



Universidad  
de Alcalá



Universidad  
Rey Juan Carlos

**MODELIZACIÓN HIDROLÓGICA Y SIMULACIÓN  
DE ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO EN LA  
CUENCA DEL RÍO SENSUNAPÁN (EL SALVADOR)  
USANDO EL PROGRAMA HYDROBID**

**HYDROLOGICAL MODELLING AND CLIMATE  
CHANGE SCENARIOS SIMULATION IN  
SENSUNAPAN RIVER BASIN, EL SALVADOR WITH  
THE HYDROBID MODEL**

**MÁSTER UNIVERSITARIO EN HIDROLOGÍA  
Y GESTIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS**

**Presentado por:**

**MAURICIO ANTONIO DOMÍNGUEZ RAMÍREZ**

**Dirigido por:**

**Dr. JUAN ANTONIO PASCUAL AGUILAR**

**Alcalá de Henares, a 7 de febrero de 2024**

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios todopoderoso por la fortaleza, para nunca decaer, la sabiduría y entendimiento necesarios, y así poder alcanzar este logro de culminar el máster, sin ellos nada de esto sería posible.

A mis padres (Mauricio Antonio y Rosa Emilia) y hermano (Luis Alonso), por el apoyo desde la distancia, motivándome y transmitiendo su amor, durante todo el transcurso del máster.

A los amigos que este proceso me permitió conocer y compartir con ellos, siendo un apoyo mutuo durante todo el transcurso del máster.

Finalmente, al director del presente trabajo Dr. Juan Antonio Pascual, por su apoyo y entendimiento en las circunstancias que se presentaron en el desarrollo del presente trabajo.

## ÍNDICE

|  |    |
|--|----|
| RESUMEN.....   | 1  |
| 1. INTRODUCCIÓN.....   | 2  |
| 2. OBJETIVOS.....  | 4  |
| 2.1 Objetivo general.....  | 4  |
| 2.2 Objetivos Específicos.....   | 4  |
| 3. ANTECEDENTES.....   | 4  |
| 3.1 Zona de estudio.....   | 7  |
| 4. METODOLOGÍA.....  | 11 |
| 4.1 Etapa 1. Delimitación de zona de estudio e identificación de cuencas aferentes pertenecientes a la cuenca baja del río Sensunapán..... | 11 |
| 4.1.1 Delimitación de zona de estudio.....   | 11 |
| 4.1.2 Identificación de cuencas aferentes pertenecientes a la cuenca baja del río Sensunapán.....  | 11 |
| 4.2 Recopilación y procesamiento de información hidrometereológica de la cuenca.....   | 13 |
| 4.2.1 Recopilación de información hidrometereológica de la cuenca.....   | 13 |
| 4.2.2 Procesamiento de información hidrometereológica de la cuenca.....  | 14 |
| 4.3 Etapa 3. Modelización Hidrológica con Hydro-BID.....   | 15 |
| 4.3.1 Modelación Hidrológica con Hydro-BID.....  | 15 |
| 4.3.2 Etapa 3.1 Calibración inicial del modelo.....  | 21 |
| 4.4 Etapa 4. Generación de escenarios de cambio climático.....   | 23 |
| 5. RESULTADOS.....   | 26 |
| 5.1 Parametrización y calibración del modelo.....  | 26 |
| 5.2 Modelado de escenarios de cambio climático.....  | 31 |
| 6. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....  | 35 |
| 6.1 Modelo hidrológico para el periodo 2014-2022.....  | 35 |
| 6.2 Escenarios de cambio climático.....  | 38 |
| 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....   | 39 |
| 8. BIBLIOGRAFÍA.....   | 40 |

## ÍNDICE DE TABLAS

|   |    |
|---|----|
| Tabla 1. Valores de $\Delta P$ , $\Delta\sigma_P$ , RWAF y $\Delta\sigma_T$ en 26 regiones a nivel mundial.....   | 5  |
| Tabla 2. Características de la red hídrica de la cuenca río Sensunapán. ....  | 9  |
| Tabla 3. Identificación de cuencas aferentes y coordenadas de centroide de cada una según COMID.....  | 12 |
| Tabla 4. Estaciones hidrometeorológicas utilizadas para el análisis. ....   | 14 |
| Tabla 5. Ecuaciones utilizadas por el modelo GWLF. ....   | 19 |
| Tabla 6. Parámetros de entrada del modelo Hydro-BID.....  | 21 |
| Tabla 7. Variables estadísticas de aceptabilidad.....   | 22 |
| Tabla 8. Precipitación promedio mensual en El Salvador para el periodo 1995-2014.....   | 25 |
| Tabla 9. Datos de anomalías de precipitación y temperatura en El Salvador proyectadas para el periodo 2020-2039 para los diversos escenarios de cambio climático..... | 25 |
| Tabla 10. Multiplicador para cada escenario de cambio climático. ....   | 26 |
| Tabla 11. Valores asignados en la parametrización del modelo para la cuenca aferente 212058100.....   | 26 |
| Tabla 12. Estadística de aceptación de la parametrización del modelo. ....  | 27 |
| Tabla 13. Valores de calibración para el modelo de la cuenca aferente 212058100.....  | 28 |
| Tabla 14. Estadística de validación de calibración del modelo.....  | 29 |

## ÍNDICE DE ECUACIONES

|   |    |
|---|----|
| Ecuación 1. Ecuación de Descenso de Gradiente Estocástico (SGD). .... | 15 |
|---|----|

## ÍNDICE DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 1. Mapa de índice de riesgo climático global. Fuente: Germanwatch y Munich Re NatCatSERVICE. Citado por: (GWP Centroamérica, 2017)..... | 6  |
| Figura 2. Localización de cuenca del río Sensunapán. (Fuente: Elaboración propia).....   | 8  |
| Figura 3. Cuenca del río Sensunapán. (Fuente: Elaboración propia) ....   | 8  |
| Figura 4. Red hídrica principal de la cuenca río Sensunapán. Fuente: (USAID, 2009). ....   | 10 |
| Figura 5. Identificación de cuencas aferentes. (Fuente: Elaboración propia) ....   | 13 |
| Figura 6. Organización de archivos climatológicos en carpeta "Climate". ....   | 16 |
| Figura 7. Organización de archivos de caudales en carpeta "Flow".....  | 16 |
| Figura 8. Representación esquemática del modelo de GWLF. Fuente: (Moreda et al., 2014) .....   | 18 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 9. Estaciones con datos de caudal utilizados en el modelamiento. Fuente: elaboración propia.....                           | 23 |
| Figura 10. Curvas de duración de flujo obtenidas en la parametrización del modelo. ....   | 27 |
| Figura 11. Registros diarios de caudal para valores de parametrización. ....  | 28 |
| Figura 12. Curvas de duración de flujo obtenidas con la calibración del modelo.....   | 30 |
| Figura 13. Registros diarios de caudal para valores de calibración de modelo.....   | 30 |
| Figura 14. Caudales anuales modelados vs caudales observados con la calibración del modelo.....                                   | 31 |
| Figura 15. Balance hídrico del escenario actual vs los escenarios de cambio climático. ....                                       | 32 |
| Figura 16. Variación de temperatura según los escenarios de cambio climático. ....  | 33 |
| Figura 17. Percolación generada por cada escenario de cambio climático. ....  | 34 |
| Figura 18. Caudales generados por escenarios de cambio climático.....   | 34 |
| Figura 19. Precipitación media en las cuencas de la región hidrográfica Sonsonate-Bandera. Fuente: (MARN, 2012). ....             | 36 |
| Figura 20. Mapa de precipitación media anual (1971-2001). Fuente: (MARN, 2012). ....  | 36 |
| Figura 21. Evapotranspiración en cuencas de la región hidrográfica Sonsonate-Bandera. Fuente: (MARN, 2012). ....                  | 37 |
| Figura 22. Mapa de evapotranspiración anual (1971-2001). Fuente: (MARN, 2012). ....   | 37 |
| Figura 23. Cambios de temperatura media anual por el ensamble multimodelo para los períodos 2021-2050. Fuente: (MARN, 2017). .... | 38 |

## **TABLA DE ABREVIATURAS**

|        |   |
|--------|---|
| AHD:   | Analytical Hydrology Dataset.                                 |
| AWC:   | Available Water Content.                                      |
| BID:   | Banco Interamericano de Desarrollo.                           |
| CMIP5: | Coupled Model Intercomparison Project, 5 <sup>th</sup> Phase. |
| CMIP6: | Coupled Model Intercomparison Project, 6 <sup>th</sup> Phase. |
| CN:    | Número de Curva.  |
| COMID: | Catchment Identifier.   |
| CSV:   | Comma Separated Values.                                       |
| ESRI:  | Environmental Systems Research Institute.                     |
| ETP:   | Evapotranspiración Potencial.                                 |
| GIS:   | Geographic Information Systems.                               |
| GMAO:  | Global Modeling and Assimilation Office.                      |
| GWLF:  | Generalized Watershed Loading Function.                       |
| GWLF:  | Generalized Watershed Loading Functions.                      |
| GWP:   | Global Water Partnership.                                     |
| IDEAM: | Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. |
| IQR:   | Interquantil Range.   |
| LAC:   | Latin America and Caribbean.                                  |
| LaRC:  | Langley Research Center.                                      |
| MARN:  | Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales.            |
| MLP:   | Multi-Layer Perceptron.                                       |
| NASA:  | National Aeronautics and Space Administration.                |
| QGIS:  | Quantum Geographic Information System.                        |
| RCCI:  | Regional Climate Change Index.                                |
| SGD:   | Stochastic Gradient Descent.                                  |
| USAID: | United States Agency for International Development            |

## **RESUMEN**

En el presente estudio tiene como propósito fortalecer el conocimiento de los recursos hídricos superficiales, con el fin de poder aportar capacidad de decisión, en la planificación y gestión de los mismos a futuro, siendo conscientes del valor de dichos recursos.

Para ello se desarrolló un modelo hidrológico de la cuenca del río Sensunapán o Grande de Sonsonate, ubicada en El Salvador. Se hizo uso del modelo Hydro-BID, lo que permitió realizar la modelación que incluyó 4 fases primarias, iniciando con la delimitación de la zona de estudio e identificación de las cuencas aferentes pertenecientes a la cuenca, para luego realizar una recopilación de datos hidrometeorológicos que posteriormente fueron procesados utilizando herramientas de *Machine Learning* como la librería de *Python*, *Scikit-Learn*. Dentro de la tercera etapa se realizó la parametrización y calibración del modelo hidrológico, utilizando la información obtenida en las primeras dos etapas, para finalmente realizar el modelamiento de escenarios de cambio climático.

## **ABSTRACT**

The purpose of this study is to strengthen the knowledge of surface water resources, to be able to provide decision-making capacity in the planning and management of them in the future, being aware of the value of said resources.

For this purpose, a hydrological model of the Sensunapán or Grande de Sonsonate river basin, located in El Salvador, was developed. The Hydro-BID model was used, which allowed the modeling to be carried out that included 4 primary phases, beginning with the delimitation of the study area and identification of the afferent basins belonging to the basin, and then to carry out a compilation of hydrometeorological data that They were subsequently processed using Machine Learning tools such as the Python library, Scikit-Learn. Within the third stage, the parameterization and calibration of the hydrological model was carried out, using the information obtained in the first two stages, to finally carry out the modeling of climate change scenarios.

## 1. INTRODUCCIÓN

Centroamérica dispone de una gran riqueza hídrica suficiente para satisfacer sus necesidades, pero aún presenta déficit en el acceso al agua en general. Es una zona altamente vulnerable a la variabilidad climática y al cambio climático. Esto pone en riesgo las oportunidades de desarrollo y exige mejorar las capacidades de convertir estas amenazas en oportunidades; reducir los impactos sociales, económicos y ambientales. (GWP Centroamérica, 2017)

Esta riqueza hídrica urge de modelos de gestión del agua que permitan el uso eficiente como la conservación. Las aguas subterráneas y superficiales tienen débiles mecanismos de control, protección y conservación. Además, aún no se cuantifican los aportes de los bienes naturales en términos macroeconómicos, lo que limita las posibilidades de alcanzar la seguridad hídrica. (GWP Centroamérica, 2017)

La cuenca del río Grande o Sensunapán se encuentra en el departamento de Sonsonate que tiene mayor parte sobre toda el área de la cuenca y en menor medida los departamentos de Ahuachapán y Santa Ana. Por su tamaño, la cuenca se suele dividir en tres zonas principales (Dirección General del Observatorio Ambiental, 2012):

- Parte alta: que se extiende al noreste de Sonsonate desde las estribaciones del volcán de Izalco y el Cerro Verde a una altura de 2.000 msnm; presentando extensas áreas de cultivos de café.
- Parte media: se extiende hacia el oeste pasando por las cimas de una serie de estructuras volcánicas extintas con alturas que oscilan entre los 1.900 y 1.700 msnm; presentando áreas extensas de cultivos de café y algunas zonas urbanas.
- Parte baja: que se extiende sobre una extensa área de colinas en el que se unen una serie de ríos que corren en un patrón de drenaje subparalelo y desembocan en el río Grande de Sonsonate. El uso de suelos es utilizado en su mayoría con la explotación de cultivos y pastos, incluyendo extensiones considerables de caña de azúcar.

El comportamiento de la escorrentía superficial en la cuenca del río Sensunapán presenta muy buenas características, esto debido a una buena drenabilidad natural tanto interna como externa por lo que conforma áreas de infiltración de agua; además de presentar un 83% de uso de suelo no conflictivo y que no promueven grandes cantidades de escorrentía superficial, misma que tienden a incrementar los caudales de la red hídrica.

La dinámica de los sistemas hídricos es compleja e involucra una alta diversidad de



componentes. La modelación hidrológica se constituye en una valiosa herramienta para mejorar el conocimiento de los sistemas hídricos con el propósito de dar soporte a la toma de decisiones sobre las acciones de gestión integral del recurso hídrico y cubre un amplio espectro de aplicaciones (IDEAM, 2022).

En la región de América Latina y el Caribe (LAC), cambios en los patrones de precipitación producirán lluvias más intensas en algunas áreas y sequía en otras. Tormentas más frecuentes y violentas podrían causar daños a la infraestructura y sobrecargar los sistemas de drenaje, mientras que la disminución de lluvias causaría estrés hídrico al mismo tiempo que aumentos en el nivel del mar también pueden amenazar los acuíferos costeros con contaminación salina. En las regiones montañosas, la pérdida de agua almacenada en los glaciares puede causar reducción a largo plazo en las corrientes de ríos y los procesos de recarga de aguas subterráneas, resultando en estrés del suministro de agua para las personas, la agricultura y los ecosistemas, así como también una capacidad de generación hidroeléctrica reducida. La energía hidroeléctrica es la principal fuente de electricidad en la mayoría de países latinoamericanos y está en gran riesgo por cambios en los caudales y la disponibilidad de aguas. (Moreda et al., 2014)

Hydro-BID utiliza la estructura de datos y las topologías de red de cuencas y corrientes de la Base de Datos de Hidrología Analítica (AHD, por sus siglas en inglés). 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. (Moreda et al., 2014)

Teniendo en cuenta lo antes mencionado el presente trabajo se enfoca en tener un conocimiento más amplio sobre el comportamiento de la cuenca del río Sensunapán, tanto de las condiciones actuales como de su probable comportamiento en el futuro, bajo los efectos de escenarios de cambio climático, a través de la modelización hidrológica y de escenarios de cambio climático con el Modelo Hydro-BID.

## 2. OBJETIVOS

### 2.1 Objetivo general

- Generar un modelo hidrológico y de escenarios de cambio climático, con base en la caracterización de la cuenca del río Sensunapán (Sonsonate, El Salvador), con la utilización del software Hydro-BID.

### 2.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar la cuenca del río Sensunapán.
- Calibrar el modelo hidrológico de la cuenca del río Sensunapán.
- Analizar escenarios de cambio climático y su afectación en la cuenca del río Sensunapán.

