar la calibración

- **Número de Curva (NC):** Parámetro usado para caracterizar el tipo de uso de suelo y representar la hidrología en el suelo.
- **Contenido Disponible de Agua (AWD):** AWC estima el monto de agua que se puede almacenar en el suelo para ser usado por las plantas, afectando la infiltración hacia las aguas subterráneas. Un valor es asignado para cada sub-Cuenca en la base de datos.
- **Coefficiente de Recesión (r):** Controla la tasa de flujo de agua subterránea desde el almacenamiento saturado.
- **Pérdidas (Seepage):** es el intercambio entre agua subterránea cerca de la superficie y las más profundas.

Para verificar las simulaciones de calibración se puede utilizar las variables de error, la gráfica de las series temporales y la curva de duración de flujo.

En los resultados finales, Hydro-BID integra una serie de métricas con los cuales se evalúa el proceso de calibración, estas métricas se observan en la **Tabla 24**, la idea final del proceso es encontrar un equilibrio entre las variables estadísticas y las variables hidráulicas.

Tabla 24: *Valores óptimos de las métricas.*

Métrica	Valor óptimo
Volumen del error general	Más cercano a 0
Correlación (R)	0 – 1
Correlación Modificada	0 – 1
Eficiencia de Nash-Sutcliffe	0 – 0,1 insatisfactorio
	0,2 – 0,4 es satisfactorio
	0,41 – 0,6 es bueno
	0,61 – 0,8 es muy bueno
	>0,8 es excelente

Fuente: Adaptado de “Nota Técnica Hydro-BID (pág. 52),” por Moreda et al., 2014.

Al momento de realizar la calibración de los datos actuales se realizaron más de 20 pruebas y los parámetros que se ajustaron a la cuenca se presentan en la **Tabla 25**:

Tabla 25: *Parámetros de calibración para la cuenca alta del río Guadalquivir.*

Parámetros	
Curve Number	0,7
AWC	0,5
R Coefficient	0,007
Seepage	0,007
Grow season ET	1
Dormant season ET	1

Al aplicar los parámetros en la estación aguas debajo, se obtuvieron las métricas de desempeño como se muestra en la **Tabla 26** a nivel diario y mensual.

Tabla 26: *Métricas de desempeño calibración.*

Métrica	Valor Mensual	Valor Diario
Volumen general de error	-1,35	-1,79
Correlación (R)	0,73	0,54
Correlación modificada	0,69	0,44
Eficiencia Nash-Sutcliffe	0,55	-0,19

Finalmente, Hydro-BID arrojó las curvas de duración **Figura 46** antes y después del proceso de calibración y la gráfica de caudales simulados **Figura 47** donde se observa resultados aceptables en el periodo 1980 – 2010, comparando con los datos observados, en donde se evidencia el ajuste obtenido entre los datos simulados y los datos observados.

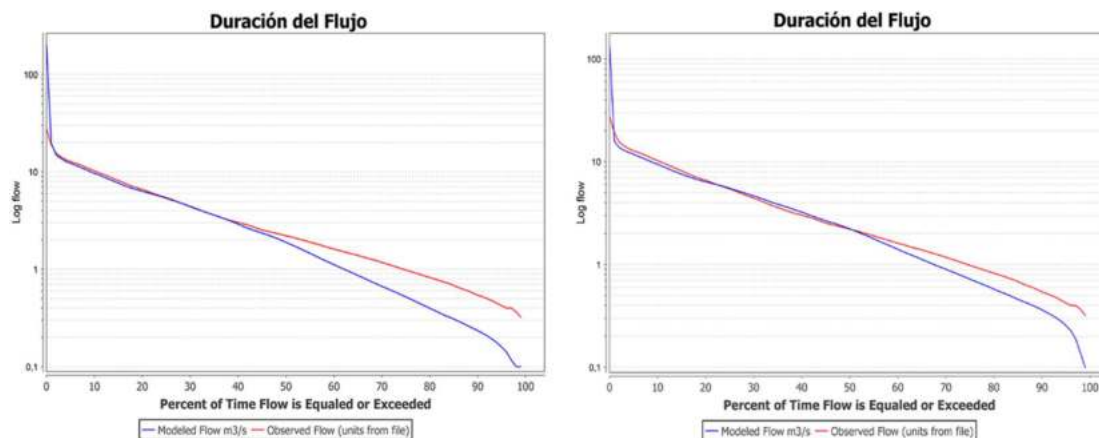


Figura 46: *Curvas de duración antes y después de calibrar la estación de Obrajes*

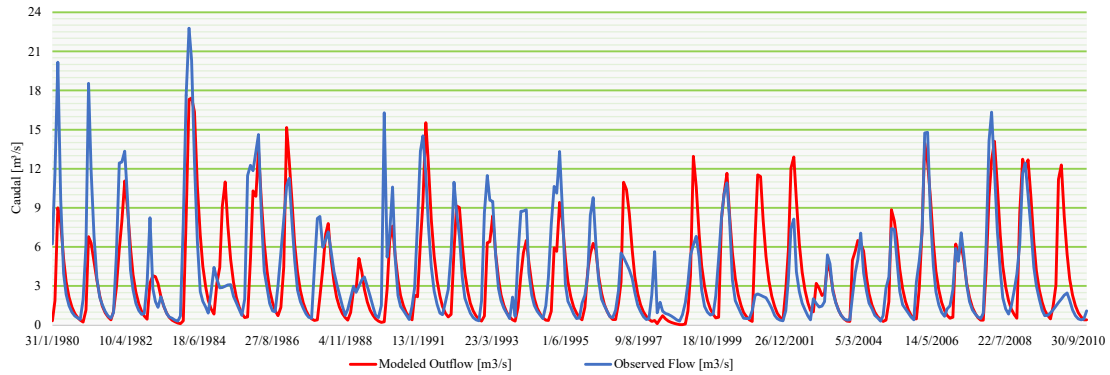


Figura 47: Hidrograma de calibración de caudales modelados vs observados [1980 - 2010].

Se realizó la curva de duración para el proceso de validación que comprende 4 años desde 2011-2014, la curva comprueba que la calibración fue llevada a cabo correctamente, obteniéndose buenos parámetros estadísticos como se observa en la **Tabla 27**.

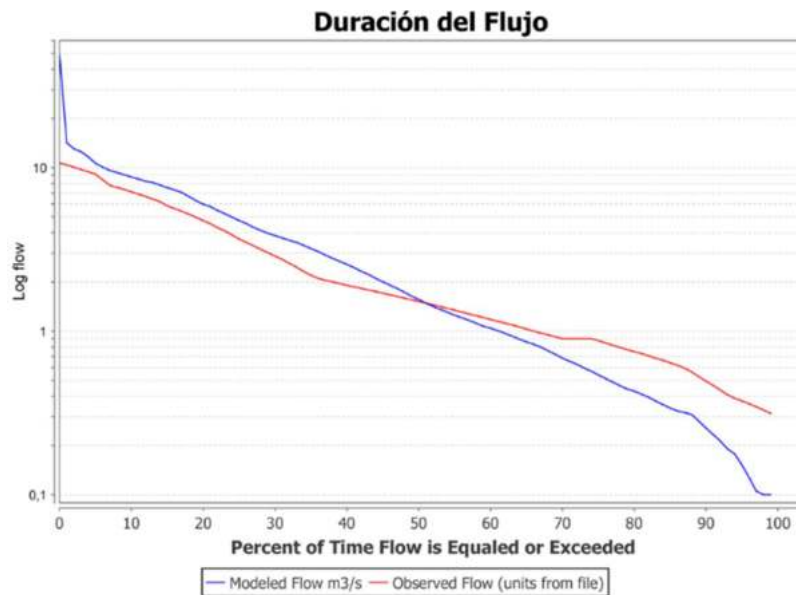


Figura 48: Curvas de duración-validación de la estación de Obrajés.

Tabla 27: Métricas de desempeño validación.

Métrica	Valor Mensual	Valor Diario
Volumen general de error	15,24	12,17
Correlación (R)	0,94	0,85
Correlación modificada	0,69	0,58
Eficiencia Nash-Sutcliffe	0,62	0,27

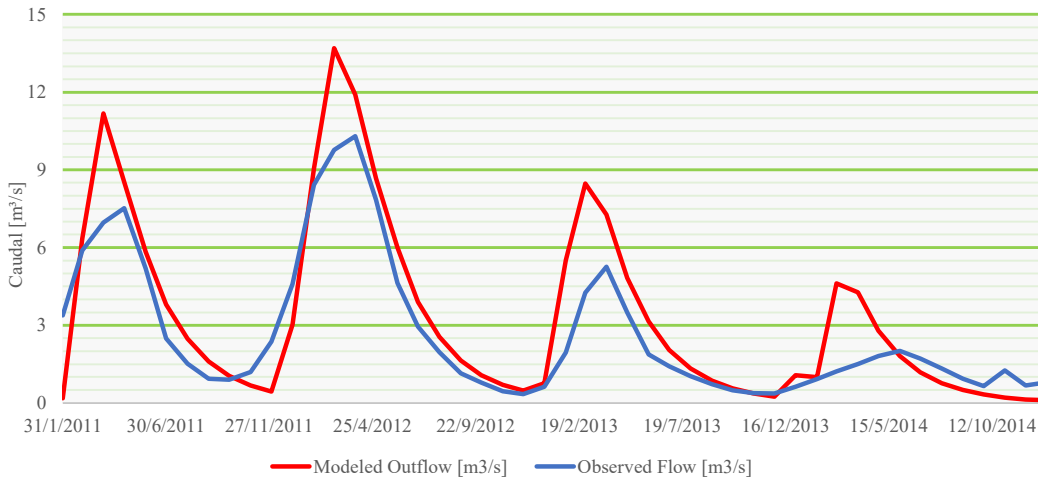


Figura 49: Hidrograma de validación de caudales modelados vs observados [2011 - 2014].

En la **Figura 49**, se puede observar el comportamiento de los caudales observados (línea roja) y los caudales modelados (color azul), esta comparación se la realiza con el fin de evidenciar la relación que tienen las variables.

3.4 Análisis de cambio climático

Las proyecciones climáticas a futuro se realizan considerando escenarios que describen evoluciones alternativas de la sociedad a futuro en ausencia de nuevas políticas sobre cambio climático más allá de las actuales. Los escenarios desarrollados en el informe del IPCC (AR6) se denominan “Trayectorias Socioeconómicas Compartidas”, SSP (Shared Socioeconomic Pathways). Estos SSP ahora se están utilizando como insumos importantes para los modelos climáticos más recientes.

Los casos que se consideraran en este trabajo son SSP-126 por simbolizar el mejor caso de vías de forzamiento futuras y SSP-585 por protagonizar el caso más extremo con emisiones considerables.

- El SSP-126 indica un escenario SSP1 con forzante radiativo de 2.6 W/m^2 en el tope de la atmósfera para fin de siglo XXI. Simboliza el mejor caso de vías de forzamiento futuras y es análogo al RCP2.6 usado en el IPCC AR5.

- El SSP-585 indica un escenario SSP5 con forzante radiativo de 8.5 W/m² en el tope de la atmósfera para fin de siglo XXI. Es el caso extremo de mayor uso de combustibles fósiles considerado y es análogo al RCP8.5 usado en el IPCC AR5.

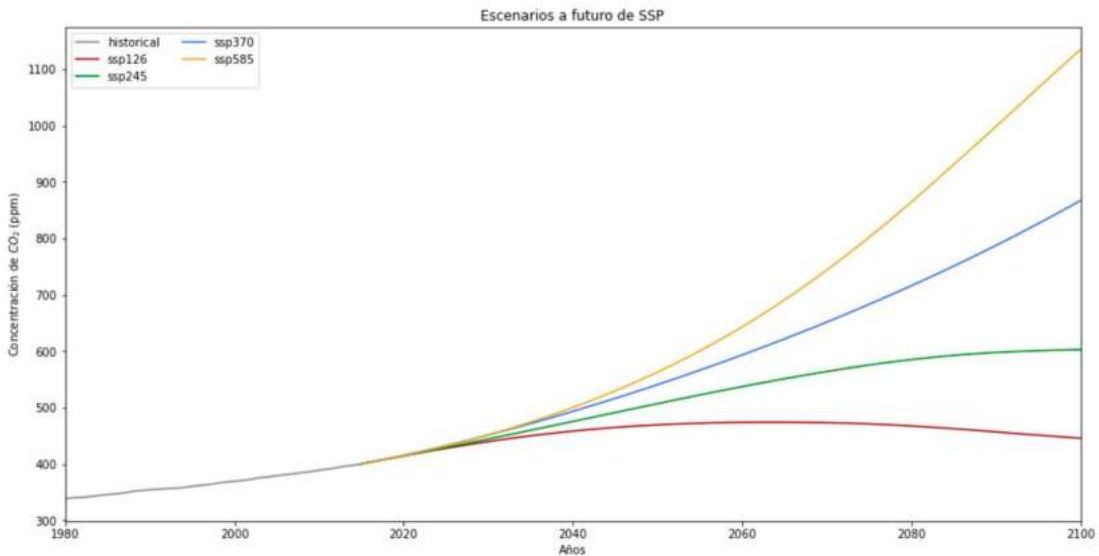


Figura 50: Representación de los escenarios a futuro de las concentraciones de CO₂

Fuente: Tomada de “Vías Socioeconómicas Compartidas [Fotografía],” CarbonBrief, 2022, www.carbonbrief.org

3.4.1 Selección del modelo de circulación global

Posteriormente, se desarrolló la selección del modelo de circulación global (GCM) para obtener la proyección de las variables climáticas, precipitación y temperatura a futuro, inicialmente se preseleccionó el modelo propuesto por el MMAyA para un periodo de 2020-2050. La descripción del procedimiento para desarrollar estos escenarios, es explicado en el documento “anexo Metadocumento” del BH nacional a partir de la pág. 251.

Como resultado de todo el análisis que realizaron en el BH nacional, obtuvo el modelo de cambio climático:

- MPI-ESM-MR para un escenario seco.

Este modelo, tanto para precipitación como temperatura, fueron utilizados para el presente estudio.

