

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA**

FACULTAD DE INGENIERIA AGRICOLA



**“MODELACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD HÍDRICA DEL RÍO
PIURA, CONSIDERANDO LA INCIDENCIA DEL
CAMBIO CLIMÁTICO”**

Presentado por:

RICARDO FERNANDO LEÓN OCHOA

TESIS PARA OBTAR EL TÍTULO DE:

INGENIERO AGRÍCOLA

Lima - Perú

2017

Dedico este trabajo a mis padres y abuelos por su amor, orientación y apoyo continuo, ayudándome a tener éxito e iniciando la confianza de ser capaz de hacer cualquier cosa que me proponga.

De igual manera a mis tíos, Fermín, Iván y Regina, por compartir momentos significativos conmigo y siempre estar dispuestos a escucharme y ayudarme en cualquier momento.

Finalmente a mi hermana, Claudia, a quien aprecio infinitamente.

Agradezco a Dios por otorgarme el don de la vida, salud y fortaleza para seguir adelante con mis metas. Y, por permitirme conocer a mi novia Zully Vásquez, gracias a ella por darme tanta felicidad, y por toda la dulzura e inspiración que disfruto y tengo junto a ella. Mis sinceras gracias a esta gran mujer; que Dios siempre nos bendiga.

Al Departamento de Recursos Hídricos de la Facultad de Ingeniería Agrícola por el uso de equipos en el Laboratorio de Geomática.

A mis asesores, el Ing. Marcelo Portuguez y el Dr. Eduardo Chávarri, por su orientación, paciencia, consejos y aliento en todas las etapas de esta investigación bajo sus auspicios.

A los doctores Néstor Montalvo y Lía Ramos, el Ing. Jorge Díaz y la Ing. Cristina Portocarrero que gracias a sus aportes enriquecieron la investigación.

Al Fis. Alan Llacza, por su disposición en apoyar esta investigación.

ÍNDICE GENERAL

| | |
|--|----|
| RESUMEN..... | i |
| ABSTRACT..... | ii |
| I. INTRODUCCIÓN | 1 |
| 1.1. OBJETIVOS | 2 |
| 1.1.1. Objetivo principal..... | 2 |
| 1.1.2. Objetivos específicos..... | 3 |
| II. REVISIÓN DE LITERATURA..... | 4 |
| 2.1. EL CICLO HIDROLÓGICO..... | 4 |
| 2.1.1. Evapotranspiración..... | 6 |
| 2.1.2. Evapotranspiración de referencia..... | 7 |
| 2.2. MODELACIÓN HIDROLÓGICA..... | 8 |
| 2.3. SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG) EN LOS RECURSOS HÍDRICOS..... | 11 |
| 2.4. HERRAMIENTA DE EVALUACIÓN DEL SUELO Y AGUA (SWAT)..... | 12 |
| 2.4.1. Componente hidrológico del SWAT..... | 14 |
| 2.5. CAMBIO CLIMÁTICO | 15 |
| 2.5.1. Cambio climático en el Perú..... | 16 |
| 2.5.2. Escenarios de emisión..... | 16 |
| 2.6. MODELOS DE CIRCULACIÓN GENERAL (MCG)..... | 21 |
| 2.7. MÉTODOS DE REDUCCIÓN DE ESCALA..... | 22 |
| 2.8. LA HERRAMIENTA MARKSIM GCM..... | 24 |
| III. MATERIALES Y MÉTODOS | 27 |
| 3.1. ÁREA DE ESTUDIO | 27 |
| 3.2. MATERIALES | 28 |
| 3.2.1. Información geográfica..... | 28 |
| 3.2.2. Información climática..... | 28 |
| 3.2.3. Programas de cómputo..... | 29 |
| 3.2.4. Equipo de cómputo..... | 29 |
| 3.3. METODOLOGÍA..... | 29 |
| 3.3.1. Sistematización de la información requerida..... | 30 |
| 3.3.2. Aplicación del modelo hidrológico SWAT..... | 37 |
| 3.3.3. Análisis de sensibilidad, calibración y validación del modelo..... | 38 |
| 3.3.4. Proyección climática | 41 |

| | |
|--|----|
| IV. RESULTADOS Y DISCUSIONES | 44 |
| 4.1. EJECUCIÓN DEL MODELO ARCSWAT | 44 |
| 4.2. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD | 45 |
| 4.3. CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO HIDROLÓGICO... .. | 46 |
| 4.4. EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO | 48 |
| V. CONCLUSIONES | 65 |
| VI. RECOMENDACIONES | 67 |
| VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 68 |
| VIII. ANEXOS..... | 74 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | | |
|-----------|---|----|
| Tabla 1: | Ventajas y desventajas de los modelos hidrológicos | 10 |
| Tabla 2: | Vías de concentración representativas definidas para el quinto informe (AR5) del IPCC | 18 |
| Tabla 3: | Descripción de los modelos de circulación general disponibles en MarkSim | 25 |
| Tabla 4: | Información geográfica suministrada al modelo | 28 |
| Tabla 5: | Ubicación de estaciones meteorológicas e hidrológicas del estudio | 29 |
| Tabla 6: | Clasificación de tierras por capacidad de uso mayor | 31 |
| Tabla 7: | Uso actual de la tierra de la cuenca del río Piura | 31 |
| Tabla 8: | Atributos requeridos por el ArcSWAT para cada tipo de suelo | 33 |
| Tabla 9: | Clasificación de suelos en la cuenca | 34 |
| Tabla 10: | Clasificación de pendientes | 35 |
| Tabla 11: | Descripción de los parámetros utilizados en el análisis de sensibilidad | 39 |
| Tabla 12: | Criterios para evaluar el rendimiento del modelo hidrológico y sus correspondientes clasificaciones | 40 |
| Tabla 13: | Resultado de los parámetros calibrados para la cuenca del río Piura | 48 |
| Tabla 14: | Estadísticas de rendimiento del modelo para la calibración y validación .. | 48 |
| Tabla 15: | Resultado de los parámetros calibrados para la cuenca del río Piura | 50 |
| Tabla 16: | Escenarios climáticos para los periodos presente y futuro | 50 |
| Tabla 17: | Caudal promedio mensual de los escenarios, en la estación hidrométrica Sánchez Cerro | 57 |
| Tabla 18: | Variación porcentual del caudal promedio mensual | 59 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | | |
|------------|---|----|
| Figura 1: | Clasificación de los modelos hidrológicos | 9 |
| Figura 2: | Fases del ciclo hidrológico simulados por SWAT | 13 |
| Figura 3: | Simulación de movimiento del agua en SWAT | 15 |
| Figura 4: | Impactos y consecuencias del cambio climático | 16 |
| Figura 5: | Evolución temporal del consumo de energía (derecha), consumo de combustibles fósiles (centro) y el uso primario de energía (izquierda) en los RCP usados en el quinto Informe del IPCC | 18 |
| Figura 6: | Evolución temporal de la población y producto interior bruto en los RCP usados en el quinto Informe del IPCC | 19 |
| Figura 7: | Evolución temporal del consumo de energía (derecha), consumo de combustibles fósiles (centro) y el uso primario de energía (izquierda) en los RCP usados en el quinto Informe del IPCC | 20 |
| Figura 8: | Un modelo regional con tamaño de celdilla reducido se anida en uno global de resolución más baja (celdillas con mayor tamaño), dando información de la evolución de las variables atmosféricas en los puntos del contorno del dominio del modelo regional | 24 |
| Figura 9: | Mapa de ubicación y sistema hidrográfico de la cuenca del río Piura | 27 |
| Figura 10: | Diagrama de flujo de la metodología empleada | 30 |
| Figura 11: | Variación altitudinal de la cuenca del río Piura..... | 30 |
| Figura 12: | Mapa de cobertura y uso del suelo de la cuenca del río Piura | 32 |
| Figura 13: | Mapa de clasificación de suelos de la cuenca del río Piura | 34 |
| Figura 14: | Mapa de pendientes de la cuenca del río Piura | 35 |
| Figura 15: | Mapa de ubicación de estaciones meteorológicas e hidrométricas de la cuenca del río Piura | 36 |
| Figura 16: | Comparación entre las precipitaciones medias mensuales entre los modelos globales para la cuenca media y alta del río Piura | 43 |
| Figura 17: | Subcuencas y red hídrica delineada de la cuenca media alta del río Piura .. | 44 |
| Figura 18: | Resultado del análisis de sensibilidad de los parámetros usando SUFI-2.. | 45 |
| Figura 19: | Serie de caudales mensuales observados y simulados para el período de calibración y validación | 47 |
| Figura 20: | Grafica de dispersión del caudal observado vs. simulado en los periodos de calibración y validación | 47 |
| Figura 21: | Precipitación media mensual del escenario base y los escenarios futuros escogidos | 49 |
| Figura 22: | Mapa de isoyetas en el escenario base..... | 50 |
| Figura 23: | Mapa de isoyetas según el modelo HadGEM2-ES | 51 |
| Figura 24: | Mapa de isoyetas según el modelo CSIRO Mk3-6-0 | 52 |

| | | |
|------------|---|----|
| Figura 25: | Diagrama de cajas de la precipitación observada y simulada | 53 |
| Figura 26: | Temperatura media observada en el escenario base | 54 |
| Figura 27: | Temperatura media simulada en los escenarios futuros, ruta RCP 8.5 | 54 |
| Figura 28: | Temperatura media simulada en los escenarios futuros, ruta RCP 4.5. | 54 |
| Figura 29: | Hidrogramas de caudal promedio mensual en los escenarios (grafico superior RCP 4.5 e inferior RCP 8.5), estación hidrométrica Sánchez Cerro | 56 |
| Figura 30: | Diagrama de cajas de los caudales observados y simulados. | 57 |
| Figura 31: | Tendencia de la variación porcentual del caudal promedio mensual proyectado a futuro, de enero de 2025 a diciembre de 2054 | 58 |
| Figura 32: | Persistencias de disponibilidad hídrica al 50%, 75%, 90% y 95% | 59 |
| Figura 33: | Evapotranspiración de referencia en el escenario base | 60 |
| Figura 34: | Evapotranspiración de referencia futura según el modelo CSIRO Mk3-6-0. | 61 |
| Figura 35: | Evapotranspiración de referencia futura según el modelo HadGEM2 - ES | 62 |
| Figura 36: | Evapotranspiración referencial vs. altura, para el periodo húmedo y seco de los escenarios | 63 |

ÍNDICE DE ANEXOS

| | |
|--|----|
| Anexo 1: Estaciones con registros de precipitación media mensual ubicadas dentro de la cuenca del río Piura | 74 |
| Anexo 2: Datos de caudales observados (m ³ /s) en la estación hidrométrica Sanchez Cerro para el periodo de enero de 1984 a diciembre del 2008 | 79 |
| Anexo 3: Datos de caudales simulados (m ³ /s) en la estación hidrométrica Sanchez Cerro para el periodo futuro de enero de 2025 a diciembre del 2054 | 80 |
| Anexo 4: Prueba de Independencia para los valores mensuales de caudal observado en el escenario base. | 84 |
| Anexo 5: Mapa de ubicación de la cuenca del río Piura | 85 |

RESUMEN

El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) reitera en su quinto informe de evaluación (AR5), los riesgos futuros del cambio climático en nuestros sistemas hidrológicos y la amenaza de una reducción severa en la disponibilidad hídrica en un futuro próximo. Debido a la drástica variación global del clima que se viene expresando en forma de cambios en la temperatura y precipitación en la última década. En efecto, uno de los métodos de investigación para evaluar los riesgos de los recursos hídricos por variaciones climáticas, es combinar el modelamiento hidrológico con escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero para simular el comportamiento hídrico en cuencas. En este estudio se utilizó el modelo hidrológico *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) para investigar el comportamiento hidrológico futuro en la cuenca media y alta del río Piura a mediados del siglo XXI. El modelo SWAT fue calibrado y validado para un periodo total de 23 años (1986 - 2008) obteniendo valores de Nash-Sutcliffe (NSE) y coeficientes de determinación (R^2) superiores al 75 por ciento en ambos, lo que indica un desempeño óptimo. Las principales variables climáticas se proyectaron con dos escenarios de forzamiento radiativo RCP4.5 y RCP8.5 de dos modelos climáticos globales (MCG) HADGEM2-ES y CSIRO-Mk3-6-0, del *Coupled Model Intercomparison Project Phase 5* (CMIP5), usando el generador de clima MarkSim; definiéndose un total de cuatro escenarios futuros. Se analizaron los periodos húmedos (octubre a abril) y secos (mayo a setiembre), al igual que el periodo anual. Los resultados muestran que la tendencia promedio del total de proyecciones indica para el periodo húmedo un aumento de la escorrentía de +71.8%, que representa un aproximado de 55.9 m³/s; ocurriendo los mayores incrementos en los meses de octubre, noviembre y diciembre. Por otro lado, el periodo seco disminuye en un -66.1%, que representa una disminución aproximada de 12 m³/s. ocurriendo los mayores descensos en los meses de julio, agosto y setiembre.

Palabras Clave: *SWAT*, Disponibilidad Hídrica, Modelación Hidrológica, Cambio Climático, *RCP*, Modelos Climáticos Globales, *CMIP5*.

ABSTRACT

The fifth assessment report of climate change (AR5) by the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), reiterates the future risks of climate change in our hydrological systems and the threat of a severe reduction in water availability in the near future. Due to global variation of the weather that has been expressed in the form of changes in temperature and precipitation in the last decade. Indeed, one of the research methods to assess the risks of water resources due to climatic variations, it is combining the hydrological modeling with greenhouse emission scenarios to simulate the water behavior in watersheds. In this study, the Soil Water Assessment Tool (SWAT) model has been applied to investigate future hydrological behavior in the middle and upper Piura river basin for the middle of the XXI century. The SWAT model was calibrated and validated for a period of 23 years (1986 to 2008); getting Nash-Sutcliffe (NSE) values and coefficients of determination (R^2) above 75 percent in both, depicting reasonably good model performance. The main climatic variables were projected with two radiative forcing scenarios RCP4.5 and RCP8.5 of two global climate models (MCG) HADGEM2-ES and CSIRO-Mk3-6-0, from Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 (CMIP5), using the weather generator MarkSim, defining four future scenarios in total. Humid periods (October to April) and dry periods (May to September) were analyzed, as was the annual period. The result shows that the average trend of total projections indicates an increase in runoff of + 71.8% for the wet period, representing an approximate 55.9 m³/s; and the highest increases would occurred in October, November and December. Whereas, the dry period decreases by -66.1%, which represents an approximate decrease of 12 m³/s, and the largest decreases would occurred in July, August and September.

Key words: SWAT, Water Availability, Hydrological Modeling, Climate Change, RCP, General Circulation Models, CMIP5.

I. INTRODUCCIÓN

El cambio climático está generando alteraciones climáticas que afectan las condiciones hidrológicas, dando lugar a diversos impactos en los sistemas globales de recursos hídricos. Estos pueden estar asociados en procesos hidrológicos, tales como la evapotranspiración, el volumen del flujo de agua en ríos, la humedad del suelo, el momento y la magnitud de la escorrentía, y la frecuencia e intensidad de las inundaciones. Por consiguiente, existe la necesidad de evaluar estos cambios, especialmente en las regiones con recursos escasos de agua, alta sensibilidad del clima y un desarrollo socio-económico dinámico.

El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), en su quinto informe (AR5) ha definido cuatro nuevos escenarios de emisión de carbono, denominadas Trayectorias de Concentración Representativas (RCP, por sus siglas en inglés), hacia el año 2100. Donde, las proyecciones climáticas indican aumentos en la temperatura en toda América Latina; para los escenarios de emisiones medias y altas (RCP 4.5 y 8.5), el calentamiento varía de +1,7°C a +6,7°C en América del Sur. Y, las variaciones de las precipitaciones tienen un incremento del 25% en el sureste (IPCC, 2013).

En la última década se ha observado que el Perú es vulnerable ante una variabilidad climática drástica, cuya evidencia se refleja principalmente en pérdidas económicas. En este contexto, estas incidencias, pueden exacerbarse aún más al involucrar otros mecanismos que afecten negativamente el crecimiento económico; como la pérdida de disponibilidad de recursos hídricos, pérdida de productividad primaria agrícola y pesquera producto del aumento de la temperatura del mar, variaciones en los períodos vegetativos de diferentes cultivos y afectaciones directas por exceso de humedad o sequía, pérdida de biodiversidad y/o efectos negativos sobre la salud humana.

La cuenca del río Piura al estar expuesta a diferentes eventos extremos, como el fenómeno El Niño y sequías recurrentes presenta una alta vulnerabilidad ante los impactos del cambio climático. Su importancia para la economía nacional, radica en el gran potencial de desarrollo agroexportador y pesquero; por su biodiversidad dada a sus características

geográficas particulares asociadas al bosque seco tropical y al encuentro de dos corrientes marinas de temperaturas contrapuestas, aguas frías de Humboldt y calientes de El Niño, que permiten el cultivo de una gran diversidad de productos y a la vez enriquecen el mar.

Actualmente, los modelos hidrológicos se han convertido en una valiosa herramienta para hacer frente al amplio espectro de problemas en los recursos hídricos. Además, con los avances en la teledetección y los sistemas de información geográfica (SIG) se ha impulsado el uso de los modelos hidrológico para investigar los efectos de la variación climática en el balance hídrico que simulan el comportamiento hidrológico en una cuenca y su relación directa con el clima, la topografía, la geología y el uso del suelo, además del impacto de las actividades humanas. “*The Soil and Water Assessment Tool*” (SWAT), es utilizado con frecuencia para este propósito.

Por tanto, en la presente investigación se evaluó el cambio futuro de la oferta hídrica de la cuenca media y alta del río Piura a mediados del siglo XXI, con el modelo SWAT y los modelos de circulación general (MCG) HadGEM2-ES y CSIRO-Mk3-6-0 en las rutas de concentración representativa RCP 4.5 y 8.5. Además, de simular valores de evapotranspiración referencial (ET_o) en dichos escenarios futuros bajo condiciones de cambio climático.

Es importante predecir los cambios en el ciclo hidrológico bajo escenarios de cambio climático utilizando modelos hidrológicos adecuados, que puedan capturar los fenómenos hidrológicos con un detalle espacial suficiente, para preparar a las regiones que puedan verse afectadas. Los resultados de esta investigación ayudarán en la toma de decisiones acertadas y racionales en distintos enfoques para enfrentar y superar los desafíos de las actividades de gestión de los recursos hídricos que se pueden presentar en la cuenca dentro del contexto de cambio climático, garantizando la estabilidad y sostenibilidad del agua dentro de la cuenca.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. Objetivo principal

El objetivo principal de este estudio es evaluar el cambio futuro de la oferta hídrica de la cuenca media y alta del río Piura, bajo escenarios de cambio climático, a través de la modelización hidrológica mediante el programa “*The Soil and Water Assessment Tool*” (SWAT).

1.1.2. Objetivos específicos

- Realizar el análisis de sensibilidad para obtener un buen rendimiento en la calibración y validación del modelo en condiciones actuales.
- Seleccionar y caracterizar los escenarios de cambio climático para la cuenca media y alta del río Piura.
- Simular la evapotranspiración referencial (ET_o) para los escenarios de cambio climático.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. EL CICLO HIDROLÓGICO

La Tierra tiene una gran cantidad de agua en diferentes estados y formas, que está en constante movimiento, y se le conoce como el ciclo hidrológico. Evidenciándose a medida que viaja a través de diferentes sistemas globales o almacenamientos por medio de diferentes procesos (Neitsch et al., 2005^a). Se encuentra conformado por los siguientes componentes:

La precipitación es el agua proveniente de la atmósfera en formas tales como lluvia, nieve, aguanieve o granizo. Esto resulta de la evaporación del agua en la tierra hacia la atmósfera donde se encuentra temporalmente retenida y se acumula saturando la atmósfera donde finalmente es puesto en libertad. La precipitación se considera como el principal insumo en los modelos de las cuencas hidrográficas.

La evaporación se produce cuando el agua cambia de un estado líquido al gaseoso, llegando a la atmósfera. Esto aumenta por la radiación solar, y un incremento de la temperatura del aire. Mientras más alto contenido de humedad tenga el viento, se reducirá el potencial de evaporación.

La transpiración es la liberación de agua por las plantas como un subproducto de la fotosíntesis. La evapotranspiración es la combinación de los dos procesos de evaporación y transpiración debido a la dificultad en la separación de los dos procesos.

La infiltración es la entrada de agua en el suelo. Depende de las propiedades del suelo, tales como el contenido de materia orgánica, la densidad, textura, conductividad hidráulica y porosidad. Las condiciones en la superficie del suelo también afectan la infiltración, en el suelo compactado restringirá la infiltración, la vegetación como los bosques ralentizará el flujo de agua y permitirá una mayor infiltración. La topografía, rugosidad, pendiente y las actividades humanas que alteren la superficie del suelo en zonas urbanas y agrícolas también afectan la infiltración del agua en un área.

La Percolación es el movimiento descendente del agua después de entrar en el suelo por gravedad a través del perfil del suelo. Lo que se mueve más allá de la zona de las raíces de plantas hacia la formación geológica subyacente se llama percolación profunda, es fuera del alcance de las raíces de las plantas y se dirige hacia la reposición del suministro de agua subterránea y este proceso se conoce como la recarga de acuíferos.

La escorrentía es la porción de las precipitaciones, deshielo, o agua de riego que fluye sobre y a través de los suelos, con el tiempo haciéndose un hueco en los sistemas de agua de la superficie. Un gran porcentaje de escorrentía superficial llega a los arroyos, donde se describe como el caudal o flujo. También ocurre cuando el suelo está saturado.

Flujo lateral El flujo lateral es el agua que se mueve por debajo de la superficie del suelo y sobre el nivel de los acuíferos, la cual fluye sub-superficialmente y alimenta a los canales de drenaje ríos, lagos. El flujo subsuperficial lateral es calculado simultáneamente con la percolación para el perfil del suelo entre (0-2m) mediante un modelos de almacenamiento cinético, que usa la ecuación de conservación de la masa con el perfil entero del suelo como el volumen de control (Proaño et al., 2006).

Flujo de agua subterránea se produce en el ciclo hidrológico, este proceso crea un flujo de base para los cuerpos de agua superficiales y para la recarga de aguas subterráneas. Un gran porcentaje de esta agua se utiliza para beber y para riego.

El balance hidrológico es la cuantificación de las componentes del ciclo hidrológico en las cuencas hidrográficas o de cuerpos de agua subterráneas, con el propósito de determinar los principales flujos hídricos en las cuencas. El balance hídrico es la aplicación del principio de la igualdad de las masas con respecto al flujo de agua, en un sistema determinado (Díaz et al., 2005), es decir, en un espacio geográfico en el cual se examina el ciclo hidrológico; este balance puede ser expresado en términos de:

$$\text{Flujo de entrada} - \text{Flujo de Salida} = \text{Relación de cambio de agua almacenada}$$

La cuantificación del balance hídrico es normalmente complicada, pues la falta de medidas directas, la variación espacial de las variables (tales como precipitación, evapotranspiración), las pérdidas profundas (a acuíferos) y las variaciones del agua almacenada son una limitación en este proceso, sin embargo, como respuesta a estas dificultades, de manera general se admiten dos premisas: la primera supone que las pérdidas profundas son despreciables (se considera que una cuenca es impermeable) y la segunda

admite que las variaciones del agua almacenada en la cuenca hidrográfica son despreciables para un periodo normalmente largo (Faustino, 2012).

Por último, el clima de una cuenca hidrográfica proporciona las entradas de humedad y energía, que controlan el equilibrio del agua y determinan la importancia relativa de los diferentes componentes del ciclo hidrológico. De modo que cuando se produce una precipitación, esto puede ser interceptado y contenido en el dosel de vegetación o caer a la superficie del suelo, y esto se infiltra en el perfil del suelo o fluirá sobre el terreno como escorrentía, moviéndose hacia un cauce y contribuyendo a la formación de los ríos. Por otra parte, el agua infiltrada puede ser contenida en el suelo y evapotranspirada o puede avanzar lentamente al sistemas de aguas subterráneos (Neitsch et al. 2005a).

2.1.1. Evapotranspiración

La evaporación es el término empleado para englobar todos los procesos por los cuales el agua en su estado líquido o sólido, en o cerca de la superficie terrestre se transforma en vapor de agua y pasa a la atmósfera. La evapotranspiración incluye el proceso de evaporación de agua desde cuerpos de agua, suelo desnudo y superficies vegetales, la evaporación del agua contenida en las hojas (transpiración), y la sublimación del hielo en superficies nevadas.

Según se ha demostrado aproximadamente el 60% de la precipitación que cae sobre la superficie terrestre es evaporada. Dentro de esta fracción, gran porcentaje ocurre desde la superficie terrestre, siendo la vegetación la causante de grandes pérdidas de agua del sistema a través de la transpiración. Esta pérdida de agua aumenta significativamente a lo largo de la etapa de crecimiento (fisiología de la planta) y durante el día. En el caso de la evaporación los principales factores que la controlan son los procesos físicos que se dan cerca del suelo (radiación solar, humedad atmosférica, temperatura del aire, viento, etc.). Cuando la cobertura vegetal es pobre, la evaporación es el proceso dominante, y viceversa, haciéndose cada vez más importante el proceso de transpiración a medida que aumenta la cobertura vegetal. Sin embargo es de gran dificultad hacer una distinción cuantitativa de ambos fenómenos, por lo que siempre nos referimos al término de evapotranspiración (Oki T.; Hanae S., 2006; Chow et al., 1994).

Los diversos métodos de estimación de la evapotranspiración han surgido en su mayoría ante la dificultad para medir esta variable y están orientados a una superficie o situaciones particulares de intercambio de energía según las siguientes características:

- 1) Tipo de superficie: Cuerpos de agua, suelo desnudo, follaje, un cultivo de referencia específico o regiones mixtas, es decir, que abarcan las superficies anteriores.
- 2) Disponibilidad de agua: Disponibilidad de agua ilimitada para evaporar o suministro de agua hacia la atmósfera limitado por las condiciones impuestas en el suelo y en la planta.
- 3) Uso de la energía almacenada: En el balance de energía global, la energía almacenada en el sistema puede ser significativa, despreciable o nula.
- 4) Uso de la energía por advección: En el balance de energía global, la energía almacenada en el sistema puede ser significativa, despreciable o nula.

2.1.2. Evapotranspiración de referencia

La evapotranspiración de referencia (ET_o) es una cantidad que describe la velocidad a la que el agua se vaporiza a partir de un cultivo superficial de referencia (Jensen et al., 1990). El cultivo de referencia debe ser una planta bien regada como la alfalfa de tallo alto (Allen et al., 1998). Este parámetro es útil para tomar mejores decisiones sobre el uso del agua.

La literatura sobre el cálculo de referencia ET_o es bastante amplia, y algunos métodos son mejores que otros. Aunque cada método depende del tipo de información disponible que se tenga, sin embargo el modelo más aceptado es la ecuación de ASCE Penman-Monteith (PM) que tiene la siguiente forma:

$$ET_r = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{C_n}{T+273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + C_d u_2)}$$

Donde:

ET_r=Evapotranspiración de referencia (mm/día).

R_n= Radiación neta calculada en la superficie del cultivo (MJ/m²día).

G= Densidad de flujo de calor en la superficie del suelo (MJ/m²día).

T= Temperatura diaria media del aire de 1,5 a 2,5 m de altura (°C).

u₂=Velocidad media del viento a 2 m

e_s= Presión de vapor de saturación de 1,5 a 2,5 m

e_a= Presión de vapor real media de 1,5 a 2,5 m

Δ=Pendiente de saturación en la curva de presión de vapor-temperatura (kPa°C⁻¹)

γ= Constante psicrométrica (kPa°C⁻¹)

C_n= Constante que cambia con el tipo de referencia y el tiempo (K mm s³/Mg día)

C_d= Constante que cambia con el tipo de referencia y tiempo (s m⁻¹)

2.2. MODELACIÓN HIDROLÓGICA

Un modelo se define como la representación de una parte de un sistema que conceptualiza las interrelaciones y respuestas de las condiciones reales, y que es capaz de hacer pronósticos bajo un conjunto de condiciones propuestas. En el ámbito de la modelación hidrológica, los modelos representan los fenómenos hidrológicos que hay en el ciclo del agua, éstos son aproximaciones de la realidad y en consecuencia la salida de un sistema real puede establecer con cierto grado de confianza (Salgado Rabadán, J. H., & Güitrón de los Reyes, 2012).

En este tipo de investigación son valiosas herramientas de estudio. Y tienen como objetivo tradicional principal, predecir la cantidad de la descarga de una cuenca de drenaje. Muchos estudios demuestran la capacidad de los modelos hidrológicos para estimar componentes del balance hídrico y evaluación del cambio climático (p.e. Stonefelt et al., 2000; Abbaspour et al., 2007).

Los modelos hidrológicos se pueden clasificar en enfoques deterministas y estocásticos. En el enfoque determinista, un modelo hidrológico se puede dividir en empírica (Black box), conceptual (Grey box) o con base física (White box). También se pueden agrupar en los modelos basados concentrados o distribuidos. Enfoques estocásticos se derivan de un análisis de series temporales. La Figura 1 muestra el resumen de la clasificación de los modelos hidrológicos.