## 3. ANTECEDENTES

La alteración del ciclo hidrológico prevista como parte del calentamiento global continúa y se manifestará en diferentes regiones (Stocker et al, 2001). Este efecto ya es evidente en magnitud global, en donde la precipitación ha aumentado en medias y altas latitudes y por el contrario disminuyendo en la zonas del subtrópico (Folland et al., 2001)

Centroamérica es la región que se marca como el principal “*Hot-Spot*” (punto caliente) emergente en el trópico, en dicha región se presentan las aportaciones más significativas sobre el Índice Regional de Cambio Climático (RCCI, por sus siglas en inglés) (Tabla 1). En donde el RCCI es definido por cuatro variables (Giorgi, 2006):

- Factor de Amplificación de Calentamiento Regional (RWAF, por sus siglas en inglés).
- Cambio de la Precipitación Media Regional ( $\Delta P$ , %).
- Cambio de variabilidad interanual de temperatura del aire en la superficie regional ( $\Delta\sigma_T$ , %).
- Cambio de variabilidad interanual de precipitación regional ( $\Delta\sigma_P$ , %).

Las aportaciones se generan por una proyección de una disminución de en las precipitaciones ( $\Delta P = -9,44\%$  en periodos de lluvia y  $\Delta P = -17,34\%$  en periodos secos) y un aumento en la variabilidad de las precipitaciones ( $\Delta\sigma_P = 15,20\%$  en periodo de lluvia y  $\Delta\sigma_P = 26,67\%$  en periodos secos) (Giorgi, 2006).

**Tabla 1.** Valores de  $\Delta P$ ,  $\Delta\sigma_P$ , RWF y  $\Delta\sigma_T$  en 26 regiones a nivel mundial.

| Region | Season       | $\Delta P$ , % | $\Delta\sigma_P$ % | RWF      | $\Delta\sigma_T$ % | Season       | $\Delta P$ , % | $\Delta\sigma_P$ % | RWF      | $\Delta\sigma_T$ % |
|--------|--------------|----------------|--------------------|----------|--------------------|--------------|----------------|--------------------|----------|--------------------|
| NEU    | WS (May–Oct) | 0.85 (0)       | 17.39 (2)          | 1.13 (1) | 15.09 (4)          | DS (Nov–Apr) | 14.40 (2)      | 6.69 (1)           | 1.43 (2) | -19.45 (4)         |
| MED    | WS (Oct–Mar) | -9.73 (1)      | 24.94 (4)          | 1.09 (0) | -3.43 (0)          | DS (Apr–Sep) | -21.58 (4)     | 39.99 (4)          | 1.47 (2) | 15.25 (4)          |
| NEE    | WS (May–Oct) | 6.02 (1)       | 23.23 (4)          | 1.34 (2) | 4.19 (0)           | DS (Nov–Apr) | 20.07 (4)      | 16.71 (2)          | 1.93 (4) | -12.40 (2)         |
| NAS    | WS (May–Oct) | 11.40 (2)      | 14.69 (2)          | 1.39 (2) | 3.39 (0)           | DS (Nov–Apr) | 27.27 (4)      | 9.41 (1)           | 1.96 (4) | 5.28 (1)           |
| CAS    | WS (Nov–Apr) | -2.08 (0)      | 21.89 (4)          | 1.29 (1) | 2.02 (0)           | DS (May–Oct) | -9.26 (1)      | 16.13 (2)          | 1.55 (4) | 4.31 (0)           |
| TIB    | WS (Apr–Sep) | 7.94 (1)       | 3.15 (0)           | 1.42 (2) | 3.00 (0)           | DS (May–Oct) | 15.93 (4)      | 12.62 (2)          | 1.54 (4) | 3.61 (0)           |
| EAS    | WS (Apr–Sep) | 8.20 (1)       | 9.81 (1)           | 1.20 (1) | 3.03 (0)           | DS (Oct–Mar) | 6.87 (1)       | 1753 (2)           | 1.29 (1) | 2.09 (0)           |
| SAS    | WS (May–Oct) | 11.16 (2)      | 2.23 (0)           | 1.09 (0) | 4.89 (0)           | DS (Nov–Apr) | -2.28 (0)      | 8.82 (1)           | 1.31 (2) | 9.99 (1)           |
| SEA    | WS (Apr–Sep) | 6.84 (1)       | 12.24 (2)          | 0.95 (0) | -2.95 (0)          | DS (Oct–Mar) | 5.84 (1)       | 20.26 (4)          | 0.93 (0) | 14.97 (2)          |
| NAU    | WS (Nov–Apr) | 3.78 (0)       | -1.07 (0)          | 1.20 (1) | 8.61 (1)           | DS (May–Oct) | -11.80 (2)     | 10.99 (2)          | 1.24 (1) | 3.96 (0)           |
| SAU    | WS (May–Oct) | -13.06 (2)     | 20.52 (4)          | 1.00 (0) | 14.81 (2)          | DS (Nov–Apr) | 2.90 (0)       | 5.58 (1)           | 1.09 (0) | 8.08 (1)           |
| SAH    | WS (Nov–Apr) | -17.11 (4)     | 19.71 (2)          | 1.28 (1) | 7.36 (1)           | DS (May–Oct) | -2.34 (0)      | 2.80 (0)           | 1.48 (2) | 5.20 (1)           |
| WAF    | WS (May–Oct) | 1.01 (0)       | 6.11 (1)           | 1.23 (1) | 6.88 (1)           | DS (Nov–Apr) | 0.52 (0)       | 11.87 (2)          | 1.25 (1) | 12.56 (2)          |
| EAF    | WS (May–Oct) | 4.45 (0)       | 2.01 (0)           | 1.22 (1) | 10.89 (2)          | DS (Nov–Apr) | 10.25 (2)      | 1.92 (0)           | 1.21 (1) | 1.34 (0)           |
| EQF    | WS (Feb–Jul) | 12.00 (2)      | -3.85 (0)          | 1.11 (1) | 7.26 (1)           | DS (Aug–Jan) | 12.64 (2)      | -7.41 (1)          | 1.09 (0) | 2.69 (0)           |
| SQF    | WS (Nov–Apr) | 1.80 (0)       | 20.74 (4)          | 1.18 (1) | 15.99 (4)          | DS (May–Oct) | -7.18 (1)      | 4.63 (0)           | 1.28 (1) | 12.17 (2)          |
| SAF    | WS (Oct–Mar) | -0.67 (0)      | -4.31 (0)          | 1.21 (1) | -6.67 (1)          | DS (Apr–Sep) | -11.61 (2)     | 14.32 (2)          | 1.24 (1) | 5.04 (1)           |
| ALA    | WS (Jun–Nov) | 13.47 (2)      | 3.28 (0)           | 1.35 (2) | -3.86 (0)          | DS (Dec–May) | 18.72 (4)      | -2.12 (0)          | 1.80 (4) | -5.51 (1)          |
| GRL    | WS (Jun–Nov) | 13.58 (2)      | 1.67 (0)           | 1.45 (2) | -14.96 (2)         | DS (Dec–May) | 20.48 (4)      | 9.24 (1)           | 1.85 (4) | -5.37 (1)          |
| WNA    | WS (Oct–Mar) | 5.48 (1)       | 7.09 (1)           | 1.27 (1) | -6.42 (1)          | DS (Apr–Sep) | -6.71 (1)      | 8.63 (1)           | 1.49 (2) | 7.10 (1)           |
| CNA    | WS (Apr–Sep) | -1.39 (0)      | 18.80 (2)          | 1.49 (2) | 10.37 (2)          | DS (Oct–Mar) | 4.39 (0)       | 6.68 (1)           | 1.37 (2) | -8.98 (1)          |
| ENA    | WS (Apr–Sep) | 4.02 (0)       | 19.18 (2)          | 1.34 (2) | 8.58 (1)           | DS (Oct–Mar) | 11.38 (2)      | 11.99 (2)          | 1.41 (2) | -12.18 (2)         |
| CAM    | WS (May–Oct) | -9.44 (1)      | 15.20 (2)          | 1.24 (1) | 6.65 (1)           | DS (Nov–Apr) | -17.34 (4)     | 26.67 (4)          | 1.28 (1) | 7.63 (1)           |
| AMZ    | WS (Nov–Apr) | 4.02 (0)       | 1.81 (0)           | 1.16 (1) | 3.73 (0)           | DS (May–Oct) | -4.49 (0)      | 16.61 (2)          | 1.32 (2) | 9.39 (1)           |
| CSA    | WS (Oct–Mar) | 3.90 (0)       | 8.06 (1)           | 1.11 (1) | 4.44 (0)           | DS (Apr–Sep) | -2.52 (0)      | 17.67 (2)          | 1.04 (0) | 5.74 (1)           |
| SSA    | WS (Apr–Sep) | -0.33 (0)      | 8.03 (1)           | 0.71 (0) | -12.56 (2)         | DS (Oct–Mar) | -10.02 (2)     | 9.70 (1)           | 0.80 (0) | 4.82 (0)           |

Fuente: (Giorgi, 2006).

El concepto de los “*Hot-Spot*” de cambio climático se pueden abordar desde el punto de vista de la vulnerabilidad o de la respuesta climática de una región. Los “*Hot-Spot*” por lo tanto, son definidos como una región en la que los impactos potenciales del cambio climático pueden ser particularmente pronunciados, tanto en el ambiente como en los diferentes sectores activos de la sociedad. (Giorgi, 2006)

Los efectos acumulativos del calentamiento y los cambios en las precipitaciones son integrados por las cuencas para producir cambios en la intensidad, duración y frecuencia tanto de sequías como de inundaciones. El Salvador es uno de los países de la región centroamericana que presenta una alta vulnerabilidad a los impactos del cambio climático, El Salvador tiene el sistema fluvial más grande de Centroamérica, los sistemas hídricos son cruciales en diversos sectores de desarrollo, tales como la agricultura, la construcción, industria, abastecimiento poblacional y sobre todo de manera primaria por su potencial de generación eléctrica, ya que la generación eléctrica del país está basada, en gran medida, en la utilización de los cuerpos de agua. Es por ello que los cambios en dichos sistemas

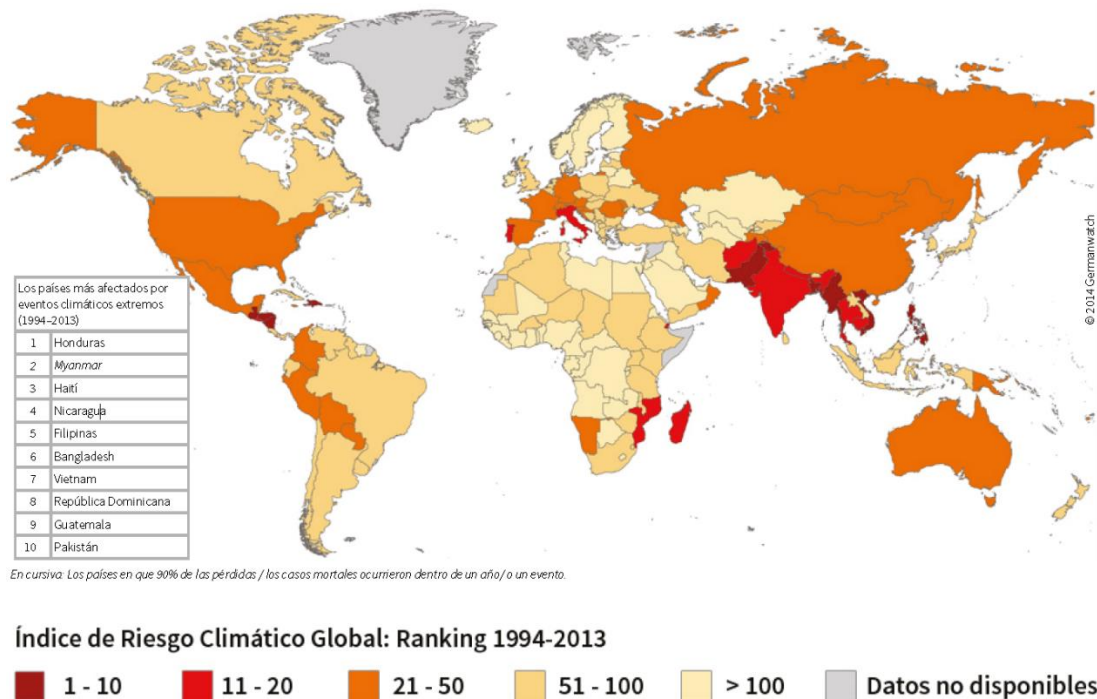
generarían severos impactos (Maurer et al, 2009).

En Centroamérica, las cuencas hidrográficas se caracterizan por un estado de deterioro y degradación, esto debido a las prácticas inadecuadas de manejo y uso de la tierra, consideradas en su mayoría como críticas (Ramos Peñate, 2016).

Centroamérica es el puente natural de las Américas; bañada por los océanos Pacífico y Atlántico, así como volcanes y montañas parte del Cinturón de Fuego del Pacífico. Es una de las regiones más diversas del mundo, con 11 eco regiones de agua dulce, pero está expuesta a los impactos de los fenómenos hidroclimatológicos extremos y a los efectos de la variabilidad climática y el cambio climático (GWP Centroamérica, 2017).

Sin bien es cierto, El Salvador no se encuentra dentro de los 10 países más afectados por eventos climáticos extremos entre 1994 y 2013 (ver Figura 1), según AQUASTAT, citado por: (GWP Centroamérica, 2017), El Salvador tiene mayor dependencia de recursos hídricos externos, esto como consecuencia de la diferencias de distribución temporal y espacial del recurso hídrico entre zonas y países.

Para el caso de la región centroamericana se tiene que el 70% del recurso se encuentra en la zona del Atlántico, donde sólo vive el 30% de la población mientras que en el Pacífico (sector en donde se ubica El Salvador) vive el 70% de la población y solo se ubica un 30% del recurso hídrico (GWP Centroamérica, 2017).



**Figura 1.** Mapa de índice de riesgo climático global. Fuente: Germanwatch y Munich Re NatCatSERVICE. Citado por: (GWP Centroamérica, 2017).

El cambio climático tendrá un impacto relevante sobre los balances de agua y los procesos hidrológicos. Los modelos pronostican, y en la actualidad se dispone de una gran variedad de metodologías y herramientas que permiten identificar y mejorar el conocimiento sobre los procesos hidrológicos inducidos por el cambio climático. (Hunink, 2013)

Según detalla (Cabrera, 2012) si bien los métodos y técnicas de medición de caudales y precipitaciones han evolucionado en el tiempo, también es cierto que otros componentes del ciclo hidrológico no han corrido la misma suerte pues se presentan bajo el suelo. La infiltración, la percolación profunda, el flujo superficial, el flujo subterráneo, entre otros, son procesos que se miden usualmente de manera indirecta y/o remota, lo que conlleva a una fuerte incertidumbre. Bajo este marco, los modelos hidrológicos se presentan como una necesidad y una herramienta para conocer mejor el funcionamiento y el comportamiento de los diferentes componentes del ciclo hidrológico.