Los casos que se consideraran en este trabajo (**Figura 51**) son: SSP-126 por simbolizar el mejor caso de vías de forzamiento futuras y SSP-585 por protagonizar el caso más extremo con emisiones considerables.

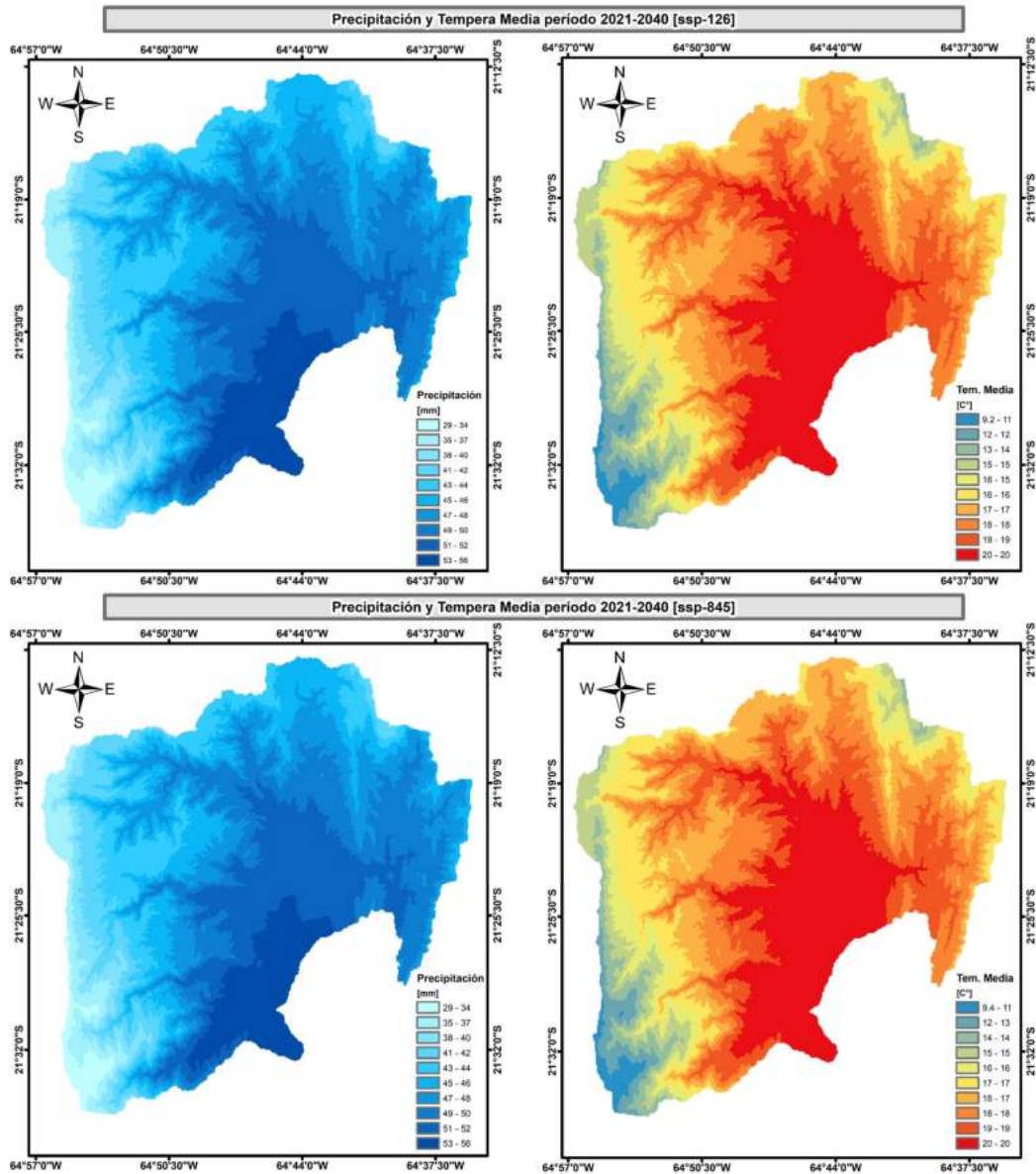


Figura 51: Escenarios climáticos para la cuenca alta del río Guadalquivir [2021-2040].

3.4.2 Reducción de escala basándose en información del WorldClim v2.1

WorldClim es un conjunto de capas climáticas globales (rejillas climáticas) con una resolución espacial de aproximadamente 1 kilómetro cuadrado. Los datos pueden ser utilizados para el mapeo y modelado espacial en un SIG o con otros programas de ordenador.

La reducción de escala y la calibración (corrección de sesgo) se realizaron con WorldClim v2.1 como clima de referencia.

Los datos disponibles en esta plataforma se produjeron con un método simple y rápido, y, por lo tanto, se pueden aplicar fácilmente a todo el mundo y a muchos modelos. Comienza con el cambio proyectado en una variable meteorológica (es decir, la temperatura mínima en junio). Esto se calcula como la diferencia (absoluta o relativa) entre el resultado de la ejecución de GCM para los años de referencia (normalmente 1960-1990 para estudios climáticos futuros y para estudios climáticos pasados) y para los años objetivo (por ejemplo, 2020-2040). Estos cambios se interpolan en una cuadrícula con una resolución alta (~ 1 km). La suposición hecha es que el cambio en el clima es relativamente estable en el espacio (alta autocorrelación espacial). (WorldClim, 2022)



Mapas de anomalías climáticas de la CMIP6. La temperatura está en °C. La precipitación es relativa a la precipitación histórica.

Modelo SSP Variable Tiempo Agregar

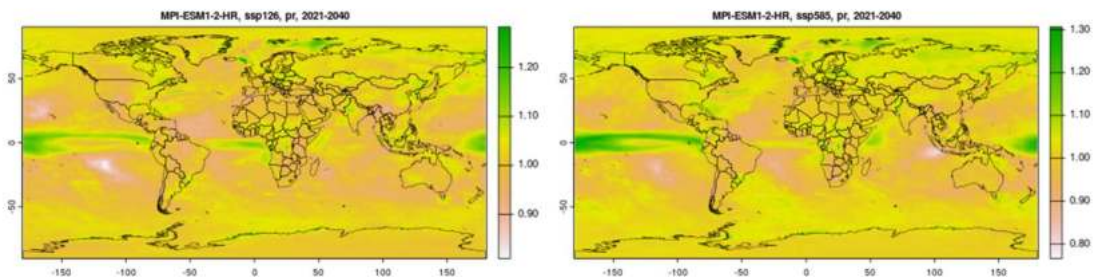


Figura 52: Plataforma para descargar los modelos de circulación global (GCM).

Fuente: Tomada de “Mapas de anomalías climáticas de la CMIP6 [Fotografía],” Mapas, gráficos, tablas y datos del clima global, 2022, www.worldclim.org

3.4.2.1 Obtención de factores de incremento y disminución mensual de precipitación/temperatura

En la **Figura 53** se muestra las precipitaciones medias mensuales, donde se aprecia que los dos escenarios climáticos tienen un comportamiento distinto a la serie observada.

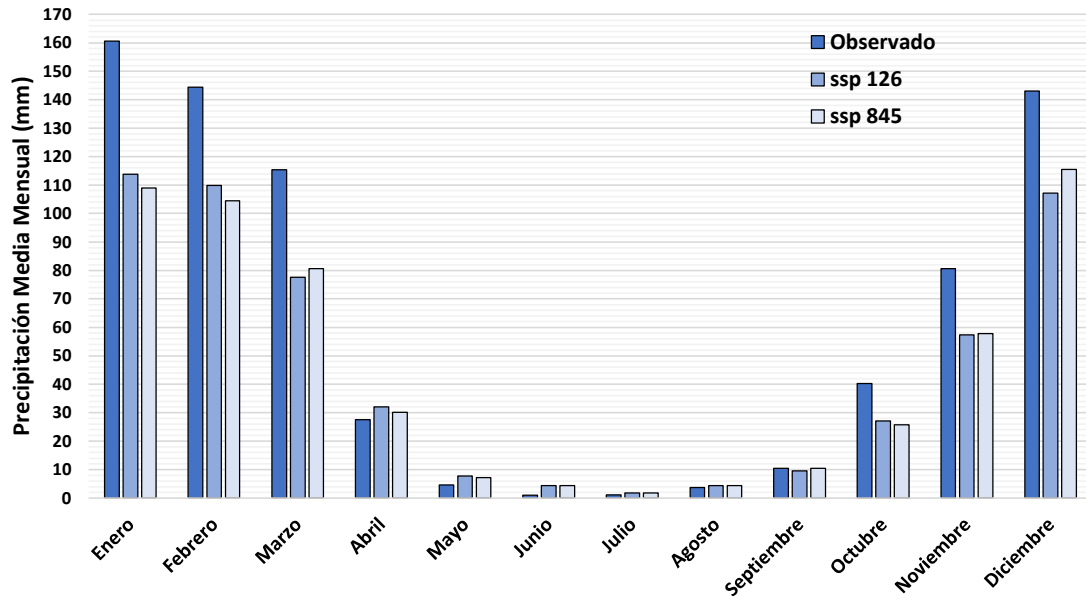


Figura 53: Precipitación media mensual de los escenarios climáticos y de los datos observados.

En la **Figura 54** se muestra las temperaturas medias mensuales, donde se aprecia que los dos escenarios climáticos tienen un comportamiento similar la serie observada.

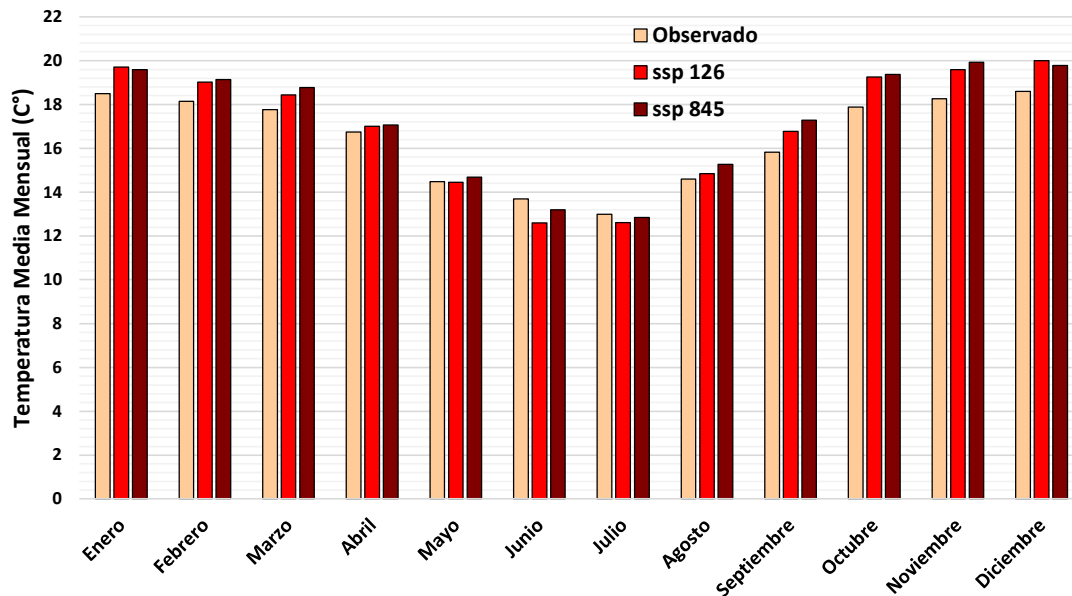


Figura 54: Temperatura media mensual de los escenarios climáticos y de los datos observados.

En la **Tabla 28** se puede observar el incremento/disminución de los escenarios climáticos en precipitación y temperatura media, para posteriormente introducirlos a

Hydro-BID, ya que el sistema puede perturbar el clima mediante el uso de los factores mensuales específicos.

Tabla 28: *Desviaciones mensuales*

Mes	ssp 126		ssp 845	
	Precipitación (%)	Temperatura +/-	Precipitación (%)	Temperatura +/-
Enero	0,53	1,00	0,49	0,89
Febrero	0,61	0,61	0,56	0,72
Marzo	0,62	0,48	0,65	0,82
Abril	1,04	0,25	1,02	0,31
Mayo	1,02	0,20	1,01	0,43
Junio	1,03	1,01	1,03	0,40
Julio	1,01	0,58	1,01	0,34
Agosto	1,02	0,09	1,02	0,52
Septiembre	0,98	0,72	0,99	1,23
Octubre	0,85	1,23	0,84	1,34
Noviembre	0,82	1,21	0,82	1,54
Diciembre	0,65	1,22	0,73	1,00

3.4.3 Modelación de caudales futuros a partir de escenarios de cambio climático

La modelación de los escenarios de cambio climático se realizó implementando factores de incremento o disminución mensual, el incremento de temperatura (Celsius) y el cambio de precipitación (%).

Después de obtener las desviaciones mensuales climatológicas (precipitación y temperatura media) a partir del GCM y la reducción de escala, se procedió a realizar de nuevo la simulación de la misma serie temporal, donde se obtuvieron las series de caudales para las condiciones futuras (2021 – 2040) en temporalidad mensual y modificada con los cambios implementados que representa la escorrentía generada a lo largo de la cuenca.

Los parámetros del modelo utilizados fueron los obtenidos en la calibración de la cuenca, es decir la correspondiente al identificador COMID. Como resultado de la modelación se obtienen series de caudales en temporalidad mensual, además de una

curva de duración que evidencia el ajuste del modelo entre los datos observados y simulados.

Adicionalmente, se obtuvieron los porcentajes de variación de caudal de cada uno de los escenarios respecto a las condiciones actuales, dando como resultado que se presentará una posible disminución en el caudal entre el 34,28% y 37,18% para los diferentes escenarios climáticos como se observa en la **Tabla 29**.

Tabla 29: Porcentaje de variación de caudales futuros.

Escenario	Periodo	Caudal (m ³ /s)	Porcentaje de variación (%)
Actual		3,79	
ssp 126	2021-2040	2,49	-34,28
ssp 845	2021-2040	2,38	-37,18

Del mismo modo, en la **Figura 55** se evidencia el comportamiento de los caudales mensuales desde 2021 a 2040, presentando que el escenario ssp 845 es el periodo más crítico en cuanto a la oferta hídrica.