Los modelos empíricos se basan en ecuaciones matemáticas. Sistemas de modelos lineales con restricciones (CLS) (Todini y Wallis, 1977) y el modelo de índice de precipitación antecedente (API) (OMM, 1994) son ejemplos de modelos empíricos. En modelos agrupados, para toda el área modelada, los parámetros son promediados espacialmente a un valor. El sistema de modelado de Stanford (Crawford & Linsley, 1966) y HEC-HMS (EE.UU. Cuerpo de Ingenieros del Ejército) agrupan los modelos, por ejemplo.

En un modelo distribuido, los parámetros varían espacialmente. MIKE-SHE (Refsgaard y Storm, 1995), Sistema de modelado de escorrentía de precipitación (PRMS) (Leavesley et al., 1983), y la herramienta de evaluación de suelo y agua (SWAT) (Arnold et al., 1998) son algunos ejemplos de estos modelos.

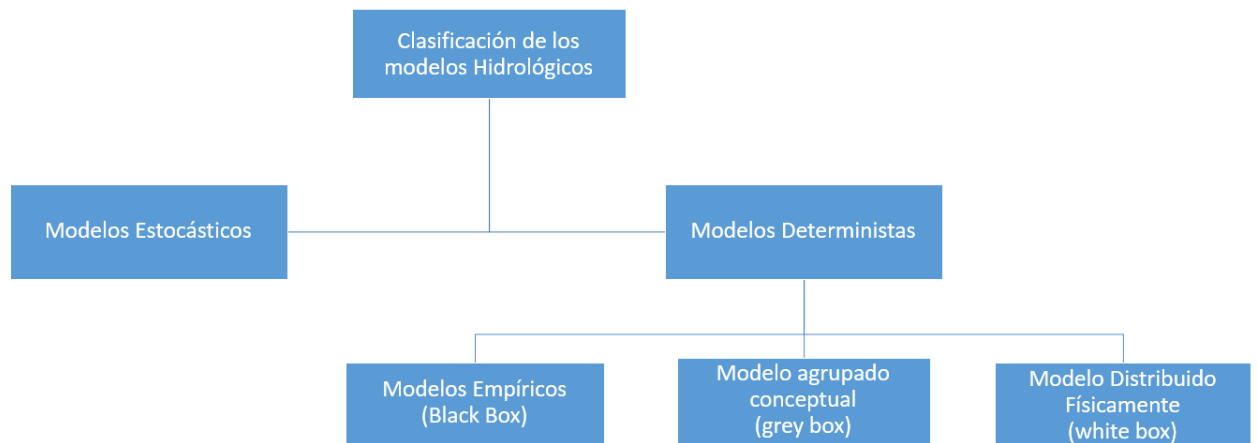


Figura 1: Clasificación de los Modelos Hidrológicos.

Fuente: Refsgaard y Storm, 1995.

La Modelización hidrológica distribuida es ventajosa en términos de los efectos que estudian de uso de la tierra, ya que su naturaleza distribuida permite la simulación y estimación de las variaciones espaciales, características y cambios dentro de una cuenca. No sólo proporciona una única descarga de salida, pero varias salidas de forma distribuida temporal y espacialmente. Las desventajas con el tipo distribuida de modelado son la gran cantidad de datos y los requisitos computacionales pesados, también un gran número de parámetros y variables que tienen que ser evaluado. El efecto de la elección de escala (tamaño de celda) es también una incertidumbre.

Actualmente, con la incorporación de los ordenadores y los datos espaciales de alta calidad, el interés se ha desplazado de los modelos agrupados hacia modelos distribuidos espacialmente, donde el movimiento de agua dentro de una cuenca de drenaje puede ser simulado. La modelización hidrológica distribuida espacialmente puede ser aplicada al movimiento de los contaminantes, la simulación de fuga de nutrientes en las tierras agrícolas, el impacto de la vegetación y uso del suelo en los regímenes hidrológicos y, por último, el impacto de la superficie terrestre (por ejemplo, la agricultura y la silvicultura).

Por consiguiente, debido a la heterogeneidad que presentan las cuencas, y con su distribución espacial de topografía, características del suelo, vegetación, uso del suelo / cobertura de la tierra, las precipitaciones y evaporación, un modelo distribuido físicamente es una herramienta adecuada para la simulación de los procesos hidrológicos en curso dentro de la cuenca.

Tabla 1: Ventajas y desventajas de los modelos hidrológicos.

| Modelo | Institución | Ventajas | Desventajas |
|-------------------------------|--|---|--|
| MIKE- BASIN / MIKE SHE | Danish Hydraulic Institute | Esta herramienta cuenta con un sistema modular en el que es posible sólo aplicar el módulo donde se aplica el modelo lluvia escurrimiento (MIKE11), es posible agregarle más módulos de acuerdo a los requerimientos. | La principal desventaja es el costo que asciende a miles de dólares dependiendo del módulo. Es un sistema cerrado, donde no se tienen opciones para desarrollar nuevos algoritmos. |
| HYDROTEL | L'Institut national de la recherche scientifique (INRS - ETE) | Es un modelo abierto que permite integrarle algoritmos desarrollados de manera externa. Tiene una capacidad alta de definición de micro- cuencas y no de malla como la mayoría de los MHD. El área de las microcuencas puede precisarse hasta 3 km ² . Su costo es reducido. | No tiene algoritmos suficientemente desarrollados para el funcionamiento de vasos. Se requiere de la preparación de una gran cantidad de archivos para la preparación de datos. |
| VIC | Washington University | Es un modelo de uso libre, tiene archivos de datos simplificados disponibles para la mayor parte de la República Mexicana. Está ligado a un modelo de pronóstico de lluvia tiempo real. Cuenta con un algoritmo de auto calibración. | La definición de la malla no tiene una precisión suficiente hasta 1/8 de grado (182.25 km ²) |
| SWAT | Soil and Water Assessment Tool de USDA Agricultural Research Service y Soil and Water Research Laboratory, Tx. EUA | El modelo está constituido por una serie de sub-modelos o módulos, los cuales se emplean para simular distintos procesos hidrológicos. Tiene la capacidad para agregarle otro tipo de modelos como el MODFLOW. Es de uso libre. | Representa con mayor precisión el proceso físico, del flujo de agua, en cuencas pequeñas, no en cuencas de varios miles de kilómetros. |
| HEC-HMS | Hydrologic Modeling System of Hydrologic Engineering Center, US Army Corps of Engineers | El grado de discretización de la malla depende de la capacidad de cómputo que se tenga. | No se tiene suficiente precisión en los resultados en cuencas grandes, de varios miles de Km ² . Poca capacidad de acoplamiento con otros modelos. |
| WATFLOOD | Universidad of Waterloo Ontario (UWO) | Es un modelo capaz de acoplarse fácilmente con otros modelos como los modelos atmosféricos el MOD FLOW. Es de uso libre. | Esta herramienta fue desarrollada principalmente para acoplarla a un modelo atmosférico y los principales problemas se dan en la comunicación de datos de estos dos modelos. Cuenta con una precisión en la definición de la malla de 15 km ² . |

| | | | |
|----------|----------------------|--|---|
| TOPMODEL | Lancaster University | El modelo requiere de pocos parámetros en la cuenca. El código del modelo está abierto para posibles modificaciones. Se ha aplicado en cuencas grandes de varios cientos de miles de kilómetros El modelo es de uso libre para fines académicos y de investigación | Presenta dificultades cuando se aplica en zonas con clima semi-árido o seco, con largos periodos de sequía. No es aplicable en cuencas excesivamente largas con pendiente moderada, la localización de zonas inundadas ocasiona muchas dificultades en la modelación. |
|----------|----------------------|--|---|

Fuente: Salgado, R. 2012.

2.3. SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG) EN LOS RECURSOS HÍDRICOS

La Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la alimentación define a los Sistemas de Información Geográfica como sistemas computarizados para el almacenamiento elaboración y recuperación de información con equipos y programas informáticos expresamente concebidos para trabajar con datos geo-referenciados y sus correspondientes atributos temáticos (FAO, 2000; citado por Morad y Triviño, 2001).

El manejo del recurso hídrico requiere un amplio rango de datos espaciales, como relieve, clima, suelos, y uso de suelo (Wilson et al., 2000), de modo que los sistemas de información geográfica (SIG) y la modelación hidrológica son aplicados para conocer los avances y é manejo de los recursos hídricos, y su contribución es importante para la gestión y la toma de decisiones (Wilson et al. 2000; Jayakrishnan et al., 2005).

No obstante, los modelos de elevación digital (DEMs) han tenido grandes impactos de aplicaciones de SIG en el estudio del recurso hídrico. Actualmente las nuevas tecnologías como LIDAR (*light detection and ranging*) y GPS (*global positioning system*) ayudan a obtener una cartografía con mayor detalle y precisión, que permite un mejor análisis y predicción del comportamiento hidrológico y la contaminación en una cuenca hidrográfica (Wilson et al., 2000).

Hoy en día, la evolución de la informática ha revolucionado el estudio de los sistemas hidrológicos y la gestión de los recursos hídricos a escalas de cuenca (Jayakrishnan *et al.* 2005), de modo que la evaluación de los recursos hídricos y la gestión son actividades que requieren el manejo múltiples formas de datos espaciales.

Convirtiéndose así en una pieza clave en los estudios hidrológicos, ya que ha demostrado ser útil en procesos de modelado hidrológico, como la distribución espacial y temporal de las entradas y los parámetros que controlan la escorrentía superficial. Los mapas que describan la topografía, uso del suelo, los suelos de cobertura del suelo, la lluvia y las variables meteorológicas pueden llegar a ser los parámetros del modelo o de los insumos en la simulación de los procesos hidrológicos. Proporcionando un entorno de simulación basado visual y las capacidades de gestión de escenarios y análisis, evaluando de una manera más practica la variabilidad hidrológica, espacial y estacional de los parámetros que intervienen en el proceso de modelado.

SIG proporciona bien desarrollado algoritmos para hacer frente a los datos geográficos de alto detalle espacial y de contenido de información. Sin embargo, dependiendo de la cuenca, una gran cantidad de estos datos requiere pre-procesamiento y la conversión antes de que pueda ser utilizado para la modelización hidrológica distribuida.

2.4. HERRAMIENTA DE EVALUACIÓN DEL SUELO Y AGUA (SWAT)

La Herramienta de Evaluación del Suelo y Agua (SWAT), es un modelo hidrológico que se puede aplicar a escala de cuencas. Es un modelo de tiempo continuo que opera en intervalos de tiempo diario y utiliza una estructura de mando para el encaminamiento de la escorrentía y la química a través de las cuencas hidrográficas. Es desarrollado por el Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA) Servicio de Investigación Agrícola (ARS) para simular los efectos causados por los impactos de la gestión y el clima en el suministro de agua, sedimentos y rendimientos químicos agrícolas en las subcuencas y cuencas más grandes con diferentes suelos, uso de la tierra y las condiciones de manejo durante largos períodos de tiempo (Arnold et al., 2005). ArcSWAT (Arcgis & Swat) es la última versión disponible que se utiliza como una interfaz entre ArcGIS y el modelo SWAT. ArcSWAT versión 10.3.19, fue adaptada para el ArcMap v.10.3.

Los datos espaciales (DEM, del suelo y del uso de la tierra) se utilizan en la fase de pre-procesamiento y se introducen en el modelo SWAT a través de la interfaz. La cobertura del suelo y la tierra hacen importantes unidades que responden y la misma se lleva a cabo según el modelo SWAT mediante la subdivisión de la cuenca en zonas que tienen uso de la tierra y la combinación única de suelo que se llaman Unidades de Respuesta Hidrológica (HRU) durante el proceso de generación de escorrentía.

Logrando alcanzar una simulación de alto nivel de detalle espacial al dividir la cuenca en un gran número de sub-cuencas que se caracterizan por una o más unidades de respuesta hidrológica (HRUS). Cada HRU corresponde a una combinación particular de suelo y uso de la tierra dentro de la subcuenca, sólo los tipos de suelos y clases de uso de la tierra que excedan el área definida por el usuario umbral se consideran para establecer la combinación de superposición. El programa está dotado de una interfaz en ArcView GIS para la definición de las características hidrológicas de las cuencas hidrográficas y de almacenamiento, así como la organización y la manipulación de los datos espaciales y tabulares relacionados.

SWAT requiere una variedad de capas de datos de entrada para la configuración del modelo y las simulaciones. La topografía de la cuenca está definido por un modelo de elevación digital (DEM). Se utiliza para calcular los parámetros de sub-cuencas, como la pendiente y definir la red de la corriente. Además, se requieren los datos del suelo para definir las características del suelo y atributos. Los datos de ocupación del suelo proporcionan información sobre la vegetación en el suelo y sus procesos ecológicos en tierras y suelos. Los datos climáticos, precipitación y flujo de corriente se obtienen y se preparan de acuerdo con los requisitos de entrada SWAT. La Figura 2 muestra una visión global de los componentes del modelo SWAT, incluyendo la entrada, salida, los conjuntos de datos espaciales, y sus partes SIG; resumiendo la metodología.

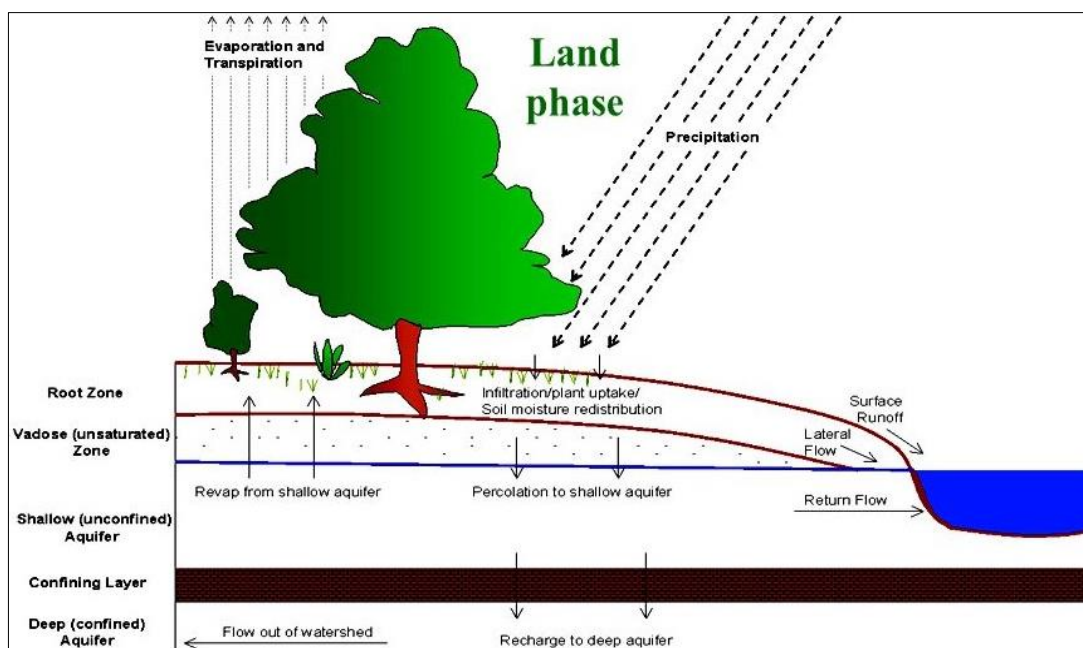


Figura 2: Fases del ciclo hidrológico simulados por SWAT.

Fuente: Neitsch, 2011.

2.4.1. Componente hidrológico del SWAT

La simulación de la hidrología se realiza en dos divisiones separadas. Una de ellas es la fase terrestre del ciclo hidrológico que controla la cantidad de cargas de agua, sedimentos, nutrientes y pesticidas para el canal principal en cada subcuenca. Componentes hidrológicos simulados en la fase terrestre del ciclo hidrológico son el almacenamiento del dosel, la infiltración, redistribución, evapotranspiración, flujo subsuperficial lateral, escorrentía superficial, estanques, canales tributarios y retorno. La segunda división es el enrutamiento fase del ciclo hidrológico que se puede definir como el movimiento del agua, sedimentos, nutrientes y productos químicos orgánicos a través de la red de canales de la cuenca a la salida. En la fase terrestre del ciclo hidrológico, SWAT simula el ciclo hidrológico basado en la ecuación de balance hídrico, considerando la zona no saturada y el acuífero superficial por encima de la capa impermeable como una unidad, como se muestra en la ecuación 1.

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{qw})_i \quad (1)$$

Donde:

- SW_t : Contenido final de agua en el suelo (mm).
- SW_0 : Contenido inicial de agua del suelo en el día i (mm).
- t : Tiempo (días).
- R_{day} : Cantidad de precipitación en el día i (mm).
- Q_{surf} : Cantidad de escorrentía superficial por día (mm).
- E_a : Cantidad de evapotranspiración en el día (mm).
- W_{seep} : Cantidad de agua acumulada en la zona no saturada del perfil del suelo en el día i (mm).
- Q_{qw} : Cantidad de flujo de retorno en el día i (mm).

La escorrentía superficial o flujo superficial por lo general se produce en una pendiente cada vez que la tasa de precipitación excede la tasa de infiltración. SWAT utiliza dos métodos para estimar la escorrentía superficial: el método del número de curva SCS (USDA-SCS, 1972) y el método de Green & Ampt infiltración (Green y Ampt, 1911).

SWAT calcula la tasa de escorrentía pico con un método racional modificado. Hay muchos métodos que se desarrollan para estimar la evapotranspiración referencial (ET_o). Tres métodos se incorporan en SWAT: el método de Penman-Monteith (Monteith, 1965), el método Priestley-Taylor (Priestley y Taylor, 1972) y el método de Hargreaves (Hargreaves et al., 1985). Para este estudio se utilizó el método de Hargreaves, debido a la falta de datos meteorológicos, como la velocidad del viento, la humedad y las horas de sol.

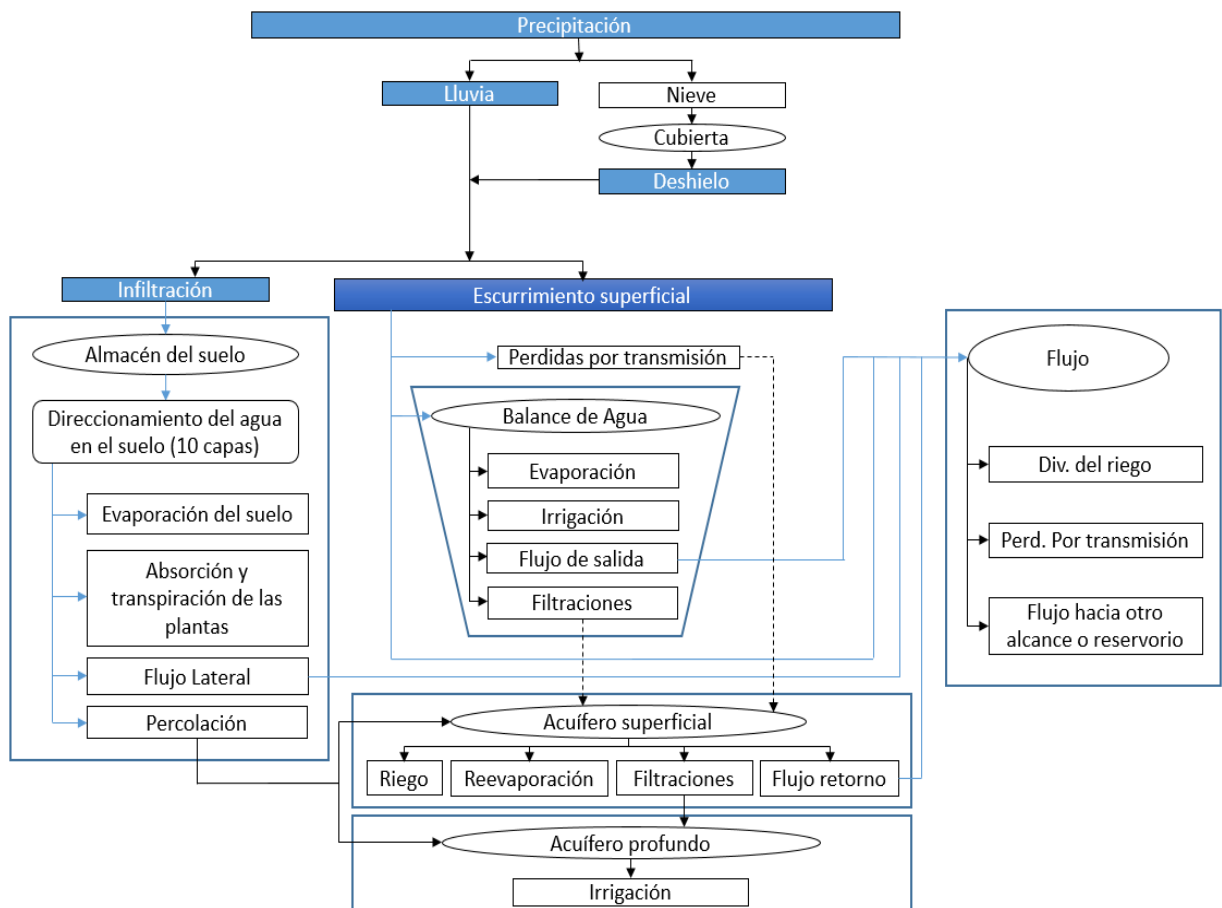


Figura 3: Simulación de movimiento del agua en SWAT.

Fuente: Neitsch, 2011.

2.5. CAMBIO CLIMÁTICO

El cambio climático es definido por el IPCC como “cualquier cambio en el clima a través del tiempo que sea producto de la variación natural o resultado de la actividad humana”. El desarrollo de la actividad industrial y otras actividades humanas, ha intensificado el efecto invernadero, provocando el aumento acelerado de la temperatura e incrementando el riesgo de desastres de origen climático, (IPCC, 2007).

La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), atribuye el cambio climático a las actividades humanas que directa o indirectamente alteran la composición atmosférica, mientras que la variabilidad climática la atribuye a causas naturales.



Figura 4: Impactos y Consecuencias del Cambio Climático.

Fuente: CMNUCC, 1992.

2.5.1. Cambio climático en el Perú

El Perú es un país altamente vulnerable a los efectos adversos del cambio climático, pues presenta cuatro de las cinco características de vulnerabilidad reconocidas por la CMNUCC. Adicionalmente, el país continúa su crecimiento poblacional y ocupación económica del territorio, con persistencia de pobreza, ecosistemas amenazados, glaciares tropicales en reducción, problemas de distribución de recursos hídricos por su geografía diversa mayormente agreste, y actividad económica altamente dependiente del clima. Por ello, se requiere mejorar la capacidad nacional para prever escenarios de cambio climático, adelantar acciones de previsión, y sistematizar nuestro conocimiento y experiencias al respecto.

2.5.2. Escenarios de emisión

En estudios ambientales, y más precisamente para el IPCC, los escenarios son imágenes del futuro o alternativas futuras que no son ni predicciones ni previsiones, sino más bien imágenes alternativas (IPCC, 2001). El IPCC define como escenarios las proyecciones del estado futuro de la sociedad y del medio ambiente, basadas en suposiciones sobre el

aumento de la emisión de gases de efecto invernadero y aerosoles, el aumento de la población, el crecimiento económico y las políticas ambientales.

Los escenarios de emisión están basados en las emisiones de gases de efecto invernadero. Estas emisiones son productos de sistemas dinámicos muy complejos determinados por el desarrollo demográfico y socio-económico, cambios tecnológicos y políticas ambientales. Su incertidumbre es muy grande. De manera que el conjunto de escenarios es frecuentemente adoptado para reflejar, tan bien como sea posible, el rango de incertidumbre en las proyecciones. Un sinónimo de escenario usado frecuentemente es “caracterización” y se habla de caracterización futura (IPCC, 2013).

Los escenarios actuales representan los posibles impactos (físicos, ecológicos y económicos) y las posibles respuestas que ayuden a la toma de decisiones políticas. Estos escenarios son distintos de los usados en el Cuarto Informe del IPCC (AR4) y fueron desarrollados por la “*Integrated Assessment Modelling Community (IAMC)*”. Panel científico, que incluye representantes de las comunidades de desarrolladores de escenarios socioeconómicos, modeladores climáticos, mitigación y adaptación que desarrollan, conjuntamente, estos nuevos escenarios. (CIIFEN, 2014)

Los nuevos escenarios de emisiones presentan las siguientes características (Moss et al., 2010, van Vuuren et al., 2011).

- a) Proveen información detallada a las comunidades de adaptación y desarrollo socioeconómico para desarrollar escenarios basados en políticas futuras.
- b) Representan forzamientos radiativos lo suficientemente diferentes como para poder diferenciar su impacto climático en el largo plazo.
- c) Son compatibles con todo el rango de escenarios de emisiones, estabilización y mitigación existente en la literatura publicada y revisada por pares.

Hay cuatro nuevos escenarios, y son nombrados de acuerdo al forzamiento Radiativo (FR), que producen al año 2100: RCP 2.6 W/m², RCP 4.5 W/m², RCP 6.0 W/m² y RCP 8.5 W/m². Los escenarios RCP (Rutas de concentración representativa), comprenden un escenario en el que los esfuerzos en mitigación conducen a un nivel de forzamiento muy bajo (RCP2.6), 2 escenarios de estabilización (RCP4.5 y RCP6.0) y un escenario con un nivel muy alto de emisiones (RCP8.5). Las características más resaltantes de estos escenarios se ilustran en la Tabla 1.

Tabla 2: Vías de concentración representativas definidas para el quinto informe (AR5) del IPCC

| Name | Radiative forcing | Concentration (p.p.m) | Temp. anomaly (°C) | Pathway | SRES Temp Anomaly equiv. |
|----------------|---|---|--------------------|---------------------------------|--------------------------|
| RCP 8.5 | > 8.5 Wm ⁻² in 2100 | >1370 CO ₂ ~equiv. in 2100 | 4.9 | Rising | SRES A1F1 |
| RCP 6.0 | ~ 6 Wm ⁻² at stabilization after 2100 | ~850 CO ₂ ~equiv. (at stabilization after 2100) | 3 | Stabilization without overshoot | SRES B2 |
| RCP 4.5 | ~ 4.5 Wm ⁻² at stabilization after 2100 | ~650 CO ₂ ~equiv. (at stabilization after 2100) | 2.4 | Stabilization without overshoot | SRES B1 |
| RCP 2.6 | Peak at ~3 Wm ⁻² before 2100 and then declines | Peak at ~490 CO ₂ ~equiv. before 2100 and then declines. | 1.5 | Peak and decline | None |

Fuente: Moss, 2010.

Además, la evolución temporal de las radiaciones y emisiones correspondientes se representan en la Figura 5. Es importante resaltar que el nuevo escenario RCP 2.6 tiene las concentraciones más bajas que cualquiera de los escenarios SRES utilizados en el Cuarto Informe, en cambio el escenario RCP 8.5 llega a fines de siglo con las concentraciones de CO₂ más altas.

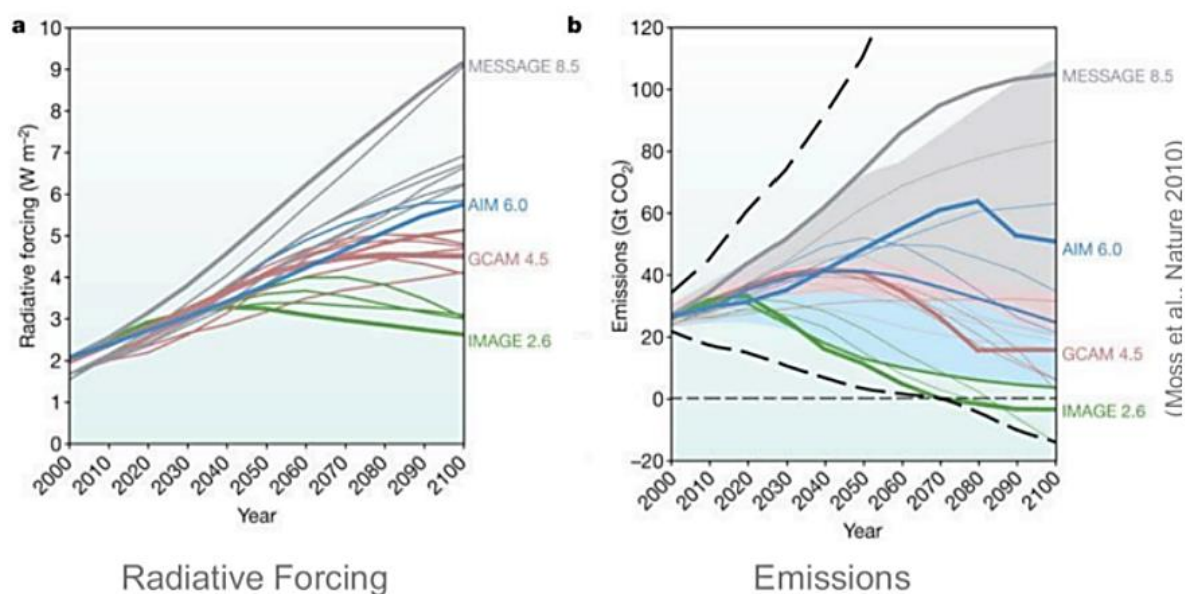


Figura 5: Evolución temporal del forzamiento radiativo (izquierda) y emisiones (derecha) en los RCP usados en el Quinto Informe del IPCC. Las líneas grises representan los escenarios SRES.