El Banco Interamericano de Desarrollo (BID) ofrece asistencia financiera y técnica para proyectos de infraestructura en agua y saneamiento, irrigación, control de inundaciones, transporte y energía. Como parte de su compromiso el BID patrocina trabajos para desarrollar y aplicar un conjunto integrado de herramientas de simulación de cuencas conocidas como Hydro-BID. El sistema de simulación Hydro-BID incluye módulos de análisis hidrológico y climático para estimar la disponibilidad (volúmenes y caudales) de agua dulce a escalas regional, de cuencas y de sub-cuencas. (Moreda et al., 2014)

La fase I de este esfuerzo produjo una versión operacional del Hydro-BID, en el que se generan salidas de información en forma de series de tiempo diarias de los flujos estimados para la localidad y el período escogidos. (Moreda et al., 2014)

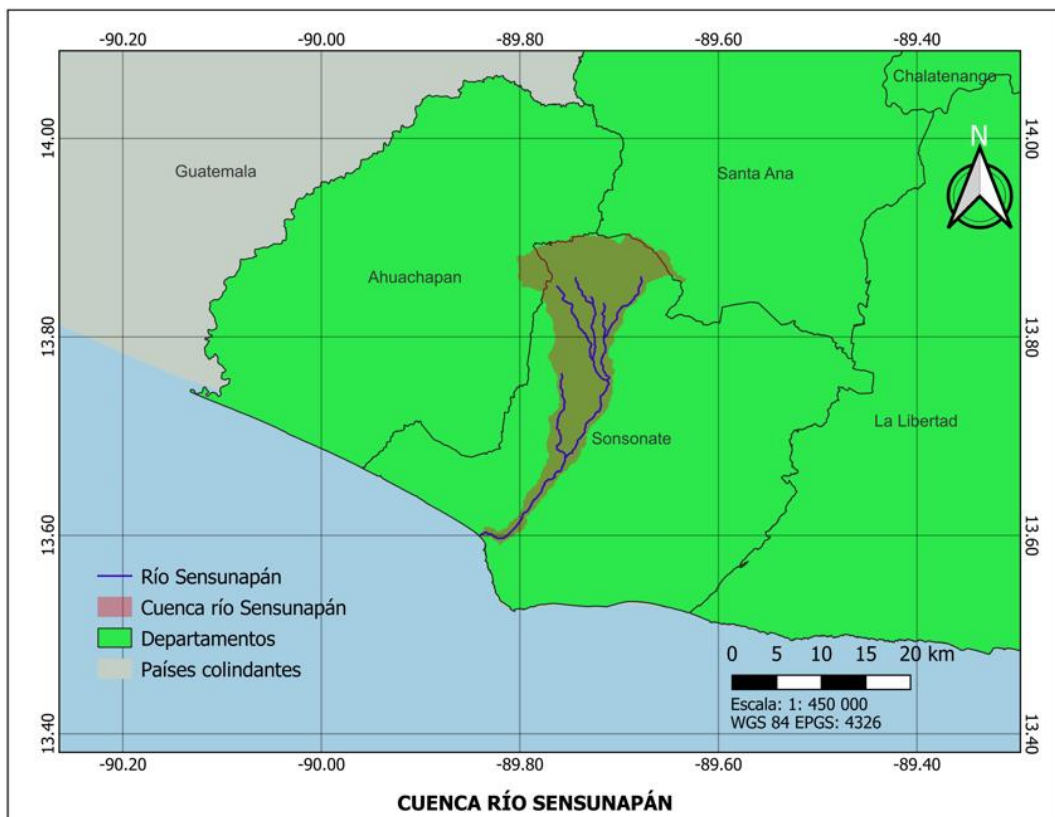
### **3.1 Zona de estudio**

El área de estudio correspondiente al presente trabajo, es la cuenca del río Sensunapán o Grande (Figura 2 y Figura 3), se ubica en el departamento de Sonsonate, incluyendo sectores en los departamentos de Santa Ana y Ahuachapán, entre los tres departamentos conforman el sector occidental de El Salvador.

La cuenca del río Grande con una superficie de 218,8715 km<sup>2</sup> y una elevación máxima de 2.090,00 metros sobre el nivel del mar con una elevación media de 1.045,00 msnm para finalmente tener una elevación mínima a nivel del mar en su desembocadura en el océano Pacífico.



**Figura 2.** Localización de cuenca del río Sensunapán. (Fuente: Elaboración propia)



**Figura 3.** Cuenca del río Sensunapán. (Fuente: Elaboración propia)

La cuenca del río Sensunapán esta limitada al Norte por los municipios de Ahuachapán, Atiquizaya y Chalchuapa, al Este por Izalco, al Oeste por San Pedro Puxtla y Santo Domingo de Guzmán, y finalmente al Sur por el Océano Pacífico.

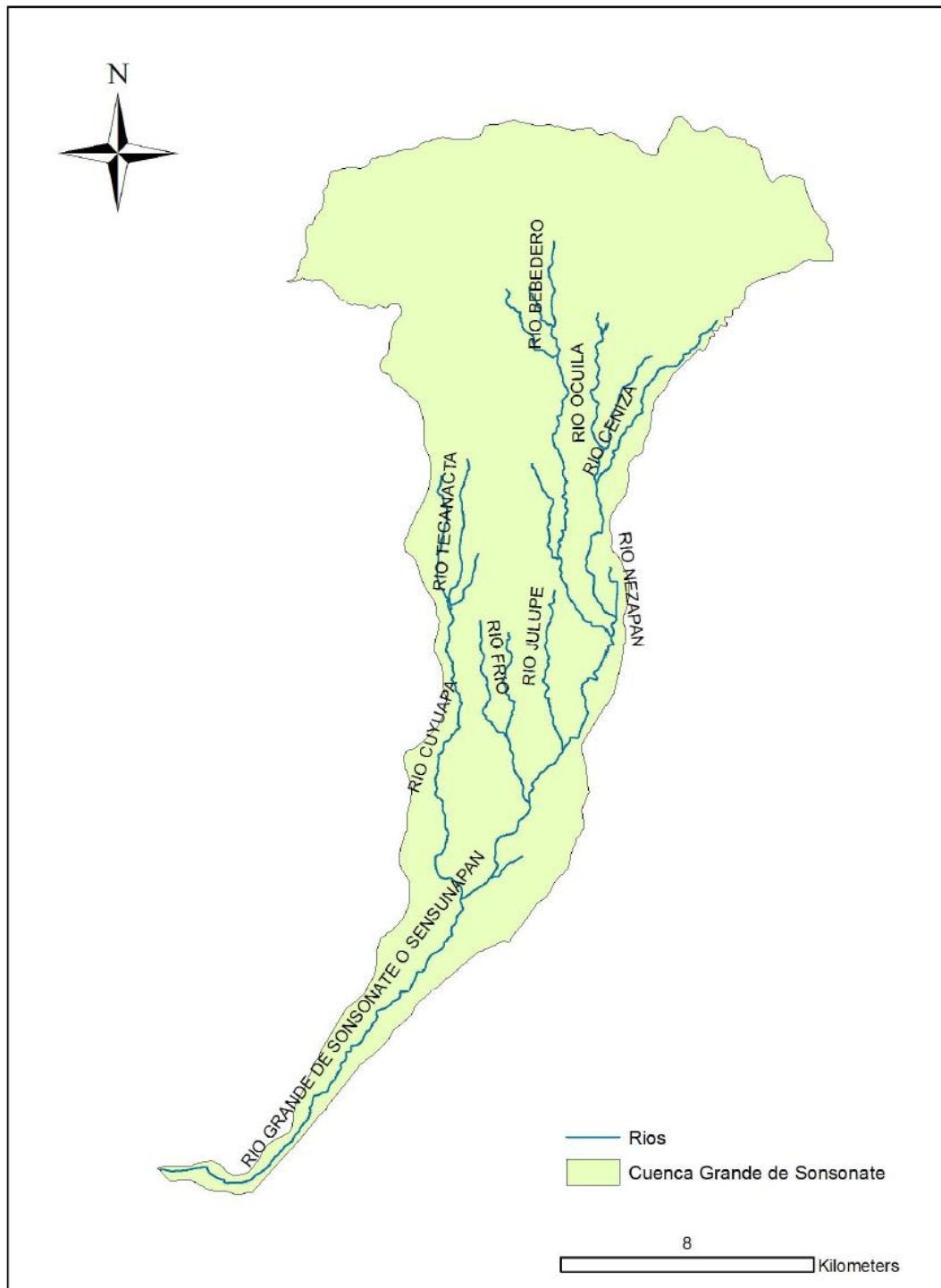
En su mayoría los suelos de la cuenca son clase III, IV y VI. Los primeros están constituidos por suelos moderadamente profundos, con texturas finas o muy gruesas, limitados por estratos de materia rocosa poco permeable y aluviones compactos; los segundos se ubican en zonas planas y son aptas para el cultivo semi intensivo y mecanizado de cultivos anuales y semipermanente, así como para los pastos intensivamente manejados y algunos cultivos permanentes; mientras que los terceros, son suelos poco profundos o superficiales, de texturas franco arenosas, franco arcillo arenosas o arcillo gravilosa y bajo nivel de fertilidad. (USAID, 2009).

La red hídrica (Tabla 2 y Figura 4) que conforma la cuenca del río Sensunapán consta de 16 cauces entre quebradas y ríos, donde el principal río es el Sensunapán o Grande de Sonsonate, los ríos tributarios tienen su recorrido de Norte a Sur; encontrándose sus nacimientos ubicados en los municipios de Juayua, Nahuizalco y Sonsonate. La parte alta de la cuenca constituye una zona de captación hídrica, la cual se encuentra protegida por cafetales y remanentes de vegetación natural. Las características de la red hídrica más relevantes de la cuenca son las siguientes (USAID, 2009):

**Tabla 2.** Características de la red hídrica de la cuenca río Sensunapán.

| <b>Características</b>            | <b>Descripción</b> |
|-----------------------------------|--------------------|
| <b>Forma de la cuenca</b>         | Hoja               |
| <b>Forma de la red de drenaje</b> | Dendrítica         |
|                                   | Río Santa Lucía    |
|                                   | Río Bebedero       |
|                                   | Río Ceniza         |
|                                   | Río Cuyuapa        |
|                                   | Río Frío           |
|                                   | Río Sensunapán     |
| <b>Red hídrica</b>                | Río Julupe         |
|                                   | Río Los Trozos     |
|                                   | Río Nezapán        |
|                                   | Río Ocuila         |
|                                   | Río Papaloate      |
|                                   | Río Los Milagros   |
|                                   | Río Tecanacta      |
| <b>Tipo de caudales</b>           | Superficial        |
| <b>Desembocadura</b>              | Océano Pacífico    |

Fuente: Adaptación de (USAID, 2009)



**Figura 4.** Red hídrica principal de la cuenca río Sensunapán. Fuente: (USAID, 2009).

En cuanto a la climatología de la zona de estudio se denomina como Tierra caliente, presentando las siguientes características: precipitación pluvial promedio 2.200 mm/año, según los registros establecidos por las estaciones ubicadas dentro de la zona de estudio; una temperatura promedio que varía de 18 a 25°C, con humedad relativa que oscila entre 82% y 90%. (USAID, 2009).



## **4. METODOLOGÍA**

El proceso de caracterización de la cuenca y su posterior modelamiento, se desarrolla en 4 etapas, tal como se presenta a continuación:

- Etapa 1: Delimitación de zona de estudio e identificación de cuencas aferentes pertenecientes a la cuenca del río Sensunapán.
- Etapa 2: Recopilación y procesamiento de información hidrometeorológica de la cuenca.
- Etapa 3: Modelización hidrológica con Hydro-BID.
  - Etapa 3.1: calibración de modelo hidrológico.
- Etapa 4: Generación de escenarios de cambio climático.

### **4.1 Etapa 1. Delimitación de zona de estudio e identificación de cuencas aferentes pertenecientes a la cuenca baja del río Sensunapán.**

#### **4.1.1 Delimitación de zona de estudio**

El área de estudio correspondiente al presente estudio es la cuenca del río Sensunapán (Figura 3), se ubica en el departamento de Sonsonate, incluyendo cierta superficie (mínima) en los departamentos de Santa Ana y Ahuachapán, todo ello ubicado en la zona occidental de El Salvador. La cuenca se encuentra limitada al Norte por los municipios de Ahuachapán, Atiquizaya y Chalchuapa, al Este por el municipio de Izalco, al Oeste por el municipio de San Pedro Puxtla y Santo Domingo de Guzmán y finalmente al Sur por el Océano Pacífico. La cuenca del río Sensunapán se encuentra entre las coordenadas 13° 43' 0" Norte y 89° 43' 0" Oeste con una superficie de 218,8715 km<sup>2</sup>, con una elevación máxima de 2.090 msnm y una elevación mínima de 0 msnm al desembocar al océano Pacífico, teniendo una elevación promedio de 1.045 msnm. En la cuenca, la precipitación media anual es aproximadamente de 2.200 mm/año (Ramos Peñate, 2016).

#### **4.1.2 Identificación de cuencas aferentes pertenecientes a la cuenca baja del río Sensunapán**

El modelo Hydro-BID cuenta con una Base de Datos de Hidrología Analítica (AHD, por sus siglas en inglés), para la región de América Latina y el Caribe, representando más de 299.000 cuencas y sus correspondientes segmentos fluviales, de igual manera las herramientas AHD están diseñadas para ayudar a los usuarios con la visualización y navegación en las líneas de flujo y cuencas de la AHD en la aplicación de escritorio Quantum GIS (QGis). Las

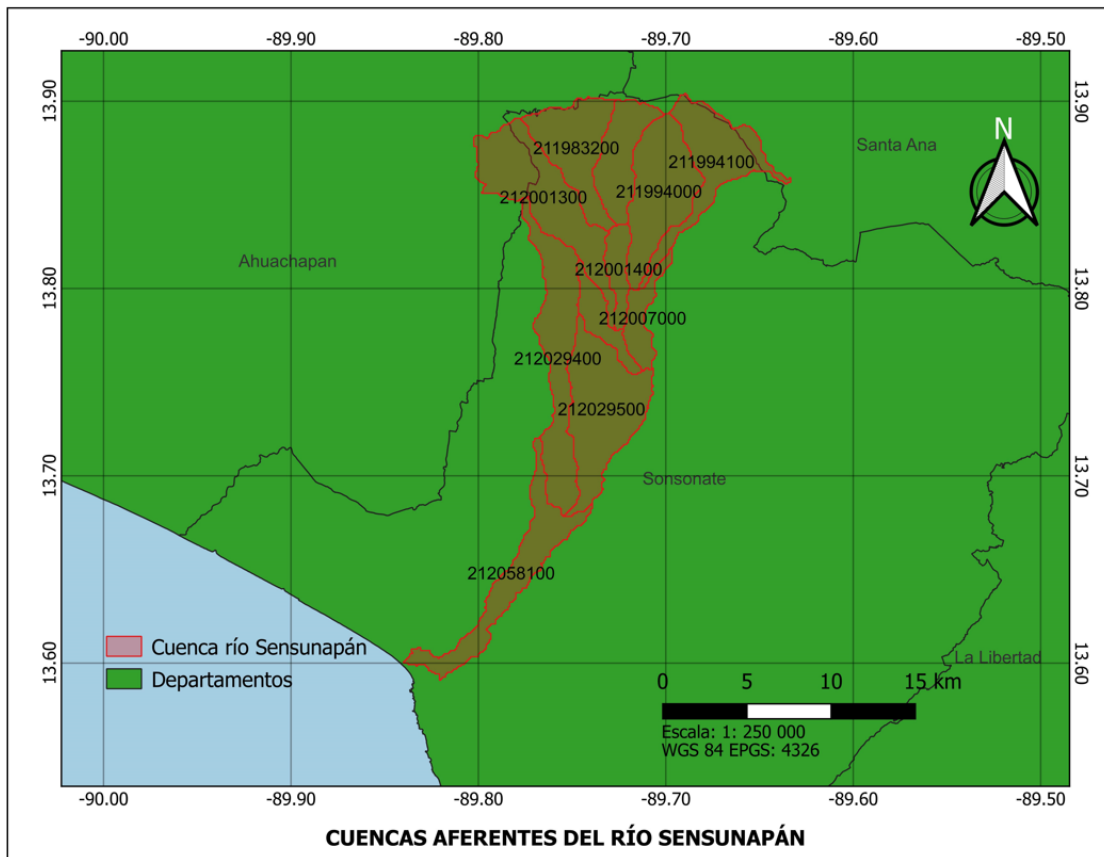
herramientas cuentan con menús simples que permiten a los usuarios escoger cuales características quieren utilizar y luego mostrar la información de los resultados la selección (Moreda et al., 2014).