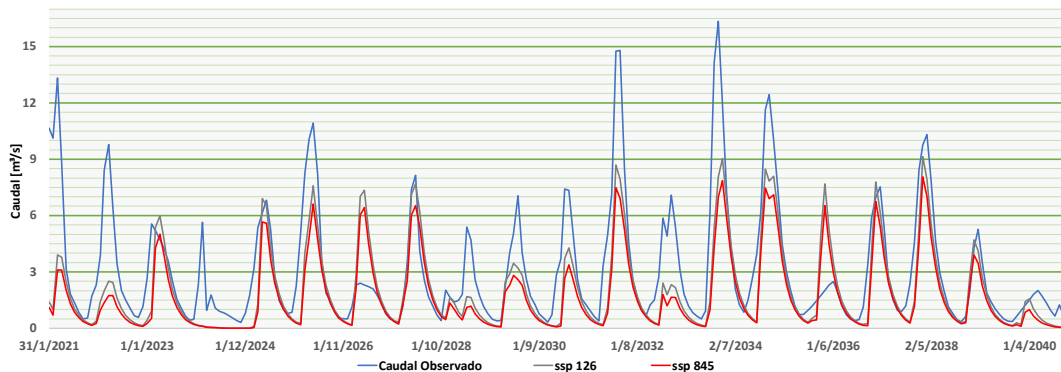


Figura 55: Caudales proyectados.

La gráfica de curva de duración de caudales ayuda a tener una buena imagen del posible cambio del comportamiento de la cuenca debido a los efectos del cambio climático.

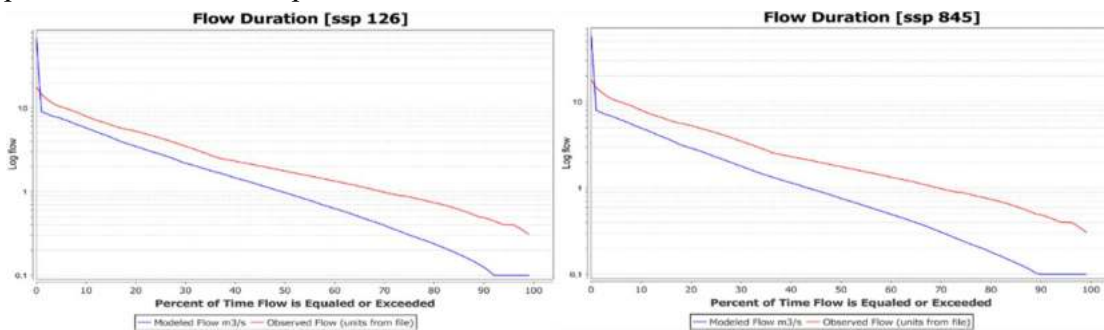


Figura 56: Curvas de duración de caudales proyectados.

3.5 Realización de indicadores de sequía hidrológica

Se realizaron los índices de severidad de sequía hidrológica a partir de los caudales arrojados por Hydro-BID desde 2021 a 2040, para definir con precisión el índice de severidad más representativo para la cuenca alta del río Guadalquivir.

Se presentan los resultados del índice estandarizado de caudal (SQI) que se adaptó de la metodología SPI – índice estandarizado de precipitación – pero con la variable caudal, ya que el SPI hace referencia al índice de precipitación estandarizado el cual fue desarrollado por McKee, Doesken y Kleist (1993), y tiene como propósito determinar un indicador para clasificar el estado de sequía de un lugar en específico, con el fin de monitorear y analizar las zonas donde el uso del recurso hídrico es relevante. Para determinar este indicador solo es necesaria la variable precipitación. Sin embargo, esta metodología se puede aplicar de forma similar con otras variables hidrológicas como: caudales, capas de nieve, aguas subterráneas, entre otras. (McKee et al., 1993, pág. 2)

El estado de sequía se define a través de una estandarización de la precipitación, esta corresponde a la diferencia de precipitación a partir de la media para un determinado periodo de tiempo, dividido por la desviación estándar. La media y desviación estándar se determinan a partir de registros de precipitación. Una desventaja del método es que, por lo general, la precipitación no presenta una distribución normal, lo que se soluciona a través de una transformación sobre la distribución que mejor responda a la variable.

El procedimiento de cálculo del SPI es el siguiente, se dispone de una serie de precipitaciones mensuales para m meses, se recomienda el uso de al menos 30 años de registros continuos. Luego se prepara una serie de datos correspondiente a un periodo de i meses, donde i pueden ser series de 1, 3, 6, 12, 24 o 48 meses. Con esta nueva serie se lleva a cabo un análisis estadístico y se establece la relación con la función de distribución que mejor ajusta a los datos, esto según un test de Chi-cuadrado. Una vez establecido el ajuste, se determina la probabilidad de las precipitaciones observadas en la serie de i meses.

Finalmente, cada probabilidad es utilizada para calcular la inversa de una función normal estándar, con media nula y una desviación estándar correspondiente a la unidad. Con esto se logra pasar de una función de distribución cualquiera a una distribución normal. El valor obtenido en el paso anterior corresponde al SPI para dicha precipitación en particular. El SPI al estar basado en una distribución normal estandarizada, puede utilizarse para determinar tanto estados de humedad como de sequía. (Mckee et al., 1993, pág. 4)

Dichos pasos pueden resumirse y ser calculados por un software o en código R que permite introducir valores de caudales y no solo precipitación, lo que conlleva al uso del índice estandarizado de caudal (SQI), el cual se usó para determinar la severidad de sequía hidrológica de la cuenca.

Para la realización de indicadores de sequía hidrológica, utilizamos el paquete SPEI (Calculation of the Standardised Precipitation-Evapotranspiration Index) disponible en R:

- **SPEI** desarrollado para un conjunto de funciones para calcular la evapotranspiración potencial y varios índices de sequía ampliamente utilizados, incluido el Índice estandarizado de precipitación-evapotranspiración (SPEI). Utilizamos la versión 1.7 (2017-06-07)

Siguiendo con lo anterior, se realizaron dos gráficas, que representará los años del 2021 al 2040, la severidad y duración de la sequía.

Dichas gráficas se realizaron por cada escenario climático manejado en este trabajo de grado, es decir, (ssp-126 y ssp-845) **Figura 57** para el completo análisis y comparación, de esta manera se verá el comportamiento de la sequía desde distintos puntos de estudio.

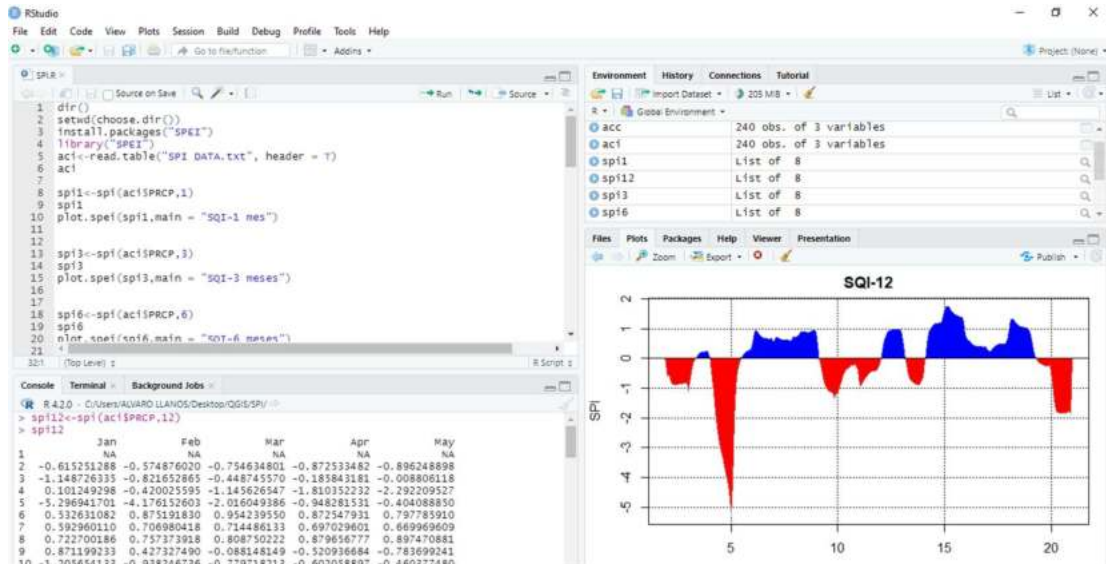


Figura 58: Script de código R del paquete SPEI.

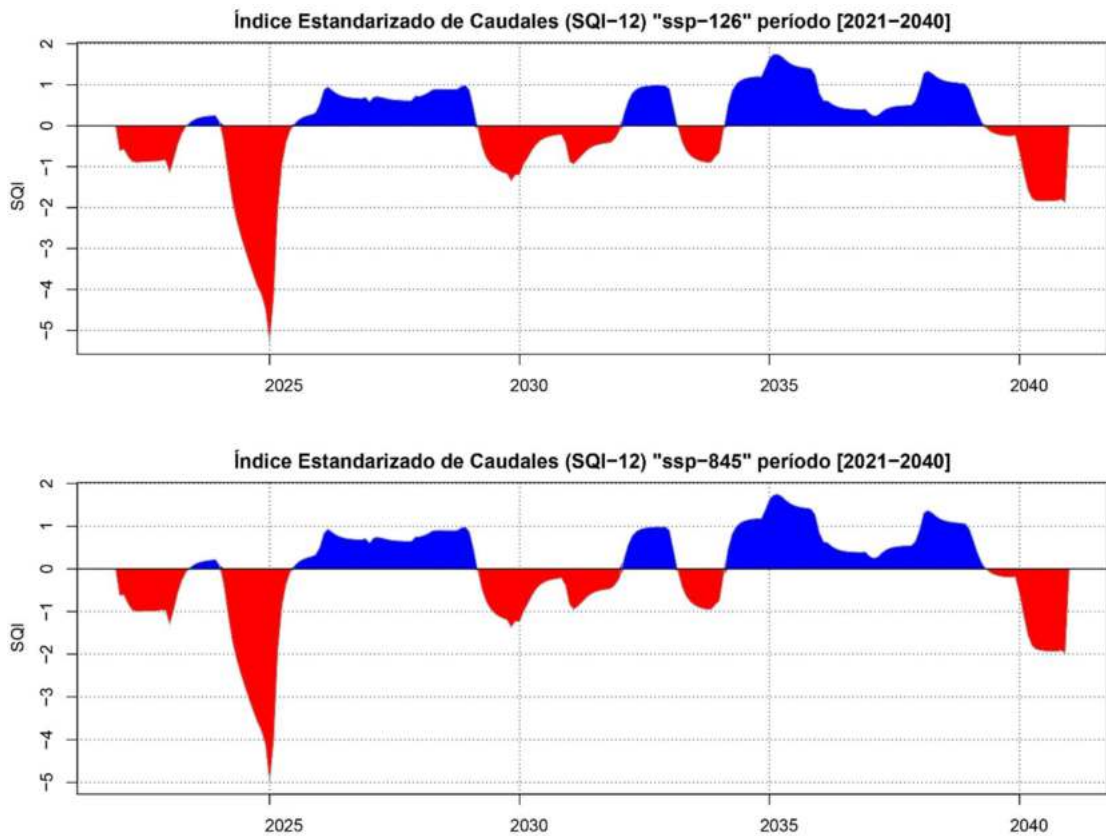


Figura 57: Índices normalizados de caudales (SQL) en la escala temporal anual (12 meses).

ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1 Fase 1

4.1.1 Llenado de datos y consistencia de datos

4.1.1.1 Análisis de resultados de la estimación de datos faltantes de precipitación

Se realiza un análisis gráfico de manera rápida del comportamiento de los datos rellenados frente a los datos observados a escala diaria.

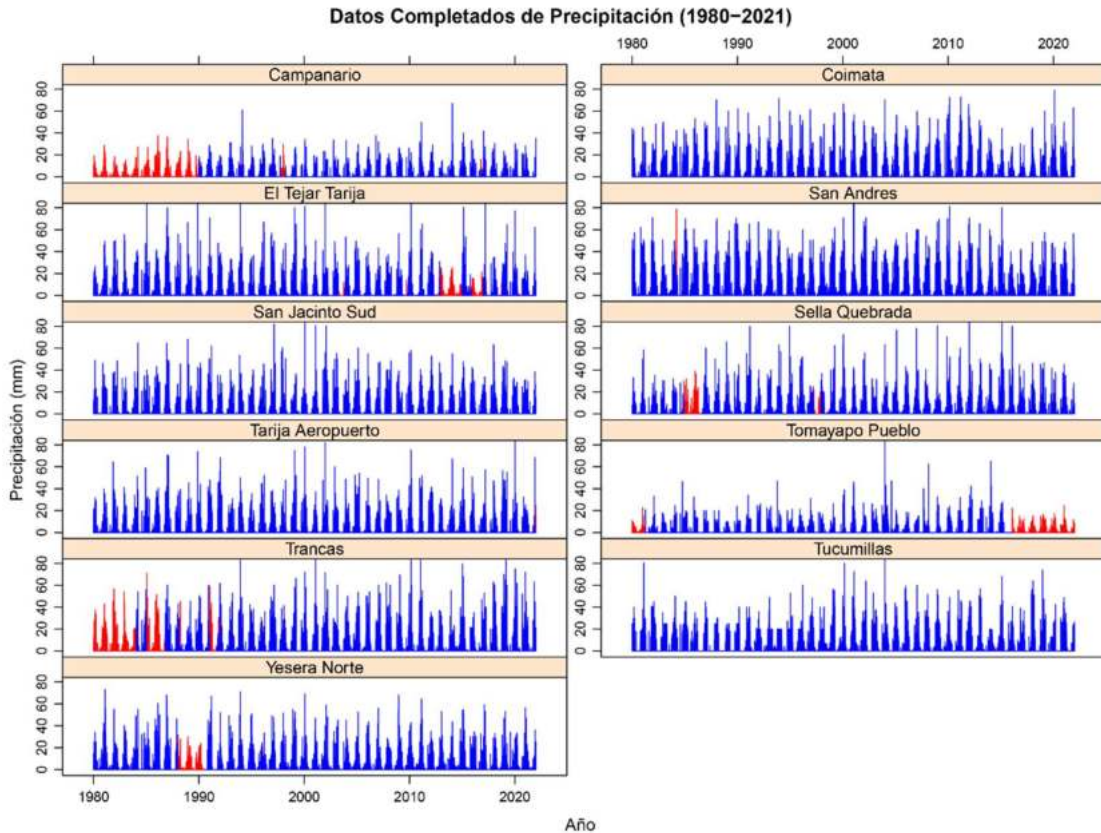


Figura 59: Series de precipitación diaria de datos completados.