Fuente: IPCC, 2013.

A continuación, se describen los cuatro nuevos escenarios de emisión, del quinto informe del IPCC (AR5); denominadas vías de concentración representativa, (*Representative Concentration's Pathways*, RCP) (CIIFEN, 20

- **Vía de concentración representativa - RCP 2.6**

Esta vía de concentración es representativa de escenarios de mitigación cuyo objetivo es limitar el calentamiento global a menos de 2 °C a fin de siglo. Aunque existen importantes incertidumbres, se ha determinado que este objetivo se puede alcanzar si el forzamiento radiativo hacia el año 2100 alcanza valores menores a 3W/m². Por esto, en este RCP se ha supuesto que, inicialmente, el forzamiento radiativo crece hasta alcanzar un valor de 3,1W/m² a mediados de siglo, cuando comienza a reducirse hasta que hacia el final de siglo alcanza un valor de 2.6W/m².

Esto hace necesaria una reducción bastante drástica de las emisiones, que algunos sugieren no son posibles (Van Vuuren et al., 2011). Sin embargo, resultados del modelo integrado de evaluación IMAGE muestra que alcanzar este objetivo es posible para valores de crecimiento de población mundial, Producto Interno Bruto (PIB) e intensidad de emisiones (emisiones/PIB) (ver Figura 6). La realización de este escenario requiere de tecnologías de almacenamiento y captura de carbono (“Carbon Capture and Storage”, CCS) y disminución de emisiones de bio-energías, gas natural, petróleo y carbono a partir del año 2020. La figura 6 muestra la trayectoria de la línea base y las trayectorias requeridas para alcanzar los 2.6 W/m² de forzamiento de este escenario.

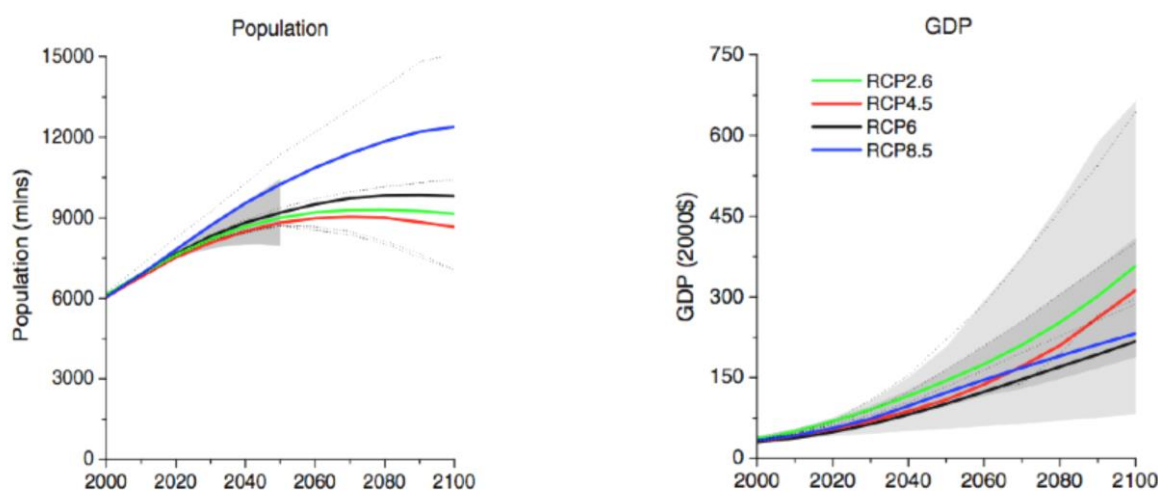


Figura 6: Evolución temporal de la población (izquierda) y producto bruto interno (derecha) en los RCP usados en el Quinto Informe del IPCC.

Fuente: IPCC, 2013.

- **Vía de concentración representativa - RCP 4.5**

Este es un escenario de estabilización, en el que para el año 2100, el forzamiento radiativo es de 4.5 W/m², sin haber excedido este valor antes (Thomson et al., 2011). Para lograr este objetivo, se suponen políticas climáticas, que en este caso incluyen la penalización del uso de carbono. En este escenario, la población mundial llega a nueve mil millones en 2065 y se reduce a 8,7 mil millones en 2100. El PIB mundial crece un orden de magnitud, y la necesidad energética en 3 órdenes de magnitud. Además de imponer precios al carbón, la tecnología de captura y almacenamiento de carbón (CCS) se desarrolla de manera que la industria eléctrica llega a ser un sumidero neto de carbón. En este escenario, las emisiones de GEI llegan a su máximo alrededor del año 2040, luego comienzan a bajar hasta el año 2080, cuando se estabilizan.

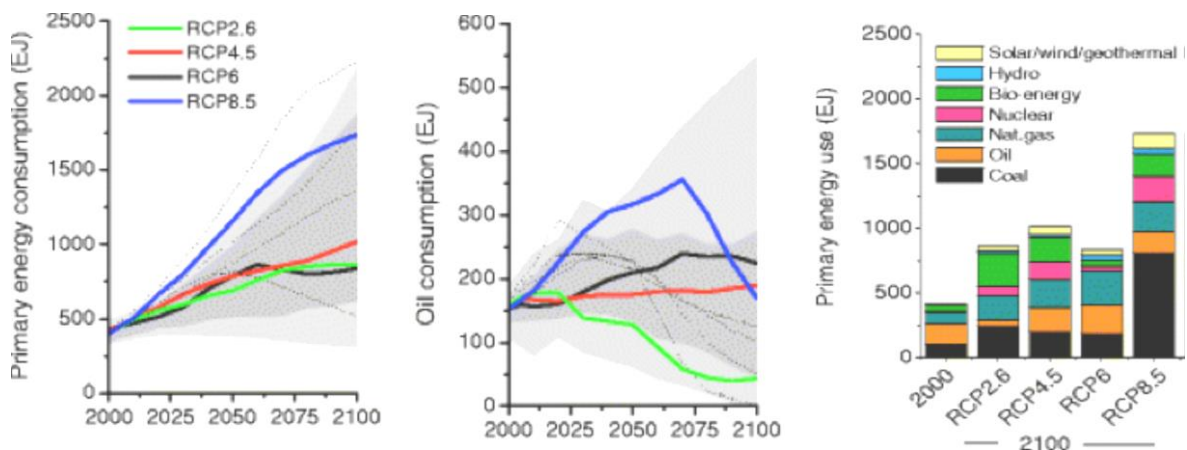


Figura 7: Evolución temporal del consumo de energía (derecha), consumo de combustibles fósiles (centro) y el uso primario de energía (izquierda) en los RCP usados en el Quinto Informe del IPCC.

Fuente: IPCC, 2013.

- **Vía de concentración representativa - RCP 6.0**

Aquí, las emisiones de gases de efecto invernadero y cambios en el uso de suelo se traducen en un forzamiento radiativo de 6 W/m² al año 2100 (Masui et al, 2011).

Esto requiere disminuciones significativas de emisiones a partir del año 2060 (Ver Figura 5), que se logran a través la imposición de políticas climáticas, es decir, que limiten las emisiones vía precios y tecnología de CCS. La población mundial crece hasta 9,8 billones al año 2100. El PIB per cápita global crece un 1,6% anualmente durante 2000–2060 y entre 1,3 y 1,4% durante 2060–2100. La intensidad energética disminuye a un ritmo de 1,2%/año antes de 2060 a un ritmo de 1.5%/año entre 2060-2100.

- **Vía de concentración representativa - RCP 8.5**

Se representa una vía en la que las emisiones y las concentraciones son altas. Sus principales supuestos socio-económicos incluyen alto crecimiento poblacional, relativamente bajo crecimiento de PIB, con tasas modestas de cambios tecnológicos y de eficiencia energética. Esto lleva a una importante demanda energética y consecuente emisiones de gases de efecto invernadero. En este escenario no se implementan políticas de cambio climático. Las Figuras 5 y 6 muestran los forzamientos socio-económicos (población y producto interno bruto), usos energéticos y emisiones para esta vía. En cada aspecto, salvo en PIB, este escenario tiene valores mayores a los otros tres.

2.6. MODELOS DE CIRCULACIÓN GENERAL (MCG)

Los MCG son instrumentos importantes para mejorar nuestra comprensión y la previsibilidad del comportamiento climático en las diferentes escalas temporales. Estos ayudan a investigar el grado en que se observa los cambios climáticos debido a la variabilidad natural, actividad humana o la combinación de ambos. Sus resultados y proyecciones proporcionan información esencial para mejorar las informaciones en diferentes áreas.

Todos los modelos son similares porque describen el mismo sistema climático, pero sus errores, omisión de procesos, simplificaciones, parametrizaciones de procesos, y aproximaciones numéricas no son similares (Knutti et al., 2013). Las expresiones matemáticas que configuran un MCG se pueden analizar por separado dentro de las tres principales partes de que constan estos modelos:

1. La dinámica del sistema del clima que describe el movimiento a gran escala de las masas de aire y el transporte de la energía y momentum.
2. La física del sistema climático tal como transmisión de la radiación a través de la atmósfera, la termodinámica, y la evaporación; y
3. Otros factores tales como la interacción océano-atmósfera, topografía, y parámetros de la vegetación.

Estas expresiones son basadas en las leyes físicas tales como la conservación de energía y masa así como las relaciones empíricas basadas en características y tendencias observadas, tales como fórmulas que relacionen temperatura y humedad con la formación de la nube.

Los modelos climáticos que integran componentes de atmósfera y del océano se conocen como Modelos de Circulación General (GCMs), ya que de manera explícita simulan la circulación de la atmósfera y el océano a una escala mundial (Bader et al., 2008).

Los Modelos de Circulación Atmosférica General (AGCMs) son programas que desarrollan las tres dimensiones del estado de la atmósfera hacia un tiempo futuro. Este estado es descrito por variables de la atmósfera tales como: temperatura, presión, humedad, viento, agua y condensación de hielo en las nubes. Estas variables se definen espacialmente en una cuadrícula dentro de una malla, con un espacio limitado básicamente por los recursos computacionales disponibles (Bader et al., 2008).

Los Modelos de Circulación General Oceánicos (OGCMs) resuelven las ecuaciones primitivas mundiales para el flujo de fluidos incompresibles análogas a las ecuaciones primitivas del gas ideal resuelto por el modelo de circulación general. (Bader et al., 2008). Al acoplarse los AGCM y OGCM forman un Modelo de Circulación General Atmosférico – Oceánico (MCGAO) y al adicionar otros componentes, como un modelo de hielo marino o de un modelo de evapotranspiración de la tierra, el MCGAO se convierte en un modelo climático completo. (Bader et al., 2008)

La mayoría de estos tienen una resolución horizontal entre 250 y 600 km y una resolución de 10 a 20 km en la vertical de la atmósfera, mientras que un modelo típico de océanos tiene una resolución horizontal de 125 a 250 km y una resolución de 200 a 400 m en la vertical (IPCC, 2001).

2.7. MÉTODOS DE REDUCCIÓN DE ESCALA

El uso de los escenarios climáticos establecidos a partir de simulaciones de los MCG para predecir futuros estudios de los impactos del cambio climático se ha ido incrementando. Sin embargo, estos no están diseñados para analizar el impacto hidrológico, y para conseguirlo primero necesitamos resolver su principal limitación, la cual es su resolución espacial relativamente gruesa, siendo incapaz de representar de manera realista la estructura de la escala fina (escala inferior a la malla – “*subgrid scale*”) que caracteriza a las variables climáticas necesarias para los estudios e investigaciones de impacto en zonas específicas.

Los métodos de reducción de escala (*downscaling methods*) son usualmente usados para solucionar estos vacíos entre los MCG y los modelos hidrológicos. Estas técnicas pueden clasificarse en dos categorías, principalmente: la reducción de escala estadística (*statistical*

downscaling) y la reducción de escala dinámica (*dynamic downscaling*), estos se describen en los párrafos siguientes.

a) Reducción de escala estadística de los resultados de los MCG

En la reducción de escala estadística, se establecen relaciones empíricas entre las variables climáticas de la escala GCM (*predictors*) y las variables meteorológicas a escala local (*predictands*) utilizando varios métodos estadísticos (Fowler et al., 2007). En general, la relación empírica puede expresarse como:

$$Y = f(x)$$

Donde, “Y” es la variable climática local que no se describe adecuadamente en los MCGs y necesita ser reducida para estudios de impacto hidrológico, “X” es el conjunto de variables climáticas en una escala gruesa, y “f” es la función que las relaciona.

Las técnicas de reducción pueden ser tales como el método de cambio delta (*Delta change*) o métodos más sofisticados como los modelos de regresión (MLR) y generadores meteorológicos (WG).

En donde un generador de tiempo estocástico produce series temporales artificiales de datos meteorológicos de longitud ilimitada para un lugar basado en las características estadísticas del tiempo observado en ese lugar. Estos tipos de modelos estadísticos se desarrollan generalmente en dos pasos:

- El primer paso se centra en el modelado de la precipitación diaria;
- El segundo paso se centra en las restantes variables de interés, tales como la temperatura máxima y mínima, la radiación solar, la humedad y la velocidad del viento, que se modelan condicionalmente a la ocurrencia de la precipitación.

b) Reducción de escala dinámica de los resultados de los MCG

En la reducción de escala dinámica se utilizan frecuentemente los modelos climáticos regionales (MCR) para generar resultados, variables meteorológicas, con alta resolución utilizando técnicas de anidamiento en las variables de baja resolución proporcionadas por un modelo global (ver Figura 8). Estos modelos parten de una concepto análogo al de los modelos globales al desarrollarse sobre un continuo geográfico y ser sus variables interdependientes, pero los campos atmosféricos (presión superficial, viento, temperatura y

vapor) en los MCR se resuelven en un dominio limitado y con un tamaño de celdilla mucho menor a diferentes niveles verticales y horizontales que los simulados por un MCG. Además, pueden incorporar procesos del sistema climático que no han sido estimados por el modelo global, tales como procesos convectivos, efectos de la nubosidad, intercambios de energía suelo-aire, etc.

Según el IPCC (2013), las escalas espaciales abarcan desde extensiones locales (inferiores a 10^4 km²) hasta regionales (entre 10^4 y 10^7 km²) o subcontinental (mayor a 10^7 km²).

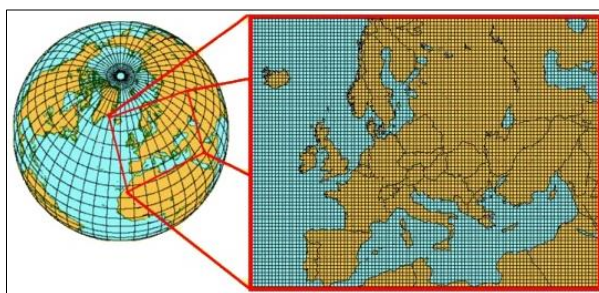


Figura 8: Un modelo regional con tamaño de celdilla reducido se anida en uno global de resolución más baja (celdillas con mayor tamaño), dando información de la evolución de las variables atmosféricas en los puntos del contorno del dominio del modelo regional.

Fuente: Escenarios-PNACC Datos mensuales, 2015.

Una ventaja importante de la dinámica de los MCR en las condiciones locales, es que pueden incluir cambios en la superficie de la tierra, la vegetación o la característica atmosférica de una manera constante. Las limitaciones principales de esta técnica son los efectos de los errores sistemáticos en los campos de conducción proporcionados por los modelos globales y la falta de interacciones en ambos sentidos entre los modelos regionales y los modelos globales del clima (IPCC, 2007).

2.8. LA HERRAMIENTA MARKSIM GCM

La herramienta online MarkSim GCM es una plataforma estocástica para generar datos climáticos futuros diarios en un sitio específico, reduciendo la escala de los resultados provenientes de los GCMs (Jones y Thornton, 2013). A diferencia de la mayoría de los modelos estadísticos de reducción de escala, MarkSim no depende de registros de datos climáticos a largo plazo, que carecen en la mayoría de los países en desarrollo. Además, tiene la capacidad de generar cuatro variables climáticas (lluvia, radiación solar, temperaturas mínimas y máximas), que son los datos mínimos requeridos por la mayoría de modelos hidrológicos.

En el 2013, MarkSim GCM fue actualizado para incluir datos de un total de 17 modelos de clima individuales que formaban parte del quinto informe de evaluación del IPCC (CMIP5), los cuales se mencionan en la Tabla 3. Además, los usuarios también pueden elegir qué Ruta de Concentración Representativa (RCP) utilizar. El camino más alto conduce a aumentos de la temperatura global de casi 5 °C por el año 2100. Incluso, el usuario puede combinar diferentes modelos para distintas vías de emisiones.

Tabla 3: Descripción de los Modelos de Circulación General disponibles en MarkSim

| Modelo | Institución | Resolución Lat. x Long. |
|-----------------------|---|------------------------------------|
| BCC-CSM 1.1 | Beijing Climate Center, China Meteorological Administration | 2.8125 x 2.8125 |
| BCC-CSM 1.1(m) | Beijing Climate Center, China Meteorological Administration | 2.8125 x 2.8125 |
| CSIRO-Mk3.6.0 | Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation and the Queensland Climate Change Centre of Excellence | 1.875 x 1.875 |
| FIO-ESM | The First Institute of Oceanography, SOA, China | 2.812 x 2.812 |
| GFDL-CM3 | Geophysical Fluid Dynamics Laboratory | 2.0 x 2.5 |
| GFDL-ESM2G | Geophysical Fluid Dynamics Laboratory | 2.0 x 2.5 |
| GFDL-ESM2M | Geophysical Fluid Dynamics Laboratory | 2.0 x 2.5 |
| GISS-E2-H | NASA Goddard Institute for Space Studies | 2.0 x 2.5 |
| GISS-E2-R | NASA Goddard Institute for Space Studies | 2.0 x 2.5 |
| HadGEM2-ES | Met Office Hadley Centre | 1.2414 x 1.875 |
| IPSL-CM5A-LR | Institut Pierre-Simon Laplace | 1.875 x 3.75 |
| IPSL-CM5A-MR | Institut Pierre-Simon Laplace | 1.2587 x 2.5 |
| MIROC-ESM | Atmosphere and Ocean Research Institute (The University of Tokyo), National Institute for Environmental Studies, and Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology | 2.8125 x 2.8125 |
| MIROC-ESM-CHEM | Atmosphere and Ocean Research Institute (The University of Tokyo), National Institute for Environmental Studies, and Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology | 2.8125 x 2.8125 |
| MIROC5 | Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Atmosphere and Ocean Research Institute (The University of Tokyo), and National Institute for Environmental Studies | 1.4063 x 1.4063 |
| MRI-CGCM3 | Meteorological Research Institute | 1.125 x 1.125 |
| NorESM1-M | Norwegian Climate Centre | 1.875 x 2.5 |

Fuente: Jones y Thornton, 2013.

La aplicación trabaja desde un conjunto de superficies climáticas interpoladas a través de un generador de lluvia de Markov de tercer orden para simular la aparición de un día de lluvia. MarkSim GCM utiliza un re-muestreo estocástico especial de los parámetros del modelo para simular de manera realista las variaciones de lluvia y temperatura para casi cualquier lugar en los trópicos. Se puede acceder a la herramienta (MarkSim GCM website) a través del siguiente enlace: <http://gisweb.ciat.cgiar.org/MarkSimGCM/>; en donde se utiliza interfaz de *Google Earth* para una mejor interactividad con el usuario.

Esta herramienta tiene por objetivo ayudar a los distintos usuarios en línea a generar datos meteorológicos diarios simulados (futuros, principalmente) en todo el mundo. Puede proporcionar información sobre lluvias, temperaturas máximas y mínimas y radiación solar, y ha sido específicamente diseñado para los países tropicales.

Los datos generados se pueden utilizar para el modelado de cultivos, ganado y recursos naturales y evaluación de riesgos. Además de eso, los usuarios también pueden trazar datos climáticos en términos de los valores medios mensuales de precipitación y temperatura máxima y mínima diaria.

MarkSim fue desarrollado por Waen Associates, UK. Los socios para este proyecto incluyen el Programa de Investigación del CGIAR sobre Cambio Climático, Agricultura y Seguridad Alimentaria (CCAFS), el Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), el Instituto Internacional de Investigación Ganadera (ILRI), el Instituto Potsdam para la Investigación del Impacto Climático El Instituto de Investigación sobre Políticas Alimentarias (IFPRI), Elección de la cosecha (*Harvest Choice*) y el Programa de Apoyo a la Investigación Colaborativa del Manejo Integrado de Plagas (IPM-CRSP).

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. ÁREA DE ESTUDIO

La cuenca del río Piura corresponde al sistema de cuencas de la vertiente del Pacífico, se sitúa en la región de Piura, en el norte del Perú, entre los 0 y 3650 (aprox.) m.s.n.m., y se encuentra comprendida entre las coordenadas geográficas 04°41' a 5°49' de latitud Sur y los meridianos 79°26' a 81°05' de longitud Oeste.

El presente estudio, se desarrolló en la parte media y alta de la cuenca del río Piura, espacio delimitado a partir de la estación hidrométrica Sánchez Cerro; cubriendo un área aproximada de 7,500.5 km² dentro de los 10,872.1 km² de extensión de la cuenca, tal como se muestra en la Figura 9. (Ver mapa en Anexos)

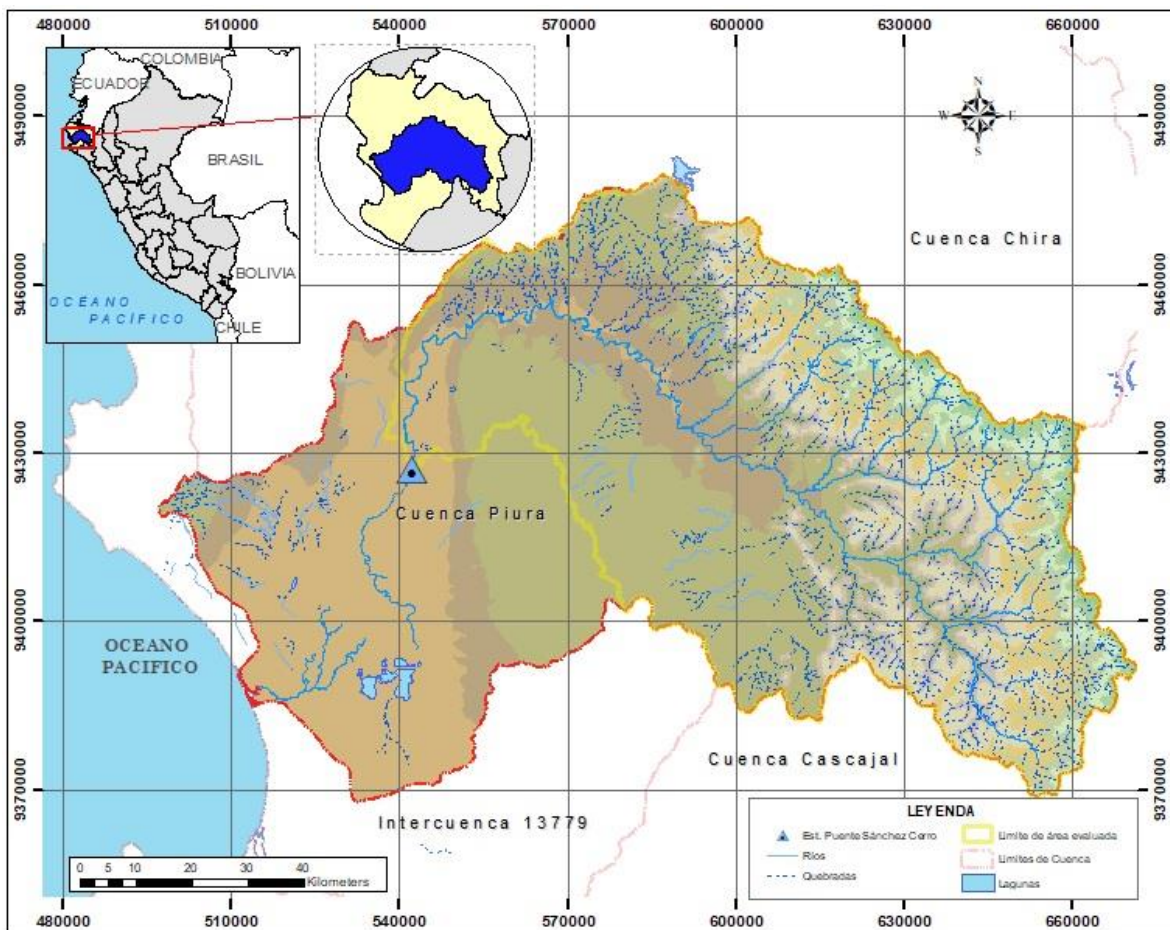


Figura 9: Mapa de ubicación y sistema hidrográfico de la cuenca del río Piura

3.2. MATERIALES

3.2.1. Información geográfica

La información geográfica recopilada, descrita en la Tabla 4, fue clasificada y analizada, para su adaptación y uso en el modelo.

Tabla 4: Información geográfica suministrada al modelo

| Información | Fuente | Descripción | Formato |
|--|-------------------|---|-------------------|
| Topografía (DEM) | ASTER/GDEM (NASA) | Modelo Digital de Elevación (DEM) resolución 30 m x 30 m | Raster |
| Suelos | MINAGRI | Mapa de Suelos para la cuenca del río Piura | Polygon Shapefile |
| Capacidad de Uso Mayor de Tierras | MINAM | Mapa de Capacidad de Uso Mayor de Tierras para la cuenca del río Piura. | Polygon Shapefile |
| Cartografía Básica | IGN | Cartas Nacionales de la cuenca del río Piura. | Polygon Shapefile |
| Hidrografía | ANA | Delimitación y red de drenaje hidrográfica, cuenca del río Piura | Polygon Shapefile |

3.2.2. Información climática

La información climática usada en el estudio fue tomada de las estaciones meteorológicas e hidrológicas ubicadas en la cuenca, las que se muestran en la Tabla 5; y cuentan con registros de precipitación, temperaturas máximas y mínimas, humedad relativa y radiación solar a nivel diario. Además, se contó con registros medios mensuales de velocidad del viento. Estos datos corresponden a un periodo de 25 años (1984 - 2008) de los registros del SENAMHI y el Proyecto Especial Chira - Piura (PECHP).

Del mismo modo, se obtuvo información mensual de la estación hidrológica Sánchez Cerro ubicada también dentro de la cuenca. Los registros del SENAMHI y PECHP también corresponden al mismo periodo de 25 años (1984 - 2008).

Los registros mensuales de precipitación y caudal de las estaciones meteorológicas e hidrométricas, respectivamente, se muestran con mayor detalle en Anexos.

Tabla 5: Ubicación de estaciones meteorológicas e hidrológicas del estudio

| Estación | Tipo | Ubicación | | | Periodo de registro diarios | Coord. UTM (WGS - 84) | | Altitud (m.s.n.m) |
|---------------|------------------|-----------|-------------|------------|-----------------------------|-----------------------|---------|-------------------|
| | | Dpto. | Provincia | Distrito | | Este | Norte | |
| Miraflores | CO | Piura | Piura | Piura | 1984 - 2008 | 542483 | 9428899 | 30 |
| Chulucanas | CO | Piura | Morropón | Chulucanas | 1984 - 2008 | 591603 | 9434804 | 90 |
| Morropón | CO | Piura | Morropón | Morropón | 1984 - 2008 | 614022 | 9425731 | 141 |
| Huarmaca | CO | Piura | Huancabamba | Huarmaca | 1984 - 2008 | 663594 | 9384215 | 2186 |
| Chalaco | CO | Piura | Morropón | Chalaco | 1984 - 2008 | 633951 | 9443127 | 2295 |
| Tejedores | CO | Piura | Piura | Las Lomas | 1984 - 2008 | 585022 | 9474923 | 206 |
| Sánchez Cerro | CO, Hidrométrica | Piura | Piura | Castilla | 1984 - 2008 | 541731 | 9425917 | 23 |

*CO: Estación Convencional

Fuente: SENAMHI y PECHP.

3.2.3. Programas de cómputo

Los cálculos y el manejo de datos se realizaron mediante el uso de los softwares siguientes:

- ArcGIS Desktop 10 (Licencia: UNALM)
- Extension 3D Analyst for ArcGIS 10
- Extension Spatial Analyst for ArcGIS 10
- ArcSWAT 2012 10.0.15
- SWAT- CUP 2012 5.1.5
- Hydraccess v4.4
- Microsoft Office 2013

3.2.4. Equipo de cómputo

Una computadora portátil con las siguientes características:

- Procesador Intel CORE i3 - 2.40 GHz.
- Memoria RAM de 3.00 Gb.
- Tarjeta de video 1 Gb.
- Disco duro 465 Gb.

3.3. METODOLOGÍA

La metodología desarrollada en la presente investigación, comprende, tres procesos: (1) La aplicación del modelo SWAT en la cuenca en estudio, (2) generación de datos climáticos proyectados a escenarios seleccionados; y (3) evaluación del efecto del cambio climático, los cuales se resumen en el diagrama de flujo que se muestra en la Figura 10.