Para el caso de estudio, la AHD correspondiente a Centro América consiste de aproximadamente 37.000 cuencas y segmentos de corrientes. Al tener esta base datos en formatos “*Shapefile*” ESRI (Environmental Systems Research Institute) y tener un Plug-In para recursos GIS, esto permite una identificación de cuencas aferentes con la herramienta AHD Navigator, pudiendo salvar las características seleccionadas de la capa de geometría y la tabla AHDFlow como un nuevo archivo “*Shapefile*”, teniendo cada cuenca identificada con un COMID, que es un Identificador de Cuencas Único (Catchment Identifier) (Moreda et al., 2014).

Para la cuenca del río Sensunapán se cuenta con ciento cinco (11) subcuencas aferentes (Tabla 3), tomando como referencia el punto de drenaje de la cuenca, siendo en este caso la desembocadura del río Sensunapán en el océano Pacífico, en el COMID 212058100 (Figura 5).

**Tabla 3.** Identificación de cuencas aferentes y coordenadas de centroide de cada una según COMID.

| <b>Identificación de cuencas aferentes</b> |              |                |                 |
|--|--------------|----------------|-----------------|
| <b>Ítem</b>                                | <b>COMID</b> | <b>Latitud</b> | <b>Longitud</b> |
| 1  | 212058100    | 13.6478        | -89.7825        |
| 2  | 212006900    | 13.7834        | -89.7342        |
| 3  | 212029500    | 13.7354        | -89.7343        |
| 4  | 212029400    | 13.7624        | -89.7577        |
| 5  | 212001300    | 13.8485        | -89.7653        |
| 6  | 212007000    | 13.7839        | -89.7124        |
| 7  | 211994100    | 13.8674        | -89.6756        |
| 8  | 212001400    | 13.8101        | -89.7252        |
| 9  | 211983300    | 13.8704        | -89.7237        |
| 10   | 211994000    | 13.8516        | -89.7037        |
| 11   | 211983200    | 13.8749        | -89.7478        |



**Figura 5.** Identificación de cuencas aferentes. (Fuente: Elaboración propia)

## 4.2 Recopilación y procesamiento de información hidrometeorológica de la cuenca.

### 4.2.1 Recopilación de información hidrometeorológica de la cuenca.

El proceso de recopilación de datos se llevó a cabo, a través de petición directa al Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN) de El Salvador, es de mencionar que en El Salvador la información de registros históricos hidro-climatológicos no es de carácter público. Del MARN se obtuvieron información de registros históricos de precipitaciones en un intervalo de tiempo que va desde enero de 2012 hasta diciembre de 2022, para las cinco (5) estaciones que se presentan en la Tabla 4, para el caso de los datos de temperatura al no tener acceso a los registros del MARN, se utilizó información satelital extraída de la Administración Nacional Aeronáutica y del Espacio (NASA, por sus siglas en inglés) Centro de Investigación en Langley (LaRC, por sus siglas en inglés), del programa de Predicción de Recursos Energéticos Mundiales (POWER, por sus siglas en inglés), proyecto fundado a través del Programa de la NASA de Ciencia Terrestre y Ciencias Aplicadas. Dicha data fue obtenida de la versión Daily v2.4.3 el 2023/03/17. (NASA, 2023)

La información de temperatura, se obtuvo a partir del modelo MERRA-2 de la Oficina de Modelamiento y Asimilación Global (GMAO, por sus siglas en inglés). Los datos fueron

obtenidos para las cinco estaciones con las que se cuentan datos de precipitación, en un periodo temporal igual, desde enero de 2012 hasta diciembre 2022. (NASA, 2023)

Los datos de caudal se obtuvieron a través de petición directa al Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN) de El Salvador para el caso del presente estudio se obtuvieron los caudales de en estación Atalaya y la estación Sensunapán, en ambos casos los datos corresponden a un periodo dado entre el uno de mayo del 2014 al treinta y uno de diciembre de 2022.

**Tabla 4.** Estaciones hidrometereológicas utilizadas para el análisis.

| ID | Tipo de Estación | Nombre       | Parámetro |               |             | Ubicación (WGS84) |           |
|----|------------------|--------------|-----------|---------------|-------------|-------------------|-----------|
|    |                  |              | Caudal    | Precipitación | Temperatura | Latitud           | Longitud  |
| 1  | Metereológica    | Apaneca      |           | x             | x           | 13.8412           | -89.7980  |
| 2  | Hidrométrica     | Atalaya      | x         | x             | x           | 13.60095          | -89.82991 |
| 3  | Metereológica    | Izalco       |           | x             | x           | 13.75690          | -89.70300 |
| 4  | Metereológica    | Los Naranjos |           | x             | x           | 13.87630          | -89.67430 |
| 5  | Hidrométrica     | Sensunapán   | x         | x             | x           | 13.66020          | -89.76390 |

Fuente: Elaboración propia

#### 4.2.2 Procesamiento de información hidrometereológica de la cuenca.

Se realiza una limpieza y verificación de los datos obtenidos a través de una solicitud al Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN) de El Salvador, este proceso de limpieza y verificación es con el fin de detectar y corregir registros que pudieran presentar una inexactitud o no presentar información dentro del conjunto de datos.

Con ayuda de la herramienta “*Scikit-Learn*” en Python se ejecutaron análisis estadísticos, procurando identificar y modificar datos considerados como anómalos y al mismo tiempo complementar datos que pudieran no existir para periodos de tiempo determinados.

“*Scikit-Learn*” provee implementaciones del estado del arte de muchos algoritmos de “*Machine Learning*” conocidos, manteniendo una interface de fácil uso completamente integrado al lenguaje de programación Python (Pedregosa et. al, 2011).

Como primer punto de análisis se realiza un proceso de escalado de la información con la que se cuenta, utilizando el paquete “*Preprocessing data*”, teniendo en cuenta la presencia de valores atípicos o anómalos en los datos obtenidos, se ejecuta este proceso con la función “*Robust Scaler*” el cual remueve la mediana y escala los datos sobre la base del rango de

cuartiles (IQR: Interquantil Range), el cual es el rango entre el primer cuartil (25) y el tercer cuartil (75).

El centrado y el escalado se realizan de forma independiente en cada función mediante el cálculo de datos estadísticos relevantes en la muestra. Este proceso es necesario para los estimadores de “*Machine Learning*”, pues asegura tener datos homogéneos al momento de generar la regresión (Scikit-learn, 2023).

Luego se aplica un modelo de regresión utilizando el paquete “*Neural network models*” con la función “MLP” (Multi-Layer Perceptron) el cual es un algoritmo que toma como base la ecuación  $f(\cdot) = \mathbf{R}^m \rightarrow \mathbf{R}^o$  ejecutando en un conjunto de datos  $\mathbf{R}$ , en donde  $f$  representa la ecuación de aprendizaje del modelo de regresión,  $m$  es el número de dimensiones de entrada y  $o$  es el número de dimensiones de salida. Dado un conjunto de datos  $\mathbf{X} = \mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_m$  y un objetivo  $\mathbf{y}$ , “aprende” una función de aproximación no lineal ya sea para clasificación o para regresión. Para el caso del presente análisis se realiza para regresión el cual usa el cuadrado del error como función de pérdida, y el resultado de salida es un conjunto de datos de valores continuos.

La función MLP utiliza el Descenso de Gradiente Estocástico (SGD, por sus siglas en inglés) (Ecuación 1) con el que actualiza los parámetros usando el gradiente de la función de pérdida respecto al parámetro que necesita adaptación.

**Ecuación 1.** Ecuación de Descenso de Gradiente Estocástico (SGD).

$$w \leftarrow w - \eta \left( \alpha \frac{\partial R(w)}{\partial w} + \frac{\partial Loss}{\partial w} \right)$$

En donde  $\eta$  es la tasa de aprendizaje que controla el tamaño del paso en la búsqueda de espacio de los parámetros. Mientras que *Loss* es la función de pérdida utilizada para la red (Scikit-learn, 2023).

### **4.3 Etapa 3. Modelización Hidrológica con Hydro-BID.**

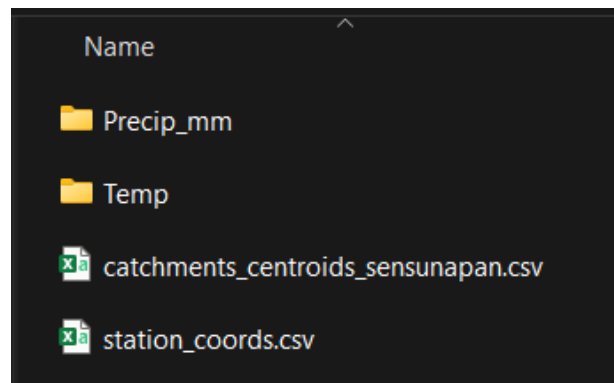
#### **4.3.1 Modelación Hidrológica con Hydro-BID**

La modelización parte del uso de la información hidrometeorológica debidamente procesada. La organización de los archivos es clave en la ejecución del modelo Hydro-BID, dichos archivos deben de estar en formato .CSV (Valores Separados por Coma, por su siglas en inglés). Se deben de presentar ordenados en una carpeta los datos de precipitación

(Precip\_mm) y otra carpeta que contenga los datos de temperatura (Temp), en las que se deberán de encontrar un archivo por cada estación, en ambos casos.

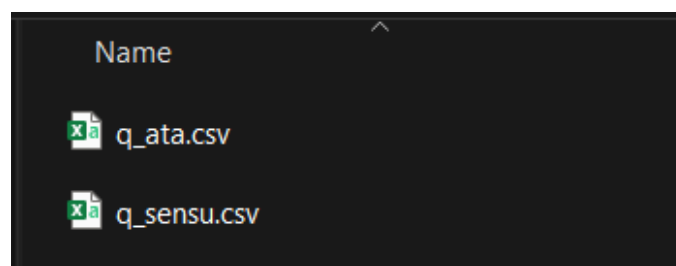
Para el caso del presente estudio se cuentan con cinco (5) archivos con datos de precipitación y una misma cantidad para datos de temperatura en un periodo que va desde el 1 de enero de 2012 hasta el 31 de diciembre de 2022.

A estas carpetas (de precipitación y temperatura) se deben añadir dos archivos en el mismo formato .CSV que serán los correspondientes a las coordenadas de las estaciones (Figura 6), tal como se presenta en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y un segundo archivo que contiene las coordenadas de los centroides de cada una de las cuencas aferentes, tal como se presenta en la Tabla 3.



**Figura 6.** Organización de archivos climatológicos en carpeta “Climate”.

De igual manera se introduce la información correspondiente a los puntos de medición de caudales, para el presente estudio Sensunapán y Atalaya. Los datos obtenidos son diarios para un periodo que comprendido entre el 1 de mayo de 2014 y el 31 de diciembre de 2022. Los datos son almacenados en archivos separados y con formato .CSV dentro de la carpeta “Flow” dentro de la estructura de carpetas del modelo Hydro-BID, tal como se presenta en la Figura 7.



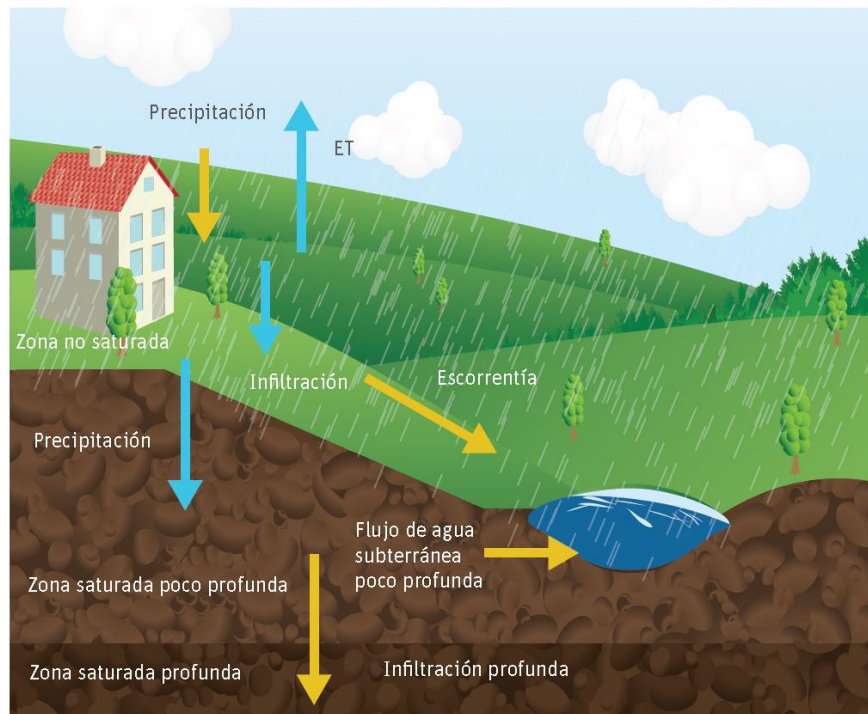
**Figura 7.** Organización de archivos de caudales en carpeta "Flow".

Hydro-BID está basado en el modelo GWLF (Funciones de carga de cuencas hidrográficas generalizadas, por sus siglas en inglés) el cual es un modelo combinado de parámetros de cuencas hidrográficas distribuidos/agrupados. (Rangarajan et. al, 2008)

El modelo de precipitación-escorrentía componente del modelo GWLF se aplica a unidades de cuencas pequeñas al tomar en consideración los usos de tierras y las condiciones del suelo dentro de la cuenca. La respuesta a cada uso de tierra en una cuenca dada es tratada por separado para generar un volumen de escorrentía estimado. El flujo que se genera de cada cuenca, incluyendo las contribuciones de aguas subterráneas poco profundas o flujo base, se dirige a través de las redes de corrientes definidas por la AHD. (Moreda et al., 2014)

En la Figura 8 se muestra una representación conceptual de una cuenca de captación con capas de suelo saturadas y no saturadas tal como se utiliza en el modelo GWLF.