Nota: En color azul datos observados y en color rojo datos rellenados.

Análisis doble masa

El análisis de consistencia de doble masa, relaciona la precipitación acumulada de una estación Y (estación que se analiza) con el correspondiente valor X de una (estación patrón). Si la estación que se analiza ha sido bien observada, los puntos

deberán alinearse en una recta, pero si existe algún quiebre, o cambio de pendiente en la recta, ello indicará que la estadística de la estación analizada debe ser corregida.

Se tomó como estación patrón, la estación de Tarija Aeropuerto, y como se observa en la **Figura 60** se obtuvo que las pendientes no presentan una variación significativa. Este resultado se comprueba con los valores obtenidos por medio del parámetro de ajuste $R^2 = 0,99998$, mostrando un ajuste óptimo entre las estaciones. Puede observarse las curvas de doble masa de las demás estaciones en el **ANEXO L**.

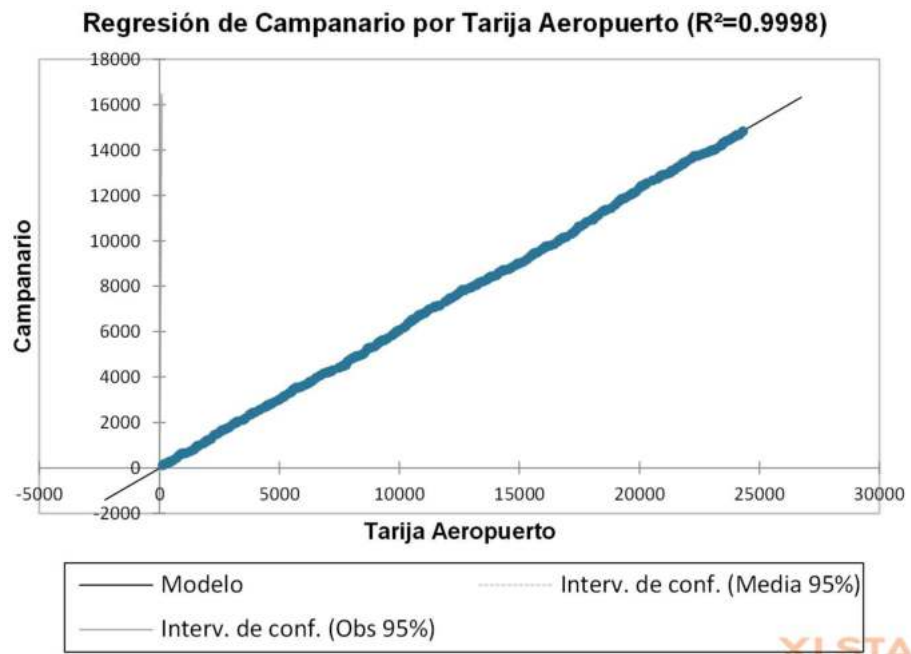


Figura 60: Curva de doble masa de precipitación de la estación Campanario

Análisis de consistencia de las series de precipitación

La matriz de correlación muestra los valores de correlación, que miden el grado de relación lineal entre cada par de variables. Los valores de correlación se pueden ubicar entre -1 y +1. Si las dos variables tienden a aumentar o disminuir al mismo tiempo, el valor de correlación es positivo.



Figura 61: Matriz de correlaciones - Datos de precipitación.

Como se observa en la **Figura 61**, existe una relación lineal entre las estaciones meteorológicas. Los coeficientes de correlación de Pearson indican que existe una relación positiva moderada entre las variables.

4.1.1.2 *Análisis de resultados de la estimación de datos faltantes de temperatura máxima y mínima*

Al igual que con la información pluviométrica, se consideró el coeficiente de correlación diaria entre las estaciones, como se muestra en el siguiente cuadro (**Figura 63** y **Figura 65**).

Se determinó tanto el coeficiente de correlación para las temperaturas mínimas como máximas entre las estaciones y se aplicó el método de relleno razón o ratio normal.

Como se observa en la **Figura 63**, existe una relación lineal entre las estaciones meteorológicas. Los coeficientes de correlación de Pearson indican que existe una relación positiva moderada entre las variables.

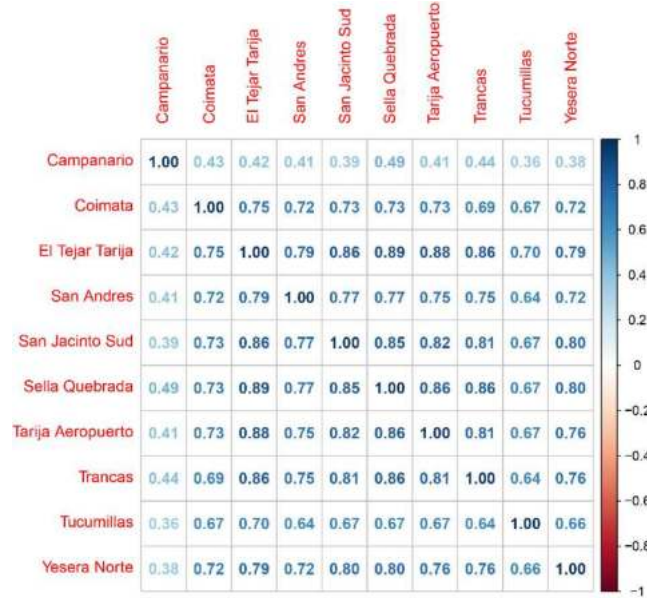


Figura 63: Matriz de correlación – Datos de temperatura máxima.

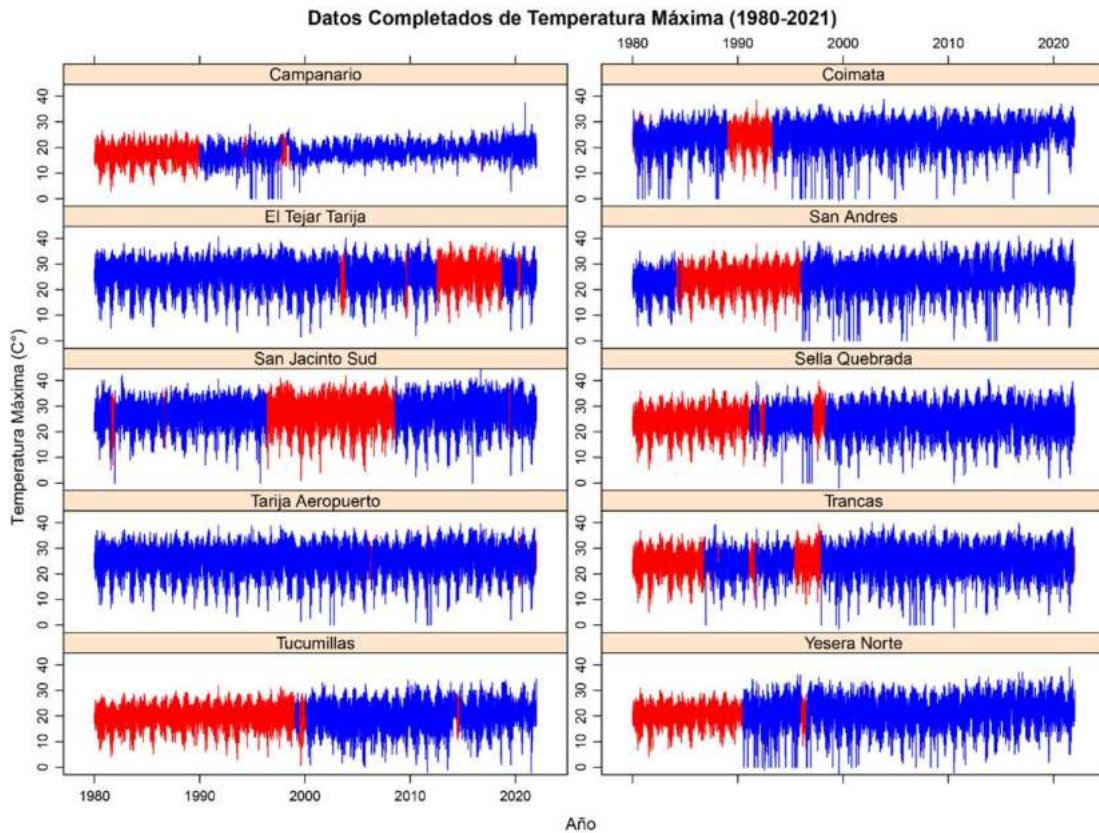


Figura 62: Series de temperatura máxima diaria de datos completados.

Nota: En color azul datos observados y en color rojo datos rellenados.

Como se observa en la **Figura 63**, existe una relación lineal entre las estaciones meteorológicas. Los coeficientes de correlación de Pearson indican que existe una relación positiva moderada entre las variables.

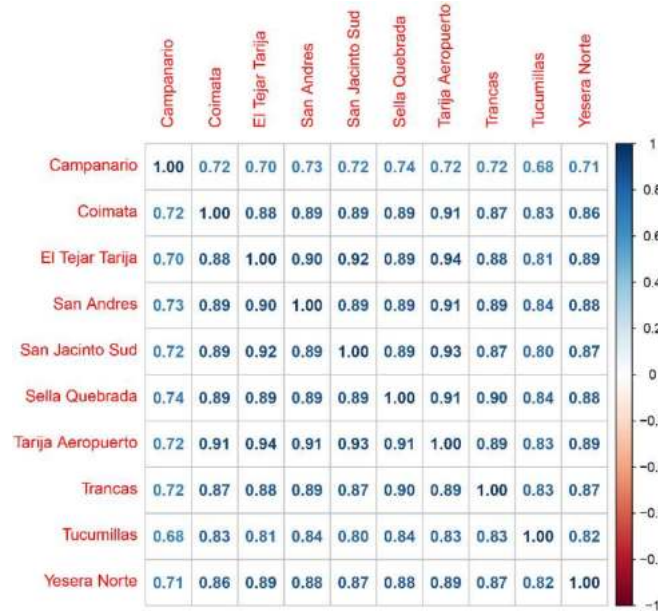


Figura 65: Matriz de correlación – Datos de temperatura mínima

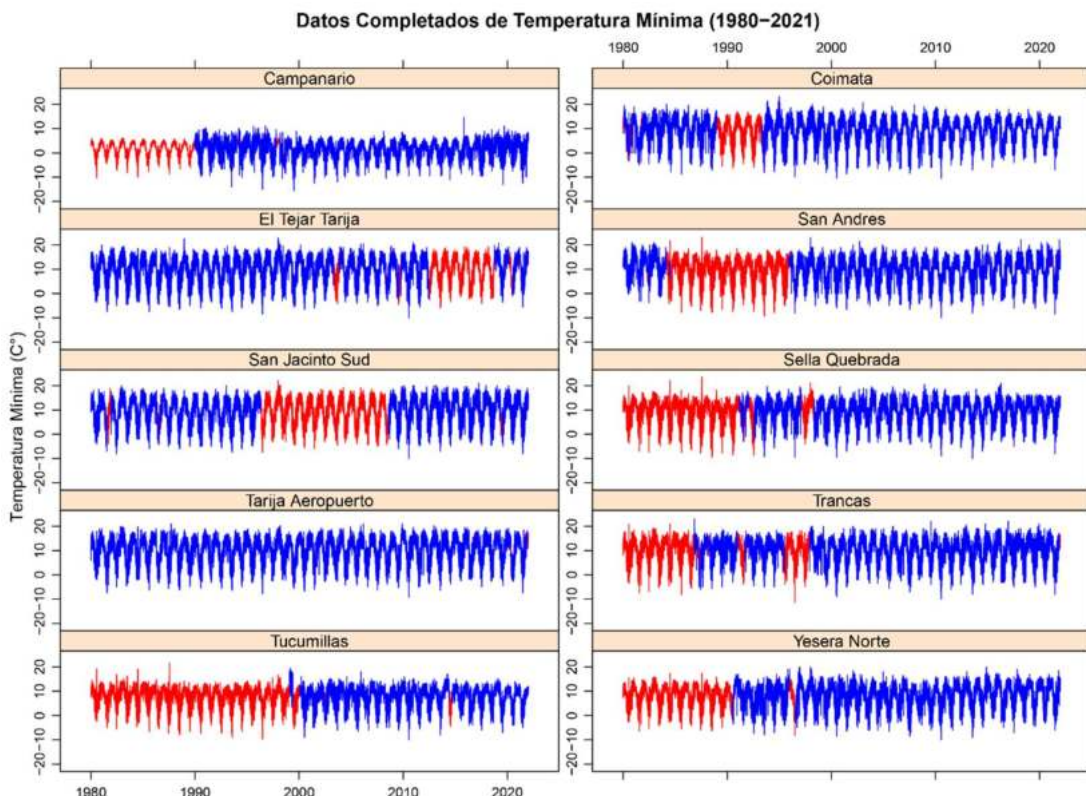


Figura 64: Series de temperatura mínima diaria de datos completados.

Nota: En color azul datos observados y en color rojo datos rellenados.

Como se observa en la **Figura 65**, existe una relación lineal entre las estaciones meteorológicas. Los coeficientes de correlación de Pearson indican que existe una relación positiva moderada entre las variables.

4.1.2 Calibración y validación del modelo Hydro-BID

A lo largo de la calibración se identificó como los diferentes parámetros de Hydro-BID estimulaban el caudal simulado, pues si se aumenta el seepage, el volumen de los caudales reflejados en la curva de duración disminuye; también se observó que el valor asociado al coeficiente R muestra que, si se aumenta, la pendiente de la curva también aumenta, así mismo, cuando el valor del número de curva se reduce, los caudales disminuyen siendo menos sensibles a los eventos de precipitación. Hay que tener en cuenta que para los parámetros de número de curva y el contenido de agua almacenado en el suelo, el valor que se ingresa en la interfaz de los parámetros se toma como un multiplicador, es decir, cuando el valor ingresado se encuentra entre 0 y 1 implica una disminución en el valor que se encuentra anidado con la base de datos AHD.