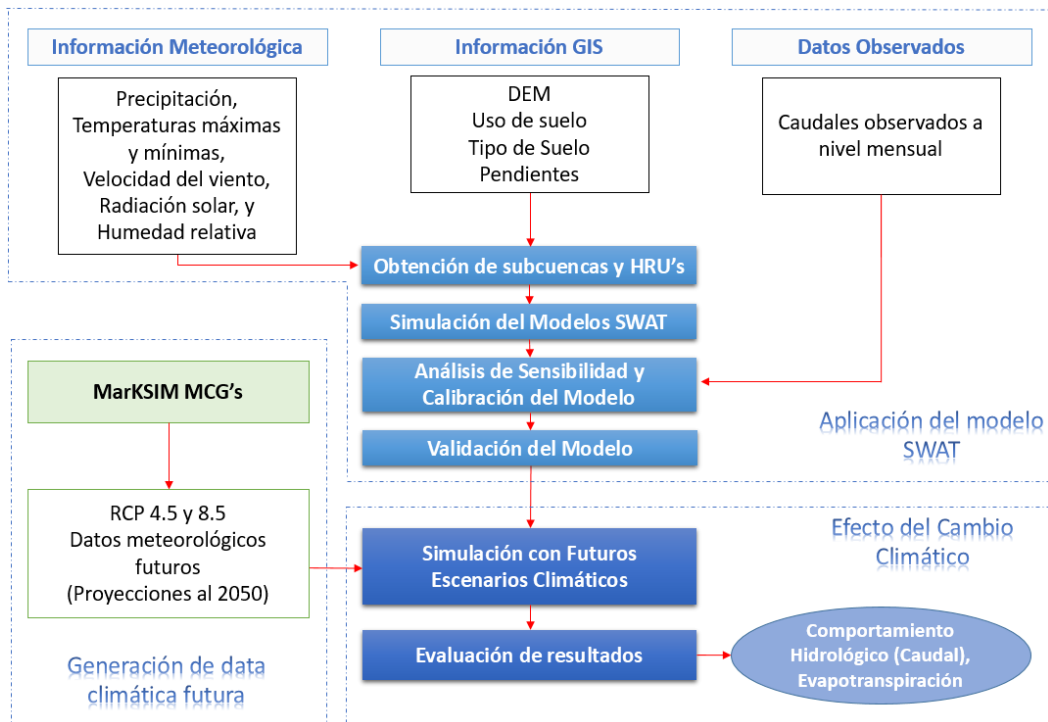


Figura 10: Diagrama de flujo de la metodología empleada

3.3.1. Sistematización de la información requerida

i. Modelo de elevación digital

El modelo digital de elevación (DEM), es utilizado para delimitar las subcuencas y la distribución de la red hídrica del área de estudio en la interfaz del ArcSWAT. Se utilizó imágenes del sensor *ASTER Global Digital Elevation Model v2.01* (ASTER GDEM) a una resolución espacial de 30 metros. El sistema de coordenadas para la elaboración DEM es el: “*Projected Coordinate Systems UTM WGS 1984 UTM Zone 17S*”.

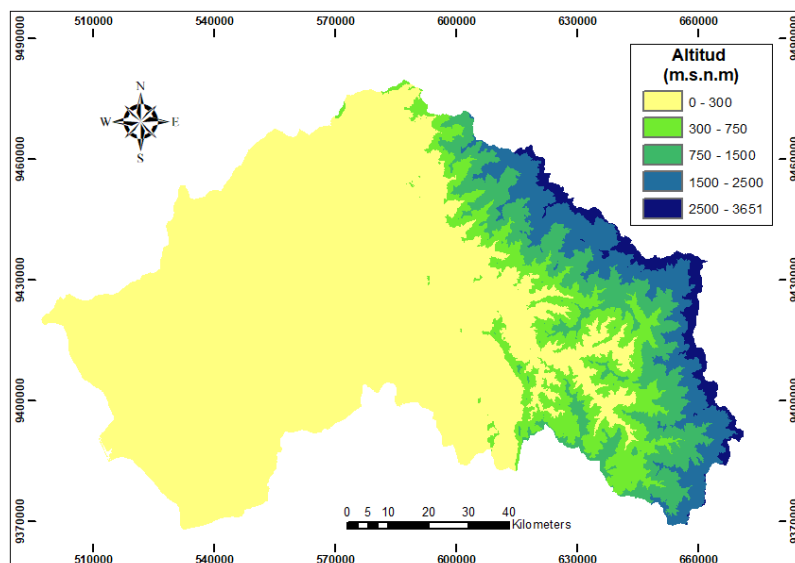


Figura 11: Variación altitudinal de la cuenca del río Piura

ii. Capacidad de uso mayor

La información del Mapa de Capacidad de Uso Mayor elaborado, fue actualizado con información del MINAM, 2015; en la Tabla 6 se detalla cada una de las clases predominantes en la cuenca del río Piura y su distribución respectiva; teniendo en cuenta las clasificaciones recomendadas por el Reglamento de Clasificación de Tierras por su Capacidad de Uso Mayor según el Decreto Supremo D.S. N°017-2009-AG.

Tabla 6: Clasificación de tierras por capacidad de uso mayor

| Símbolo | Descripción | Superficie | |
|------------------------|---|------------|-------|
| | | (ha) | % |
| A1s(r)-C2s(r) | Cultivos en Limpio, Calidad Agrologica Alta – Cultivos Permanentes, Calidad Agrologica. Media. Limitación por suelo, requieren riego | 100957.481 | 9.24 |
| A2s(r)-C3s(r) | Cultivos en Limpio, Calidad Agrologica Media – Cultivos Permanentes, Calidad Agrologica. Baja, requieren riego, Limitación por suelo, requieren riego | 46660.465 | 4.27 |
| P3s(t)-Xse | Pastoreo temporal, Calidad Agrologica Baja – Protección. Limitación por suelo | 297608.513 | 27.23 |
| P3s(t)-F3se-Xse | Pastoreo temporal – Forestal - Protección, Calidad Agrologica Baja – Protección. Limitación por suelo y erosión | 128609.056 | 11.77 |
| Xse | Protección (Limitación por suelo y erosión) | 183938.628 | 16.83 |
| Xse-P3s(t)-C3se | Protección - Pastoreo temporal – Cultivos Permanentes, Calidad Agrologica Baja – Limitación por suelo y erosión | 140544.764 | 12.86 |
| Xse-P2s-F3se | Protección - Pastoreo, Calidad Agrologica Media - Forestal, Calidad Agrologica Baja – Limitación por suelo y erosión | 31846.049 | 2.91 |
| Xse-P3s(t)-F3s | Protección - Pastoreo temporal – Forestal, Calidad Agrologica Baja – Limitación por suelo | 158151.063 | 14.47 |
| Ríos | Cuerpo de agua | 3514.065 | 0.32 |
| Pob | Población | 1179.055 | 0.11 |

Fuente: Instituto Nacional de Recursos Naturales - INRENA.

A cada unidad de tierras se le asignó un código de identificación, para su ingreso a la base de datos SWAT para su procesamiento. En la Tabla 7 se indican los códigos asignados, y su distribución espacial se observa en la Figura 12.

Tabla7: Uso actual de la tierra de la cuenca del río Piura

| Clase | Código SWAT | Clase | Código SWAT |
|-----------------|-------------|-----------------|-------------|
| A1s(r)-C2s | AGRR | Xse-P3s(t)-C3se | WETF |
| A2s(r)-C3s(r) | AGRL | Xse-P2s-F3se | AGRC |
| P3s(t)-Xse | PAST | Xse-P3s(t)-F3s | WETN |
| P3s(t)-F3se-Xse | SPAS | Ríos | WATR |
| Xse | WETL | Pob | URBN |

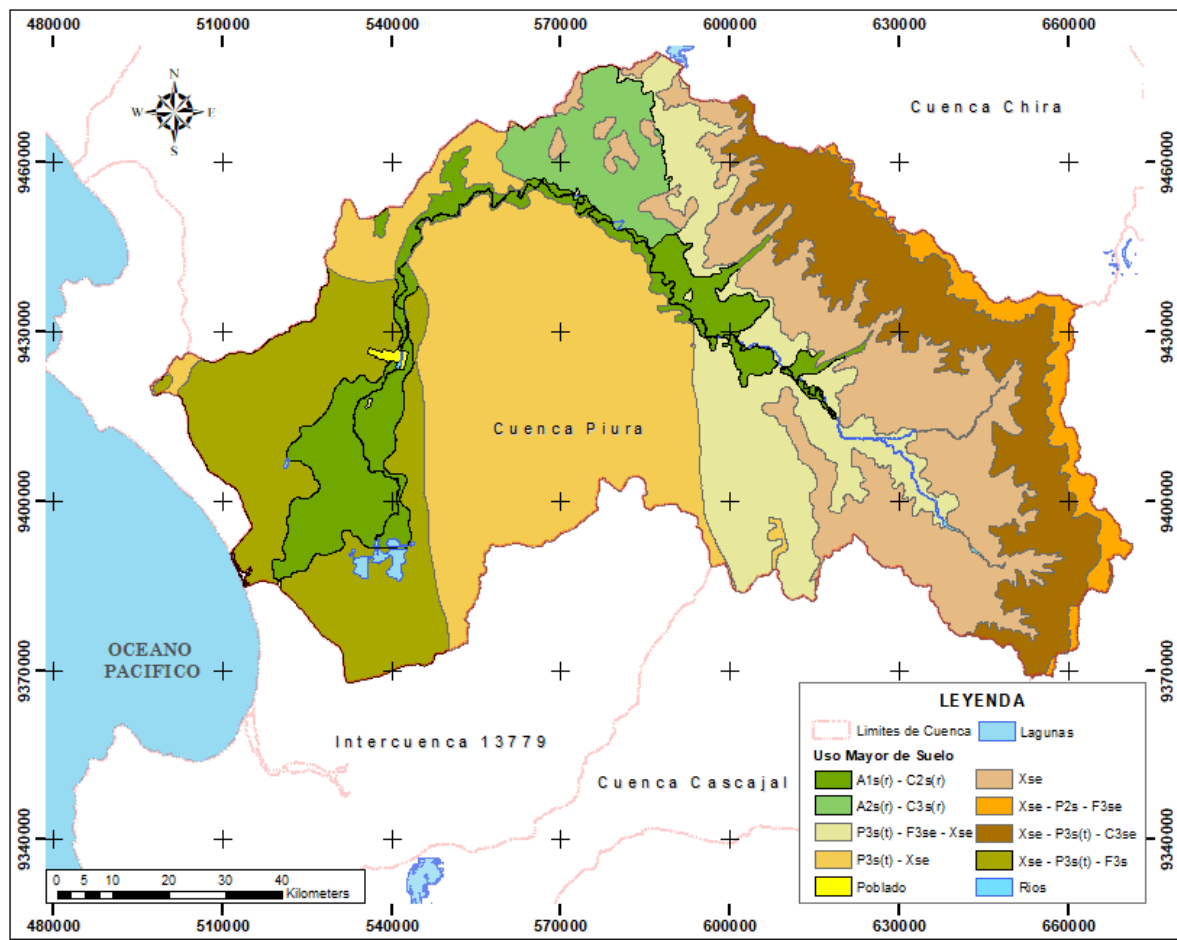


Figura 12: Mapa de cobertura y uso del suelo de la cuenca del río Piura.

iii. Clasificación de suelos

La información de suelos, obtenida del MINAGRI, será utilizada dentro del ArcSWAT para identificar las combinaciones únicas de los HRU, y también para realizar la mayoría de cálculos hidrológicos que dependen de los parámetros asociados con el tipo de suelo.

La base de datos para suelos del SWAT está adaptada a los distintos tipos que se pueden encontrar en los Estados Unidos; de tal manera que al introducir los códigos de suelos que representan el tipo de suelo, estos se relacionan en función de sus características fisicoquímicas que posea en cada una de las capas (por ejemplo, granulometría del suelo, permeabilidad, densidad aparente, cantidad de materia orgánica, entre otros). Estos valores se detallan en la Tabla 8.

Tabla 8: Atributos requeridos por el ArcSWAT para cada tipo de suelo

| Nombre de la Variable | Descripción |
|------------------------------|--|
| Snam | Clase de suelo |
| Nlayers | Numero de capas en el suelo |
| Hydgrp | Grupo hidrológico del suelo |
| Sol_Zmx | Profundidad máxima de raíces (mm) |
| Anion_Excl | Porosidad (de la cual se excluyen los aniones) |
| Sol_CRK | (Opcional) Volumen potencial del perfil del suelo |
| Texture | (Opcional) Textura de la capa del suelo |
| Sol_Z | Profundidad del suelo (mm) |
| Sol_Bd | Densidad aparente de suelo húmedo (mg/m ³ o g/cm ³) |
| Sol_AWC | Capacidad de retención de agua disponible |
| Sol_K | Conductividad hidráulica saturada (mm/hr) |
| Sol_CBN | Contenido de carbono orgánico (% peso del suelo) |
| Clay | Contenido de Arcilla (% peso del suelo) |
| Silt | Contenido de Limo (% peso del suelo) |
| Sand | Contenido de Arena (% peso del suelo) |
| Rock | Contenido de fragmento de roca (% peso total) (diámetro > 2mm) |
| Sol_ALB | Albedo húmedo del suelo |
| Usle_K | Ecuación USLE factor erodabilidad del suelo (K) |

Fuente: SWAT User's Manual, 2000.

Las clases de suelos que no se encuentran, deben agregarse manualmente a la tabla "usersoil" que se encuentra en la base principal de datos SWAT.

La información de suelos en la cuenca fue ingresada, teniendo en cuenta los parámetros de la base de datos del mapa digital de suelos a escala mundial (DSWM) elaborado conjuntamente por la FAO y UNESCO, el cual se puede visualizar en el software libre "Harmonized World Soil Database" (HWSD v.1.2), y es posible obtenerlo a través del siguiente Link, (<http://webarchive.iiasa.ac.at/Research/LUC/External-World-soil-database/HTML/>) consultado el 15 de enero del 2017. El mapa utiliza el sistema de clasificación taxonómica de suelo de la FAO / UNESCO (2010), que coincide con la base de datos de propiedades del suelo de SWAT.

Las principales categorías de suelo en la cuenca son Fluvisol Eutrico, Arenosol Haplico, Cambisol Eutrico, Regosol Eutrico y Leptosol Eutrico. En la Tabla 9 se muestra su descripción y en la Figura 13 se observa la distribución espacial de los suelos en el ámbito de estudio.

Tabla 9: Clasificación de suelos en la cuenca

| Código | Descripción | Textura | Densidad Aparente (g/cm ³) | % Arcilla | % Limo | % Arena |
|----------------|--|------------------------|--|-----------|--------|---------|
| FLe-RGe | Fluvisol eutríco – Regosol - eutríco | Franco | 1.8 | 23 | 40 | 37 |
| ARh-SCh | Arenosol háplico – Solonchak haplico | Franco arenoso | 1.6 | 19 | 30 | 52 |
| CMe-VRe | Cambisol eutríco – Vertisol - eutríco | Franco arcilloso | 1.9 | 39 | 35 | 27 |
| RGe-CLh | Regosol eutríco – Calcisol háplico | Franco arcillo arenoso | 1.8 | 25 | 25 | 50 |
| LPe-R | Leptosol eutríco – Afloramiento lítico | Franco arenoso | 1.7 | 20 | 28 | 52 |

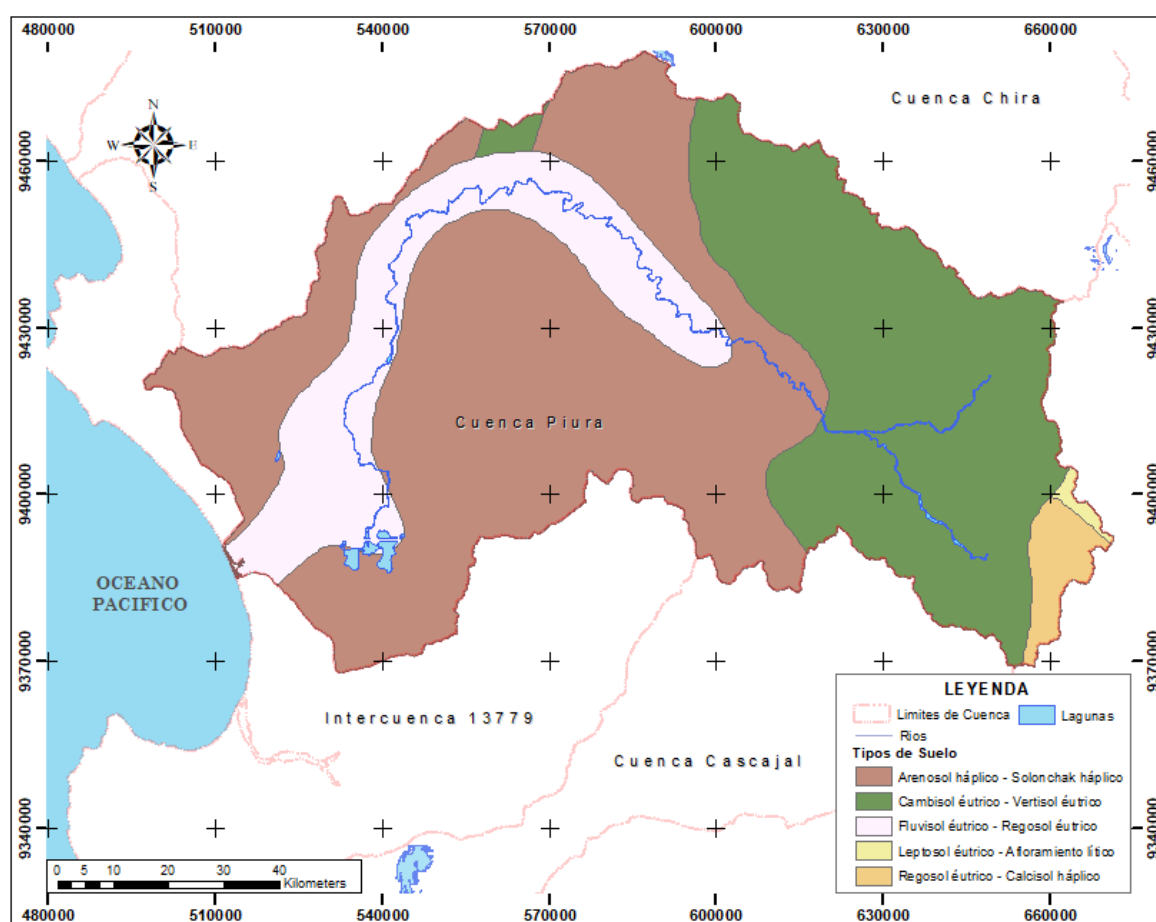


Figura 13: Mapa de clasificación de suelos de la cuenca del río Piura.

iv. Clasificación de pendientes

La clasificación de pendientes fue obtenida a partir del DEM (USGS-NASA). El modelo te permite clasificar las pendientes, de acuerdo a la finalidad del estudio. Para ello, se optó por agrupar en 4 clases, de acuerdo a los rangos recomendados por el Reglamento de Clasificación de Tierras (D.S. N°017-2009-AG), como se muestra en la Tabla 10.

Tabla 10: Clasificación de pendientes

| Clases | Pendiente en (%) |
|--|-------------------------|
| Ligeramente / Moderadamente inclinado | 0 – 12 |
| Moderadamente inclinado | 12 - 25 |
| Algo Escarpado | 25 - 50 |
| Escarpado a muy escarpado | > 50 |

Fuente: D.S. N°017-2009-AG.

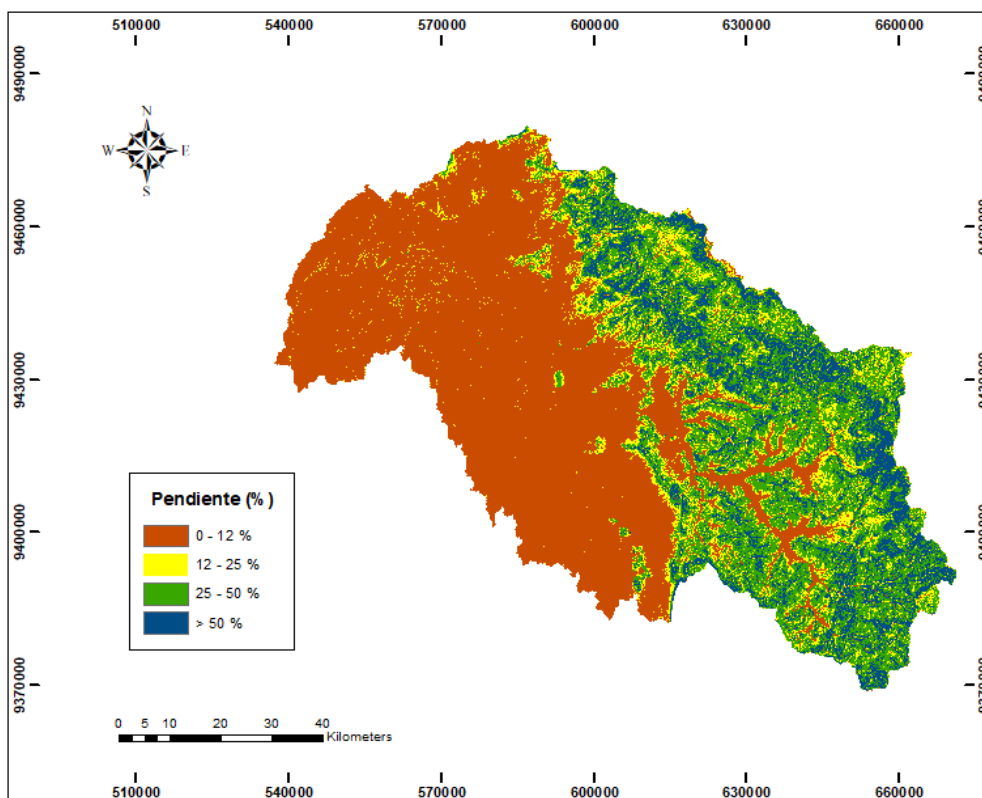


Figura 14: Mapa de pendientes de la cuenca del río Piura.

v. Datos meteorológicos e hidrológicos

Los datos meteorológicos necesarios que el modelo requiere a escala diaria (precipitación, temperaturas máximas y mínimas, humedad relativa, radiación solar y dirección del viento) fueron obtenidos de las estaciones meteorológicas de tipo convencional ordinarias, las cuales fueron seleccionadas, solo aquellas que contenían un registro diario y continuo (1984-2008) y se distribuyeron espacialmente dentro del área de estudio (6 estaciones meteorológicas del SENAMHI), estas son las mismas que en la Tabla 5.

La falta de datos para algunos periodos, como: radiación solar, velocidad del viento y humedad relativa; fueron completados utilizando el generador de clima del modelo SWAT para simular estos valores (Neitsch et al., 2005a, b).

Los datos hidrológicos fueron tomados de la estación hidrométrica Sánchez Cerro, administrada por el SENAMHI y con registros del PECHP. El registro de los caudales mensuales (m³/s) sirvió para realizar la calibración y validación del modelo.

La ubicación de estaciones meteorológicas e hidrométricas del estudio se muestra en la Figura 15.

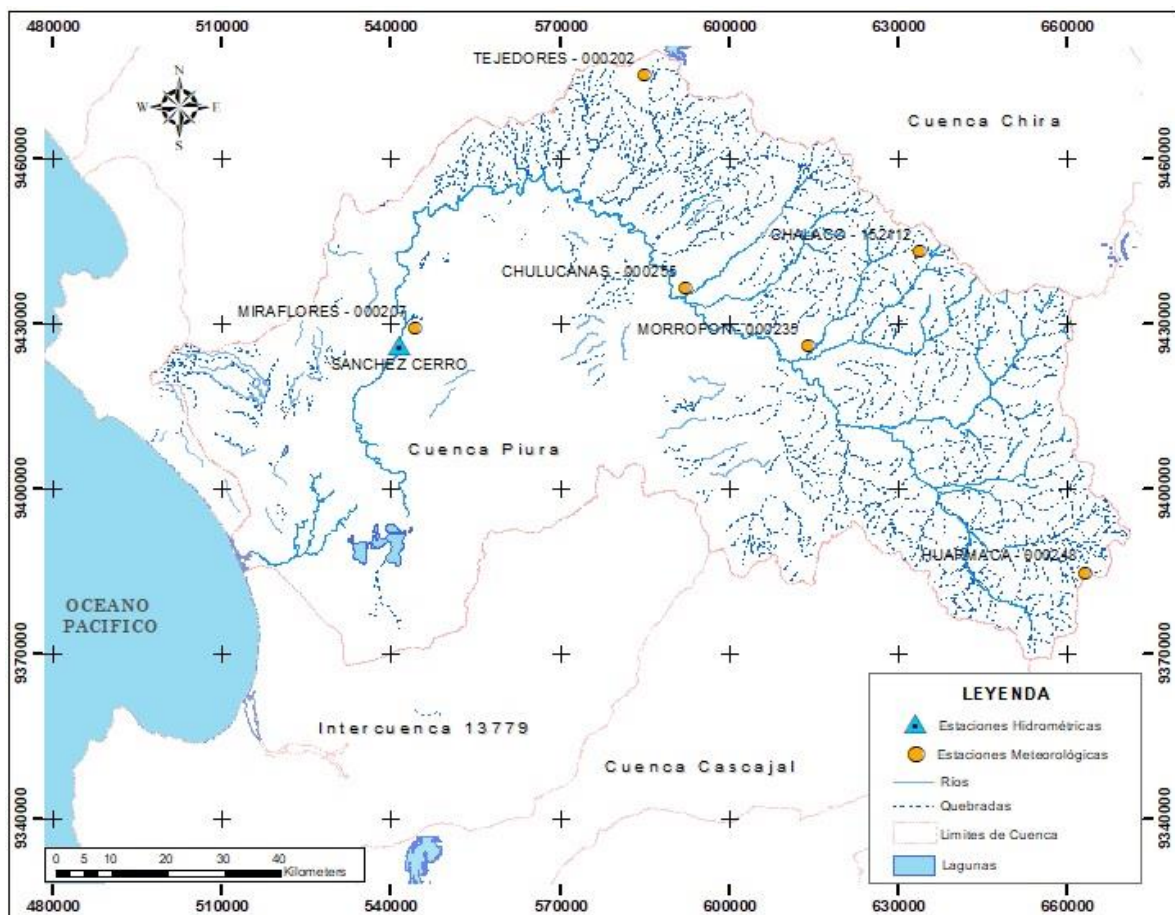


Figura 15: Mapa de ubicación de estaciones meteorológicas e hidrométricas de la cuenca del río Piura

Se considera en esta investigación, que el volumen proveniente del embalse Poechos, (a través del canal de derivación Daniel Escobar) al llegar a la presa Ejidos, se deriva a otras zonas de riego por medio del canal principal Biaggio Arbulú. Por lo tanto, se ha supuesto en la investigación que lo aforado en la estación hidrométrica Sánchez Cerro ubicada aguas abajo de la presa Ejidos, contiene un volumen mínimo proveniente del río Chira.

3.3.2. Aplicación del modelo hidrológico SWAT

La información requerida por el modelo, se ingresa de modo secuencial en la interfaz del ArcSWAT dentro del ArcGIS.

En el modelo SWAT al ingresar el agua como precipitación; la energía disponible, específicamente la radiación solar, ejerce un control mayor sobre el movimiento del agua (ciclo hidrológico) en la superficie terrestre. Debido a que la evaporación es el mecanismo primario por el cual el agua disminuye en la cuenca, de modo que los insumos de energía son importantes para simular un balance hídrico exacto. La evapotranspiración potencial se calcula mediante SWAT con el método de Penman-Monteith, que requiere las variables de temperatura del aire, radiación solar, humedad relativa y velocidad del viento.

El ciclo hidrológico simulado por SWAT se basa en la ecuación del balance hídrico

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{qw})_i$$

Donde SW_t es el contenido final de agua en el suelo (mm); SW_0 es el contenido de agua inicial en el día i (mm); t es el tiempo (día); R_{day} es la cantidad de precipitación en el día i (mm); Q_{surf} es la cantidad de escorrentía superficial por día (mm); W_{seep} es la cantidad de agua acumulada en la zona no saturada del perfil del suelo en día i (mm); Q_{qw} es la cantidad de flujo de retorno en el día i (mm); (Neitsch et al., 2002).

El escurrimiento superficial se estima por separado para cada unidad de respuesta hidrológica (HRU) y se encamina para obtener la escorrentía total en la cuenca. El escurrimiento se calcula usando una modificación del método del número de la curva SCS (USDA Soil Conservation Service, 1972). El número de la curva varía no linealmente con el contenido de humedad del suelo. El agua que no se infiltra se convierte en escorrentía superficial.

El volumen de escurrimiento superficial estimado por SWAT utilizando el método de número de la curva SCS se da a continuación:

$$Q_{surf} = \frac{(R_{day} - 0.2S)^2}{(R_{day} + 0.8S)}; R > 0.2S$$

El escurrimiento solamente ocurrirá cuando $R_{day} > 0.2S$

Donde O_{surf} es la escorrentía acumulada del exceso de lluvia (mm), R_{day} es la lámina de lluvia para el día (mm) y S es el parámetro de retención (mm), el cual varía espacialmente debido a los cambios en los suelos, el uso de la tierra, pendiente y manejo, además varía temporalmente debido a cambios en el contenido de agua en el suelo.