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. 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 hacia el acuífero subterráneo más profundo. (Moreda et al., 2014)



**Figura 8.** Representación esquemática del modelo de GWLF. Fuente: (Moreda et al., 2014)

El modelo tiene la capacidad de análisis de diversos factores, tales como:

- Deshielo
- Evapotranspiración Potencial (ETP)
- Escorrentía
- Percolación
- Flujo

Las ecuaciones usadas para calcular cada componente se presentan a continuación (Tabla 5):



**Tabla 5.** Ecuaciones utilizadas por el modelo GWLF.

| Componente del modelo | Ecuación  | Observaciones  |
|-----------------------|---|--|
| Deshielo              | $SNO_t = SNO_{t-1} + R_t - SNO_{mlt}$                       | <p><b><math>SNO_t</math></b>: es el contenido de agua de la capa de nieve en un día dado.</p> <p><b><math>R_t</math></b>: es la cantidad de precipitación en un día.</p> <p><b><math>SNO_{mlt}</math></b>: cantidad de deshielo estimada como <math>SNO_{mlt} = 0.45T_t</math></p>   |
| ETP                   | $PET_t = \frac{0.021 H_t^2 e_t}{T_t + 273}$                 | <p><b><math>H_t</math></b>: número de horas de luz solar por día durante el mes que contenga el día.</p> <p><b><math>e_t</math></b>: es la presión de vapor de agua en saturación en milibars en el día <math>t</math>.</p> <p><b><math>T_t</math></b>: es la temperatura en el día <math>t</math> (°C).</p>   |
| Escorrentía           | $RO_t = \left( \frac{R_t - 0.2D_t}{R_t + 0.8D_t} \right)^2$ | <p><b><math>RO_t</math></b>: es la escorrentía (cm).</p> <p><b><math>R_t</math></b>: es la suma de lluvia y deshielo.</p> <p><b><math>D_t</math></b>: es el parámetro de detención, calculado de la siguiente forma:</p> $D_t = \frac{2540}{CN_t} - 25.4$ <p>Con <math>CN_t</math> es el número de curva asignado por uso de suelos y ajustado cada día.</p> |

| Componente del modelo | Ecuación  | Observaciones   |
|-----------------------|---|---|
| Percolación           | $U_{t+1} = U_t + R_t + M_t - Q_t - E_t - P_t$ $S_{t+1} = S_t + P_t - G_t - D_t$ | <p><b><math>U_t</math> y <math>S_t</math></b>: humedad del suelo en la zona no saturada y la zona de poca profundidad en el comienzo del día <math>t</math>.</p> <p><b><math>Q_t, E_t, P_t, G_t, D_t</math></b>: son la escorrentía de la cuenca, la evapotranspiración real, la percolación hacia la zona saturada poco profunda, el flujo/volumen de aguas subterráneas hacia el arroyo, y la infiltración hacia la zona saturada profunda, respectivamente, en el día <math>t</math> (cm).</p> |
| Flujo                 | $F_t = RO_t + G$  | <p><b><math>RO_t</math></b>: escorrentía.</p> <p><b><math>G</math></b>: flujo del agua subterránea.</p>   |

Fuente: adaptación de (Moreda et al., 2014)

Finalmente se procede a la configuración para realizar la modelación en donde se definen parámetros generales del modelo, como lo son el nombre del proyecto, la cuenca a modelar, periodo de modelación, periodo de calibración del modelo, para luego proceder con la parametrización del modelo. Se debe de tener en cuenta que al ejecutar por primera vez se tienen valores por defecto. Dichos parámetros y sus valores sugeridos se presentan a continuación en la Tabla 6:

**Tabla 6.** Parámetros de entrada del modelo Hydro-BID.

| <b>Parámetro</b>                               | <b>Descripción</b>  | <b>Valor sugerido</b> |
|--|---|-----------------------|
| <b>Número de curva (CN)</b>                    | Controla la cantidad inicial de abstracción y usada para calcular la detención.   | 1.0                   |
| <b>Cantidad de agua disponible (AWC)</b>       | Puede ser un solo valor aplicado a todas las cuencas o un multiplicador de los valores de las cuencas.  | 1.0                   |
| <b>Coefficiente R</b>                          | Coeficiente de recesión: puede ser un solo valor aplicado a todas las cuencas o un multiplicador de los valores de las cuencas.   | 0.01                  |
| <b>Permeabilidad</b>                           | Para determinar la infiltración profunda desde la capa saturada. Puede ser un solo valor aplicado a todas las cuencas o un multiplicador de los valores de las cuencas.                             | 0.005                 |
| <b>Factor de ET de la estación de cultivo</b>  | Factor de evapotranspiración durante la estación de cultivo. Puede ser un solo valor aplicado a todas las cuencas o un multiplicador de los valores de las cuencas.                                 | 1.0                   |
| <b>Factor de ET de la estación de latencia</b> | Factor de evapotranspiración durante la estación de latencia (cuando no se está cultivando). Puede ser un solo valor aplicado a todas las cuencas o un multiplicador de los valores de las cuencas. | 1.0                   |

Fuente: adaptación de (Moreda et al., 2014)

#### **4.3.2 Etapa 3.1 Calibración inicial del modelo**

La parametrización realizada a partir de valores sugeridos, tal como se presenta en la Tabla 6, permite tener una primera aproximación para realizar una calibración al modelo, se debe de tener en cuenta que la base de datos de Hydro-BID se encuentra parametrizada y pre-calibrada utilizando valores provenientes de bases de datos regionales, por esta razón el proceso de calibración y validación es necesario para garantizar que el modelo represente lo más correctamente posible la realidad. (Nalesso & Coli, 2017)

La calibración del modelo se basa en un ajuste de los siguientes parámetros:

- **Número de Curva:** parámetro usado para caracterizar el tipo de uso de suelo y representar la hidrología en el suelo. Un número de curva es asignado a cada sub-cuenca en la base de datos.
- **Contenido disponible de agua (AWC):** 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):** el coeficiente R caracteriza como agua subterránea cerca de la superficie contribuye a los caudales en los ríos después de un evento de grandes caudales.
- **Perdidas (Seepage):** es el intercambio entre agua subterráneas cerca de la superficie y las más profundas.

La calibración se verifica a través de las variables de error, la gráfica de series temporales y la curva de duración de flujo. (Nalesso & Coli, 2017)

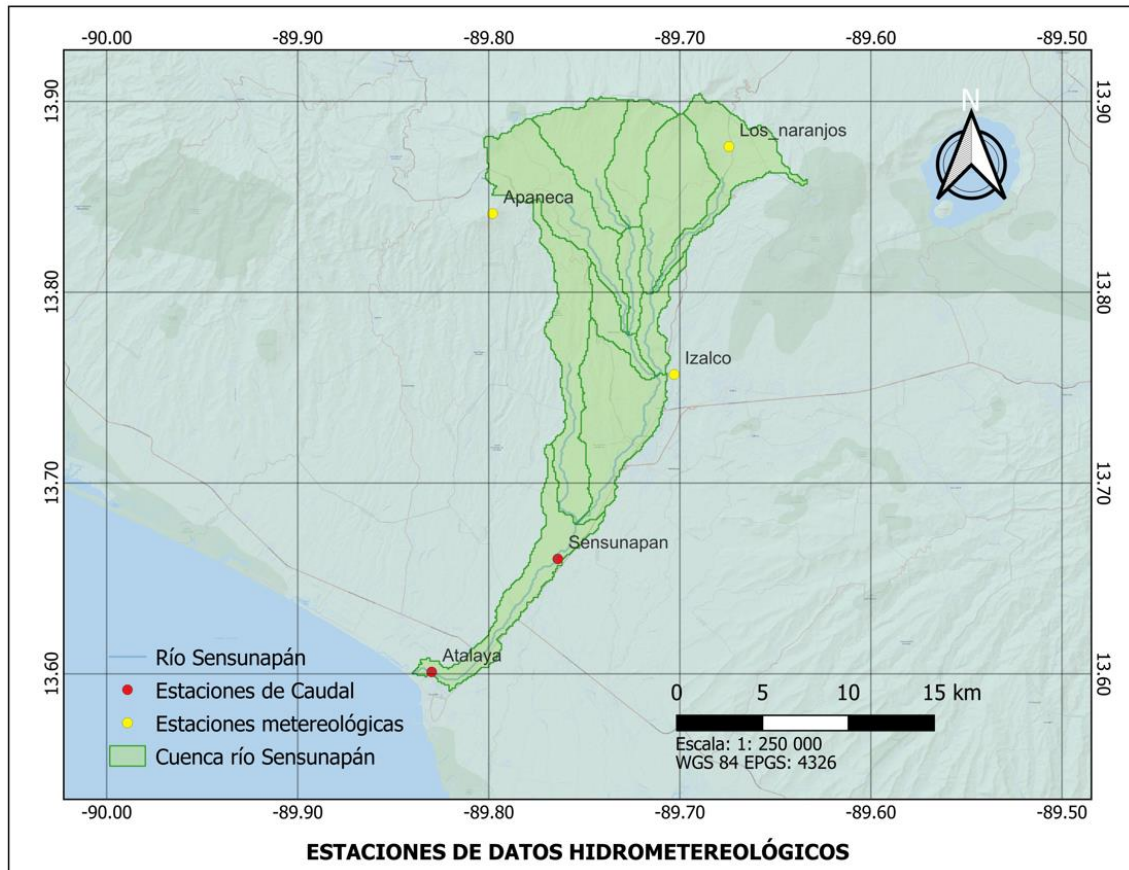
Para ello el BID presenta las variables estadísticas y sus rangos de aceptabilidad.

**Tabla 7.** Variables estadísticas de aceptabilidad.

| <b>Parámetro</b>  | <b>Descripción</b>   | <b>Valor sugerido</b> |
|---|--|-----------------------|
| <b>Overall Error</b>                                      | Indica la media del porcentaje de error entre los valores simulados y los valores observados.  | -30% a 30%            |
| <b>Correlation (r)</b>                                    | Analiza las desviaciones estándar de las series de tiempo de flujos observadas y simuladas.  | Cercano a 1           |
| <b>Modified Correlation Coefficient (r<sub>mod</sub>)</b> | Analiza las desviaciones estándar de las series de tiempo de flujos observadas y simuladas, aplicando un factor que relaciona los valores mínimos y los valores máximos. | Cercano a 1           |
| <b>Nash-Sutcliffe Efficiency Index (R<sup>2</sup>)</b>    | Analiza la magnitud de la relación entre las varianzas de los flujos simulados y las varianzas de los flujos observados.   | Cercano a 1           |

Fuente: (Nalesso & Coli, 2017)

En el presente estudio la calibración se realiza directamente utilizando la estación Sensunapán ubicada dentro del COMID 212058100, las estaciones de medición de caudal (2) se encuentran dentro del mismo COMID, siendo el COMID en el que se encuentra el punto de descarga de la cuenca del río Sensunapán (Figura 9).



**Figura 9.** Estaciones con datos de caudal utilizados en el modelamiento. Fuente: elaboración propia.

#### 4.4 Etapa 4. Generación de escenarios de cambio climático.

Hydro-BID incluye una herramienta para la implementación de simulaciones para el análisis de escenarios de cambio climático sobre la base los datos hidrometeorológicos obtenidos de la cuenca, precisamente Temperatura y Precipitación, esta herramienta permite incluir variaciones de precipitación y temperatura de manera anual o mensual. (Nalesso & Coli, 2017)

Tal como lo plantea Stocker la intensificación del ciclo hidrológico prevista como parte del calentamiento global continúa y se manifestará en diferentes regiones (Stocker et al, 2001). Centroamérica es la región que se marca como el principal “Hot-Spot” emergente en el trópico, con las aportaciones más significativas sobre el Índice Regional de Cambio

Climático (RCCI, por sus siglas en inglés) (ver Tabla 1). Esto generado por una disminución de en las precipitaciones ( $\Delta P = -9,44\%$  en periodos de lluvia y  $\Delta P = -17,34\%$  en periodos secos) y un aumento en la variabilidad de las precipitaciones ( $\Delta\sigma_p = 15,20\%$  en periodo de lluvia y  $\Delta\sigma_p = 26,67\%$  en periodos secos) (Giorgi, 2006).

El proceso de evaluación de escenarios de cambio climático, se realiza a través del estudio de 3 escenarios de cambio climático estipulados por los Proyectos de intercomparación de modelos acoplados Fase 6 (CMIP6, por sus siglas en inglés), lanzado en agosto de 2021 por el *World Bank Group* a través del Portal de Conocimiento del Cambio Climático (CCKP por sus siglas en inglés), este portal sirve como un centro de datos climáticos, información y herramientas que sirvan como apoyo en la toma de decisiones y mejorar la comprensión del clima en el futuro y los riesgos proyectados. (World Bank Group, 2021b)

Los 3 escenarios tomados como referencia para el presente trabajo, son los Caminos Socioeconómicos Compartidos (SSPs por sus siglas en inglés) SSP1-2.6, SSP2-4.5 y SSP5-8.5. Cada escenario representa diferentes enfoques en cuanto al optimismo o pesimismo que el cambio climático pueda tener de acuerdo a la reducción o no de las emisiones, para una comprensión más amplia de ello se detallan los enfoques específicos a continuación (World Bank Group, 2021b):

**SSP1-2.6** apoya una mayor sostenibilidad con una reducción drástica de las emisiones globales, pero que alcancen el cero neto después de 2050.

**SSP2-4.5** presenta un escenario de “medio camino” en el que las emisiones se mantienen alrededor de los niveles actuales, antes de decaer a medio siglo, pero no alcanzan el cero neto para el 2100.

**SSP5-8.5** presenta un futuro basado en una explotación intensificada de los recursos de combustibles fósiles donde los mercados globales están cada vez más integrados, lo que conduce a innovaciones y progreso tecnológico.

Como parte inicial se tomaron datos de precipitación promedio mensual para un periodo comprendido entre 1995 y 2014 (rango temporal disponible para El Salvador), con dichos promedios mensuales se calculó un promedio anual correspondiente al intervalo temporal antes mencionado, dando como resultado un promedio de 124,57 mm, todo esto apreciable en la Tabla 8.

La información de precipitación promedio mensual se complementa con la información de temperatura para contribuir con el análisis que se debe ejecutar para obtener los valores necesarios para ingresarlos al modelo en Hydro-BID, dicha información se complementa con los datos de anomalías tanto de precipitación como de temperatura, para este caso se

utilizan datos de anomalías para el periodo comprendido entre el año 2020 y el año 2039 (Tabla 9).

**Tabla 8.** Precipitación promedio mensual en El Salvador para el periodo 1995-2014.

| Mes             | Precipitación<br>(mm) |
|-----------------|-----------------------|
| Enero           | 5.84                  |
| Febrero         | 5.63                  |
| Marzo           | 7.98                  |
| Abril           | 57.99                 |
| Mayo            | 180.42                |
| Junio           | 265.31                |
| Julio           | 170.29                |
| Agosto          | 208.7                 |
| Septiembre      | 295.53                |
| Octubre         | 237.16                |
| Noviembre       | 53.3                  |
| Diciembre       | 6.73                  |
| <b>Promedio</b> | <b>124.57</b>         |

Fuente: (World Bank Group, 2021a)

**Tabla 9.** Datos de anomalías de precipitación y temperatura en El Salvador proyectadas para el periodo 2020-2039 para los diversos escenarios de cambio climático.

| Mes         | SSP1-2.6    |             | SSP2-4.5    |             | SSP5-8.5    |              |
|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------|
|             | Temp.       | Prec. (mm)  | Temp.       | Prec. (mm)  | Temp.       | Prec. (mm)   |
| <b>Ene</b>  | 0.75        | 0.15        | 0.75        | 0.3         | 0.9         | 0.1          |
| <b>Feb</b>  | 0.78        | -0.2        | 0.75        | 0.01        | 0.89        | -0.27        |
| <b>Mar</b>  | 0.81        | 0.03        | 0.85        | -0.07       | 0.9         | 0.14         |
| <b>Abr</b>  | 0.79        | 1.97        | 0.77        | 3.1         | 0.83        | 1.42         |
| <b>May</b>  | 0.65        | 6.47        | 0.63        | 2.67        | 0.82        | 0.14         |
| <b>Jun</b>  | 0.79        | 9.34        | 0.88        | -1.34       | 0.9         | -5.37        |
| <b>Jul</b>  | 0.91        | -12.76      | 0.89        | -3.2        | 1.09        | -22.98       |
| <b>Ago</b>  | 0.79        | -0.09       | 0.83        | 0.01        | 1.08        | -14.53       |
| <b>Sep</b>  | 0.8         | -7.34       | 0.76        | -0.84       | 0.98        | -19.57       |
| <b>Oct</b>  | 0.65        | 19.45       | 0.69        | 14.16       | 0.79        | 17.72        |
| <b>Nov</b>  | 0.67        | 10.39       | 0.72        | 3.73        | 0.77        | 6.49         |
| <b>Dic</b>  | 0.71        | 0.51        | 0.72        | 0.8         | 0.9         | 0.36         |
| <b>Prom</b> | <b>2.33</b> | <b>2.33</b> | <b>Prom</b> | <b>1.61</b> | <b>Prom</b> | <b>-3.03</b> |

Fuente: (World Bank Group, 2021a)

Finalmente teniendo los valores promedios de las anomalías para los datos de precipitación se realiza el cálculo para determinar un factor de afectación, el cual será el utilizado por cada escenario en Hydro-BID como un multiplicador de la precipitación. Dichos valores a utilizar

como multiplicador se muestran en la Tabla 10.

Como parte del proceso se calcula el porcentaje de variación de la precipitación, de una relación directa entre el promedio de precipitación mensual expuesto en la Tabla 8 y los promedios calculados de las anomalías en la precipitación de cada escenario de cambio climático detallados en la Tabla 9, teniendo como resultados que para el escenario SSP1-2.6 plantea un aumento de la precipitación de un 1.87%, teniendo igualmente un aumento en la precipitación del 1.29% para el escenario SSP2-4.5, para finalmente tener una disminución del 2.43% en el escenario SSP5-8.5.