Al momento de realizar la calibración de los datos actuales se realizaron más de 20 pruebas y los parámetros que se ajustaron a la cuenca se presentan en la **Tabla 30**:

Tabla 30: *Parámetros de calibración para la cuenca alta del río Guadalquivir*

Parámetros	
Curve Number	0,7
AWC	0,5
R Coefficient	0,007
Seepage	0,007
Grow season ET	1
Dormant season ET	1

Al aplicar los parámetros en la estación aguas debajo, se obtuvieron las métricas de desempeño como se muestra en la **Tabla 31** a nivel diario y mensual.

Las métricas de desempeño obtenidas durante el proceso de calibración se encuentran cercanas al rango óptimo, demostrando que los resultados finales de la simulación son confiables y que el modelo representa la realidad de la zona de estudio. Igualmente, la simulación de la cuenca alta del río Guadalquivir, describe con mayor precisión las condiciones mensuales de la cuenca a diferencia de las condiciones

diarias, puesto que las primeras se encuentran más cerca de los rangos de desempeño satisfactorio y excelente.

Tabla 31: Métricas de desempeño calibración.

Métrica	Valor Mensual	Valor Diario
Volumen general de error	-1,35	-1,79
Correlación (R)	0,73	0,54
Correlación modificada	0,69	0,44
Eficiencia Nash-Sutcliffe	0,55	-0,19

Finalmente, Hydro-BID arrojó las curvas de duración **Figura 66** antes y después del proceso de calibración y la gráfica de caudales simulados **Figura 67**, donde se observa resultados aceptables en el periodo 1980 – 2010, comparando con los datos observados, en donde se evidencia el ajuste obtenido entre los datos simulados y los datos observados.

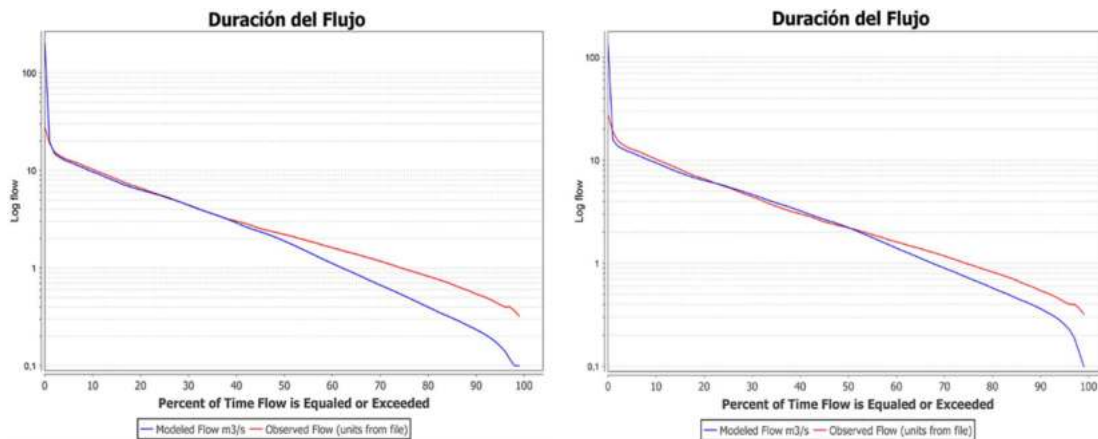


Figura 66: Curvas de duración antes y después de calibrar la estación de Obrajes.

Nota: En (color azul) datos modelados y en (color rojo) datos observados

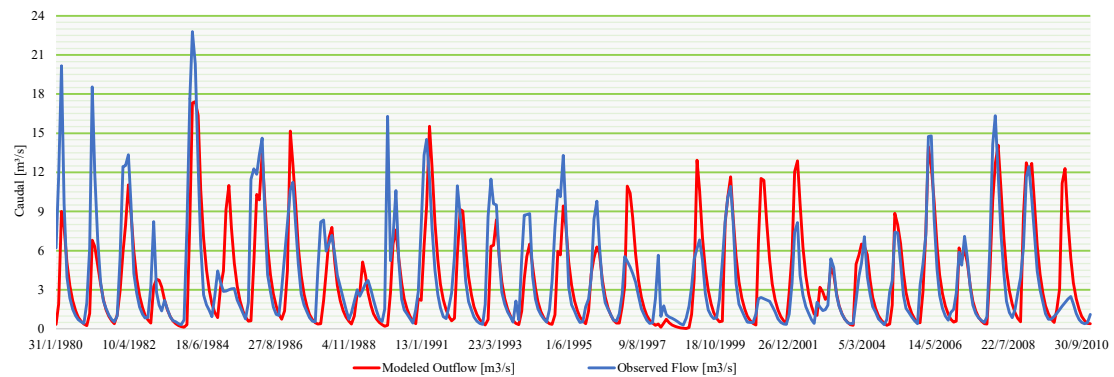


Figura 67: Hidrograma de calibración de caudales modelados vs observados [1980 - 2010].

En cuanto a la sensibilidad de los parámetros de calibración de Hydro-BID, se observó que los parámetros más sensibles son el AWC, ya que este representa el volumen de agua que es capaz de absorber el suelo, y el número de curva, porque representa el nivel de impermeabilización ya sea natural o antrópico.

Adicionalmente, se realizó la curva de duración para el proceso de validación que comprende 4 años desde 2011-2014, la curva comprueba que la calibración fue llevada a cabo correctamente, obteniéndose buenos parámetros estadísticos como se observa en la **Tabla 32**.

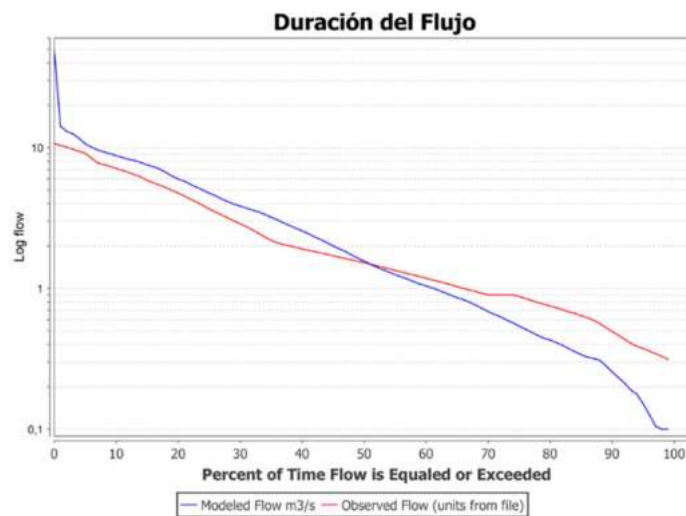


Figura 68: Curvas de duración-validación de la estación de Obrajes.

Tabla 32: Métricas de desempeño validación

Métrica	Valor Mensual	Valor Diario
Volumen general de error	15,24	12,17
Correlación (R)	0,94	0,85
Correlación modificada	0,69	0,58
Eficiencia Nash-Sutcliffe	0,62	0,27

Generalmente, la evaluación de un modelo de simulación se realiza comparando los resultados obtenidos con los datos observados, asumiendo que los errores obtenidos corresponden completamente a la salida del modelo. Sin embargo, como lo menciona el estudio de Moriasi et al., (2007), en la modelación de cuencas hidrográficas se debe considerar también los errores debido a la incertidumbre en las mediciones de datos que se consideran la base para la comparación del modelo.

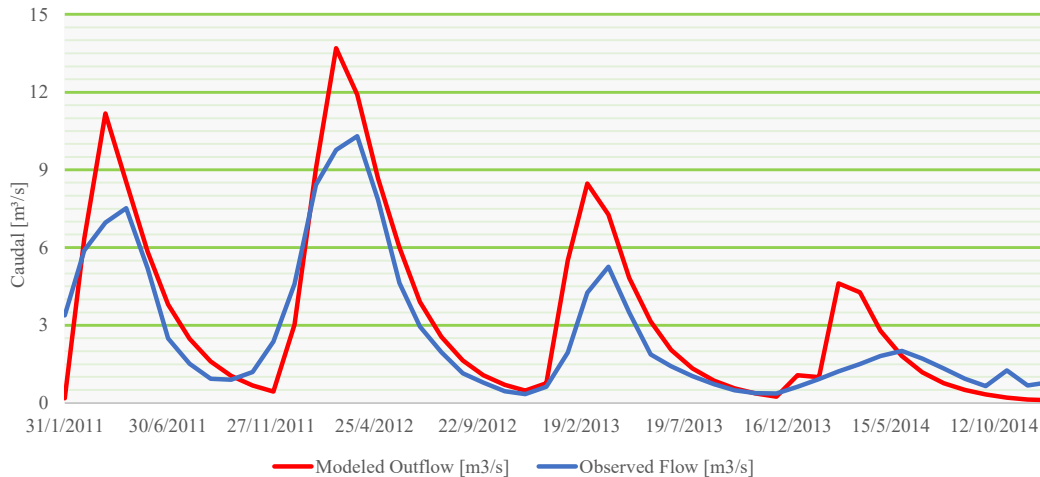


Figura 69: Hidrograma de validación de caudales modelados vs observados [2011 - 2014]

En la **Figura 69**, se puede observar el comportamiento de los caudales observados (línea roja) y los caudales modelados (color azul), esta comparación se la realiza con el fin de evidenciar la relación que tienen las variables.

Se puede divisar que el modelo tiende a simular los caudales mínimos, pero no representa adecuadamente los flujos altos subestimándolos.

4.2 Fase 2

4.2.1 Análisis de cambio climático

4.2.1.1 Selección del modelo de circulación global

En el modelo proyectado (MPI-ESM-MR “para un escenario seco”) se ha conceptualizado la información climática hasta el año 2040, se plantea analizar un escenario que corresponde al periodo del 2015 a 2040.

Los casos que se consideraran en este trabajo (**Figura 70**) son: SSP-126 por simbolizar el mejor caso de vías de forzamiento futuras y SSP-585 por protagonizar el caso más extremo con emisiones considerables.

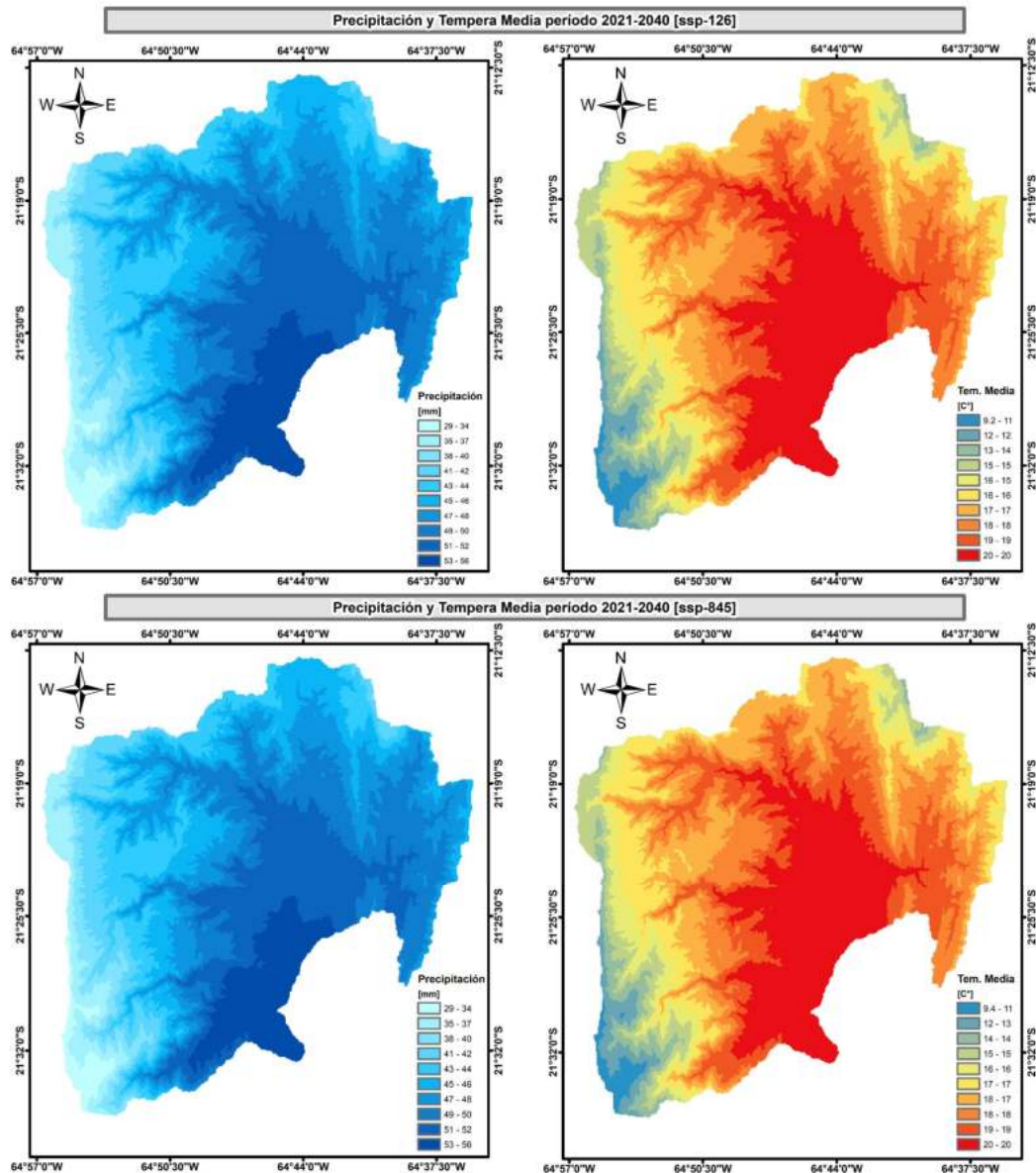


Figura 70: Escenarios Climáticos para la cuenca alta del río Guadalquivir [2021-2040].