El parámetro de retención se define como:

$$S = 25.4 \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right);$$

Donde CN es el número de curva del día. El número de la curva SCS es una función de la permeabilidad del suelo, la cobertura de la tierra y las condiciones del agua del suelo.

El flujo, o inter-flujo subterráneo lateral se calcula mediante el modelo de almacenamiento cinemático, que tiene en cuenta la conductividad hidráulica del suelo, pendiente y el cambio temporal y espacial de la humedad del suelo (Ghaffari et al., 2010), además la captación de agua de la planta del suelo se simula como una función potencial de evapotranspiración, índice de área foliar y profundidad de enraizamiento; está limitada por el contenido de agua en el suelo (Arnold et al., 2000). A medida que el agua fluye aguas abajo, se enruta a través del canal usando un método de coeficiente de almacenamiento variable.

Las entradas del modelo incluyen la topografía, el uso del suelo, las propiedades del suelo y los datos hidrometeorológicos, mencionados anteriormente. El modelo de elevación digital (DEM) es usado para delinear la cuenca y obtener otros parámetros de subcuenca, como la longitud de pendiente y las características de la red de flujo. La cuenca se divide primero en subcuencas y luego en HRUs, que son porciones de terreno con una combinación única de cobertura, clase de suelos y de pendientes. Para cada HRU, se calculan los componentes hidrológicos, incluyendo la precipitación diaria, evapotranspiración (ET), escorrentía superficial, flujo lateral, flujo de retorno y cambio de humedad del suelo.

3.3.3. Análisis de sensibilidad, calibración y validación del modelo

- Análisis de sensibilidad

El modelo hidrológico SWAT tiene numerosos parámetros de calibración que lo hacen complejo, siendo usual afrontar la tarea de determinar cuáles parámetros calibrar para obtener que la respuesta del modelo se asemeje a los datos observados, representando así las condiciones reales de la cuenca lo más cerca posible.

Este análisis es útil para identificar y clasificar los parámetros que tienen un impacto significativo en los datos de interés específico simulados por el modelo, con la finalidad de limitar el número de parámetros óptimos para el modelo, y asimismo conseguir que el proceso de calibración se vuelva menos complejo y extenso.

A través del software SWAT – CUP se realizó el análisis de sensibilidad de los parámetros, comúnmente recomendados, descritos en la Tabla 11, con el fin de ver el grado de influencia y la pertinencia de utilizarlos como parámetros de calibración.

Tabla 11: Descripción de los parámetros utilizados en el análisis de sensibilidad

| PARAMETRO | DESCRIPCIÓN | PROCESO |
|------------------|--|----------------|
| Cn2 | SCS numero de curva de escorrentía inicial | Cobertura |
| Alpha_Bf | Factor “alpha” del flujo base | Acuíferos |
| Gw_Delay | Tiempo de retardo del agua subterránea (días) | Acuíferos |
| Gw_Revap | Coefficiente de aguas subterráneas “revap”. | Acuíferos |
| Gwqmn | Umbral profundidad del agua en el acuífero (mm) | Acuíferos |
| Sol_Awc | Capacidad de agua disponible (mm agua/mm suelo) | Suelos |
| Slope | Pendiente media (m/m) | Pendiente |
| Epc0 | Factor de compensación de absorción de la planta | Transpiración |
| Esco | Factor de compensación de evaporación del suelo | Evaporación |
| Canmx | Almacenamiento máximo del dosel (mm) | Cobertura |
| Ch_N2 | Valor n de Manning para el canal principal | Enrutamiento |
| Revapmn | Umbral de la profundidad del agua en el acuífero superficial “revap”. (mm) | Acuíferos |

- Calibración y validación

La fase de calibración consiste en la estimación de los parámetros del modelo, al comparar las predicciones, para un conjunto determinado de condiciones, con los datos observados. Se debe lograr un ajuste aceptable entre las observaciones y las simulaciones de la variable de salida de interés (caudales) al variar reiterativamente los parámetros del modelo. Con esta finalidad se utilizó el algoritmo “*Sequential Uncertainty Fitting 2*” (SUF12), ya que estudios anteriores demuestran que tiene un mejor rendimiento con la calibración del modelo SWAT.

Los mejores parámetros fueron seleccionados basados en el análisis gráfico y los parámetros estadísticos, como el coeficiente de eficiencia de Nash - Sutcliffe (NSE), el coeficiente de determinación (R²), el sesgo porcentual (Percent bias - PBIAS), la raíz cuadrada del error cuadrático medio (RMSE), y su relación con la desviación estándar de las observaciones (RSR).

Estas estadísticas demuestran el desempeño del modelo SWAT para ambas etapas de calibración y validación basadas en los datos históricos medidos para la cuenca del río Piura. En esta etapa se establece una base para realizar los estudios de cambio climático basados en las simulaciones de SWAT. Estos últimos indicadores se calculan con las ecuaciones de la Tabla 12.

Tabla 12: Criterios para evaluar el rendimiento del modelo hidrológico y sus correspondientes clasificaciones.

| Criterio estadístico | Valores | Clasificación del rendimiento | Referencia |
|---|---|--|-----------------------|
| Coefficiente Nash-Sutcliffe $NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^n (Q_t^{obs} - Q_t^{sim})^2}{\sum_{t=1}^n (Q_t^{obs} - \bar{Q}^{sim})^2}$ | $0.75 < NSE \leq 1.00$ $0.65 < NSE \leq 0.75$ $0.50 < NSE \leq 0.65$ $0.40 < NSE \leq 0.50$ $NSE \leq 0.40$ | Excelente Bueno Satisfactorio Aceptable Malo | Moriassi et al., 2007 |
| Coefficiente de determinación $R^2 = \frac{[\sum_{t=1}^n (Q_t^{obs} - \bar{Q}^{obs})(Q_t^{sim} - \bar{Q}^{sim})]^2}{\sum_{t=1}^n (Q_t^{obs} - \bar{Q}^{obs})^2 \sum_{t=1}^n (Q_t^{sim} - \bar{Q}^{sim})^2}$ | $r \geq 0.5$ $0 \leq r < 0.5$ | Satisfactorio Malo | Santhi et al., 2001 |
| Percent bias $PBIAS = \frac{\sum_{t=1}^n (Q_t^{obs} - Q_t^{sim})}{\sum_{t=1}^n (Q_t^{obs})} \cdot 100$ | $PBIAS < \pm 10$ $\pm 10 \leq PBIAS < \pm 15$ $\pm 15 \leq PBIAS < \pm 25$ $PBIAS \geq \pm 25$ | Excelente Bueno Satisfactorio Malo | Moriassi et al., 2007 |
| Raíz cuadrada del error cuadrático medio $RMSE = \left[\frac{(\sum_{t=1}^n Q_t^{sim} - Q_t^{obs})^2}{n} \right]^{0.5}$ | Valor inferior a la mitad de la desviación estándar | Satisfactorio | Moriassi et al., 2007 |
| Relación entre el RSME y la desviación estándar de las observaciones $RSR = \frac{RMSE}{STDEV_{obs}} = \frac{\left[\sqrt{\sum_{t=1}^n (Q_t^{obs} - Q_t^{sim})^2} \right]}{\left[\sqrt{\sum_{t=1}^n (Q_t^{obs} - \bar{Q}^{obs})^2} \right]}$ | $0.00 \leq RSR \leq 0.50$ $0.50 \leq RSR \leq 0.60$ $0.60 \leq RSR \leq 0.70$ $RSR > 0.70$ | Excelente Bueno Satisfactorio Malo | Moriassi et al., 2007 |

* Las ecuaciones están en función de caudales; sin embargo dichas expresiones son aplicables a cualquier variable hidrológica. Donde, “ Q^{sim} y Q^{obs} ” son los caudales simulados y observados, respectivamente; \bar{Q}^{sim} y \bar{Q}^{obs} representa la media de cada uno, en el tiempo “ t ”, y “ n ” es el número de observaciones del periodo considerado.

Por último, en la fase de validación se evaluó la capacidad del modelo para realizar las simulaciones, con suficiente precisión, de los caudales con los parámetros obtenidos durante la fase de calibración. Se comprobó su eficacia al comparar los caudales observados y los caudales calculados con los parámetros finales obtenidos en la calibración para un periodo diferente, consiguiendo validar que el modelo es capaz de proyectar datos.

En la calibración y validación del modelo, se empleó los registros mensuales de caudales de la estación hidrológica Sánchez Cerro. La calibración se realizó con la información de 13 años, periodo comprendido entre enero de 1986 a diciembre de 1998. Y, en la validación se utilizó la información de 10 años, periodo comprendido entre enero de 1999 a diciembre del 2008. En ambas etapas (calibración y validación), el rendimiento del modelo se evalúa con base estadística y gráfica.

3.3.4. Proyección climática

En la presente investigación, se utilizó la versión web del generador meteorológico MarkSim para reducir la escala (desagregación estadística método Delta Change, Fowler et al., 2007) de los datos climáticos de los modelos de circulación global (MCGs) del IPCC AR5 (CMIP5) (Jones & Thornton, 2013).

Para ello, inicialmente, se seleccionaron 4 MCGs de buen ajuste para representar el clima a futuro (2025 - 2054) en la costa norte del Perú, HadGEM2-ES, CSIRO-Mk3-6-0, MRI-CGCM3 y MIROC 5, en base a las investigaciones: “*Developing Climate Scenarios*”, *Paraguay Project* (Yates, 2014), y “*Estimación del efecto del cambio climático en la precipitación en la costa norte del Perú usando simulaciones según los modelos climáticos globales*” (Ramos, 2014).

Los escenarios futuros escogidos para comparar estos modelos en el estudio tuvieron las rutas de concentración representativas RCP 4.5 y RCP 8.5, por lo que se logró obtener hasta ocho proyecciones posibles (4x2 ESM RCP)

Para representar la precipitación futura, como se muestra en la Figura 16, se utilizó el software Hydraccess, para el cálculo de la precipitación media en la zona de interés en la cuenca del río Piura, mediante la interpolación de la data futura de precipitación obtenida con la herramienta MarkSim de las seis estaciones empleando los métodos que continuación se describen (Vergara, 2015):

- a) Media aritmética.

Es el promedio de todas las estaciones analizadas.

- b) Inversa de la distancia al cuadrado.

El valor estimado se calcula a partir de los valores de las estaciones más cercanas, dando distinto peso a cada una de ellas según la distancia a la que se encuentren del punto estimado,

de forma que a mayor distancia de una estación al punto de interpolación menor será su peso. En general, la expresión que se utiliza para emplear este método es la siguiente:

$$P_x = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{P_i}{D_i^{pw}}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{D_i^{pw}}}$$

c) Polígonos de Thiessen

Es uno de los métodos más usados en la obtención de precipitaciones medias sobre una cuenca. Se basa en ponderar las precipitaciones en cada estación en función del área de influencia. Es más preciso que el método de la media aritmética, pero si existe algún cambio en la red de estaciones consideradas deben construirse nuevamente los polígonos.

Para la determinación de las zonas de influencia de las estaciones se unen las estaciones de tres en tres, trazando las mediatrices de los triángulos y uniéndolas convenientemente se forman unos polígonos, limitados exteriormente por los límites de la cuenca, cuyas superficies se corresponden a las zonas de influencia de cada estación.

$$P_x = \frac{1}{A} \sum_{i=1}^n A_i P_i$$

d) Interpolación Kriging

Este método de interpolación es la base de la Geoestadística, la cual se define como el estudio de las variables numéricas distribuidas en el espacio. La herramienta básica del kriging es el semivariograma, que es la función que describe la relación entre las diferencias de los valores y las distancias entre todos los posibles pares de puntos, obteniéndose este a través de la siguiente expresión.

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} \{z(x_i) - z(x_i + h)\}^2$$

Donde:

$\gamma(h)$ = Semivarianza de los datos, solo depende de la separación entre x_i y x_i+h y no de la posición del punto x .

$z(x_i)$ = Valor medido de la precipitación en el punto x_i

$z(x_i+h)$ = Valor medido de la precipitación en otro punto que dista h del anterior.

$N(h)$ = Número de puntos separados a una distancia h .

Al promediar estos 4 métodos de interpolación se determinará la precipitación media areal, para los intervalos de tiempo especificados anteriormente, de cada escenario. Se aplicará esta metodología con la finalidad de escoger los escenarios futuros más adecuados que posean una mejor representación de la estacionalidad de las lluvias para la cuenca del río Piura.

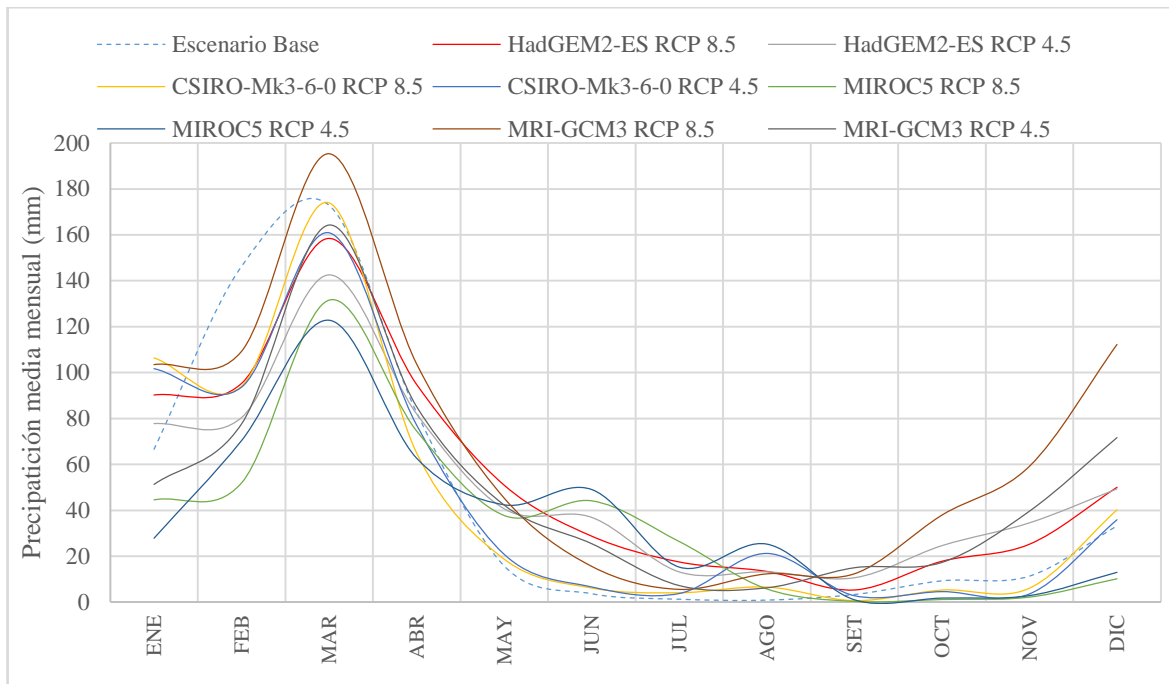


Figura 16: Comparación entre las precipitaciones medias mensuales entre los modelos globales para la cuenca media y alta del río Piura

Los escenarios futuros, que evalúan los efectos del cambio climático en la cuenca del río Piura, están comprendidos en el horizonte de tiempo futuro para el periodo 2025 - 2054; y en donde, el escenario base está referido al periodo 1986 - 2008.

- Evapotranspiración referencial futura

El modelo SWAT calibrado se utilizó para simular la evapotranspiración referencial futura en la cuenca con los modelos que presentan un mejor ajuste para el período 2025 - 2054.

Para su cálculo, se optó por utilizar el método de Penman-Monteith, ya que es considerado uno de los métodos con mayor aceptación y mejor desempeño para estimar la evapotranspiración referencial en la zona. Y, se cuentan con las suficientes variables meteorológicas para ser calculado con el modelo.

Es importante volver a mencionar que solo las variables de velocidad de viento, y humedad relativa para el futuro se completaron con el generador de clima del SWAT. Con la finalidad de comparar los valores medios mensuales en un escenario base (1999-2008) con las diferentes proyecciones futuras generadas a partir de los modelos MCG con mejor ajuste.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1. EJECUCIÓN DEL MODELO ARCSWAT

Delimitada el área de evaluación (área total 7500,53 km²), la dirección y acumulación del flujo en la cuenca en una primera fase de la ejecución, el modelo dividió la cuenca media y alta del río Piura en 26 subcuencas como se observa en la Figura 17. Seguidamente, se ingresó la información de suelos, uso de la tierra y clases de pendientes; para definir las HRU (Unidades de Repuesta Hidrológica). Se crearon e incluyeron en la simulación un total de 167 HRU (área media 288 km²). Esta división en HRU permite una simulación detallada de los procesos hidrológicos.

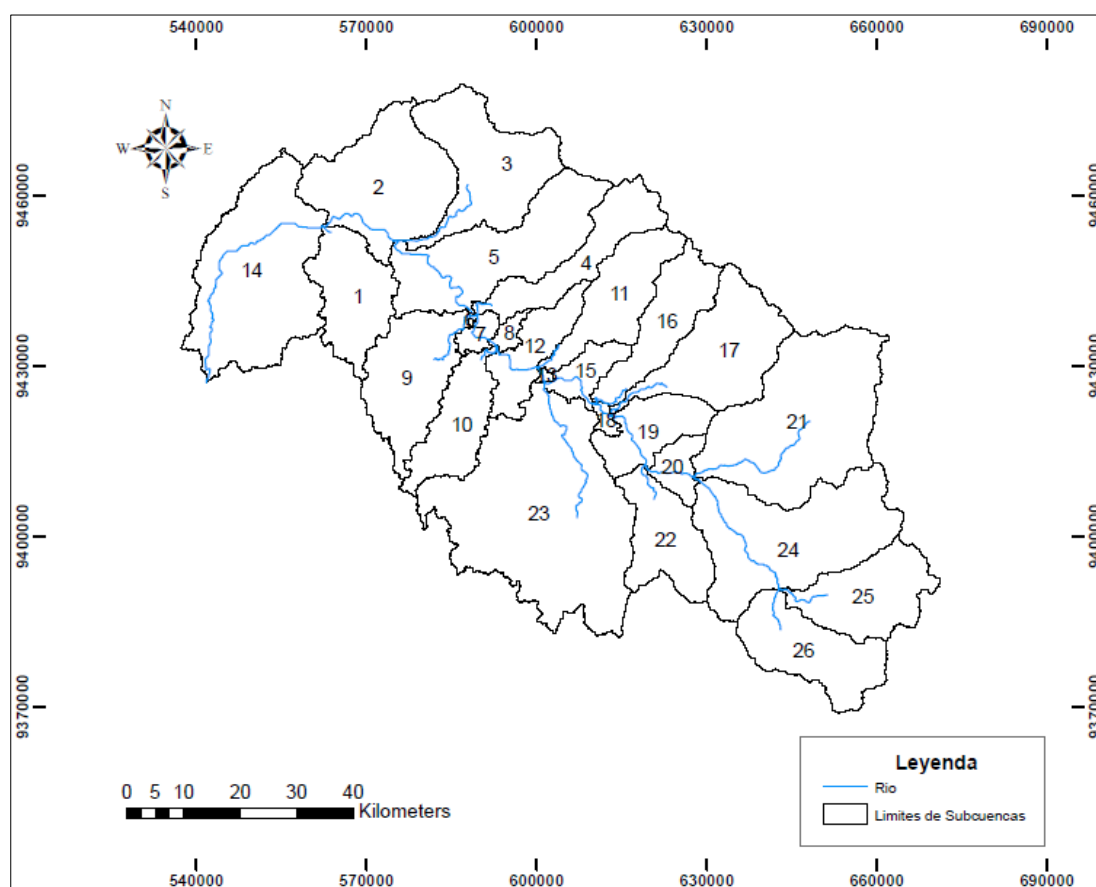


Figura 17: Subcuencas y red hídrica delineada de la cuenca media alta del río Piura

4.2. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

El análisis de sensibilidad resaltó los siguientes parámetros que tienen una influencia significativa en los resultados del modelo con respecto a las observaciones reales para la cuenca: SCS número de curva de escorrentía inicial (CN2), Umbral de la profundidad del agua en el acuífero superficial (REVAPMN), factor de compensación de evaporación del suelo (ESCO), factor de compensación de absorción de la planta (EPCO), capacidad de agua disponible (SOL_AWC), tiempo de retardo del agua subterránea (GW_DELAY), Coeficiente de agua subterránea (GW_REVAP) y el coeficiente de rugosidad de Manning para el canal principal (CH_N2).

Según (Srinivasan, 2015) los parámetros con un factor p-value mayor que 0,2 deben ser considerados para la calibración. Cumplen con esta condición todos los parámetros mencionados, exceptuando CN2 y CH_N2. Sin embargo, fueron incluidos ya que tenían la clasificación con factor t-Stat más alta de todos los parámetros. Por ello, aunque CN2 y CH_N2 no destacaron como importantes para esta sub-cuenca particular, la alta sensibilidad sugiere su importancia en las interacciones de parámetros. Los valores de P-Value y t-Stat para cada parámetro se representan en la Figura 18.

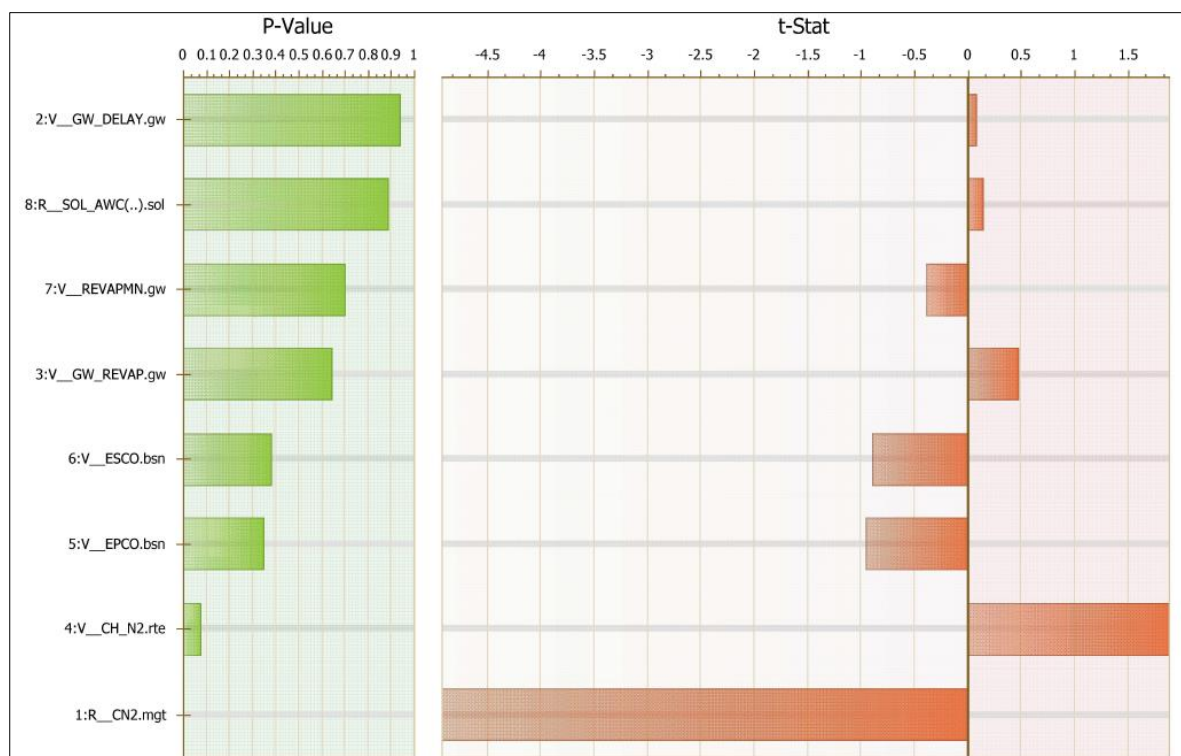


Figura 18: Resultado del análisis de sensibilidad de los parámetros usando SUFI-2

En la Figura 18, el factor t-Stat proporciona una medida de la sensibilidad, donde los valores absolutos mayores son los más sensibles; por otro lado, el factor p-value determina la importancia de la sensibilidad, siendo los valores más cercanos a cero los de mayor significancia. Se clasificaron los parámetros más sensibles, obteniéndose un ranking de éstos, el cual se observa en la Tabla 13.

Tabla 13: Resultado de los parámetros calibrados para la cuenca del río Piura

| Rank | Parámetros | t-Stat | p-Value |
|-------------|-------------------|---------------|----------------|
| 1 | r__CN2.mgt | -4.928 | 0.0001 |
| 2 | v__GW_DELAY.gw | 0.078 | 0.938 |
| 3 | v__GW_REVAP.gw | 0.471 | 0.642 |
| 4 | v__CH_N2.rte | 1.885 | 0.073 |
| 5 | v__EPCO.bsn | -0.959 | 0.348 |
| 6 | v__ESCO.bsn | -0.896 | 0.380 |
| 7 | v__REVAPMN.gw | -0.395 | 0.696 |
| 8 | r__SOL_AWC.sol | 0.142 | 0.888 |

4.3. CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO HIDROLÓGICO

La calibración consistió en la comparación de los datos simulados con la serie de datos observados a nivel mensual por medio de métodos estadísticos y gráficos; en la estación hidrológica "Sánchez Cerro" durante los años de 1986 a 1998. Mientras que, para la validación se utilizaron los años de 1999 a 2008.

Las estadísticas simuladas indican un ajuste excelente, con valores de NSE = 0.89, $R^2 = 0.90$ y NSE = 0.76, $R^2 = 0.81$, en la calibración y validación respectivamente. Los valores de PBIAS y RSR se encuentran en -3,62 y 0,33 en la etapa de calibración; y -5,63 y 0,49 en la etapa de validación, respectivamente. Estos valores indican un ajuste excelente para ambas etapas, y se resumen en la Tabla 14.

Tabla 14: Estadísticas de rendimiento del modelo para la calibración y validación

| Periodo | Media Observada (m³/s) | Media Simulada (m³/s) | Rendimiento del Modelo | | | |
|--------------------|--|---|-------------------------------|----------------------|--------------|------------|
| | | | NSE | R² | PBIAS | RSR |
| Calibración | 52.58090 | 55.54287 | 0.89 | 0.90 | -3.62 | 0.33 |
| Validación | 53.47267 | 55.40950 | 0.76 | 0.81 | -5.63 | 0.49 |

La representación de la comparación gráfica entre las series de caudales observados y simulados para el periodo de calibración y validación se representan en la Figura 19, donde se obtiene una simulación satisfactoria de la estacionalidad de flujos de escorrentía. Y, en la Figura 20 se observa el diagrama de dispersión del caudal observado vs simulado.