**Tabla 10.** Multiplicador para cada escenario de cambio climático.

| <b>Escenario SSP</b> | <b>Multiplicador</b> | <b>Porcentaje de variación de precipitación</b> |
|----------------------|----------------------|---|
| <b>SSP1-2.6</b>      | 1.02                 | 1.87%   |
| <b>SSP2-4.5</b>      | 1.01                 | 1.29%   |
| <b>SSP5-8.5</b>      | 0.98                 | -2.43%  |

Fuente: Elaboración propia.

## 5. RESULTADOS

### 5.1 Parametrización y calibración del modelo

La parametrización y calibración del modelo en Hydro-BID se realizó a través de los datos de caudales obtenidos de la estación Sensunapán, la cual se encuentra ubicada al sur de la cuenca, en el COMID 212058100, que a su vez es el COMID en donde se encuentra la desembocadura del río Sensunapán al Océano Pacífico.

La parametrización se realizó con los valores sugeridos y presentados en la Tabla 11.

**Tabla 11.** Valores asignados en la parametrización del modelo para la cuenca aferente 212058100.

| <b>Parámetro</b>                     | <b>Valor asignado</b> |
|--------------------------------------|-----------------------|
| Número de curva (CN)                 | 1                     |
| Contenido Disponible de Agua (AWC)   | 1                     |
| Coefficiente de Recesión (r)         | 0.01                  |
| Coefficiente de Percolación (s)      | 0.005                 |
| Factor ET de la estación de cultivo  | 1                     |
| Factor ET de la estación de latencia | 1                     |

Fuente: Elaboración propia.

Los valores de parametrización sugeridos presentan una estadística que lo hace no cumplir con la estadística de aceptabilidad definida en la Tabla 7, teniendo como resultados los siguientes valores:

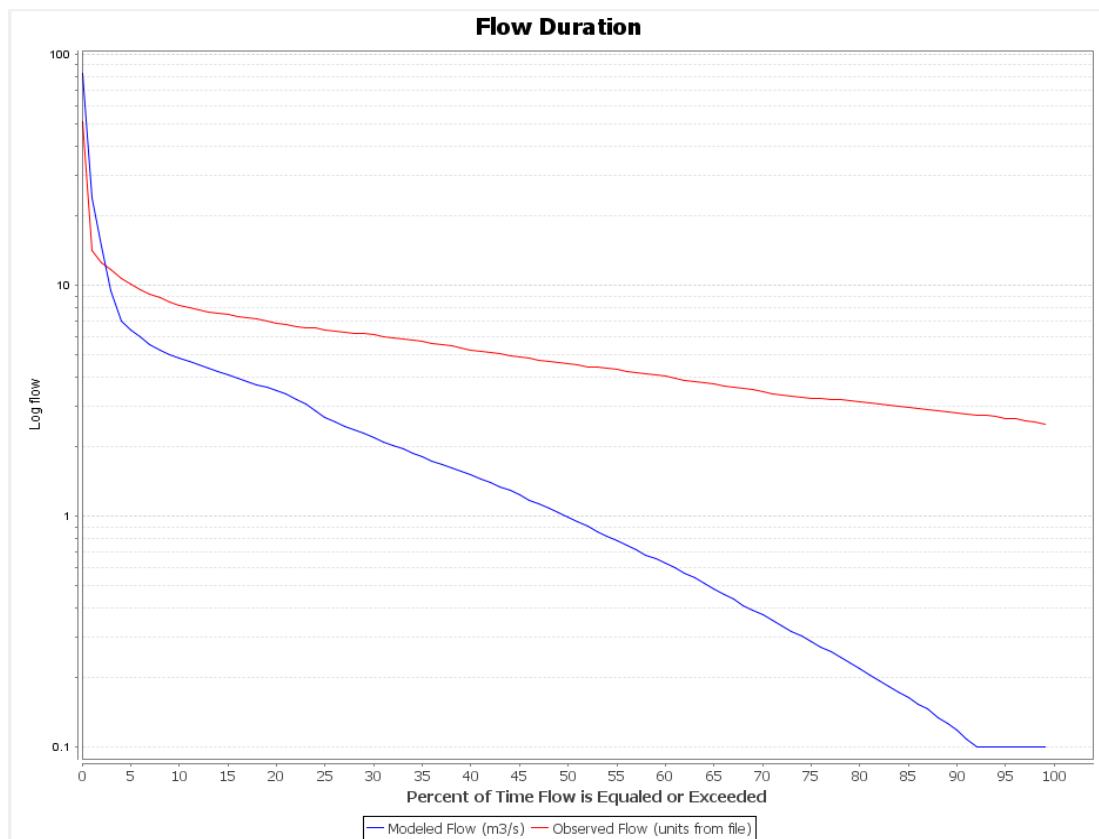


**Tabla 12.** Estadística de aceptación de la parametrización del modelo.

| <b>Parámetro estadístico</b> | <b>Valor diario</b> | <b>Valor mensual</b> |
|------------------------------|---------------------|----------------------|
| Overall Volume error         | -52.12              | -51.66               |
| Correlation                  | 0.4                 | 0.58                 |
| Modified Correlation         | 0.21                | 0.5                  |
| Nash-Stcliffe Efficiency     | -3.25               | -1.64                |

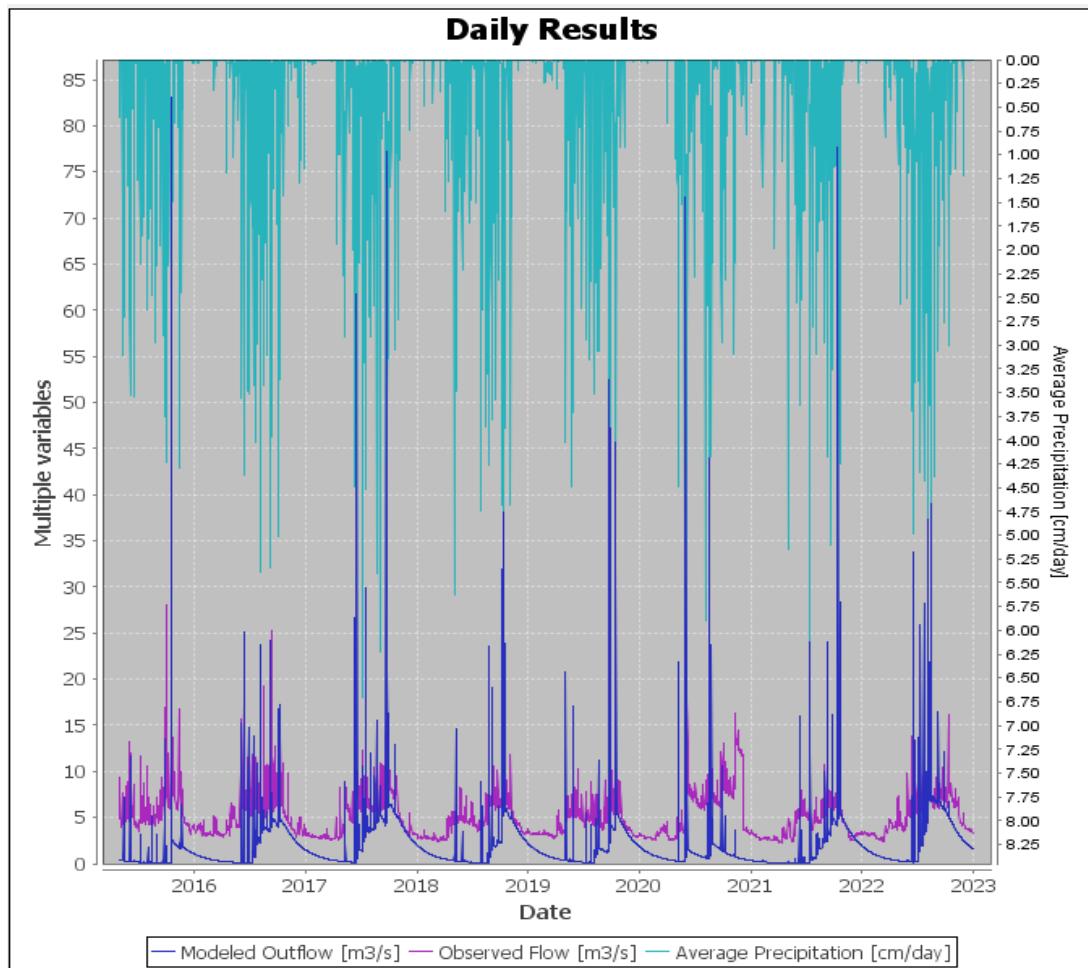
Fuente: Elaboración propia.

Como se puede apreciar el error de volumen general se encuentra fuera del rango de -30% a 30% de error, eso como primer punto de evaluación, de igual manera se puede apreciar el nivel de error presente en las curvas de duración de flujo (Figura 10), en donde el flujo observado presenta una variación significativa respecto al flujo modelado.



**Figura 10.** Curvas de duración de flujo obtenidas en la parametrización del modelo.

Respecto a los registros diarios de caudal (Figura 11) se aprecia de igual manera como los caudales modelados se encuentran muy por debajo de los caudales observados teniendo valores modelados que presentan una sobrestimación, los cuales generan picos de incerteza y apoyan en la estadística del error de volumen general, expresado en la Tabla 12.



**Figura 11.** Registros diarios de caudal para valores de parametrización.

Sobre la base de los resultados de la parametrización se realiza la calibración del modelo, para ello se realizan ajustes sobre los parámetros del modelo, modificando según las características de la cuenca, modificando los valores asignados como recomendados, teniendo para la presente calibración los siguientes valores:

**Tabla 13.** Valores de calibración para el modelo de la cuenca aferente 212058100.

| Parámetro                            | Valor asignado |
|--------------------------------------|----------------|
| Número de curva (CN)                 | 0.8            |
| Contenido Disponible de Agua (AWC)   | 0.067          |
| Coefficiente de Recesión (r)         | 0.007          |
| Coefficiente de Percolación (s)      | 0.00001        |
| Factor ET de la estación de cultivo  | 1              |
| Factor ET de la estación de latencia | 1              |

Fuente: Elaboración propia.

Como parte del análisis realizado para la presente calibración, se redujo la escorrentía y la sensibilidad a los eventos de precipitación, modificando el número de curva (CN); respecto al contenido disponible de agua (AWC) se redujo el valor asignado y con ello generando un aumento de los caudales más grandes, buscando igualar las diferencias en los extremos; en cuanto al coeficiente de recesión (r) se redujo su valor con el fin de disminuir la repetitividad de los caudales más altos dentro de la modelación; finalmente se redujo el valor del coeficiente de percolación (s) disminuyendo con ello la infiltración y aumentando la escorrentía, aumentando con ello el caudal modelado, que finalmente era lo buscado, sobre la base la modelación con los parámetros sugeridos.

Siendo estos los valores con los que se obtiene una mejor calibración, se genera una estadística más favorable para la aceptabilidad del modelo, sin embargo, aun habiendo realizado dicho ajuste de calibración algunos valores se encuentran con una variación respecto a los valores de aceptabilidad recomendados en la Tabla 7, los valores estadísticos obtenidos se presentan a continuación:

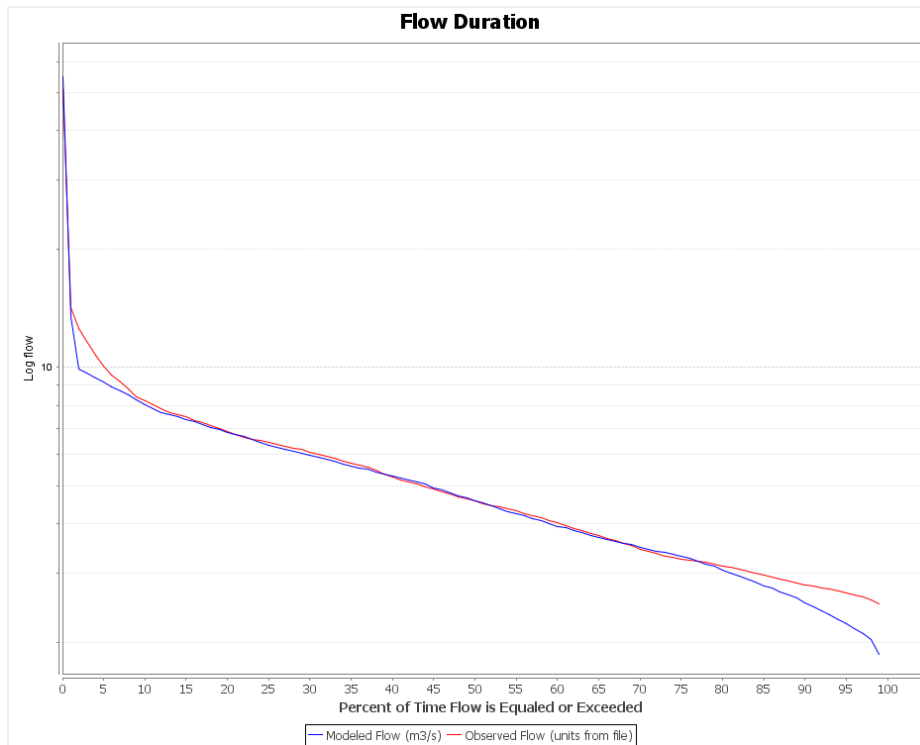
**Tabla 14.** Estadística de validación de calibración del modelo.

| <b>Parámetro estadístico</b> | <b>Valor diario</b> | <b>Valor mensual</b> |
|------------------------------|---------------------|----------------------|
| Overall Volume error         | 1.35                | 2.14                 |
| Correlation                  | 0.46                | 0.57                 |
| Modified Correlation         | 0.39                | 0.55                 |
| Nash-Stcliffe Efficiency     | -0.32               | 0.1                  |

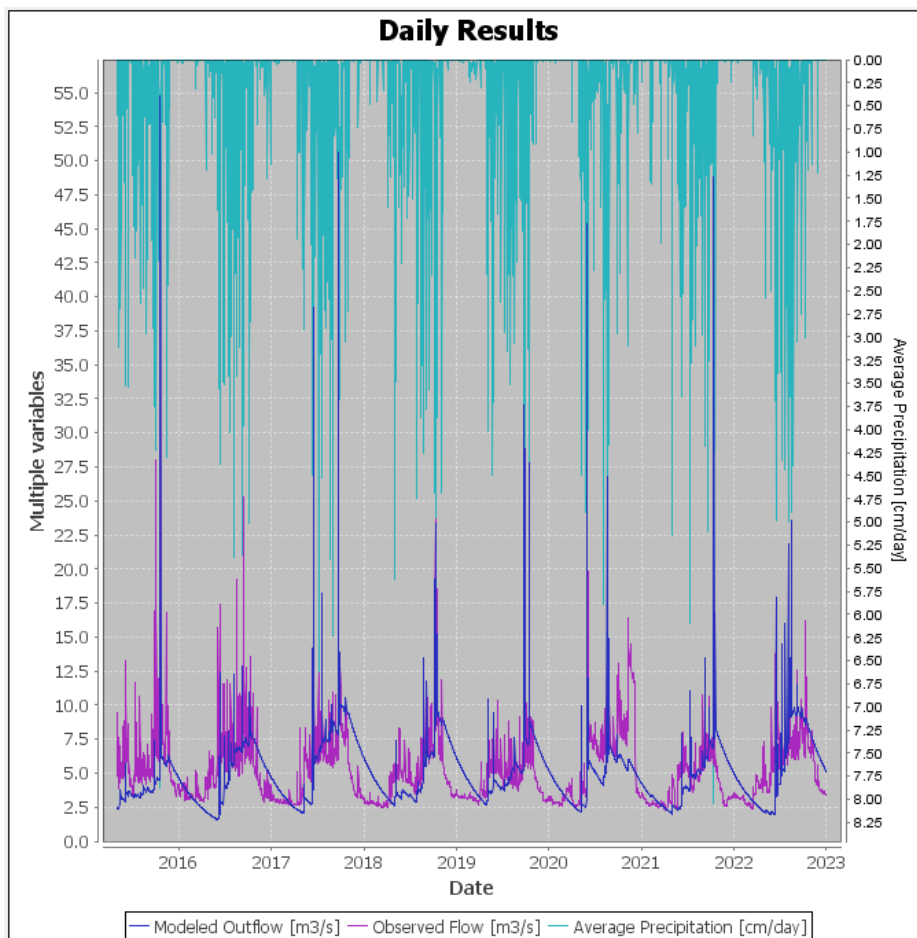
Fuente: Elaboración propia.