4.2.1.2 Reducción de escala y obtención de factores de incremento y disminución mensual de precipitación/temperatura

La reducción de escala y la calibración (corrección de sesgo) se realizaron con WorldClim v2.1 **Figura 71.**

Los datos disponibles aquí se produjeron con un método simple y rápido, y, por lo tanto, se puede aplicar fácilmente a todo el mundo y al área de estudio de la cuenca alta del río Guadalquivir.



Mapas de anomalías climáticas de la CMIP6. La temperatura está en °C. La precipitación es relativa a la precipitación histórica.

Modelo SSP Variable Tiempo Agregar

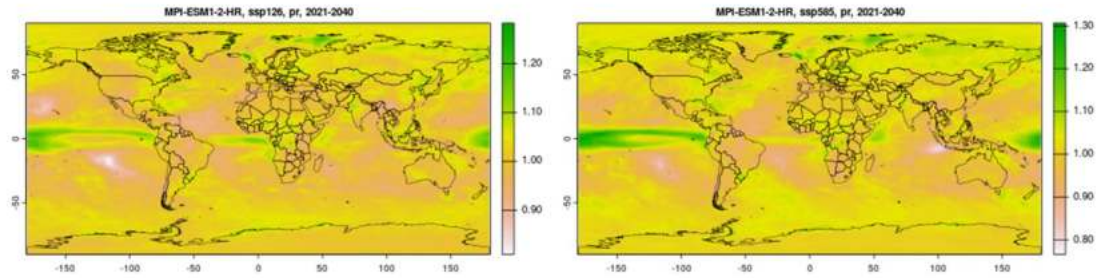


Figura 71: Plataforma para descargar los modelos de circulación global.

Fuente: Tomada de “Mapas de anomalías climáticas de la CMIP6 [Fotografía],” Mapas, gráficos, tablas y datos del clima global, 2022, www.worldclim.org

En la **Figura 72** se muestra las precipitaciones medias mensuales, donde se aprecia que los dos escenarios climáticos tienen un comportamiento distinto a la serie observada.

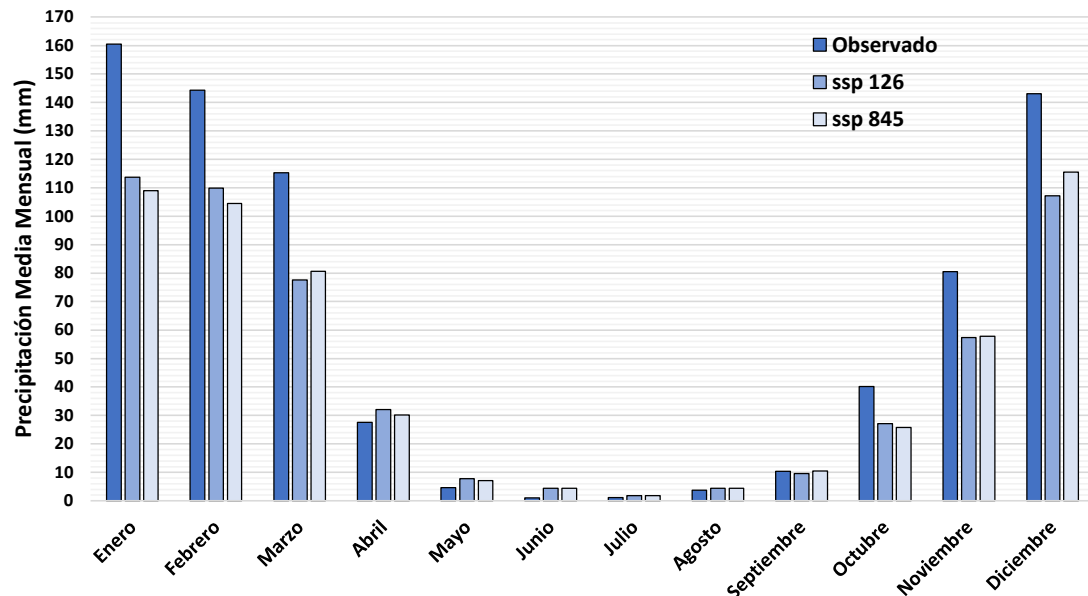


Figura 72: Precipitación media mensual de los escenarios climáticos y de los datos observados.

Al comparar las medias mensuales de los escenarios climáticos del modelo con respecto de los datos observados, se aprecia que estos presentan valores muy inferiores a los observados en los meses de mayor precipitación.

En la **Figura 73** se muestra las temperaturas medias mensuales, donde se aprecia que los dos escenarios climáticos tienen un comportamiento similar la serie observada.

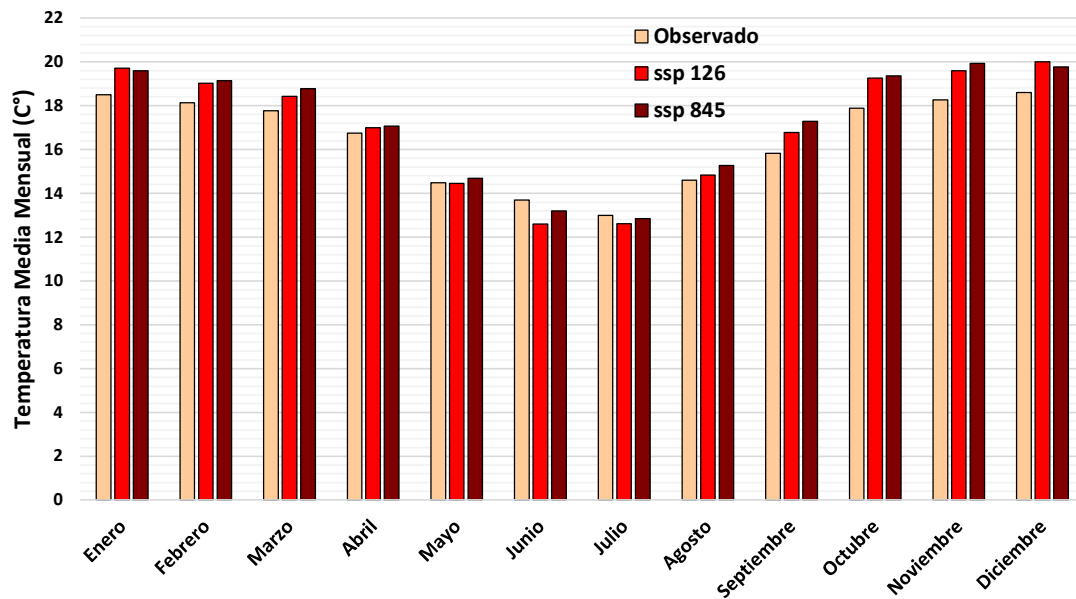


Figura 73: Temperatura media mensual de los escenarios climáticos y de los datos observados.

Al comparar las medias mensuales de los escenarios climáticos del modelo con respecto de los datos observados, se aprecia que estos presentan valores un tanto superiores a los observados en los meses de mayor temperatura.

En la **Tabla 33** se puede observar el incremento/disminución de los escenarios climáticos en precipitación y temperatura media, para posteriormente introducirlos a Hydro-BID, ya que el sistema puede perturbar el clima mediante el uso de los factores mensuales específicos.

Tabla 33: *Desviaciones mensuales.*

Mes	ssp 126		ssp 845	
	Precipitación (%)	Temperatura +/-	Precipitación (%)	Temperatura +/-
Enero	0,53	1,00	0,49	0,89
Febrero	0,61	0,61	0,56	0,72
Marzo	0,62	0,48	0,65	0,82
Abril	1,04	0,25	1,02	0,31
Mayo	1,02	0,20	1,01	0,43
Junio	1,03	1,01	1,03	0,40
Julio	1,01	0,58	1,01	0,34
Agosto	1,02	0,09	1,02	0,52
Septiembre	0,98	0,72	0,99	1,23
Octubre	0,85	1,23	0,84	1,34
Noviembre	0,82	1,21	0,82	1,54
Diciembre	0,65	1,22	0,73	1,00

4.2.1.3 Modelación de caudales futuros a partir de escenarios de cambio climático

Después de obtener las desviaciones mensuales climatológicas (precipitación y temperatura media) a partir del GCM y la reducción de escala, se procedió a realizar de nuevo la simulación de la misma serie temporal, donde se obtuvieron las series de caudales para las condiciones futuras (2021 – 2040) en temporalidad mensual y modificada con los cambios implementados que representa la escorrentia generada a lo largo de la cuenca.

Adicionalmente, se obtuvieron los porcentajes de variación de caudal de cada uno de los escenarios respecto a las condiciones actuales, dando como resultado que se presentará una posible disminución en el caudal entre el 34,28% y 37,18% para los diferentes escenarios climáticos como se observa en la **Tabla 34**.

Tabla 34: *Porcentaje de variación de caudales futuros.*

Escenario	Periodo	Caudal (m ³ /s)	Porcentaje de variación (%)
Actual	1980-2014	3,79	
ssp 126	2021-2040	2,49	-34,28
ssp 845	2021-2040	2,38	-37,18

Del mismo modo, en la **Figura 74** se evidencia el comportamiento de los caudales mensuales desde 2021 a 2040, presentando que el escenario ssp 845 es el periodo más crítico en cuanto a la oferta hídrica.

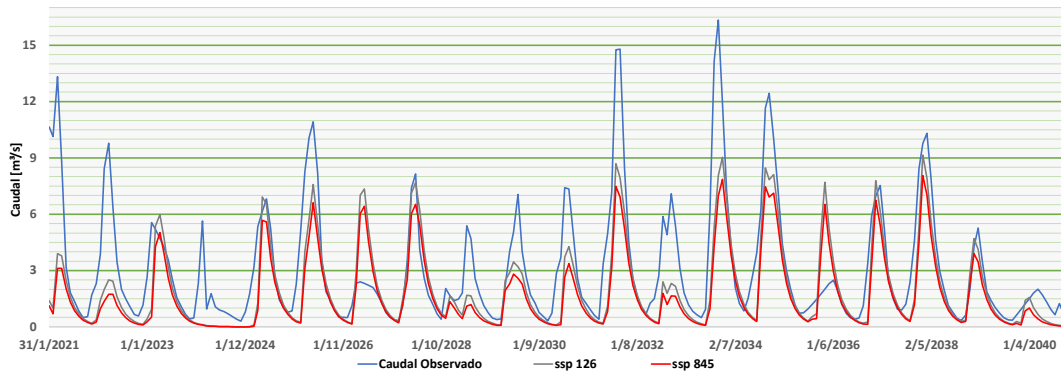


Figura 74: Caudales proyectados.

La gráfica de curva de duración de caudales ayuda a tener una buena imagen del posible cambio del comportamiento de la cuenca debido a los efectos del cambio climático.

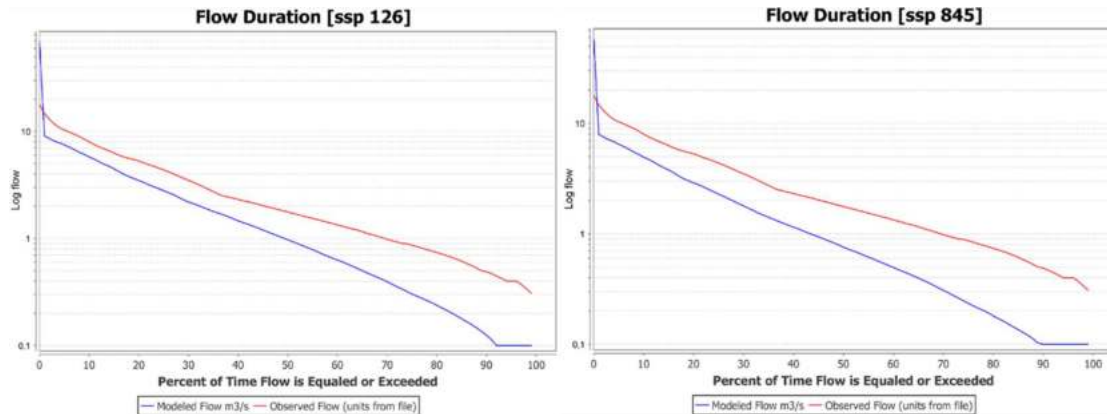


Figura 75: Curvas de duración de caudales proyectados.

4.3 Fase 3

4.3.1 Realización de indicadores de sequía hidrológica

Las características hidrológicas de la sequía, que incluyen inicio, finalización, frecuencia, severidad y duración de un evento de sequía, se han evaluado en función del índice estandarizado de caudales (SQI, siglas en inglés), a través de la metodología del índice estandarizado de precipitación (SPI). Siguiendo con lo anterior, se realizaron dos gráficas, se presentará la primera y segunda en la que se resumen los años del 2021 al 2040 la severidad y la duración de la sequía.

Dichas gráficas se realizaron por cada escenario climático manejado en este trabajo de grado, es decir, (ssp-126 y ssp-845) **Figura 76** para el completo análisis y comparación, de esta manera se verá el comportamiento de la sequía desde distintos puntos de estudio.