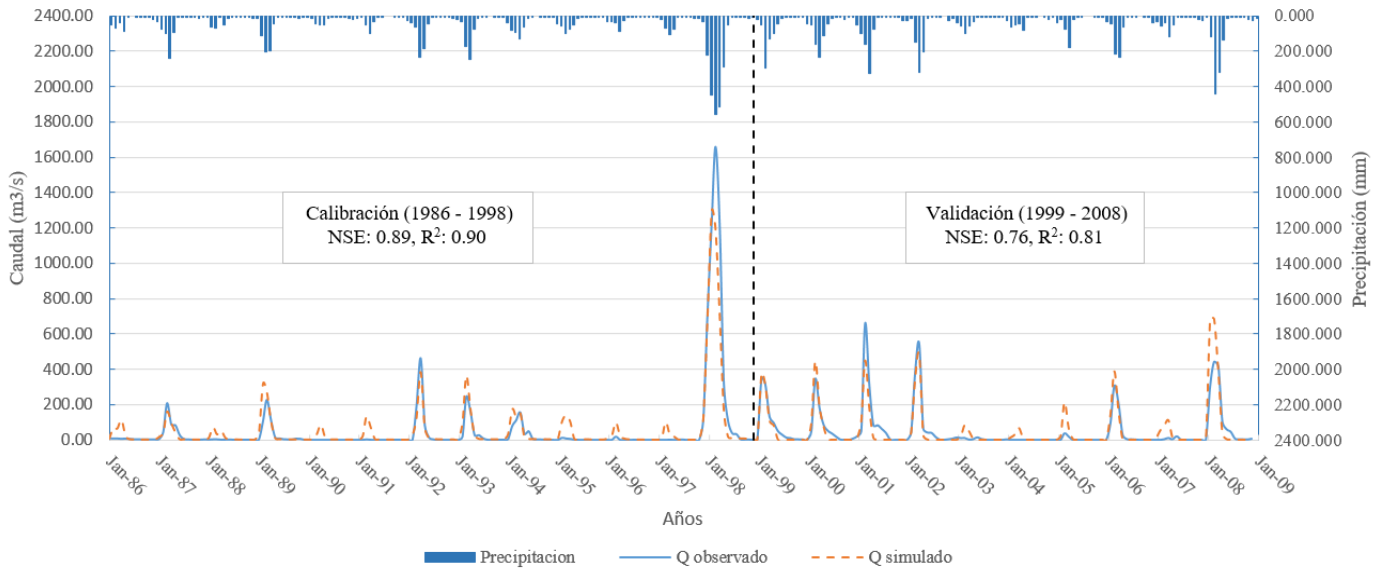


Figura 19: Series de caudales mensuales observados y simulados para el período de calibración y validación

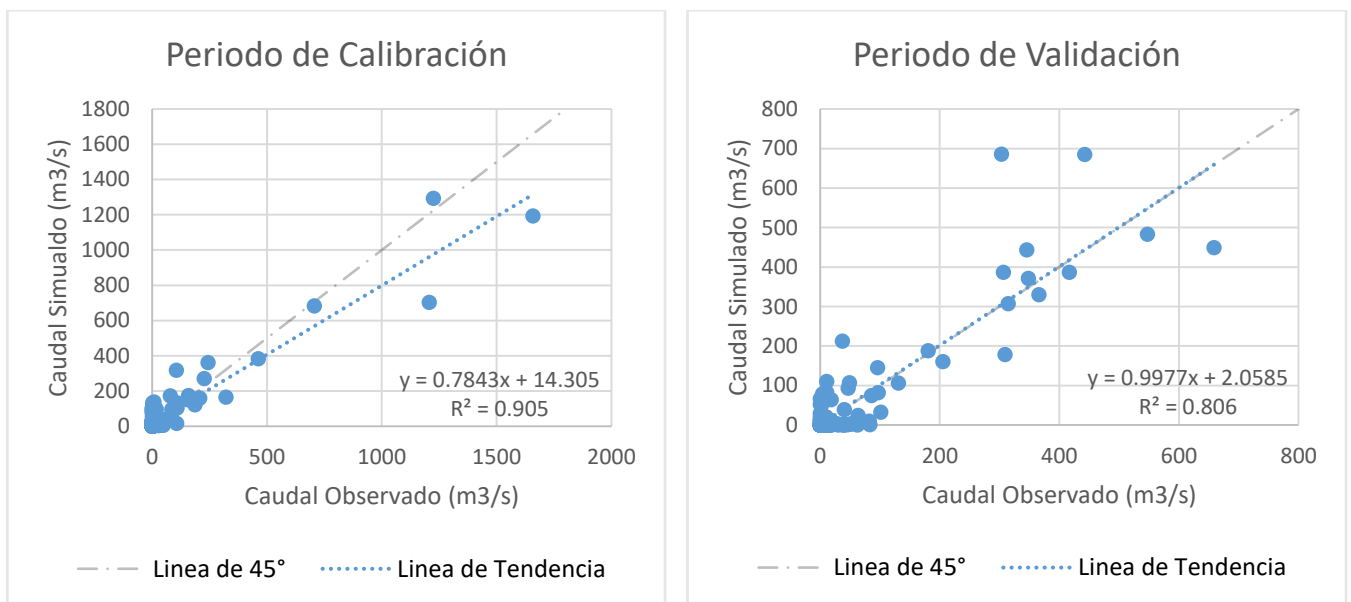


Figura 20: Grafica de dispersión del caudal observado vs. simulado en los periodos de calibración y validación

En la Tabla 15 se indican los valores ajustados para cada uno de los parámetros del modelo hidrológico calibrado que representa el área de estudio, los cuales logran una calibración y validación satisfactoria.

Tabla 15: Resultado de los parámetros calibrados para la cuenca del río Piura

| Rank | Parámetros | Rango | Valor inicial | Valor ajustado |
|------|----------------|----------|---------------|---------------------|
| 1 | r__CN2.mgt | ± 0.20 | 84 - 89 | 72 - 76 (- 0.14) |
| 2 | v__GW_DELAY.gw | 30 - 450 | 31 | 275 |
| 3 | v__GW_REVAP.gw | 0 - 0.2 | 0.02 | 0.07 |
| 4 | v__CH_N2.rte | 0 - 0.5 | 0.014 | 0.325 |
| 5 | v__EPCO.bsn | 0 - 1 | 1 | 0.45 |
| 6 | v__ESCO.bsn | 0 - 1 | 0.95 | 0.383 |
| 7 | v__REVAPMN.gw | 0 - 500 | 750 | 58.333 |
| 8 | r__SOL_AWC.sol | ± 0.25 | 0.081-0.175 | 0.09 - 0.21 (0.225) |

*El calificador (r_) indica que el parámetro se multiplica por 1 más el valor.
 El calificador (v_) se refiere a la sustitución del parámetro por el valor.
 El calificador (a_) se refiere a la adición de un parámetro por el valor.

4.4. EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO

La evaluación del cambio climático sobre la disponibilidad hídrica en la cuenca del río Piura se realiza comparando los resultados calculados por el modelo SWAT del escenario base con los escenarios futuros (obtenidos del generador meteorológico MarkSim). Para ello se escogieron cuatro proyecciones para el periodo futuro (2025 - 2054) que presentaron un alto ajuste, acorde con la zona en estudio. La Tabla 16, presenta cada uno de los escenarios modelados indicando el periodo correspondiente.

Tabla 16: Escenarios climáticos para los periodos presente y futuro

| Escenarios climáticos | | Periodo |
|---------------------------|-----------------------|---|
| Escenario Base | Data observada | Enero de 1986 a diciembre de 2008 |
| Escenarios Futuros | HadGEM2-ES RCP 4.5 | Proyectada: Enero de 2025 a diciembre de 2054 |
| | HadGEM2-ES RCP 8.5 | |
| | CSIRO-Mk3-6-0 RCP 4.5 | |
| | CSIRO-Mk3-6-0 RCP 8.5 | |

a. Variación de la precipitación

La Figura 21 muestra los resultados de la precipitación promedio mensual multianual de las seis estaciones escogidas, interpolado con el Hydraccess, en la cuenca media alta del río Piura, de acuerdo con el escenario base y los escenarios futuros.

Las proyecciones referidas al modelo HadGEM2-ES, tienen un incremento en los promedios de precipitación mensual en ambas rutas (RCP 4.5 y RCP 8.5) para los meses comprendidos entre mayo y diciembre, mientras que el modelo CSIRO-Mk3-6-0 no muestra un incremento significativo, sino que más bien tiene cierta concordancia con el escenario base, exceptuando el mes de agosto donde hay un incremento ligero para su ruta RCP 4.5 y uno mayor para su ruta RCP 8.5.

De lo anterior se desprende que, en términos generales, la herramienta MarkSim logro simular la estacionalidad de la precipitación en la zona de interés.

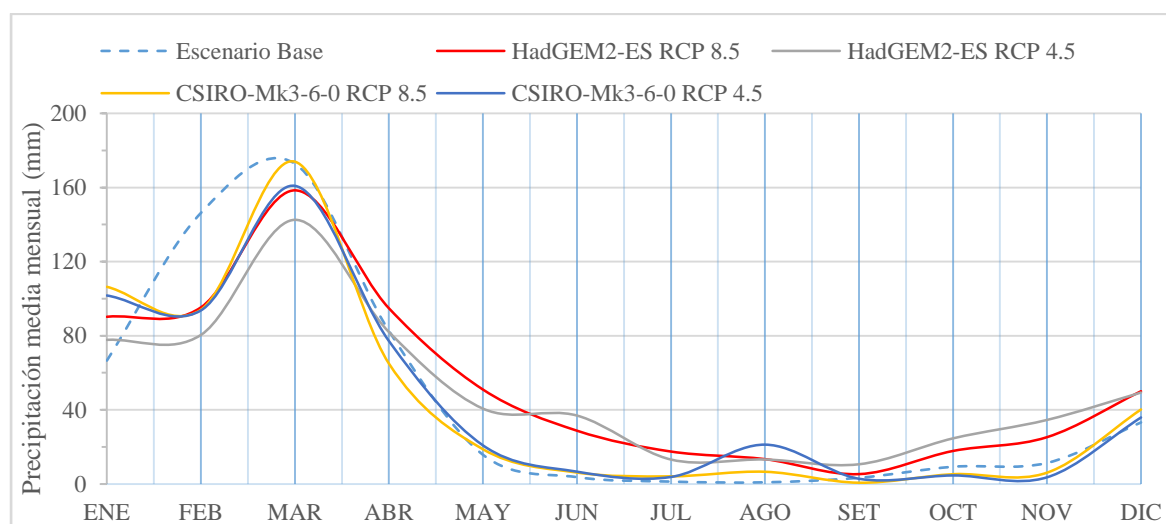


Figura 21: Precipitación media mensual del escenario base y los escenarios futuros escogidos

Según (Yates, 2014) en su investigación (Para - agua Project) las rutas HadGEM2-ES RCP 8.5 y CSIRO-Mk3-6-0 RCP 8.5 son considerados los escenarios muy húmedo y húmedo, respectivamente.

Además, en las figuras 22, 23 y 24 se observan las isolíneas de las isoyetas de precipitación media mensual (mm) para los periodos húmedos (octubre - abril) y secos (mayo - setiembre) que se generaron para el escenarios base y los posibles escenarios futuros (producto de los modelos anteriormente mencionados).

De estas gráficas, para el periodo húmedo el escenario futuro representado por el modelo HadGEM2-ES RCP 8.5 es el único que presenta un aumento ligero de la precipitación para la parte alta de la cuenca con respecto al escenario base, mientras que el modelo CSIRO-Mk3-6-0 en ambas rutas (RCP 4.5 y RCP 8.5) tiene una ligera disminución en la misma zona.

En cambio en el periodo seco los valores máximos de precipitación aumentaron en las ocho proyecciones futuras, siendo la variación porcentual más alta (142%) el escenario futuro generado por el modelo HadGEM2-ES RCP 4.5, seguido por el mismo modelo pero con otra ruta HadGEM2-ES RCP 8.5 (85%), luego el modelo CSIRO-Mk3-6-0 RCP 4.5 (57%), y la menor variación (14%) es la del escenario futuro generado por el modelo CSIRO-Mk3-6-0 RCP 8.5.

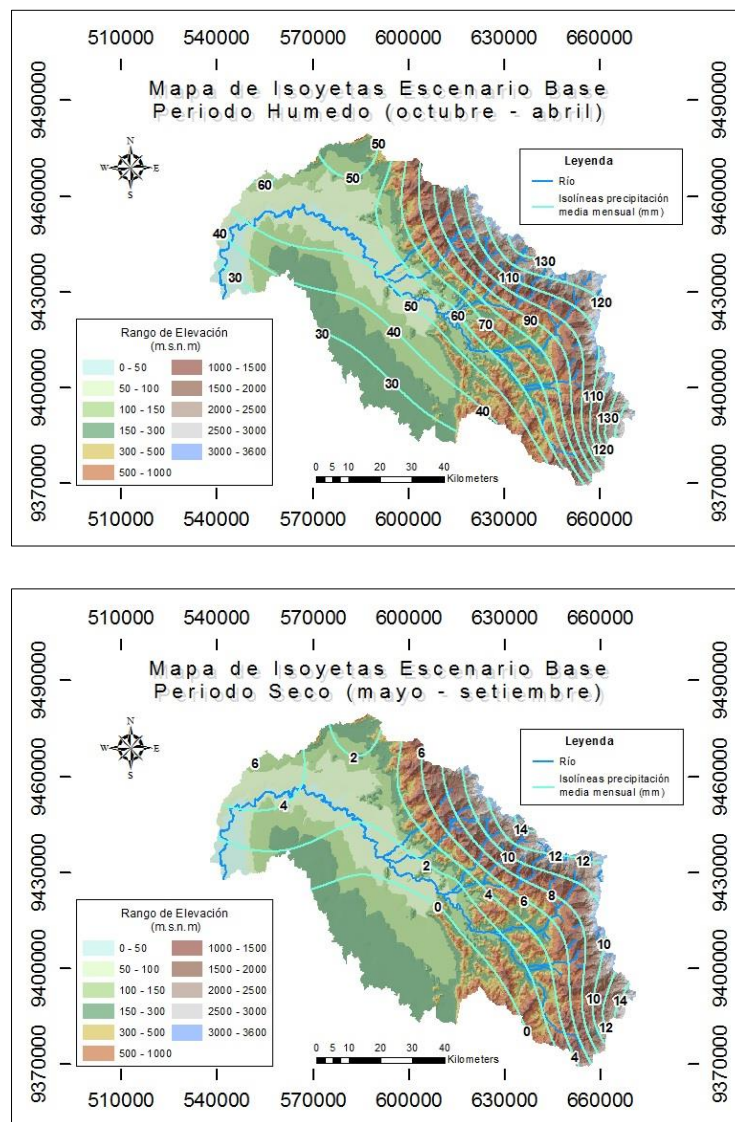


Figura 22: Mapa de isoyetas en el escenario base

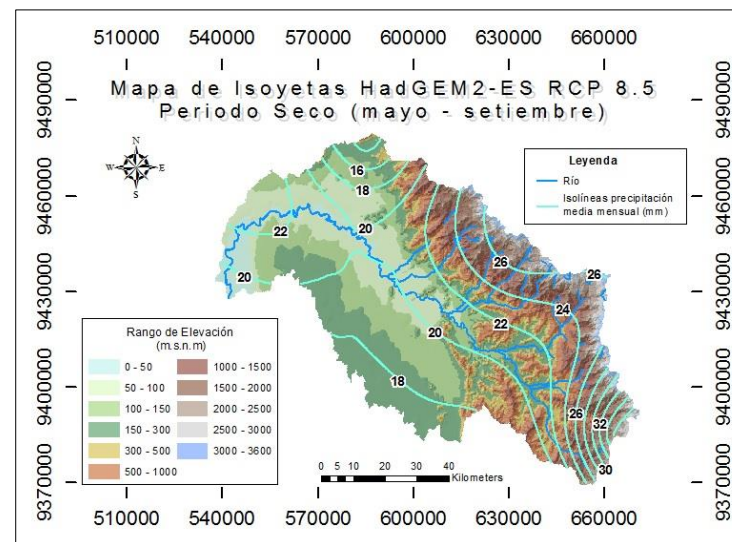
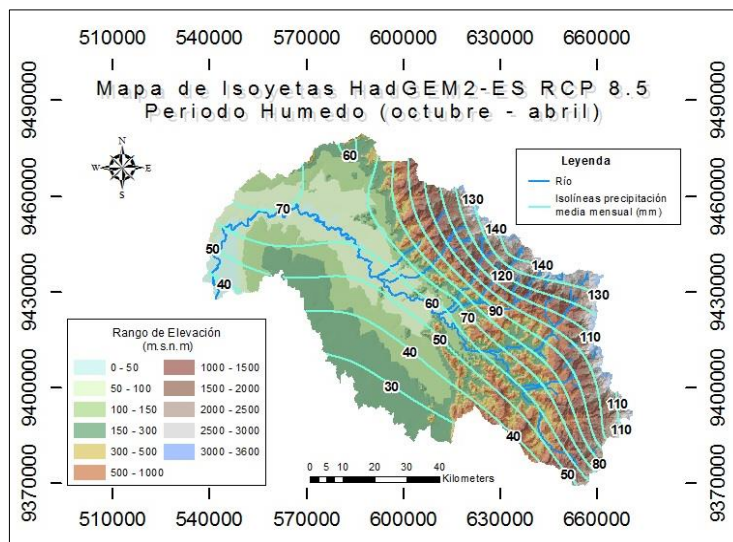
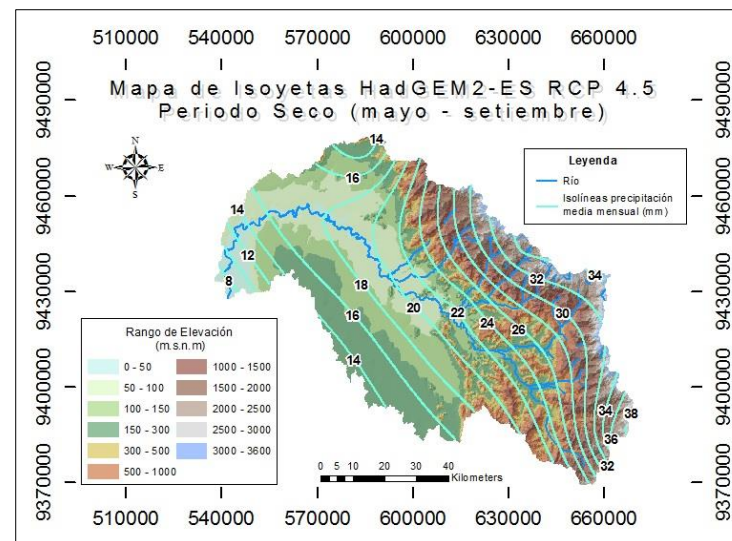
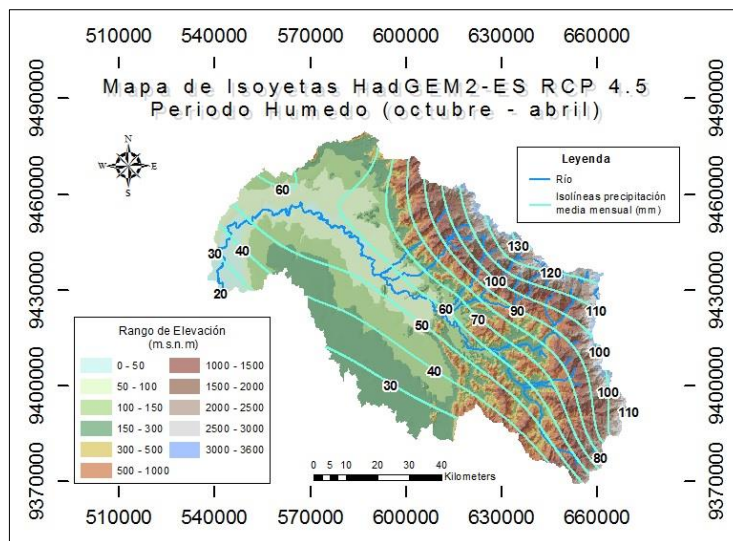


Figura 23: Mapa de isoyetas según el modelo HadGEM2-ES

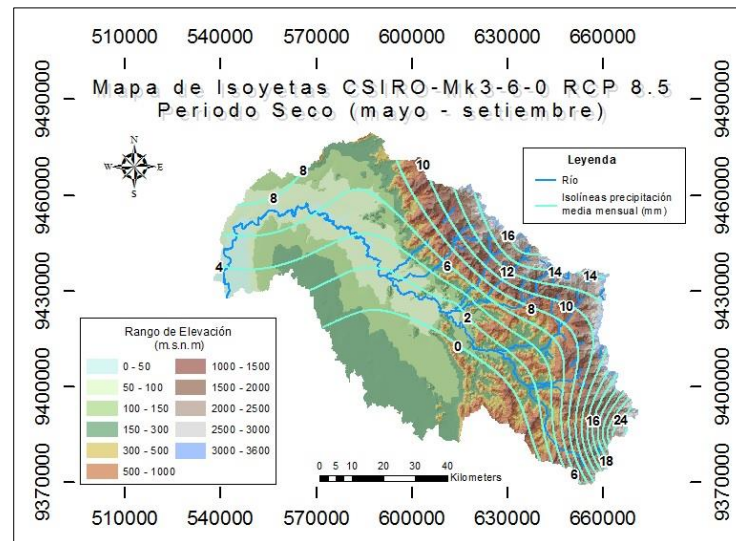
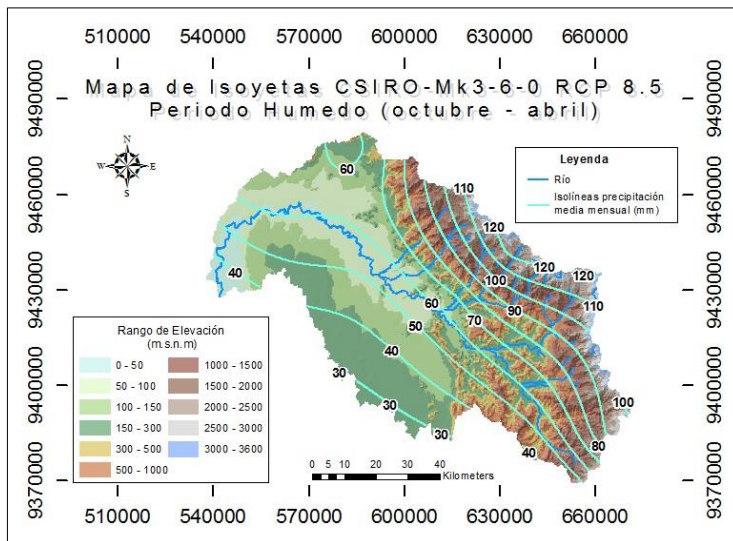
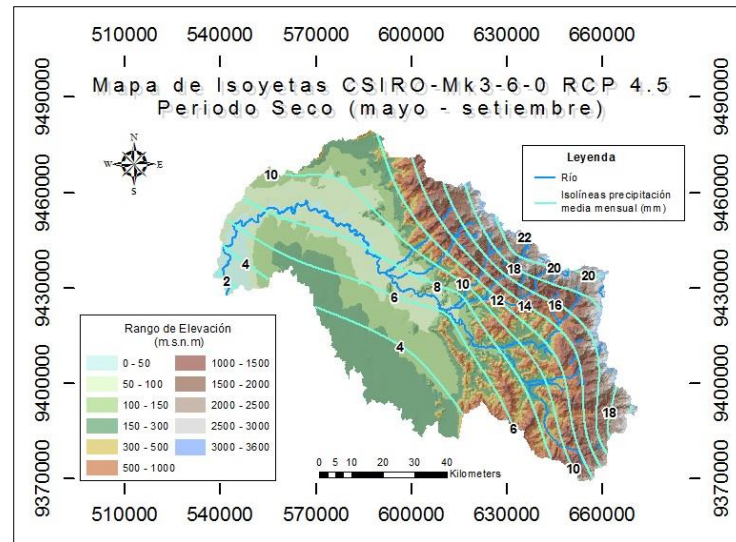
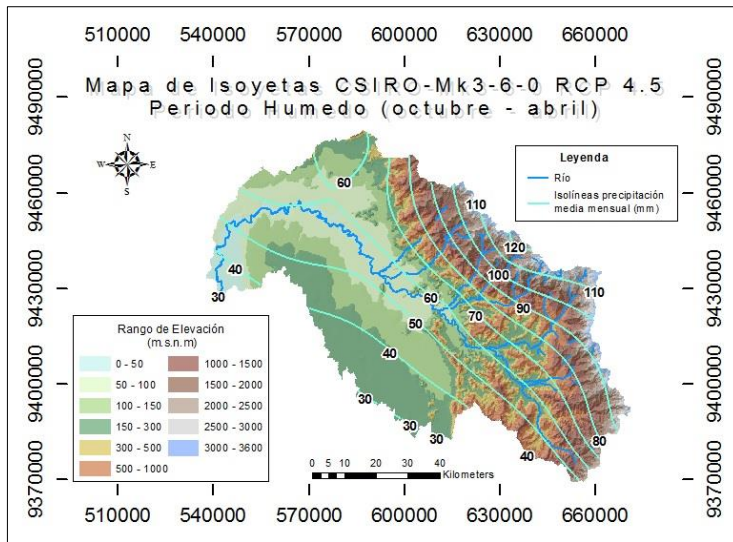


Figura 24: Mapa de isoyetas según el modelo CSIRO Mk3-6-0

Por otro lado, en la figura 25 se observa la distribución de los datos de precipitación total mensual mediante el análisis del diagrama de cajas, para el escenario base y los escenarios futuros (HadGEM 4.5, HadGEM 8.5, CSIRO 4.5, y CSIRO 8.5)

En donde la mayoría de los valores atípicos para el escenario base son referidos al evento del Fenómeno El Niño (FEN) del año 1998. Es importante señalar que los MCG no poseen la capacidad de poder predecir eventos extremos (FEN).

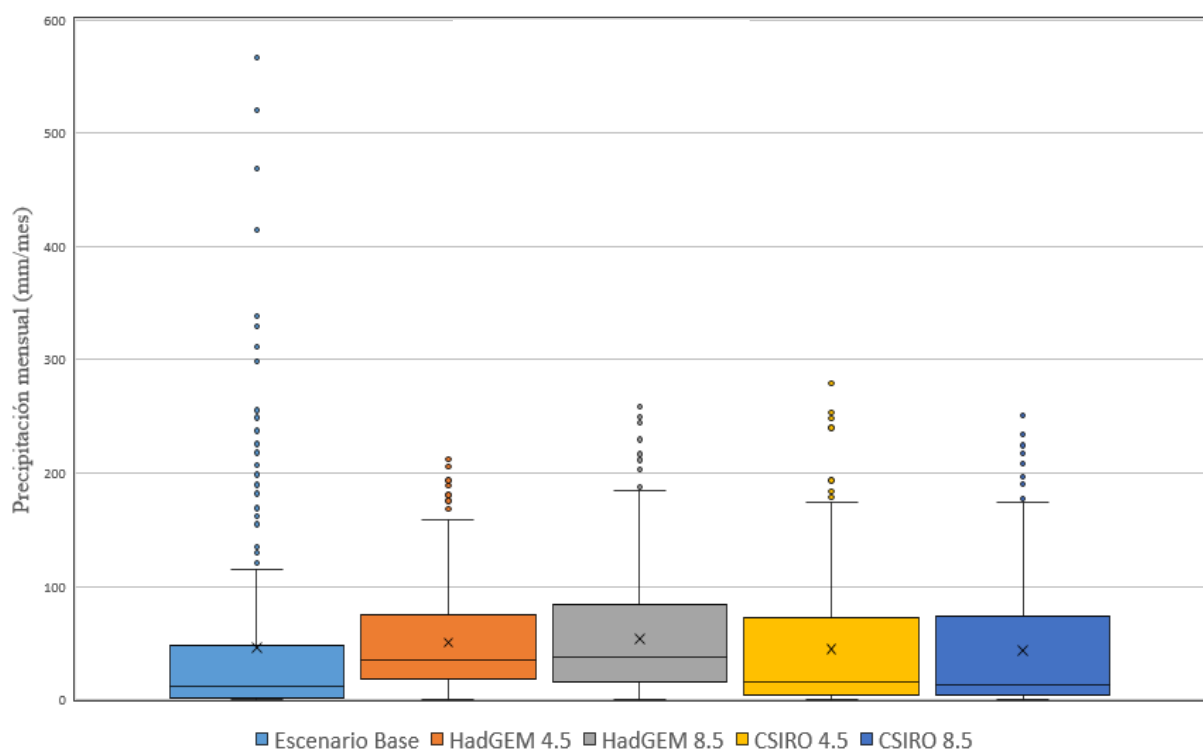


Figura 25: Diagrama de cajas de la precipitación observada y simulada

b. Variación de la temperatura

Para el periodo futuro (2025 - 2054), existe un incremento de la temperatura media en todas las estaciones en cada una de las ocho proyecciones generadas en los escenarios futuros; donde las rutas RCP 8.5 tienen los mayores incrementos, en comparación con las rutas RCP4.5 (consecuencia del aumento de las emisiones de los gases de efecto invernadero), como se puede ver en las Figuras 26, 27 y 28.