A pesar de que en algunos valores no se cuenta con los niveles de aceptabilidad esperados, dentro de la modelación se tiene un mejor ajuste en las curvas de duración de flujo, en donde los flujos modelados tienen un comportamiento más aproximado a los flujos observados (Figura 12).

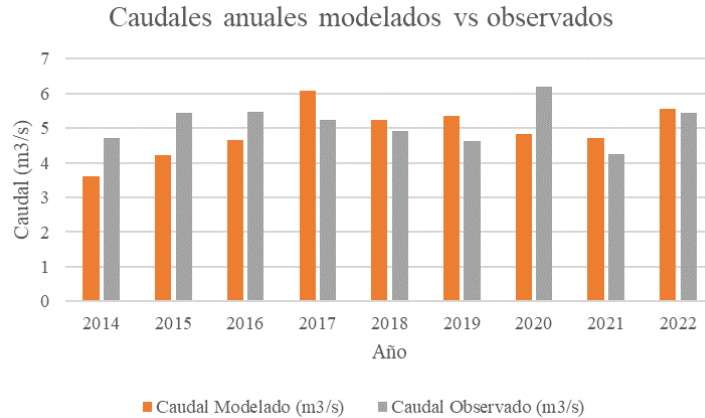
Respecto a los registros diarios de caudal (Figura 13) se aprecia de igual manera como los caudales modelados se encuentran con un comportamiento más aproximado al comportamiento de los caudales observados, esto se puede verificar con la gráfica de comparación de caudales anuales modelados respecto a los caudales anuales observados.



**Figura 12.** Curvas de duración de flujo obtenidas con la calibración del modelo.



**Figura 13.** Registros diarios de caudal para valores de calibración de modelo.



**Figura 14.** Caudales anuales modelados vs caudales observados con la calibración del modelo.

De igual manera para el caso de los caudales anuales modelados vs observados (Figura 14) la variación no supera  $1 \text{ m}^3/\text{s}$  para cada año evaluado, manteniendo un comportamiento aproximadamente similar en todo el periodo de análisis.

## 5.2 Modelado de escenarios de cambio climático

El proceso de modelado de escenarios de cambio climático se desarrolló sobre la base de lo expuesto en el numeral 4.4, tomando como base los valores de anomalías obtenidos del Portal de Conocimiento del Cambio Climático (CCKP por sus siglas en inglés).

De los resultados de cada modelado de escenarios de cambio climático se realiza un estudio del balance hídrico generado por cada uno y generando una comparación con las condiciones actuales.

Es de mencionar que Hydro-BID simula la misma serie temporal que se encuentra en la simulación original pero los resultados representarán en este caso la misma serie temporal partiendo del año 2020 como primer año y modificada con los cambios implementados (Nalesso & Coli, 2017). Teniendo en cuenta lo anterior los resultados se presentan en la escala temporal que comprende entre el año 2014 y el año 2022, para facilitar la representación gráfica y su respectiva comparación con los datos actuales.

El balance hídrico generado (ver Figura 15) presenta los datos de precipitación, escorrentía y evapotranspiración generados por las condiciones actuales y los escenarios de cambio climático modelados (SSP1-2.6, SSP2-4.5 y SSP5-8.5), en el análisis presentado se puede apreciar el aumento de la precipitación de los dos primeros escenarios de cambio climático respecto a las condiciones actuales, respaldado por el aumento de 1.87% y 1.29% respectivamente, disminuyendo la precipitación en el último escenario de cambio climático acorde al 2.43% planteado por los datos del World Bank Group.

### BALANCE HÍDRICO PARA LOS ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO

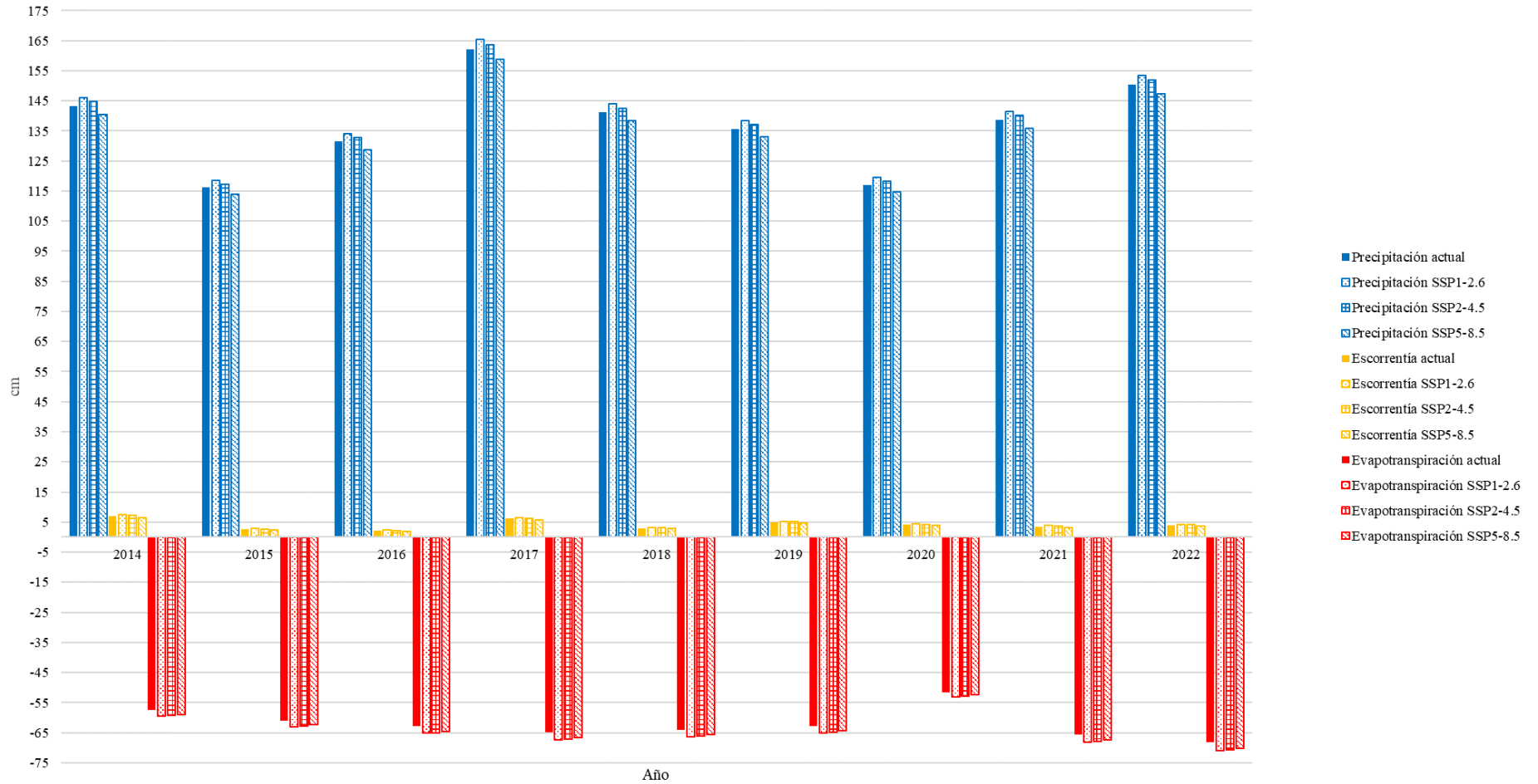
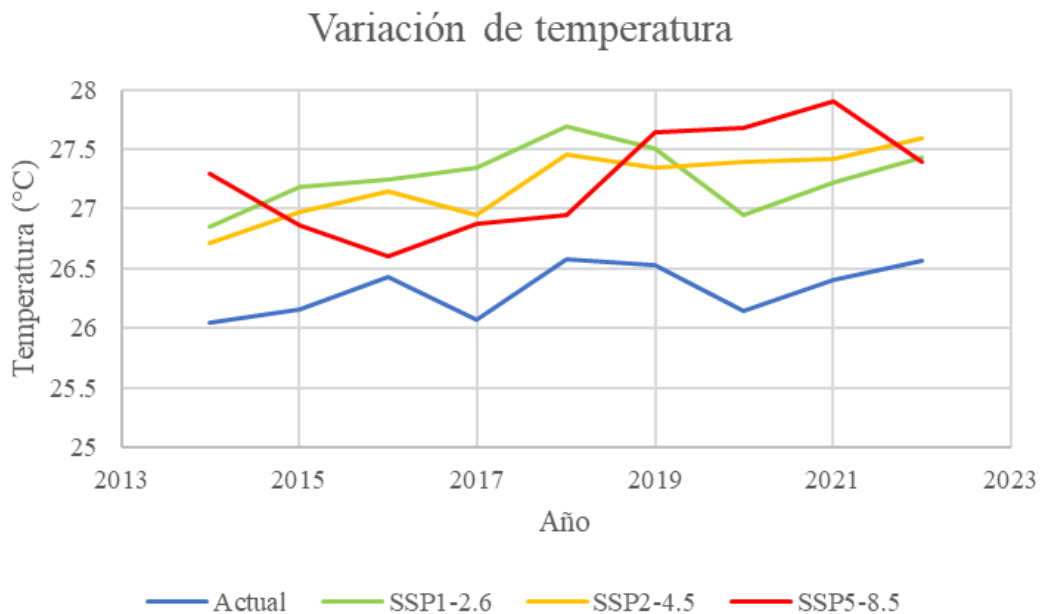


Figura 15. Balance hídrico del escenario actual vs los escenarios de cambio climático.

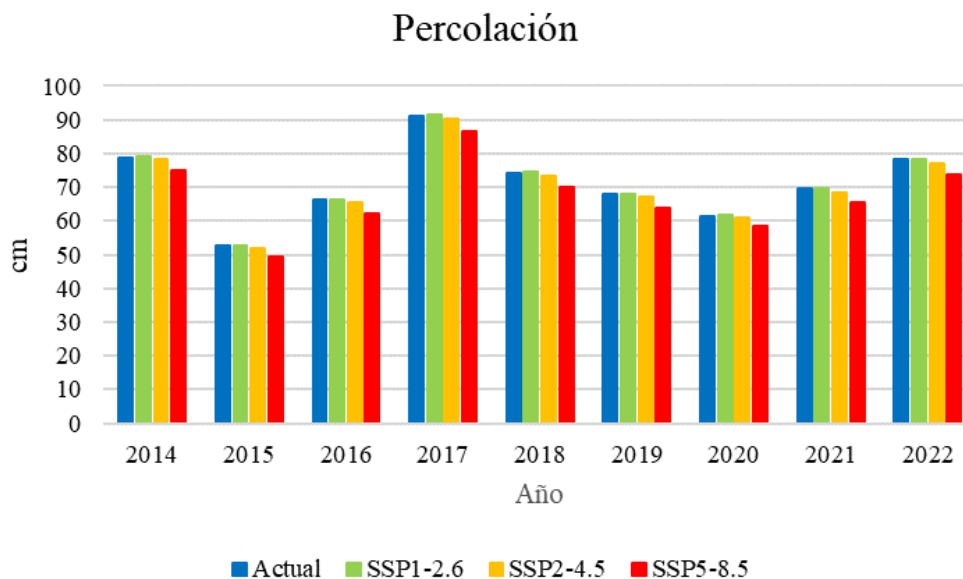
En cuanto a la escorrentía comparten una tendencia similar a la observada en la precipitación, en donde al tener un aumento de la precipitación se tiene un aumento de la escorrentía y a su vez al tener una disminución de la precipitación se tiene una disminución en los valores de escorrentía observados.

Para luego finalizar con el comportamiento de la evapotranspiración, en donde se observa un comportamiento al alza según los escenarios de cambio climático planteados, esto debido al aumento de las temperatura en la superficie de análisis tal como se aprecia en la Figura 16, en donde independientemente el escenario de cambio climático la tendencia plantea un aumento respecto a las condiciones actuales, con un promedio de 1 °C y un rango que varía entre un aumento de 0.16 °C y 1.53 °C.



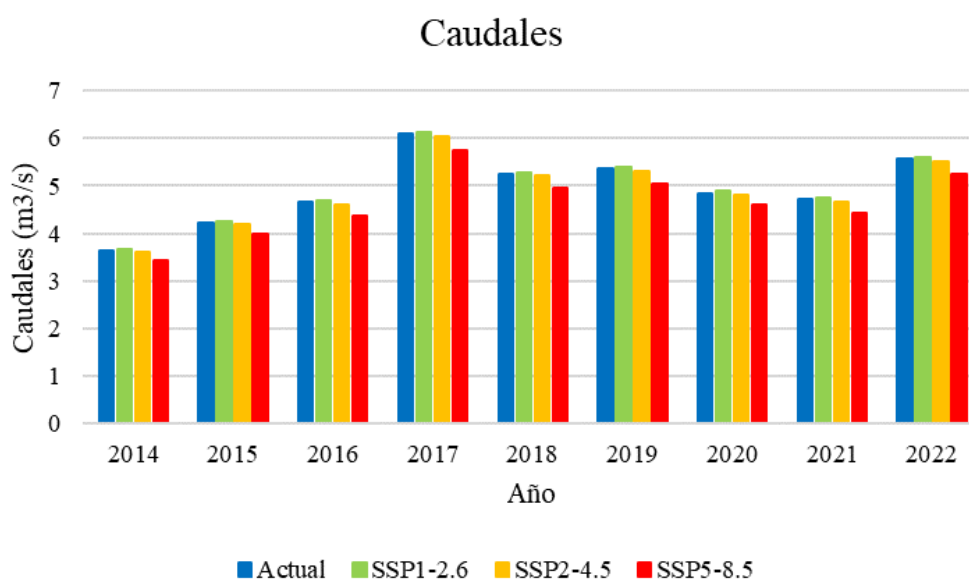
**Figura 16.** Variación de temperatura según los escenarios de cambio climático.

La percolación o infiltración es otro parámetro por evaluar dentro de los escenarios de cambio climático, en el que se observa una disminución de la infiltración de cada uno de los escenarios de cambio climático (Figura 17), respecto a las condiciones actuales, esto como producto de un aumento de la escorrentía y un aumento en la evapotranspiración para cada uno de los escenarios planteados.



**Figura 17.** Percolación generada por cada escenario de cambio climático.

Como parte final de los resultados brindados por cada uno de los escenarios de cambio climático estudiados, se presentan los caudales totales (Figura 18), producto de cada escenario. Los caudales resultantes para el periodo temporal analizado presentan una disminución de cada uno de los escenarios respecto a las condiciones actuales de hasta el 6.0% para el escenario SSP5-8.5, la disminución presentada corresponde al comportamiento de los parámetros como la evapotranspiración y la escorrentía para escenario de cambio climático.



**Figura 18.** Caudales generados por escenarios de cambio climático.



## **6. DISCUSIÓN DE RESULTADOS**

El presente apartado detalla un análisis a mayor profundidad, de los resultados obtenidos en la modelación, tanto hidrológica como de escenarios de cambio climático realizada en el presente estudio.