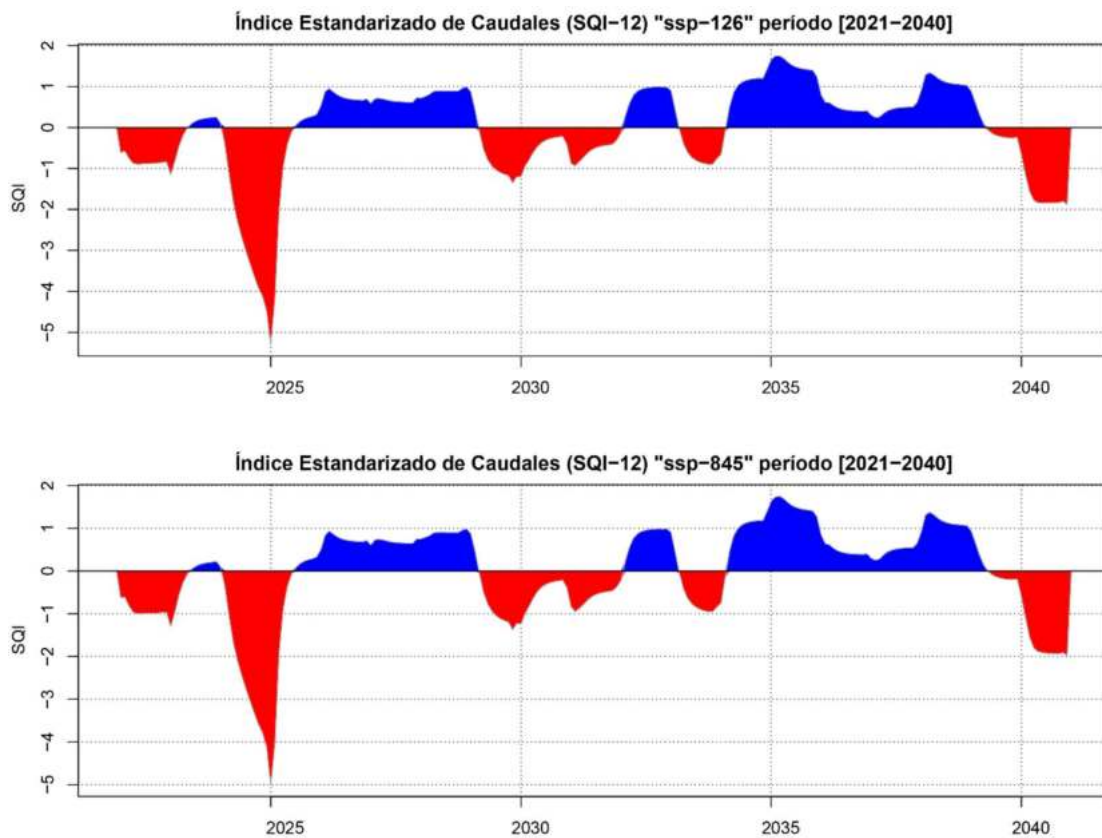


Figura 76: Índices normalizados de Caudales en la escala temporal anual (12 meses).

Tabla 35: Valores del índice normalizado de precipitación.

TIPO DE SEQUÍA	SPI
Extremadamente húmedo	SPI > 2,00
Muy húmedo	1,50 < SPI < 1,99
Moderadamente húmedo	1,00 < SPI < 1,49
Normal o aproximadamente normal	-0,99 < SPI < 0,99
Moderadamente seco	-1,00 < SPI < -1,49
Severamente seco	-1,50 < SPI < -1,99
Extremadamente seco	SPI < -2,00

Fuente: Adaptado de “Atlas de Sequía de la República Argentina (pág. 6),” por Ravelo et al., 2014.

A continuación, se presenta la **Tabla 36** resumen en donde se comparan los resultados de los índices de severidad de sequía utilizando la **Tabla 35**, para cada uno de los SSP mencionados a través del documento, para visualizar mejor la diferencia entre la duración, severidad y número de eventos de sequía que podrían presentarse en la cuenca alta del río Guadalquivir, de acuerdo con los caudales futuros arrojados por Hydro-BID.

Tabla 36: Comparación de SQI entre SSP - 126 y SSP – 845.

SSP - 126	SSP - 845
Como resultado se obtuvieron 32 eventos de sequía durante el periodo de (2021-2040)	Como resultado se obtuvieron 31 eventos de sequía durante el periodo de (2021-2040)
Moderadamente Seco: 10 eventos	Moderadamente Seco: 9 eventos
Severamente seco: 11 eventos	Severamente seco: 12 eventos
Extremadamente seco: 11 eventos	Extremadamente seco: 10 eventos
La Intensidad más alta de sequía es de -5,01 que se observó durante la sequía generada del año (2024-2025), con una duración de 11 meses entre mayo del 2024 al marzo del 2025, además fue testigo de 11 eventos de sequía de intensidades variables.	La Intensidad más alta de sequía es de -5,30 que se observó durante la sequía generada del año (2024-2025), con una duración de 11 meses entre mayo del 2024 al marzo del 2025, además fue testigo de 11 eventos de sequía de intensidades variables.

4.4 Análisis de estrategias que compensen los efectos del cambio climático

Al examinar la proyección futura 2021 a 2040, para condiciones secas debido al cambio climático. Se evidencia un fenómeno adverso, los resultados de la modelación muestran que los caudales mensuales disminuyen con el paso del tiempo, el cálculo del índice de sequía constata que se encuentra en una condición de sequía extrema, de esta situación nace la interrogante ¿Qué se puede hacer ante tal situación?

En el estudio se plantea desde la experiencia, criterio, bibliografía y entrevista con expertos, se sugieren varios planes y estrategias posibles para ayudar a contrarrestar los efectos negativos del cambio climático.

Para la oferta se puede generar líneas estratégicas o planes que optimicen el aprovechamiento hídrico de la cuenca alta del río Guadalquivir.

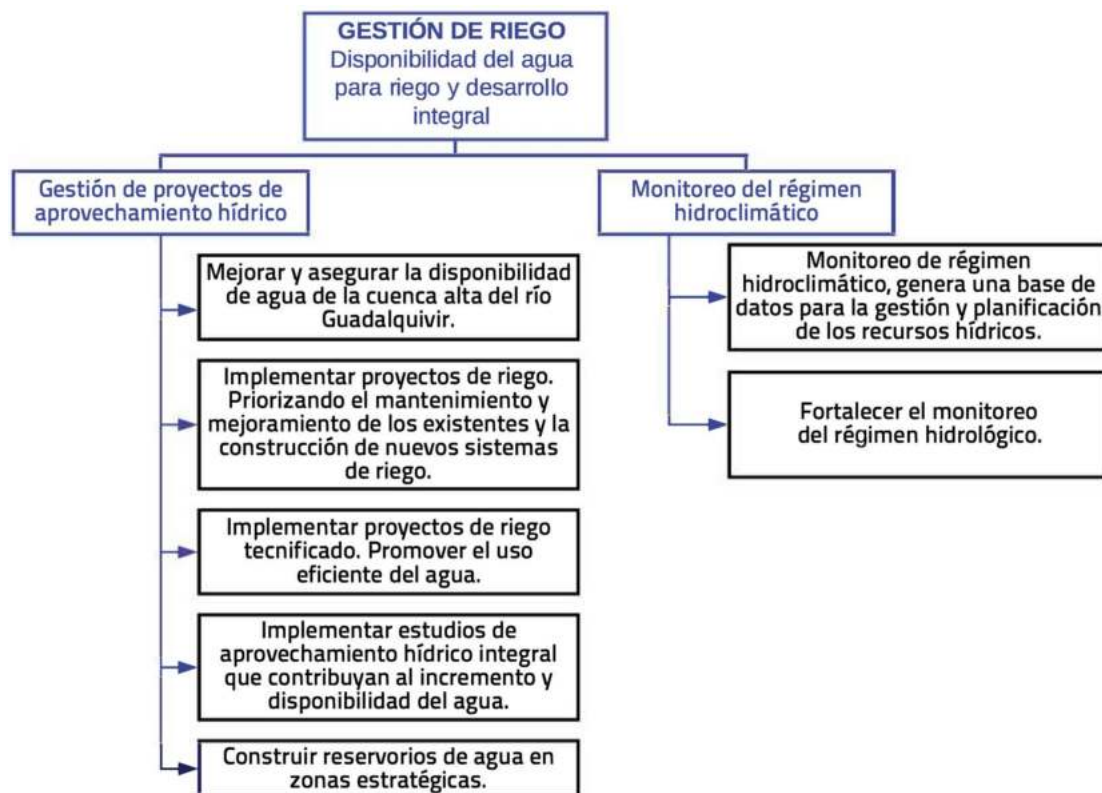


Figura 77: Líneas de acción y acciones específicas de la estrategia “Disponibilidad de agua para riego y desarrollo integral”.

Para ello, se ha propuesto un enfoque estratégico que contribuirá a mitigar los efectos del cambio climático. Que a su vez implica optimizar y garantizar la disponibilidad del agua (agua potable, riego, biodiversidad y el desarrollo integral).

Las líneas estratégicas que se plantean para optimizar el aprovechamiento hídrico de la cuenca alta del río Guadalquivir son:

- Gestión de riego, disponibilidad de agua para riego y desarrollo integral.
- Gestión de la calidad hídrica y resiliencia de los sistemas de vida.

A continuación, se detalla las líneas estratégicas que compensen el fenómeno del cambio climático.

4.4.1 Disponibilidad del agua para riego y desarrollo integral

Debido a los afluentes de la cuenca alta del río Guadalquivir, la disponibilidad de agua es moderada y la demanda de agua es alta para riego y otros fines. La clasificación de extremadamente seco de acuerdo a los índices de sequía

La categoría de extremadamente seco en el índice de severidad de sequía indica escasez de agua en la cuenca que es un problema durante la estación particularmente seca, lo que lleva a problemas tales como sequías severas que obliga y condiciona a los productores mantener sus procesos de producción en sistemas a secano. El déficit hídrico o las limitaciones se extienden también para otros usos, tales como el consumo humano y los animales.

En este contexto, se debe promover el desarrollo del riego en microcuencas con déficit hídrico. Aprovechar el aporte del agua como las precipitaciones en época húmeda, que proyecte la construcción de reservorios, de tal manera que permita cosechar y almacenar el agua en épocas de lluvia, incrementando la disponibilidad de agua en épocas de estiaje que sería regulado para aumentar efectivamente el área de riego, consumo humano y generación de energía eléctrica.

La seguridad hídrica para la producción agrícola bajo riego es importante para dinamizar la economía de los agricultores, generar fuentes de trabajo en el sector agropecuario, reduciendo la pobreza y la migración, generando desarrollo y elevando la calidad de vida en los pobladores de la cuenca alta del río Guadalquivir.

Se proponen líneas de acción específicas para mitigar los efectos del cambio climático asegurando la disponibilidad de agua para riego y desarrollo integral (consumo humano, riego e industria).

Para el cumplimiento de las estrategias planteadas se establece medios específicos para materializar las líneas estratégicas, que se refiere a programas y proyectos.

4.4.1.1 Gestión proyectos de aprovechamiento hídrico

El objetivo es incrementar y asegurar la disponibilidad de agua en la cuenca alta del río Guadalquivir, para el desarrollo del riego, consumo humano y generación de energía que contribuyen al desarrollo integral. Para ello se contempla las siguientes acciones específicas.

A. Mejoramiento y asegurar la disponibilidad del agua

La cuenca alta del río Guadalquivir, al este es compartida con el municipio de Cercado, las microcuencas de Sella, Rumicancha y Candelaria, por efecto de sus ríos tributarios tiene mediana disponibilidad de agua, teniendo alta demanda de consumo de agua para riego y otros usos. El déficit hídrico es un problema global presente sobre todo en la época seca, por lo que se enfrenta serios problemas tales como la sequía que obliga y condiciona a los productores mantener sus procesos de producción en sistemas a secano.

La finalidad es mejorar y asegurar la disponibilidad de agua de la cuenca alta del río Guadalquivir a nivel local, considerando su resiliencia hídrica al cambio climático.

B. Implementar proyectos de riego

La demanda de agua para riego es evidente en todas las comunidades del municipio de San Lorenzo, puesto que existen terrenos potenciales para fines de riego y comunidades con larga tradición de riego.

Contribuir al incremento de área de riego elevando la eficiencia del uso de agua en los sistemas de riego mediante el mantenimiento y mejoramiento de los sistemas de riego existente y la construcción de nuevos sistemas de riego.

C. Implementar proyectos de riego tecnificado

Los sistemas de riego son tradicionales ya establecidos a lo largo del río Guadalquivir y afluentes, las mismas por su topografía tienen limitaciones para la transformación a un riego tecnificado, no obstante, los pequeños sistemas de riego en montañas y laderas es necesario reacondicionar para riego tecnificado. Promoviendo el uso eficiente del agua en zonas con vulnerabilidad al déficit hídrico.

D. Implementar estudios de aprovechamiento hídrico integral

La cuenca alta del río Guadalquivir forma parte del municipio de San Lorenzo, el agua es utilizada no solo para riego, sino también para agua potable, consumo animal, agroindustria y turismo.

Es necesario realizar estudios integrales de aprovechamiento hídrico que adopte las diversas tecnologías y sistemas alternativos de aprovechamiento de diversas fuentes de agua, tales como cosecha de agua, trasvases de agua, riego tecnificado, uso de aguas subterráneas, según las particularidades y potencialidades de cada comunidad o zona. Asimismo, se deberá considerar los riesgos hidro climáticos, caudales y volúmenes ecológicos y funciones hídricas de las microcuencas.

E. Construir reservorios estratégicos en la cuenca alta del río Guadalquivir

Debido al incremento de la demanda tanto para las superficies de riego, consumo humano y requerimientos energéticos, se plantea la construcción de presas

estratégicas, diseñar presas de derivación cuya superficie se encuentre fuera de la cuenca alta del río Guadalquivir y no presenten demandas significativas. La idea es sacar provecho a la cosecha de agua fuera de la cuenca, con tales características se podrá contribuir en la oferta hídrica de la cuenca.

4.4.1.2 Monitoreo del régimen hidro climático

Se pretende generar una base de datos del régimen hidro climático para la planificación y gestión de los recursos hídricos.

A. Fortalecer el monitoreo del régimen hidrológico

En la cuenca alta del río Guadalquivir el monitoreo de los caudales de agua es deficiente, ya que se cuenta con varias estaciones hidrométricas con récord de datos intermitentes, en la actualidad solo se tiene datos de la salida de la cuenca (Obrajes). La planificación de los recursos hídricos con pocos datos, se hace difícil. En este sentido es necesario buscar la continuidad de las series en las estaciones hidrométricas para el monitoreo de los caudales de agua, y realizar un ajuste y análisis de la información de caudales mensuales existentes.

Se debe generar un plan que contemple la continuidad de relevamiento de datos de estaciones, hidrométricas cuya distribución sea conveniente, reactivar estaciones hidrométricas suspendidas o desactivadas.

B. Fortalecer el monitoreo del régimen meteorológico

El Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) viene realizando el monitoreo del régimen meteorológico en las cuatro estaciones de la cuenca. A tiempo de realizar un estudio de identificación y densificación de estaciones meteorológicas, mediante la aplicación del método “vector regional de índices anuales”. Se identifica tres microclimas en el contexto de la cuenca del río Guadalquivir (en la que la microcuenca alta del río Guadalquivir se ubica al nor oeste), zona este, zona oeste y zona sur, la cuenca del río Guadalquivir se identifica predominantemente con la zona Oeste en la que es necesario re implementar las estaciones meteorológicas.