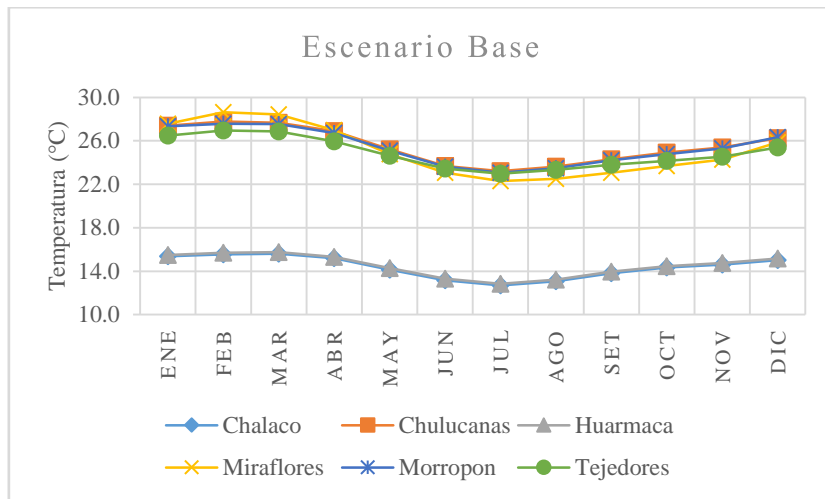


Figura 26: Temperatura media observada en el escenario base

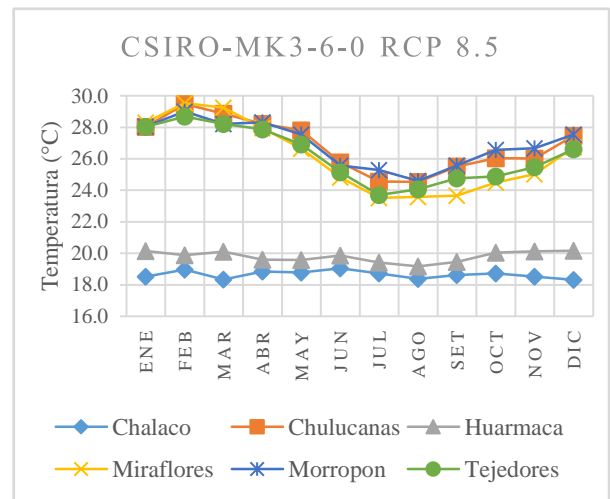
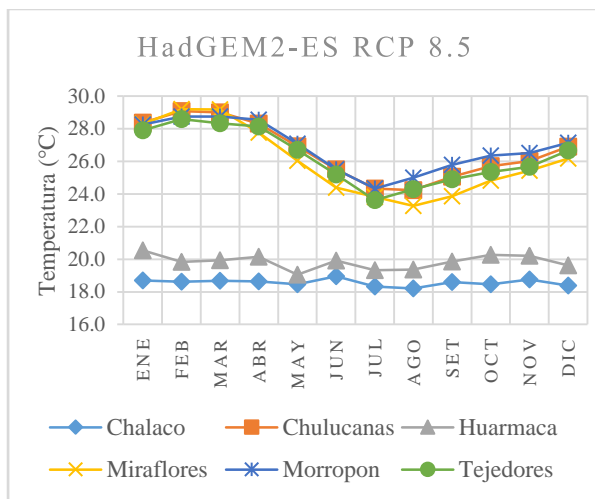


Figura 27: Temperatura media simulada en los escenarios futuros, ruta RCP 8.5

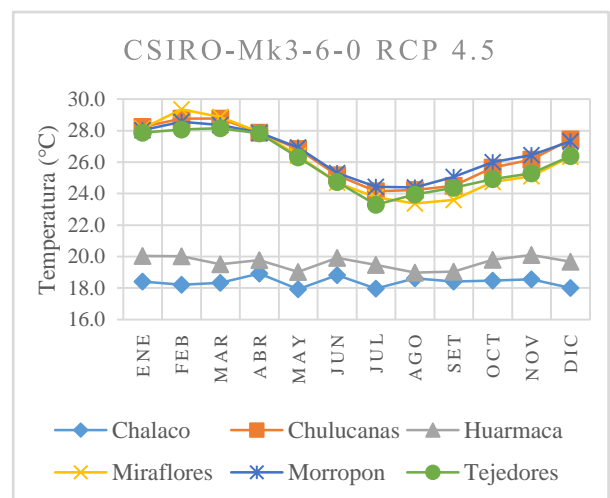
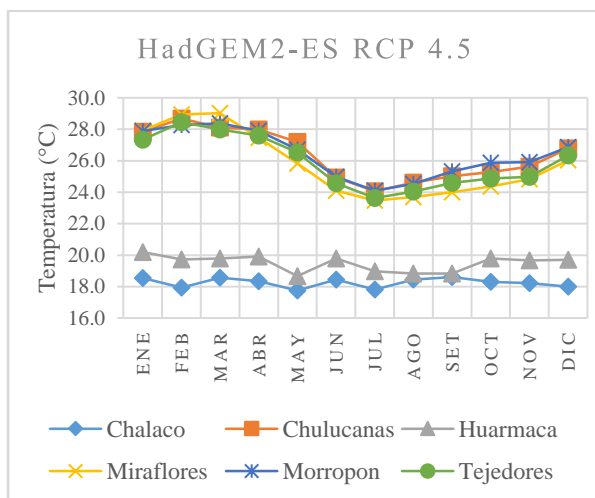


Figura 28: Temperatura media simulada en los escenarios futuros, ruta RCP 4.5

En las estaciones con mayor altitud (Chalaco y Huarmaca) los mayores incrementos se dan en los meses comprendidos entre mayo a setiembre (periodo seco) con variaciones desde los 3.6°C (mayo) hasta los 6°C (julio); en cambio para los meses entre octubre a abril (periodo húmedo) las variaciones están entre los 2.7°C (marzo) a 4°C (octubre).

Las estaciones con menor altitud (Chulucanas, Huarmaca, Miraflores, y Morropon) comparadas con las anteriores estaciones tienen una menor variación. Los incrementos altos se dan también en el periodo seco hasta los 2.6°C en el mes de mayo. Y, en el periodo húmedo el mayor aumento se da en el mes de febrero con un aproximado de hasta 1.7°C.

En general, el modelo el modelo CSIRO Mk3-6-0 RCP 8.5 es el que presenta los mayores incrementos de temperatura comparados con los otros.

c. Cambios en la oferta de agua (2025 - 2054)

En la Tabla 17, se presentan los caudales promedio mensual en la estación hidrométrica Sánchez Cerro del escenario base; y de los escenarios futuros (HadGEM2 - ES y CSIRO-Mk3-6-0), los que son comparados para la obtención de la variación mensual.

Tabla 17: Caudal promedio mensual de los escenarios, en la estación hidrométrica Sánchez Cerro

| Escenario | Caudal promedio mensual (m3/s) | | | | | | | | | | | |
|------------------------------|--------------------------------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|------|------|------|------|-------|
| | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Set | Oct | Nov | Dic |
| Escenario Base | 33.45 | 103.99 | 224.33 | 174.60 | 45.32 | 24.76 | 13.06 | 6.31 | 1.44 | 1.10 | 1.10 | 6.17 |
| HadGEM2-ES RCP 4.5 | 48.51 | 112.76 | 194.27 | 124.62 | 37.83 | 17.08 | 3.33 | 1.52 | 0.88 | 7.57 | 8.97 | 24.98 |
| HadGEM2-ES RCP 8.5 | 73.15 | 121.04 | 233.23 | 140.15 | 46.76 | 15.89 | 5.27 | 2.23 | 0.17 | 2.02 | 4.10 | 16.50 |
| CSIRO-Mk3-6-0 RCP 4.5 | 47.09 | 116.22 | 221.39 | 107.36 | 19.00 | 3.79 | 0.71 | 1.32 | 0.13 | 0.05 | 0.01 | 6.79 |
| CSIRO-Mk3-6-0 RCP 8.5 | 58.01 | 111.08 | 254.17 | 106.95 | 19.31 | 2.88 | 0.73 | 0.48 | 0.02 | 0.07 | 0.05 | 9.50 |

Los resultados de caudal mensual simulados en la estación hidrométrica Sánchez Cerro para cada uno de los escenarios futuros se adjuntan en los anexos.

Para los escenarios futuros cercanos, la Figura 29 superior muestra los hidrogramas de caudal promedio mensual para los escenarios RCP 4.5 (HadGEM2 - ES RCP 4.5 y CSIRO-Mk3-6-0 RCP 4.5); mientras que la gráfica inferior muestra los hidrogramas de caudal promedio mensual para los escenarios RCP 8.5 (HadGEM2 - ES RCP 8.5 y CSIRO-Mk3-6-0 RCP 8.5).

Ambas figuras corresponden a la estación hidrométrica Sánchez Cerro y se presentan junto con los caudales históricos del escenario base para su comparación. Se observa que los caudales máximos de los escenarios futuros al igual que en el escenarios base tienen lugar en el mes de marzo.

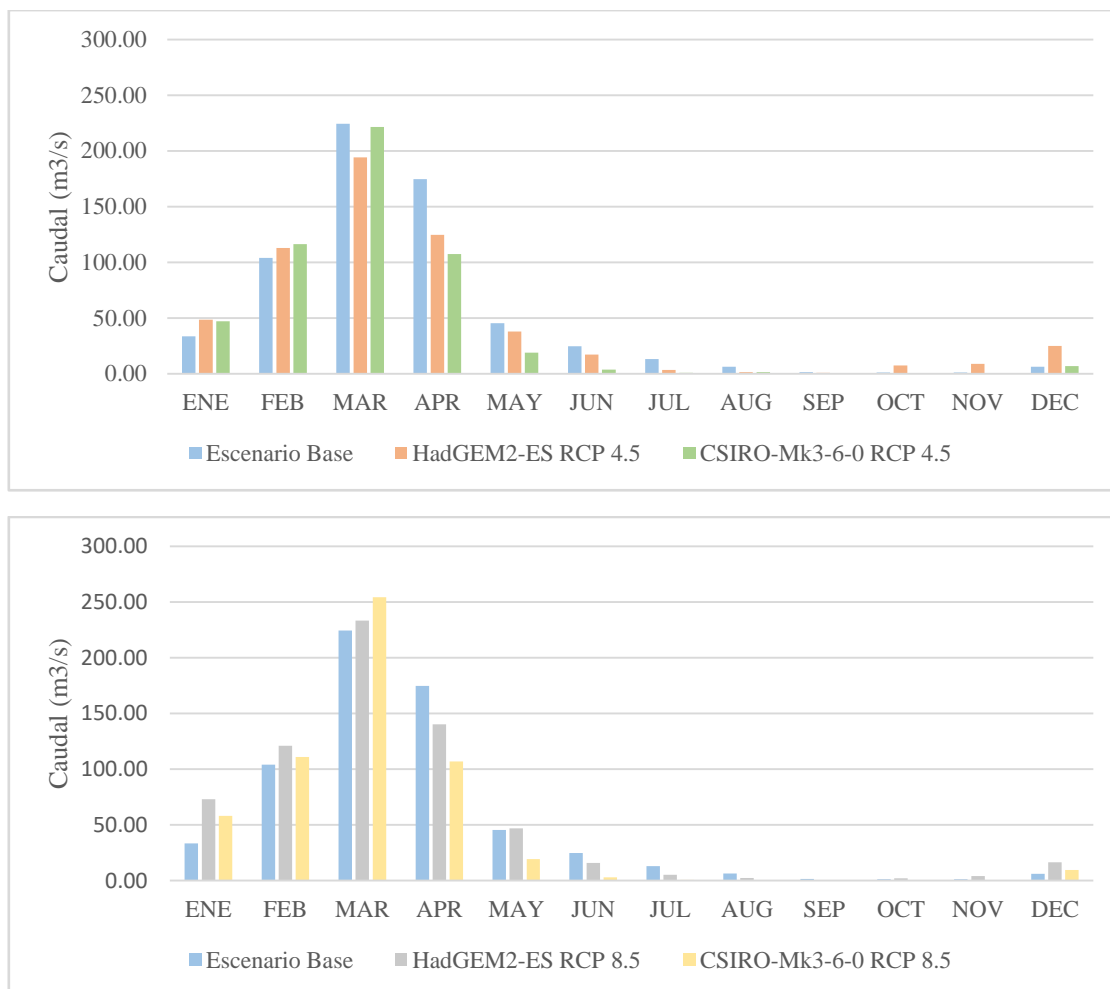


Figura 29: Hidrogramas de caudal promedio mensual en los escenarios (grafico superior RCP 4.5 e inferior RCP 8.5), estación hidrométrica Sánchez Cerro.

La tendencia de los caudales medios mensuales también se observa en la Figura 30, mediante el análisis del diagrama de cajas, en donde los escenarios futuros HadGEM2-ES RCP 8.5 y CSIRO-Mk3-6-0 RCP 8.5, tienen los caudales proyectados más altos con valores de 472.8 m³/s y 477.4 m³/s respectivamente.

Se debe recalcar que los MGC no consideran en sus proyecciones los eventos extremos como el Fenómeno El Niño. Por ello, los incrementos proyectados de las frecuencias de eventos de grandes magnitudes, representan una gran alerta por los trágicos efectos producto de las inundaciones.

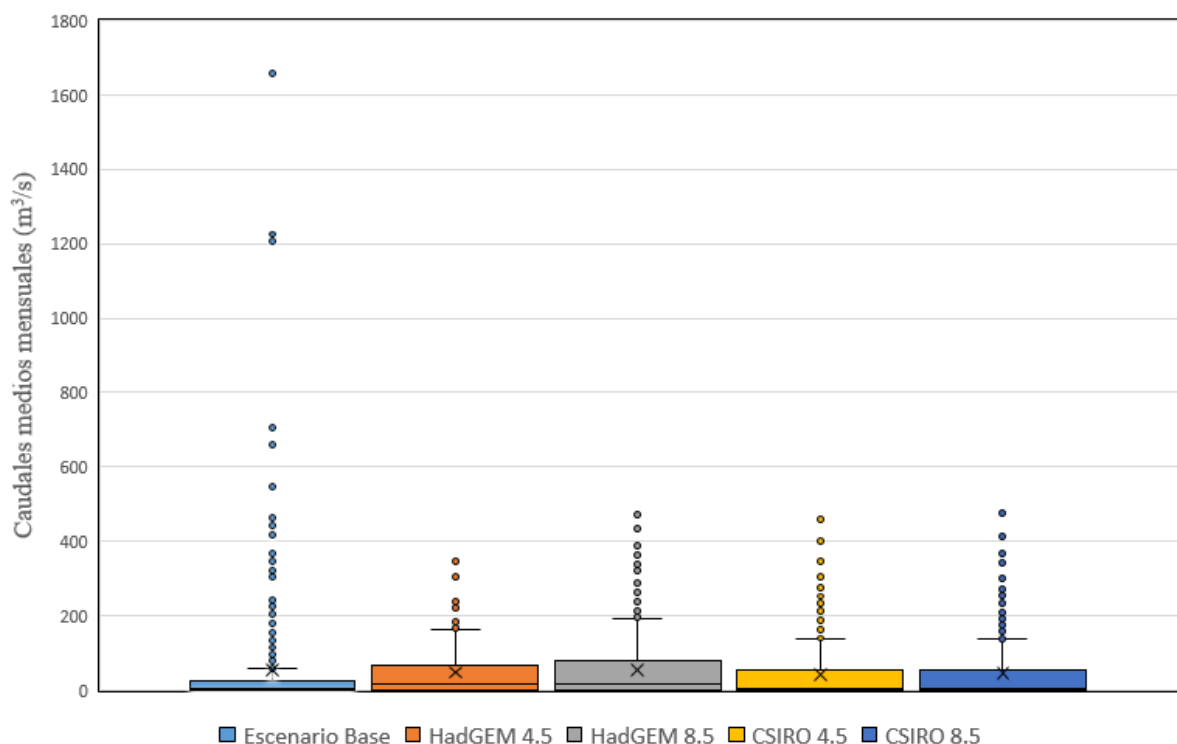


Figura 30: Diagrama de cajas de los caudales observados y simulados

La variación promedio mensual del caudal, Tabla 18, presenta resultados de variación más detallados. El modelo HadGEM2-ES presenta doce meses con variación negativa, siete pertenecen a la ruta RCP 4.5 y cinco a la ruta RCP 8.5; mientras que el modelo CSIRO-Mk3-6-0 presenta diecisiete meses con variación negativa (nueve con ruta RCP 4.5 y ocho con ruta RCP 8.5).

Se indican las variaciones de escorrentía, por el cambio climático, con respecto a cada mes del año, donde se tomaron en cuenta los resultados de los modelos de alto ajuste por presentar la mejor capacidad de simular las condiciones de la región en estudio. Se pueden identificar variaciones desde +716.5% a -99.2% en el periodo húmedo (Octubre - Abril) y variaciones de +3.2% a -98.9% en el periodo seco (Mayo - Septiembre).

Tabla 18: Variación porcentual del caudal promedio mensual

| Escenario | Δ % Promedio mensual | | | | | | | | | | | |
|----------------------------------|-----------------------------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Set | Oct | Nov | Dic |
| HadGEM2-ES RCP 4.5 | 45.0 | 8.4 | -13.4 | -28.6 | -16.5 | -31.0 | -74.5 | -76.0 | -38.6 | 587.0 | 716.5 | 305.2 |
| HadGEM2-ES RCP 8.5 | 118.7 | 16.4 | 4.0 | -19.7 | 3.2 | -35.8 | -59.6 | -64.6 | -88.4 | 83.0 | 273.7 | 167.7 |
| CSIRO-Mk3-6-0 RCP 4.5 | 40.8 | 11.8 | -1.3 | -38.5 | -58.1 | -84.7 | -94.6 | -79.1 | -91.3 | -95.8 | -99.2 | 10.1 |
| CSIRO-Mk3-6-0 RCP 8.5 | 73.4 | 6.8 | 13.3 | -38.7 | -57.4 | -88.4 | -94.4 | -92.5 | -98.9 | -93.5 | -95.5 | 54.0 |

La Figura 31 muestra estas tendencias de variación promedio mensual en la estación hidrométrica Sánchez Cerro obtenida de los cuatro escenarios proyectados para el periodo futuro de enero de 2025 a diciembre de 2054; así como la tendencia promedio de estos valores.

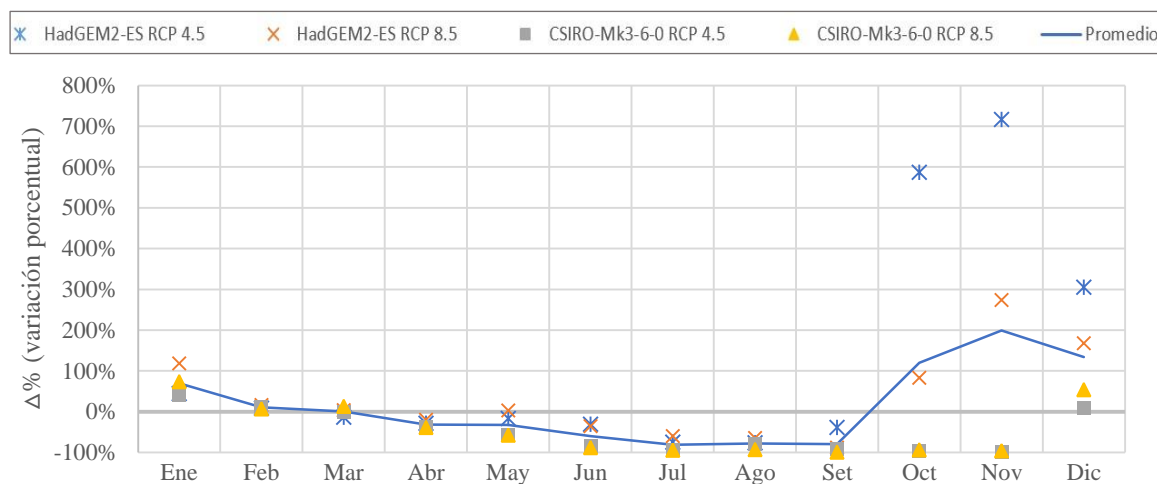


Figura 31: Tendencia de la variación porcentual del caudal promedio mensual proyectado a futuro, de enero de 2025 a diciembre de 2054

En la tendencia promedio de las variaciones mensuales, se observa que las variaciones más altas se generan en los meses de Octubre, Noviembre y Diciembre, esto es debido a que los valores promedio mensuales de escorrentía observados en dichos meses son valores pequeños, de modo que el aumento en magnitud de escorrentía proyectada en los escenarios futuros se traduce en una amplia variación en porcentajes. Además, las variaciones proyectadas en los meses entre Enero y Setiembre presentan una concordancia alta, por lo que se indica una mayor certeza en dichos meses.

La variación promedio indica que en todos los meses del periodo húmedo (Octubre - Abril) se proyecta un incremento de la oferta de agua desde +0.6% a +198.9%, aunque con una disminución de -31.4% para el mes de abril únicamente. Por otra parte, para el periodo seco (Mayo – Setiembre) se proyecta una disminución de la escorrentía, principalmente para los meses de julio y setiembre con descensos de hasta -80.8% y -79.3%, respectivamente.

En la Figura 32 se observan las curvas de disponibilidad hídrica de los caudales proyectados por los cuatro escenarios futuros escogidos, donde se puede identificar un incremento significativo para los meses comprendidos en el periodo húmedo para las persistencias al 50%, 75%, 90% y 95%, especialmente en los meses de enero, febrero, marzo y abril. Sin embargo, con respecto a la ocurrencia de caudales proyectados para las cuatro persistencias

en el periodo seco, en los meses entre mayo y noviembre, existe una tendencia al descenso hasta alcanzar valores de cero, al igual que en el escenario base.

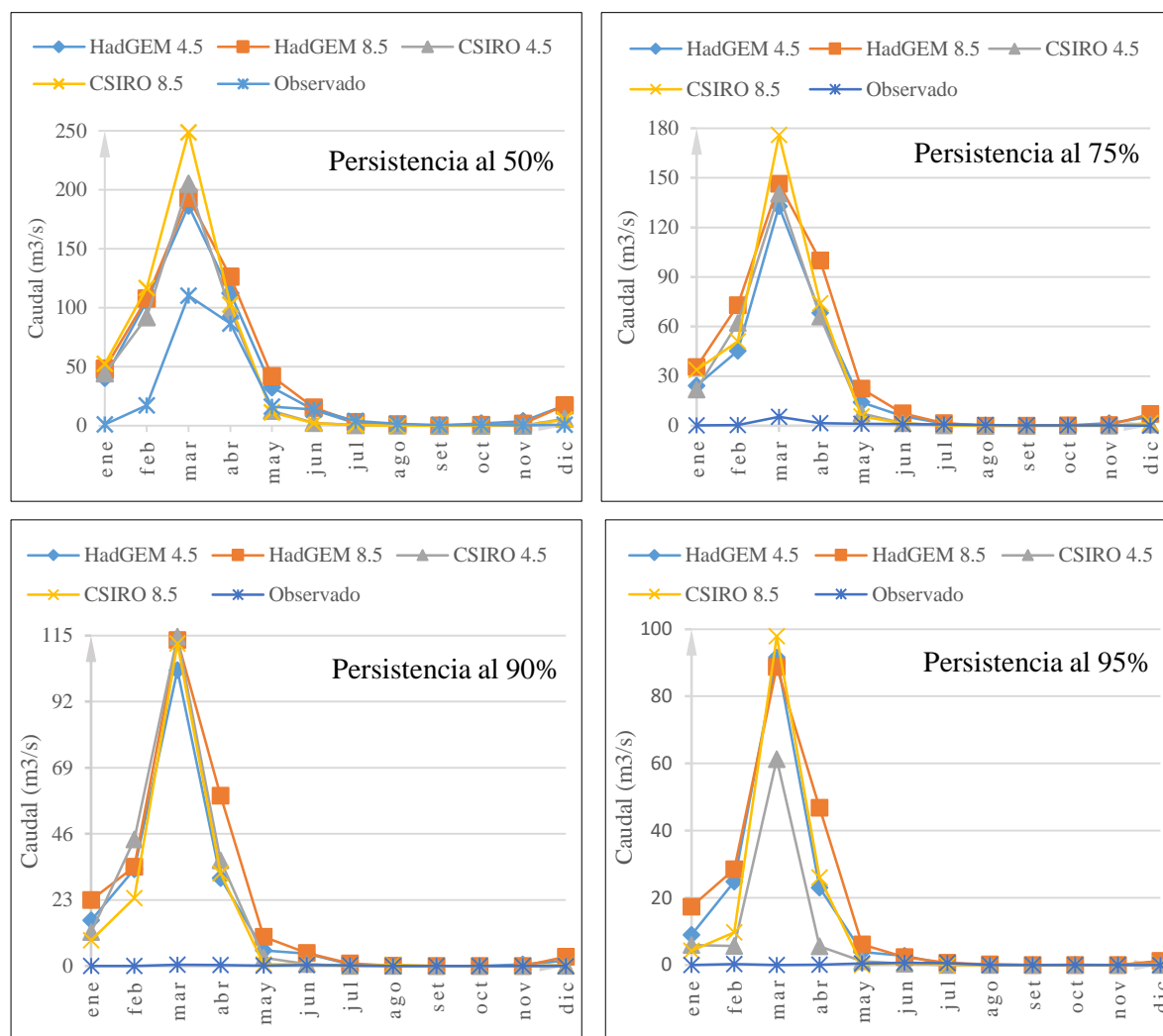


Figura 32: Persistencias de disponibilidad hídrica al 50%, 75%, 90% y 95%.

d. Evapotranspiración de referencia futura (2025 - 2054)

La Evapotranspiración de referencia (ET₀), calculada con el método de Penman - Monteith a través del modelo hidrológico SWAT, tuvo una variación anual entre 1744.6 a 2013.7 mm/año, para el periodo de validación (1999 - 2008) dentro del escenario base. Para una mejor representación de la ET₀ en los escenarios, se agrupó el promedio mensual para los periodos húmedo y seco, de acuerdo con las Figuras 33, 34 y 35.

Donde se observa que la tendencia de encontrar los mayores valores de ET₀ en el periodo seco se mantiene constante para todos los escenarios futuros. En este periodo, con respecto al escenario base, los valores máximos los tiene el modelo CSIRO Mk3-6-0 en ambas rutas RCP 4.5 y 8.5, con un aumento del 13% y 14%, respectivamente. En cambio, los valores

máximos para el modelo HadGEM2-ES en sus rutas RCP 4.5 y 8.5 tienen un aumento del 7 por ciento y un ligero incremento de 0.3 por ciento, respectivamente. Además, ambos modelos, en sus proyecciones, muestran una reducción de los valores mínimos de la ETo en 23% aproximadamente.

No obstante, en el periodo húmedo los valores máximos de la ETo en los escenarios futuros, el modelo CSIRO-Mk3-6-0, en ambas rutas RCP 4.5 y 8.5, considera un leve aumento del valor máximo en 5 y 6 por ciento, respectivamente; mientras que el modelo HadGEM2-ES indica una disminución del 4 por ciento en la ruta RCP 8.5 y un aumento igual del 4 por ciento en su ruta RCP 4.5. Además, los valores mínimos en las cuatro proyecciones se incrementan en un 40% aproximadamente.