### **6.1 Modelo hidrológico para el periodo 2014-2022**

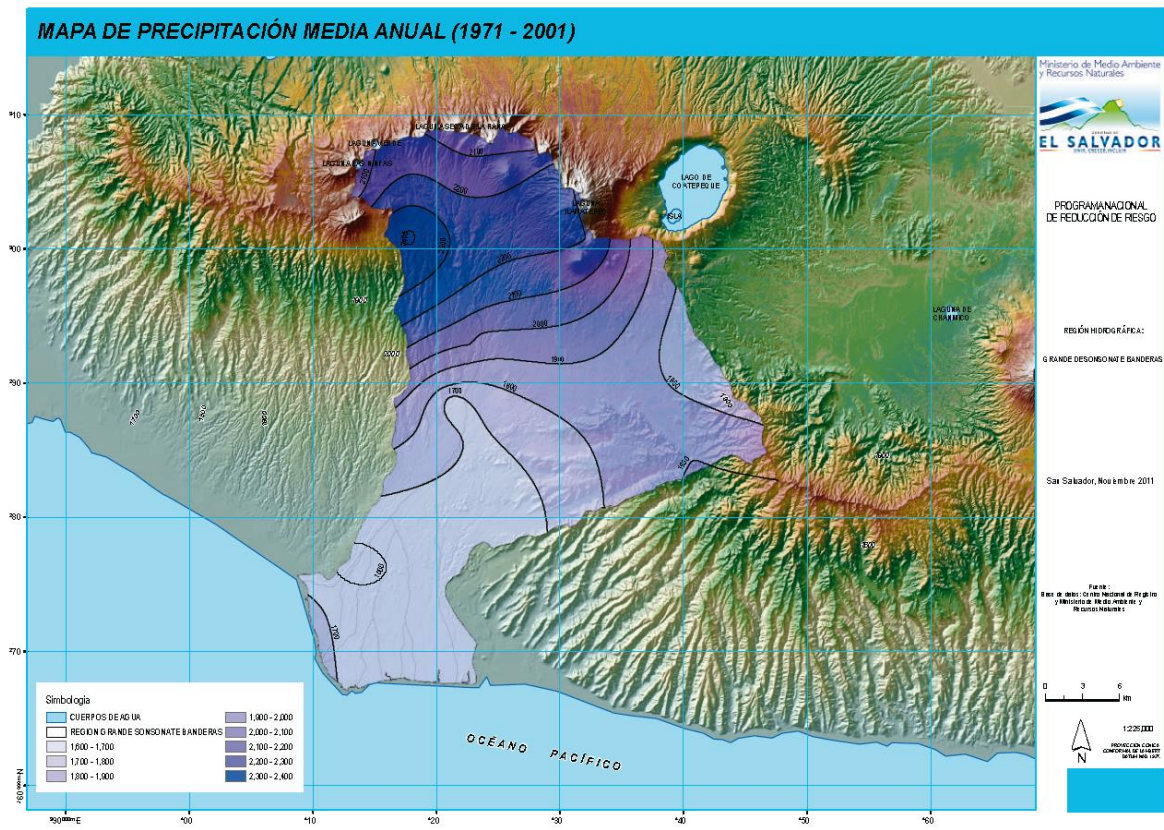
Como parte del análisis descrito en el numeral 5.1 Parametrización y calibración del modelo, se tomó como referencia el entorno fisiográfico del río Sensunapán, el cual discurre en su cuenca media y baja a través de una planicie costera, con pendientes muy bajas, teniendo como características del cauce, el material de las paredes y lecho del río constituido por materiales muy estables (lavas), sus características geológicas reducen la susceptibilidad a la erosividad y al cambio continuo de la forma del mismo, en la parte alta y media de la cuenca, mientras que en la parte baja debido a la topografía (nivel del mar) y al material geológico (suelo franco limosos), presenta susceptibilidad a procesos de inundación, debido a la ruptura de la borda (MARN, 2012). Esto por lo consiguiente, explica la toma de decisiones al momento de llevar un valor como el coeficiente de percolación a niveles cercanos al cero debido al tipo de material que el cauce presenta.

Según el Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN) a través de la Dirección General del Observatorio Ambiental, en el estudio de Escenarios de Riesgo: Amenaza por Inundación, para la región Sonsonate-Bandera, en términos de precipitación de acuerdo un balance hídrico realizado para un periodo comprendido entre el año 1971 y 2001, la región hidrográfica Sonsonate-Bandera registra una precipitación media anual de 1.892,00 mm (Figura 19 y Figura 20), específicamente para la cuenca del río Sensunapán o Grande de Sonsonate se presenta una precipitación de 2.074,00 mm.

Lo anterior, representa una aproximación a los valores obtenidos con la calibración del modelo Hydro-BID, para dicha cuenca, en donde se tiene un promedio de 1.373,50 mm teniendo en cuenta los cambios en las precipitaciones debido al cambio climático y la diferencia temporal, entre los periodos analizados, se puede prever que el comportamiento de las precipitaciones en estos últimos años (2014-2022) ha sufrido una disminución significativa, respecto a las últimas tres décadas del siglo XX.

| Cuenca              | Área (Km <sup>2</sup> ) | Precipitación (mm) |
|---------------------|-------------------------|--------------------|
| Grande de Sonsonate | 221.17                  | 2074               |
| El Almendro         | 12.01                   | 1693               |
| El Venado           | 9.61                    | 1640               |
| Las Marías          | 19.74                   | 1656               |
| Huiscoyol           | 21.77                   | 1635               |
| Las Hojas           | 5.78                    | 1690               |
| S/N                 | 3.27                    | 1687               |
| Chimalapa           | 42.8                    | 1656               |
| Banderas            | 441.53                  | 1862               |

**Figura 19.** Precipitación media en las cuencas de la región hidrográfica Sonsonate-Bandera. Fuente: (MARN, 2012).



**Figura 20.** Mapa de precipitación media anual (1971-2001). Fuente: (MARN, 2012).

Tomando como referencia la misma fuente de información, el MARN presenta los resultados de evapotranspiración, siempre en el marco del balance hídrico calculado para el periodo comprendido entre 1971-2001, en donde se presentaba un valor promedio para la región hidrográfica de 1.000 mm, mientras que en la cuenca del río Sensunapán o Grande de Sonsonate se presentaba un valor de evapotranspiración de 847 mm (ver Figura 21 y Figura 22), el modelo de Hydro-BID presenta un valor promedio anual de 62 cm, equivalente a 620

mm, que de igual manera como con la precipitación, se presenta una tendencia a la baja, teniendo en cuenta la diferencia temporal de los análisis, se considera un valor representativo y aceptable.

| Cuenca              | Área (km <sup>2</sup> ) | Evapotranspiración Real (mm) |
|---------------------|-------------------------|------------------------------|
| Grande de Sonsonate | 221.17                  | 847                          |
| El Almendro         | 12.01                   | 770                          |
| El Venado           | 9.61                    | 1097                         |
| Las Marías          | 19.74                   | 1087                         |
| Huiscoyol           | 21.77                   | 1150                         |
| Las Hojas           | 5.78                    | 813                          |
| S/N                 | 3.27                    | 1171                         |
| Chimalapa           | 42.8                    | 1143                         |
| Banderas            | 441.53                  | 927                          |

**Figura 21.** Evapotranspiración en cuencas de la región hidrográfica Sonsonate-Bandera. Fuente: (MARN, 2012).



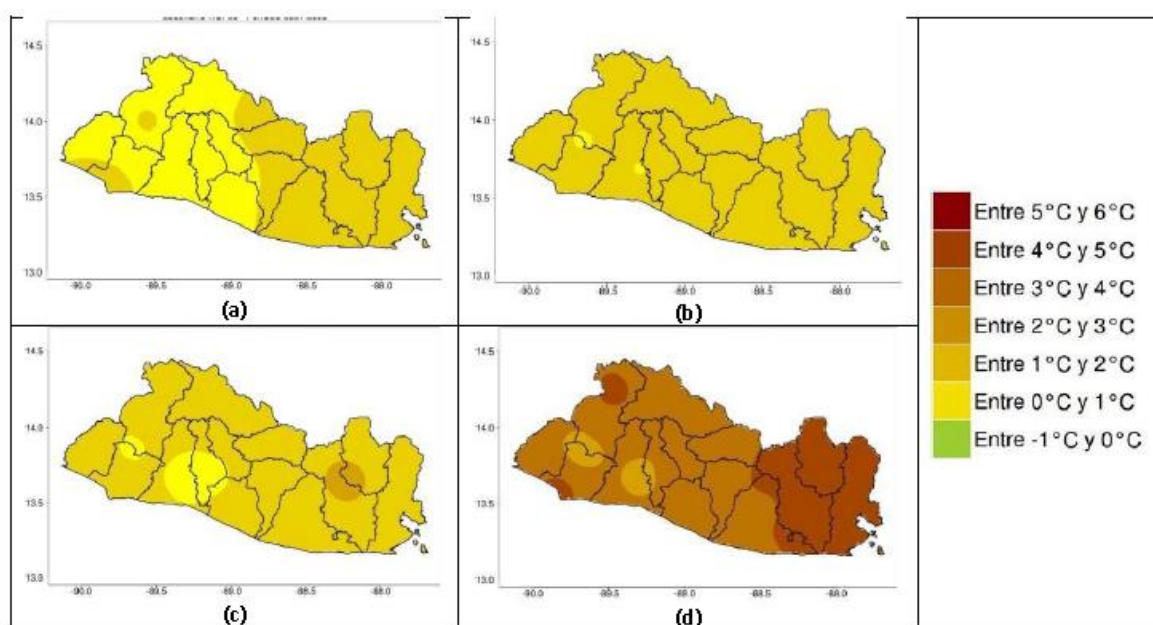
**Figura 22.** Mapa de evapotranspiración anual (1971-2001). Fuente: (MARN, 2012).

## 6.2 Escenarios de cambio climático

Sobre la base de los resultados de los modelos de escenarios de cambio climático evaluados, es apreciable el aumento de la temperatura que para el caso de la modelación con Hydro-BID, teniendo en cuenta los tres escenarios evaluados (SSP1-2.6, SSP2-4.5 y SSP5-8.5) se prevé un aumento que varía entre los 0,7 °C y los 1,5 °C.

Según el Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN) en cooperación con el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), expresan que para el periodo 2021-2050, los valores de la temperatura podrán incrementarse entre 1°C y 2°C (Figura 23), mientras que a nivel decadal para el periodo 2021-2030 los aumentos de temperatura podrían ser entre 0,7°C y 1,5°C, siendo muy similares bajo todos los escenarios (MARN, 2017). Dichos valores son coincidentes con los escenarios de cambio climático evaluados con el modelo Hydro-BID, siendo valores representativos para todo el territorio salvadoreño.

Es de destacar que el informe está elaborado sobre la base de los datos obtenidos de los Proyectos de intercomparación de modelos acoplados Fase 5 (CMIP5, por sus siglas en inglés), en donde los modelos de cambio climático tenían los códigos “RCP”, siendo estos sustituidos en el 2021 en el CMIP6 por las siglas “SSP”.



**Figura 23.** Cambios de temperatura media anual por el ensamble multimodelo para los períodos 2021-2050. Fuente: (MARN, 2017).

## **7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

La calibración realizada fue de suma importancia para la obtención de resultados aceptables, teniendo en cuenta la composición del cauce de los ríos en la cuenca del río Sensunapán, permitiendo tener una mejor certeza al momento de calibrar los parámetros, de coeficiente de percolación, coeficiente de recesión, como el contenido de agua.

La precipitación y la evapotranspiración que el modelo presenta, son de alta representatividad teniendo como referencia balances hídricos realizados en la región hidrográfica a la que pertenece la cuenca del río Sensunapán y siendo congruentes con la variación que el cambio climático plantea.

No se cuenta con datos análogos y representativos para la comparación de los caudales obtenidos en la modelación hidrológica, por lo tanto, para dichos resultados no es posible emitir una conclusión de aceptación o rechazo.

Los resultados de la modelación de escenarios de cambio climático, presentan una correlación entre resultados análogos, realizados a través de una base de datos previa a la utilizada en este estudio.

La modelación de escenarios de cambio climático, plantea un aumento de la precipitación para los primeros dos escenarios (SSP1-2.6 y SSP2-4.5) y una reducción en el último escenario evaluado (SSP5-8.5), sin embargo, al tener un aumento en las temperaturas favorece al aumento de la evapotranspiración y disminución de la escorrentía para todos los escenarios.

Se recomienda generar análisis hidrológico y de escenarios de cambio climático, basados en diferentes modelos, a fin de establecer relaciones y diferencias entre modelos que permita ajustar de mejor manera los resultados, y con ello aportar menor incerteza en la toma de decisiones.

Se recomienda mejorar la capacidad instalada de medición de parámetros hidrometeorológicos, que aporten en un futuro a mejorar los modelos predictivos y así tener una mejor capacidad en la toma de decisiones, en estos temas de tanta importancia a nivel mundial.

## 8. BIBLIOGRAFÍA

- Cabrera, J. (2012). Modelos hidrológicos. (I. p. Niño, Ed.) Perú: Universidad Nacional de Ingeniería, Facultad de Ingeniería Civil.
- Dirección General del Observatorio Ambiental. (2012). *Sistema de alerta temprana por inundaciones cuenca del río Grande de Sonsonate*. San Salvador: Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Folland et al., C. K. (2001). Observed Climate Variability and Change. En C. K. Folland, *Climate Change 2001: The Scientific Basis* (págs. 99-181). Cambridge University Press.
- Giorgi, F. (2006). Climate change hot-spots. *Geophys. Res. Lett.*, 33. doi:10.1029/2006GL025734
- GWP Centroamérica. (2017). *La situación de los recursos hídricos en Centroamérica: Hacia una gestión integrada*.
- Hunink, J. (04 de 07 de 2013). *IAGUA*. Obtenido de <https://www.iagua.es/blogs/johannes-hunink/cambio-climatico-e-hidrologia-herramientas-clave-para-conocer-los-impactos-y-evaluar-estrategias-de>
- IDEAM. (2022). *Modelación Hidrológica*. Obtenido de IDEAM: <http://www.ideam.gov.co/web/agua/modelacion-hidrologica>
- MARN. (2012). *Escenarios de riesgo: Amenaza por inundación región hidrográfica Sonsonate-Bandera*. San Salvador.
- MARN. (2017). *Modelos de Simulación y Escenarios Climáticos para El Salvador*. San Salvador.
- Maurer et al, E. A. (2009). Climate model based consensus on the hydrologic impacts of climate change to the Rio Lempa basin of Central America. *Hydrology and Earth System Sciences*, 183-194.
- Moreda et al., F. P.-W. (2014). *Hydro-BID: Un Sistema Integrado para la simulación de Impactos del Cambio Climático sobre los Recursos Hídricos. Parte 2*. Banco Interamericano de Desarrollo.
- Nalesso, M., & Coli, P. (2017). *Guía paso a paso. Manual de Hydro-BID*. Washington DC: Banco Interamericano de Desarrollo.
- NASA. (08 de 2023). *POWER*. Obtenido de POWER Data Access Viewer Enhanced: <https://power.larc.nasa.gov/beta/data-access-viewer/>
- Pedregosa et. al, F. V. (2011). Scikit-learn: Machine Learning in Python. *Journal of Machine*

*Learning Research*, 12, 2825-2830.

- Ramos Peñate, J. H. (Mayo de 2016). Análisis hidrológico de la cuenca del río Sensunapán, como alternativa para el fortalecimiento de la gestión de riesgos y reducción de la vulnerabilidad, en el departamento de Sonsonate, El Salvador. San Salvador: Universidad de El Salvador.
- Rangarajan et. al, S. M. (2008). A Decision Support Framework to Facilitate Nitrogen Load Redctions in the Long Island Sound (LIS) Watershed. *Water Practice*, 2(1), 1-15. doi:10.2175/193317708x281451
- Scikit-learn. (2023). Obtenido de Scikit-learn: <https://scikit-learn.org>
- Stocker et al, T. (2001). Physical Climate Processes and Feedbacks. *Climate Change 2001: The Scientific Basis*. En T. C. Stocker, *Climate Change 2001: The Scientific Basis* (págs. 417-470). Cambridge University Press.
- USAID. (2009). *Propuesta de plan de manejo de la subcuenca río Grande de Sonsonate*. San Salvador: MARN.
- World Bank Group. (2021a). *Climate Change Knowledge Portal*. Obtenido de Data Catalog: <https://climateknowledgeportal.worldbank.org/>
- World Bank Group. (2021b). *User Manual, Climate Change Knowledge Portal (CCKP)*. World Bank Group.