En este sentido, es necesario fortalecer al Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) en la densificación de estaciones meteorológicas, así como en su operación, mantenimiento y procesamiento de la información obtenida a través de la red de monitoreo del régimen hidrometeorológico.

La finalidad de contribuir con el sistema de monitoreo del régimen meteorológico en la cuenca alta del río Guadalquivir, se debe implementar un plan de monitoreo de régimen meteorológico, en la cual se debe reactive las estaciones que no se encuentran en funcionamiento e implementar nuevas que sean representativas.

Procesamiento de datos y estudios de aplicación, fortalecimiento y capacitación de los operadores de las estaciones meteorológicas.

4.4.2 Gestión de la calidad hídrica y resiliencia de los sistemas de vida

El río Guadalquivir y sus principales afluentes son la principal fuente de agua para los sistemas de riego y consumo humano, la misma se encuentra vulnerable a la contaminación por la generación de residuos sólidos y aguas residuales provenientes de las poblaciones de mayor concentración, como: Canasmoro, San Lorenzo, Tarija Cancha, El Rancho, Sella, Erquiz, La Victoria, Coimata y otras comunidades.

La parte alta de la cuenca del río Guadalquivir se caracteriza por formaciones aluviales y terrazas a lo largo del río, mientras que la otra parte está formada por pies de montes, laderas colinas, serranías y montañas en la que la erosión hídrica de los suelos ocurre todos los años, siendo evidente la disminución de la cobertura vegetal. Esto significa que se ha alterado el comportamiento hídrico y ambiental de la cuenca, su capacidad de regulación ha disminuido. En el siguiente esquema **Figura 78** se describe las estrategias específicas. Asimismo, son vulnerables a los riesgos hidrológicos como los riesgos climáticos (sequías, granizadas y heladas) se agravan por el efecto de los cambios climáticos.

El objetivo de esta línea estratégica es contribuir a mejorar la calidad del agua y revitalizar las funciones hídricas y ambientales de la cuenca, conservar la capacidad

de regeneración de las zonas y sistemas de vida, reducir su vulnerabilidad al cambio climático.

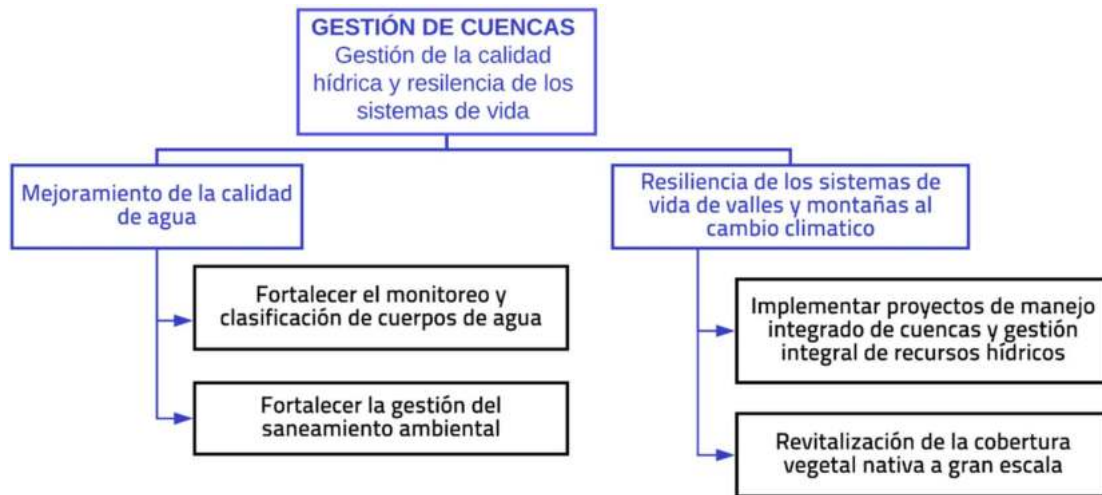


Figura 78: Líneas de acción y acciones específicas de la estrategia “Gestión de la calidad hídrica y resiliencia de los sistemas de vida”.

4.4.2.1 Mejoramiento de la calidad del agua

Para mejorar la calidad del agua se debe contribuir a prevenir, mitigar y reducir la contaminación ambiental de los cuerpos de agua en la alta cuenca del río Guadalquivir.

A. Fortalecer el monitoreo y clasificación de cuerpos de agua

Para este aspecto se debe generar planes de monitoreo, evaluación de la calidad de agua en la cuenca alta del río Guadalquivir, mediante la clasificación de cuerpos de agua como instrumento de gestión hídrica ambiental.

Las líneas de acción pertinentes para la cuenca alta del río Guadalquivir son: inventariar y caracterizar las fuentes de contaminación, fortalecer el monitoreo de la calidad de agua, generar una base de datos de los parámetros físicos, químicos y biológicos, generar reportes de calidad de agua y desarrollar protocolos de muestreo, monitoreo y niveles de contaminantes.

B. Fortalecer la gestión del saneamiento ambiental

El saneamiento básico es el mejoramiento y la preservación de las condiciones sanitarias óptimas de fuentes y sistemas de abastecimiento de agua para consumo humano, así como la disposición sanitaria de excrementos y orina, ya sean en letrinas o baños. Manejo sanitario de los residuos sólidos, conocidos como basura.

En cuanto al manejo de los residuos sólidos provenientes de los centros poblados, es necesario fortalecer y fomentar la planificación y gestión de residuos sólidos. Se debe implementar planes integrales municipales de residuos sólidos; gestionar proyectos de aprovechamiento y disposición final de residuos sólidos, plantas de tratamiento, plantas de reciclaje y compostaje.

Controlar la calidad del agua regulando el impacto ambiental, que su vez regula la afectación de la salud, se debe implementar planes como medidas ambientales, como plantas de tratamiento de aguas residuales, control de vertidos, gestión de residuos sólidos.

Algunas líneas de acción que se debe considerar es caracterizar y evaluar los sistemas de saneamiento básico, como el sistema de alcantarillado, plantas de tratamiento de aguas residuales, implementar proyectos de drenaje pluvial y alcantarillado sanitario e implementar proyectos de tratamiento de aguas y lodos residuales y su reúso para riego.

4.4.2.2 Resiliencia de los sistemas de vida de valles y montañas al cambio climático

Los sistemas de vida de la parte alta de cuenca alta del río Guadalquivir está definida por las comunidades de los valles y montañas, que han desarrollado los sistemas productivos estables en los valles, pero no fueron conservadas las funciones hídricas y ambientales en las microcuencas de montaña. Esto significa el suelo, vegetación y cantidad de agua se han degradado, actualmente se evidencia la reducción de la cobertura vegetal, pastizales de praderas, matorrales y bosques, los suelos son erosionados. Según las encuestas comunales el caudal del agua de los manantiales, ojos de agua se han reducido.

La resiliencia es la capacidad hacer frente a la adversidad y preservarse de los daños y recuperarse rápidamente. Por tanto, se trata de capacitar a los pobladores, familias de las comunidades y las instituciones con una conciencia de protección climática mediante medidas que eviten (prevención) o limiten (mitigación y preparación) los efectos negativos de los peligros y prevenirlos de manera fiable y oportuna.

El fin de la presente línea de acción estratégica es revitalizar las funciones hídricas y ambientales, así como elevar la capacidad de regeneración de los componentes (suelos, agua, vegetación, biodiversidad), considerando su vulnerabilidad al cambio climático.

A. Implementar proyectos de manejo integrado de cuencas y gestión integral de recursos hídricos

La sustentabilidad de uso de agua para riego depende del manejo y conservación de las cuencas productoras de agua. El fin de esta línea de acción es revitalizar las funciones hídricas del eco-sistémicas de las microcuencas, así como proteger y conservar los suelos, el agua, la vegetación, biodiversidad, mediante prácticas conservación y sustentabilidad, incluyendo el desarrollo de la capacidad en gestión integrada de recursos hídricos (GIRH) y manejo integral de cuencas (MIC).

Las posibles acciones a realizar son: Elaborar y ejecutar proyectos de MIC en cuencas prioritarias, fortalecer la preservación de los sistemas de vida en las áreas protegidas.

B. Revitalización de la cobertura vegetal nativa a gran escala

La vegetación de la cuenca está constituida por bosques relictos (vestigio de la flora), encontrándose mayores áreas de arbustales y especies herbáceas, que se distribuyen en los diferentes pisos ecológicos de la cuenca. La flora más representativa, se encuentra en la Reserva Biológica de la Cordillera de Sama (RBCS) la misma que se encuentran bajo la administración del Servicio Nacional de Áreas Protegidas (SERNAP). Los efectos de la reducción de la vegetación se tradujeron en la pérdida de

hábitats naturales de plantas y animales, fuentes de producción de alimentos, reducción de la capacidad de recarga de acuíferos, disminución de biodiversidad y riqueza genética de flora y fauna, minimización de las áreas de recreación naturales y el desequilibrio ecológico y ambiental generalizado de la cuenca.

En términos generales, la cobertura vegetal de las microcuencas de montaña ha disminuido notablemente, en la que los suelos son vulnerables a la erosión, ocasionando arrastre de sedimentos por efecto de las lluvias intensas, lo que se puede agravar por efecto del cambio climático.

La finalidad es revitalizar la cobertura vegetal a gran escala de las zonas de vidas de pajonales, arbustales, matorrales y bosques nativos, mediante la forestación y reforestación de las partes altas. Para proteger los suelos y revitalizar las áreas de producción de aguas superficiales, además de contribuir a la captura de carbono de la atmósfera.

Las acciones estratégicas que se pretenden generar son: elaborar y ejecutar proyectos de revitalización de la cobertura vegetal, construcción de viveros forestales comunales, prácticas de forestación y reforestación en las partes receptoras de la microcuenca para asegurar la producción de aguas, fomentar la forestación comunal mediante incentivos y fortalecer el manejo de áreas protegidas en coordinación con el servicio de áreas protegidas.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Las conclusiones que se pudieron extraer y surgieron tanto de las informaciones como de los análisis presentados en los capítulos precedentes, son las que se exponen a continuación.

5.1 Conclusiones

- En este trabajo se analizaron escenarios futuros y se obtuvieron índices de sequías hidrológicas bajo escenarios de cambio climático, mediante la modelación hidrológica de Hydro-BID de la cuenca alta del río Guadalquivir. Lo más importante del trabajo es que se pudo conocer e identificar los fenómenos y características de la sequía hidrológica (espacio-temporal anual) principalmente en términos de intensidad durante el periodo de estudio de 2021 a 2040, porque gracias a esta caracterización de la sequía se puede tener una idea del cambio, variabilidad y el comportamiento de la misma. Lo más difícil fue la obtención de la información y el tratamiento de la misma, porque antes de trabajar con cierta información es importante que la misma salga de una entidad confiable, ya que esta garantiza que los resultados sean lo suficientemente confiables como para poder confiar en ellos.
- Se realizó el análisis del comportamiento de las series de la precipitación y temperatura para el periodo 1980 a 2021 y se concluye que los datos fueron analizados y corregidos aplicando los mismos criterios utilizados en el BHSB y flexibilizando el periodo de registro continuo de las series, que genera confianza en la utilización de los mismos para la realización de un buen estudio.
- La calibración y validación del modelo Hydro-BID mostró buenos resultados en la simulación de los caudales en la cuenca alta del río Guadalquivir con valores de métricas de desempeño aceptables.
- El proceso de reducción de escala permite representar de forma más acertada las condiciones reales de la zona de estudio, aumentando la correlación entre los datos observados y los datos futuros del GCM, gracias a este proceso se

obtuvieron de manera satisfactoria los factores de incremento o disminución de precipitación y temperatura de la misma.

- La aplicación del modelo hidrológico Hydro-BID mediante las proyecciones de cambio climático, permitió conocer eventos y características de la sequía meteorológica (escala temporal anual) principalmente en términos de intensidad para diferentes meses en el periodo de estudio en la cuenca alta del río Guadalquivir.
- Finalmente, el cálculo de un Índice Estandarizado de Caudal (SQI), permitió caracterizar espacialmente y temporalmente los eventos de sequía hidrológica proyectada entre los años 2021 a 2040 en la cuenca alta del río Guadalquivir, evaluando sus principales características (duración e intensidad).

5.2 Recomendaciones

En este apartado se muestra los aspectos más importantes que puede servir para futuras investigaciones, también señala algunos aspectos por afinar para lograr mejores resultados.

- Este trabajo es una herramienta muy útil para los tomadores de decisión y planificadores, que les permita administrar el normal abastecimiento del recurso hídrico para las diferentes actividades productivas, y desarrollar la capacidad institucional sobre prevención en temas de sequía, desarrollando un sistema de alerta temprana a eventos de sequía.
- Debido a la escases de los registros hidrométricos y la dificultad que esto implica para el desarrollo de estudios detallados, se recomienda mantener la continuidad de los registros de caudales e instalar estaciones automáticas que brinden información en tiempo real en las subcuencas, a fin de contribuir con mayor precisión al conocimiento del potencial hídrico en estas subcuencas y alertar tempranamente ante eventos de sequía que se estén produciendo con el objetivo de minimizar los riesgos potenciales.
- Un riguroso control de calidad y la homogenización de las series de precipitación es un proceso previo, ineludible y clave al momento de usar estos

datos, ya que los mismos nos garantizan que las series de tiempo de las distintas estaciones representen efectivamente señales asociadas al sistema climático en la zona y no a otros factores (errores del sensor, humanos, desplazamiento de la estación, cambio del medio circundante a la estación, etc.). Esto, nos asegura que los resultados alcanzados en estudios posteriores sean lo suficientemente robustos como para poder confiar en ellos.

- Realizar un estudio que evalúe las zonas que requieren la implementación de estaciones meteorológicas para tener una mejor distribución y así poder optimizar lo más que se pueda los procesos de obtención de datos, evitando así la presentación de vacíos en la información que puedan generar incertidumbre.
- De acuerdo a los resultados obtenidos, se debe realizar una planificación hídrica, para disminuir los índices de sequía.