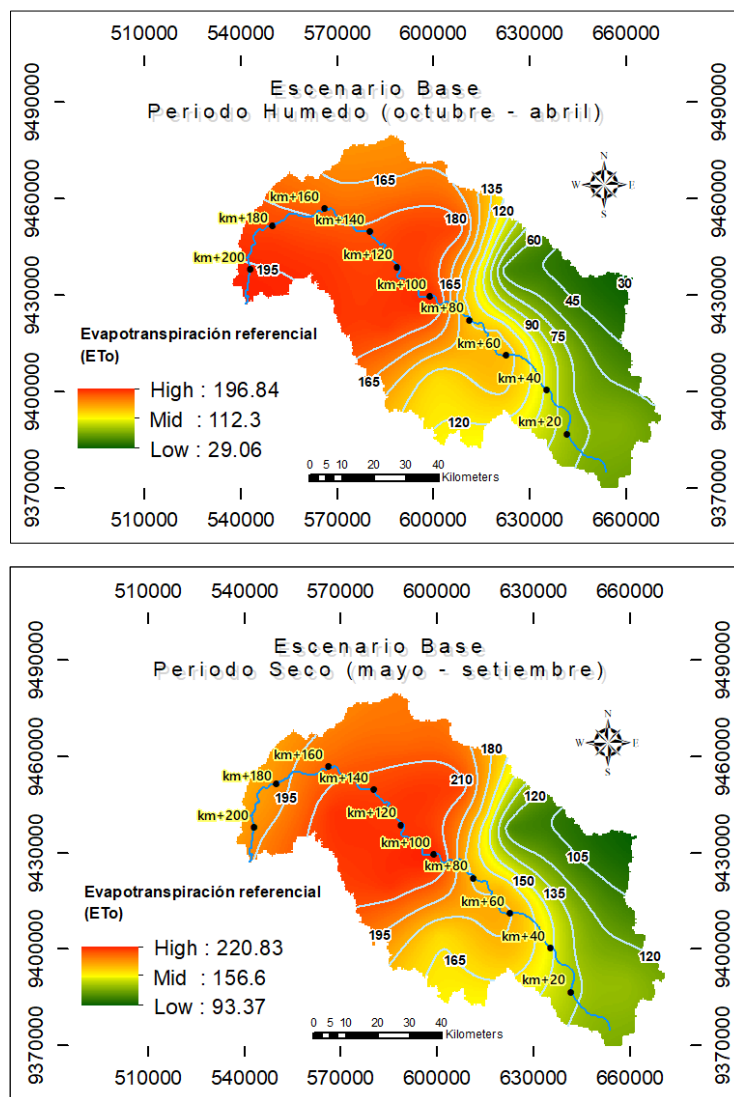


Figura 33: Evapotranspiración de referencia en el escenario base

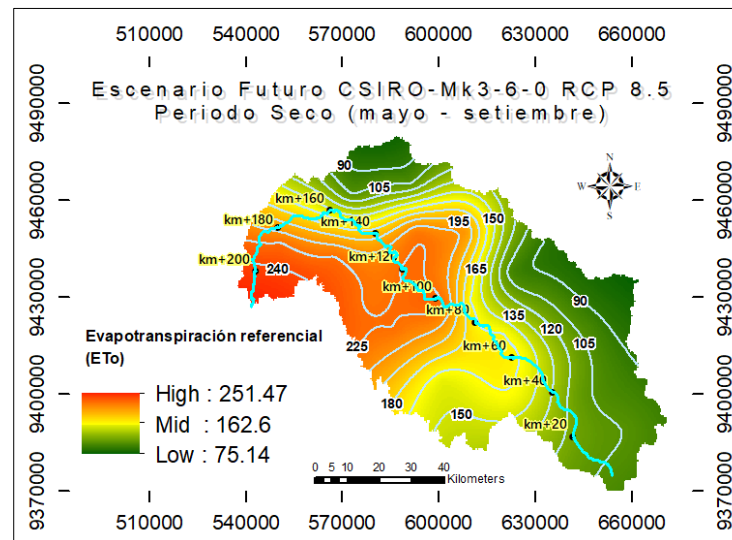
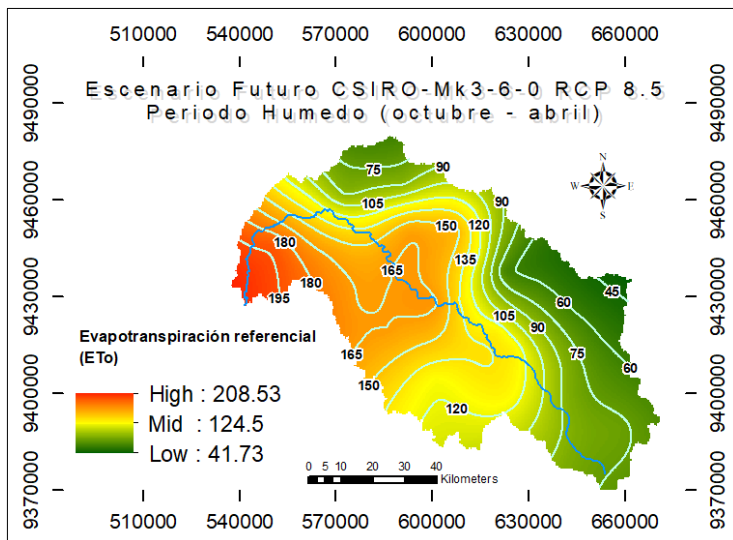
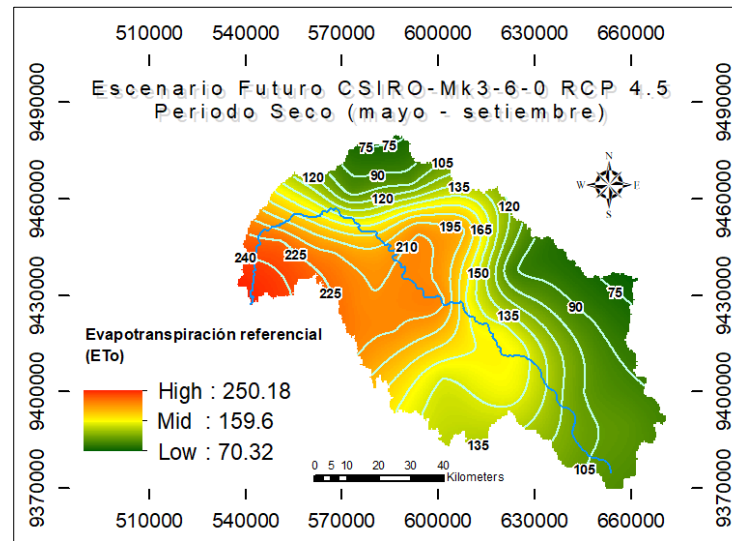
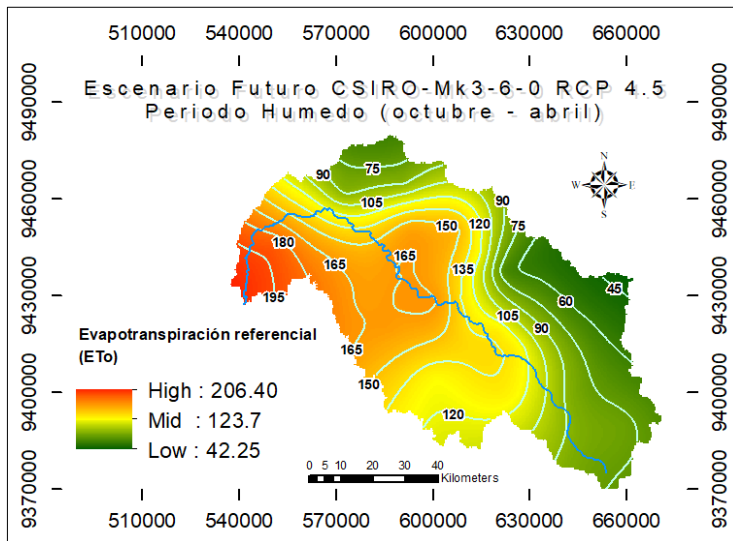


Figura 34: Evapotranspiración de referencia futura según el modelo CSIRO Mk3-6-0

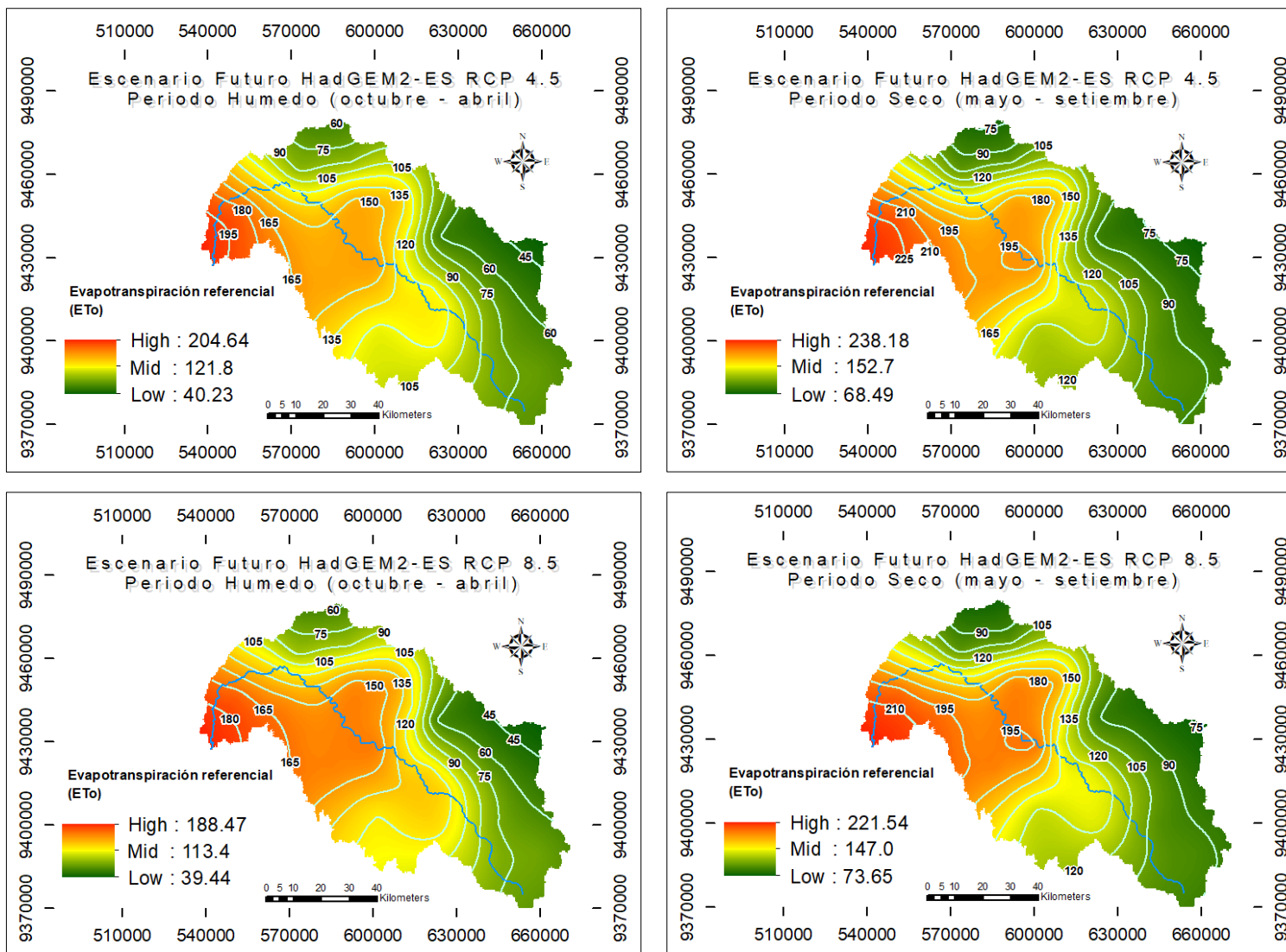


Figura 35: Evapotranspiración de referencia futura según el modelo HadGEM2-ES.

De acuerdo con el recorrido del río principal que conforma la cuenca media y alta del río Piura, se realizó una gráfica la evapotranspiración referencial vs. la altura respectiva de acuerdo con la longitud progresiva del río; como se ilustran en la Figura 36.

En términos generales la evapotranspiración alcanza valores más altos en el periodo seco, y esta aumenta conforme disminuye la altura. En la parte alta no hay cambios significativos para el periodo húmedo comparado con el escenario base, aunque en el periodo seco se observa un descenso en los valores medios; mientras que en la parte de menor altura de la cuenca (provincia Piura y parte de Morropon) hay una disminución de la ETo para el periodo húmedo y seco, aun así se proyectan alcanzar valores máximos de evapotranspiración en ambos periodos en la parte con menor altura de la cuenca.

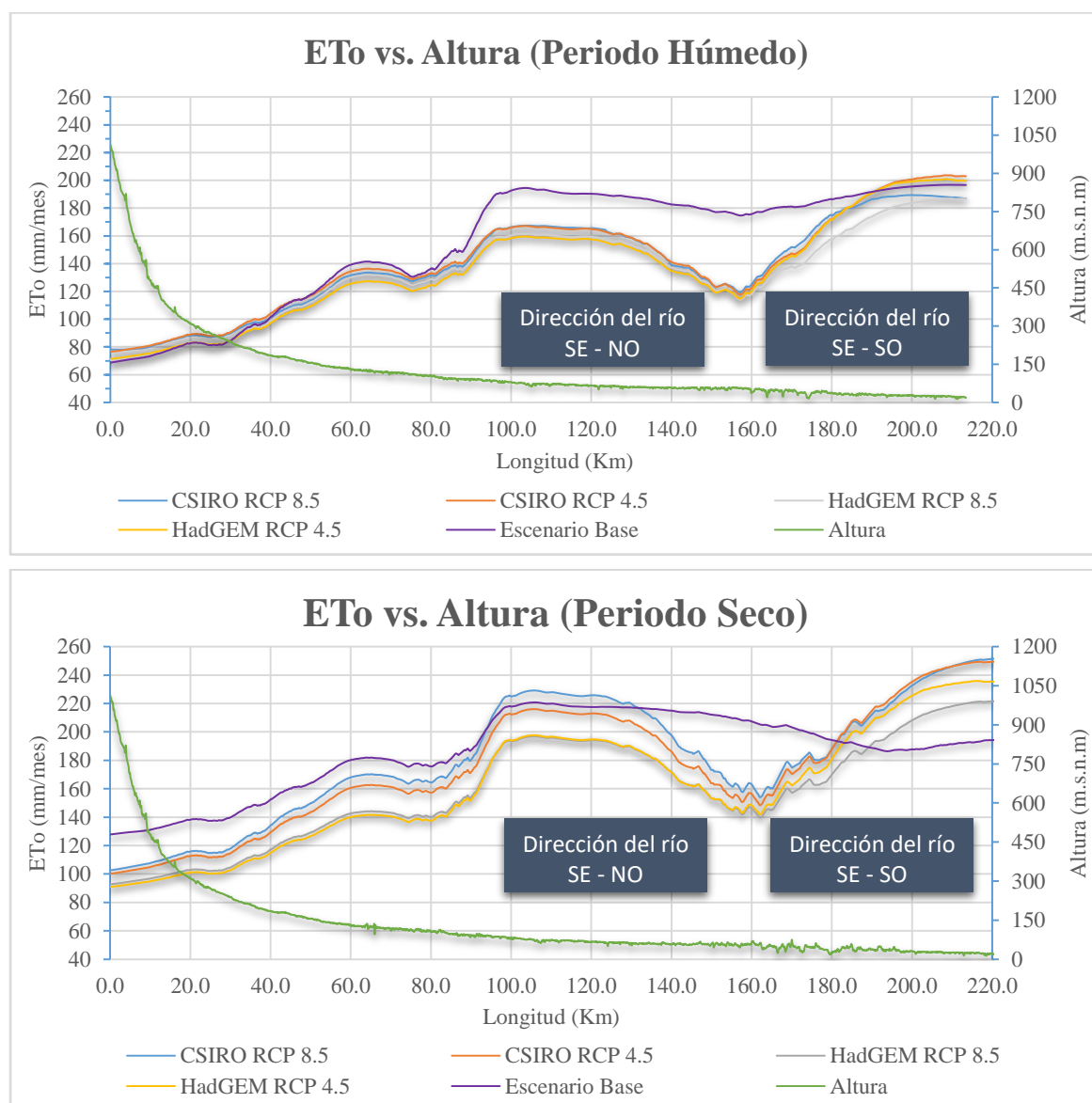


Figura 36: Evapotranspiración referencial vs. altura, para el periodo húmedo y seco de los escenarios.

Además, se debe mencionar que en la Figura 36 la diferencia entre la Eto en los escenarios futuros y el escenario base; de acuerdo con el corte transversal, en el kilómetro 160 del río Piura, aproximadamente, es originado por el cambio pronunciado al variar la dirección inicial del río con sentido de sureste a noroeste, hacia el suroeste para desembocar en el océano Pacífico.

Puesto que, los valores futuros más altos de ETo se observan en la parte baja de la cuenca cerca a la costa del suroeste, similar al escenario base. En cambio, a diferencia del escenario base, los valores futuros de Eto en la parte alta al noroeste son bajos, y esto supone una variación la cual se evidencia en la gráfica anterior.

V. CONCLUSIONES

- Los resultados obtenidos en la calibración espacial del modelo hidrológico con valores de 0.90 y 0.89 para R2 y NSE respectivamente, y también los valores del proceso de validación temporal de 0.81 y 0.76 para R2 y NSE respectivamente; indican un rendimiento satisfactorio del modelo hidrológico SWAT y su capacidad suficiente para simular las condiciones hidrológicas de la cuenca en estudio. Se evidencia también que SWAT - CUP es práctico y fiable de ser utilizado para la calibración y el análisis de sensibilidad de modelos de cuencas.
- Se realizó la reducción de escala (“downscaling”) estadística de los MCG a través de la herramienta MarkSim, generando las proyecciones futuras de precipitación, temperaturas máximas y mínimas y radiación solar de manera satisfactoria, para los escenarios de cambio climático proyectados para las rutas RCP 4.5 y RCP 8.5, de acuerdo con el 5° Informe de Evaluación (AR5) del IPCC. Logrando simular la estacionalidad de la precipitación futura (2025 - 2054) en la cuenca, los modelos HadGEM2-ES (Inglaterra) y CSIRO-Mk3-6-0 (Australia) con un mejor ajuste en el área de estudio. Por ello, sus proyecciones fueron tomadas con mayor consideración en esta investigación.
- Los resultados mostraron que el volumen del flujo mensual de los caudales proyectados para el periodo 2025 - 2054 en el escenario RCP 4.5 (ruta con emisiones moderadas) para ambos modelos, proyectan para el periodo húmedo (octubre - abril) variar en +103.4% en promedio, que representa un incremento aproximado de 80.48 m³/s. En cambio, para el periodo seco (mayo - septiembre) proyectan una variación de -64.4%, que representa una disminución aproximada de 11.71 m³/s.

Igualmente para los escenarios RCP 8.5 (ruta con emisiones altas) se proyecta para el periodo húmedo (octubre - abril) variar en +40.2% en promedio, que representa un incremento aproximado de 31.31 m³/s. Aunque, para el periodo seco (mayo –

setiembre) se proyecta una variación de -67.7%, que representa una disminución aproximada de 12.3 m³/s. Asimismo para ambas rutas en los meses entre Enero y Setiembre se presentan resultados pocos variables, por lo que se indica una mayor certeza en dichos meses.

- La tendencia promedio del total de proyecciones indica para el periodo húmedo un aumento de la escorrentía de +71.8%, que representa un aproximado de 55.9 m³/s; ocurriendo los mayores incrementos en los meses de octubre, noviembre y diciembre. Por otro lado, el periodo seco disminuye en un -66.1%, que representa una disminución aproximada de 12 m³/s. ocurriendo los mayores descensos en los meses de julio, agosto y setiembre, de hasta -80.8%, -78.0% y -79.3% respectivamente.
- A pesar de que, el aumento de las temperaturas en el futuro puede interpretarse como una mayor evapotranspiración referencial (ET_o); este efecto no están pronunciado como podría esperarse, debido a que la ET_o está limitada por la disponibilidad de agua, la cual no presenta un aumento significativo. Aunque en las zonas con baja altitud se proyectan los valores máximos que superan al escenario base en el periodo seco y se mantienen casi constantes para el periodo húmedo.

VI. RECOMENDACIONES

- La ausencia de información hidrológica, limitó al estudio a su calibración, validación y evaluación del impacto del cambio climático en la cuenca alta y media del río Piura, sin embargo se recomienda validar el modelo hidrológico para toda la cuenca empleando más estaciones hidrológicas en la calibración del modelo para poder obtener una representación más exacta de la cuenca.
- La herramienta MarkSim se utilizó para generar las proyecciones probables del clima futuro a escala local en base a los escenarios del AR5. Aunque, se debe recordar que el clima futuro generado sólo representa un posible desarrollo y, por tanto, sólo indica una tendencia probable. En este estudio la fiabilidad de los datos generados en MarkSim sólo se investigaron para una región objetivo. Por lo tanto, la fiabilidad de la herramienta se puede determinar mejor mediante la investigación de los resultados para diferentes lugares y condiciones geográficas.
- Se utilizó el método de reducción de escala estadística para obtener datos climáticos de alta resolución. En el futuro el modelo puede ser probado con datos climáticos provenientes de una reducción de escala dinámica que pueden dar una mejor aproximación del flujo con una menor incertidumbre.
- En el presente estudio el mapa de la cobertura de suelos es del año 2015 y fue tomado como constante para el periodo 2025 - 2054. Por consiguiente, para una mejor aproximación del flujo proyectado futuro, los posibles escenarios de uso de la tierra a mediados del siglo XXI pueden ser incorporados en este modelo.
- Fomentar más estudios de cambio climático en nuestro país, hasta lograr definir una línea base sobre los posibles cambios del clima y su efecto en la disponibilidad hídrica para las diferentes cuencas, a fin de que los responsables políticos tomen medidas para satisfacer la demanda futura de agua potable, riego y agua industrial en un régimen local, además de establecer las medidas de adaptación y/o mitigación más eficientes ante estos efectos.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abbaspour K.C.; Yang J.; Maximov I.; Siber R.; Bogner K.; Mieleitner J.; Zobrist J.; Srinivasan R. 2007. Modelling hydrology and water quality in the pre-alpine/alpine Thur watershed using SWAT, *Journal of Hydrology* 333: 413– 430.
- Allen, R.G., L.S. Pereira, D. Raes, and M. Smith. 1998. “Crop Evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements.” *Irrig. and Drain. Paper 56*, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 300 pp.
- Arnold, J.G.; Srinivasan, R.; Mutiah, R.S.; Williams, J.R. 1998. Large area hydrologic modeling and assessment part I: Model development. *Journal of American Water Resources Association* 34(1): 73-89.
- Arnold, J; Fohrer, N. 2005. SWAT 2000: Current capabilities and research opportunities in applied watershed modelling. *Hydrological Processes* 19 (3):563-572.
- Bader, D.C.; Covey, W.J.; Gutkowski, J.R.; I.M. Held; K.E. Kunkel; R.L. Miller, R.T. Tokmakian; M.H. Zhang. 2008: *Climate Models: An Assessment of Strengths and Limitations*. U.S. Climate Change Science Program Synthesis and Assessment Product 3.1. Department of Energy, Office of Biological and Environmental Research, 124 pp.
- Chow Ven. Te.; David, R.; Maidment, L.; W. Mays. 1994. *Hidrología Aplicada*, Traducido de la primera edición en inglés de *Applied Hydrology*. Colombia, Santa Fe Bogotá. ISBN: 0-07-01810-2.
- CIIFEN, 2014. Metodología para la Estimación de Vulnerabilidad en Ecuador, Perú y Bolivia, Proyecto Información de cambio climático y biodiversidad para el fomento de políticas públicas de conservación y adaptación en la región de los Andes Tropicales, p 1-67.

- CMNUCC, 1992. Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. FCCC/INFORMAL/84 GE.05-62301 (S) 220705. Disponible en: Naciones Unidas, Nueva York. <http://unfccc.int/resource/docs/convkp/convsp.pdf> [Con acceso 15-05-2016].
- Crawford, N.H.; Linsley, R.K. 1966. Digital Simulation in Hydrology: Stanford Watershed Model IV. Technical Report No. 39, Department of Civil Engineering, Stanford University, p. 210.
- Díaz, C.; M. Esteller. 2005. Recursos hídricos: conceptos básicos y estudios de caso en Iberoamérica. Uruguay, Piriguazú Ediciones – CIRA – UAEM.
- FAO, (Food and Agriculture Organization of the United Nations)/Cooperazione italiana/UNEP) 2000. Land cover classification and user manual. Rome. 179p.
- Faustino, J. 2012. Identificación, evaluación y manejo de zonas de recarga hídrica. Managua, NI. 114 p.
- Fowler, H. J.; Blenkinsop, S. y Tebaldi, C. (2007), “Linking climate change modelling to impacts studies: recent advances in downscaling techniques for hydrological modeling”. *International Journal of Climatology*. 27, pp. 1547-1578.
- Ghaffari, G. 2010. SWAT-simulated hydrological impact of land-use change in the Zanjanrood basin, Northwest Iran. *Hydrological Processes*, 24(7), pp.892–903.
- Green, W.H.; G. Ampt. 1911. Studies on soil physics: The flow of air and water through soils. *J. Agric. Sci.* 4:1–24.
- Intergovernmental Panel of Climate Change-IPCC, 2013. Resumen para responsables de políticas en: Cambio Climático 2013. Bases físicas. Contribución del Grupo de trabajo I al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático” [Stocker, T. F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex y P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press. Cambridge. United Kingdom and New York, NY, USA. 1535 pp.

- IPCC, 2007. “Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático” [Equipo de redacción principal: Pachauri, R.K. y Reisinger, A. (directores de la publicación)]. IPCC, Ginebra, Suiza, 104 págs.
- IPCC, 2001: Climate Change 2001. The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Houghton, J.T., Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P.J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell, and C.A. Johnson (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 881pp.
- Jayakrishnan, R.; Srinivasan, R.; Santhi, C.; Arnold, J.G. 2005. Advances in the application of the SWAT model for water resources management. *Hydrological Processes*. 19(3):749-762.
- Jensen, M.E., R.D. Burman, and R.G. Allen (ed). 1990. “Evapotranspiration and Irrigation Water Requirements.” ASCE Man. and Rep. on Engineering Pract. No. 70, New York, 332 p.
- Jones, P.G., Thornton P.K. 2013. Generating downscaled weather data from a suite of climate models for agricultural modelling applications, *Agricultural System*, 114, 1-5.
- Knutti, R.; Masson, D.; Gettelman, A. 2013. Climate model genealogy : Generation CMIP5 and how we got there, 40 (February), 1–6. doi:10.1002/grl.50256.
- Leavesley, G. H.; Lichty, R. W.; Troutman, B. M.; Saindon, L. G. 1983. Precipitation-runoff modeling system: User’s manual US Geological Survey Water Investigation Report. 83–4238.
- Monteith, J. L. 1965. “Evaporation and Environment.” In: The state and movement of water in living organism. 19th Symp. Soc. Exptl. Biol. P. 205-234.
- Morad y Triviño. 2001. Sistemas de Información Geográfica y modelizaciones hidrológicas: Una aproximación a las ventajas y dificultades de su aplicación. *Boletín de la A. G. E*, 31, 23-46.

- Moriasi, D.N., Arnold, J.G., Van Liew, M.W., Bingner, R.L., Harmel, R.D. and Veith, T.L. (2007) Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 50, 885-900.
- Moss, R. H. 2010. The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature* 463:747-756.
- Neitsch, S. L.; Arnold, J. G.; Kiniry, J. R. y J. R. Williams. 2011. "Soil and water assessment tool. Theoretical documentation: version 2009". Reporte Técnico N° 406. [En línea] College Station, Texas: Texas Water Resources Institute, Texas Havrylenko, Sofía Beatriz - 2014 - Referencias 147 A&M University, 647 pp. Disponible en: <http://swat.tamu.edu/documentation/> [Con acceso 15-03-2016].
- Neitsch, S.L., Arnold, J.G., Kiniry, J.R., Srinivasan, R., Williams, J.R. 2005a. Soil and Water Assessment Tool Input/output File Documentation. V. 2005. Blackland Research Center, Texas Agricultural Experiment Station, Temple, Texas.
- Neitsch, S.L., Arnold, J.G., Kiniry, J.R., Williams, J.R. 2005b. Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation Version 2005. Blackland Research Center, Texas Agricultural Experiment Station, Temple, Texas.
- Neitsch, S.; Arnold, J.; Kiniry, J.; Srinivasan, R.; Williams, J. 2002. Soil and Water Assessment Tool (SWAT). SWAT User Manual, Version 2000; Water Resource Institute: College Station, TX, USA.
- Oki T.; Hanae S. 2006. Global hydrological cycles and world water resources *Science*, 313, pp. 1068–1072.
- Priestley, C.H.B.; Taylor, R.J. 1972. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. *Mon. Weather Rev.* 100 (2), 81–92.
- Proaño, M.; Gavilanes, M.; Valenzuela, P.; Cisneros, C. 2006. Aplicación del Modelo SWAT en la Subcuenca del Río Ambato: Proyecto Cuencas Andinas – CODESAN –GTZ. Quito, Ecuador. 44 p.

- Ramos, Y., 2014: Estimación del efecto del cambio climático en la precipitación en la costa norte del Perú usando simulaciones de según los modelos climáticos globales, Tesis Ing. Meteoróloga de la Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú.
- Refsgaard, J.C., Storm, B. 1995. Mike She. In: Singh, V.P. (Ed.), Computer Models of Watershed Hydrology. Water Resource Pubs., CO, USA, 806-846.
- Salgado R. J. H., & Güitrón de los Reyes, A. 2012. Aplicabilidad de los Modelos Hidrológicos Distribuidos, Applicability of the Distributed Hydrological Models.
- Santhi C., Arnold J., Williams J., Dugas W., Srinivasan R., Hauck L. (2001). Validation of the SWAT model on a large river basin with point and nonpoint sources. J. American Water Resources Assoc. 37(5): 1169-1188.
- Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI), 2005. Escenarios del Cambio Climático en el Perú 2004 – 2050: Cuenca del río Piura. Lima, Perú.
- Srinivasan, R. (2015). Soil and Water Assessment Tool Beginner SWAT Training Manual. Workshop at Spatial Science Laboratory (AgriLife Research). Texas A&M University.
- Stonefelt, M. D.; T. A. Fontaine; R. H. Hotchkiss. 2000. Impacts of climate change on water yield in the Upper Wind Basin. Journal of the American Water Resources Association, 36, 321 – 336.
- Todini, E.; J. R. Wallis. 1997. Using CLS for daily or longer period rainfall-runoff modelling. Pages 149 – 168, Mathematical Models for Surface Water Hydrology, edited by T. A. Ciriani; U. Maione; J. R. Wallis. London: Wiley.
- U.S. Department of Agriculture, Soil Conservation Service. 1972. National Engineering Handbook. Hydrology Section 4. Chapters 4-10. Washington, D.C.: USDA.
- Van Vuuren, D.P. 2011. Representative Concentration Pathways: An overview. Climatic Change. Disponible en: http://www.climatechange2013.org/images/uploads/2_vvuuren13sed2.pdf [Con acceso 15-12-2016]

- Vergara, L. E. (2015). Manual de Uso del Hydraccess. Cálculo de la Precipitación Media sobre una Cuenca. Lima, Peru: Autoridad Nacional del Agua (ANA) - MINAGRI.
- Wilson, J. P.; Matisova, H.; Wright, D. J. 2000a. Water resource applications of geographic information systems. Journal of the Urban and Regional Information Systems Association, 12(2): 61-79.
- Yates, D., Angarita, H. 2014. Developing climate scenarios. Partnering for Adaptation and Resilience - Agua (PARA-AGUA) Project. University Corporation for Atmospheric Research, acting on behalf of The National Center for Atmospheric Research. AECOM International Development.

Cuadro 2. Precipitación promedio mensual (mm) de la estación Chulucanas.

| Año | Estación Chulucanas | | | | | | | | | | | |
|-------------|---------------------|--------|--------|--------|-------|-------|------|------|------|------|------|--------|
| | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Set | Oct | Nov | Dic |
| 1984 | 26.10 | 105.00 | 89.90 | 0.30 | 0.80 | 0.10 | 0.00 | 1.50 | 0.90 | 3.10 | 0.00 | 0.30 |
| 1985 | 7.20 | 42.90 | 59.70 | 0.00 | 3.90 | 0.00 | 0.00 | 0.20 | 0.00 | 0.40 | 0.00 | 2.40 |
| 1986 | 16.40 | 8.70 | 5.20 | 17.80 | 1.30 | 0.00 | 0.10 | 0.00 | 0.00 | 3.50 | 4.60 | 1.40 |
| 1987 | 50.90 | 130.50 | 239.42 | 101.80 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 3.20 | 0.00 | 0.80 | 0.00 | 0.00 |
| 1988 | 9.60 | 7.30 | 0.00 | 16.10 | 3.40 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 1989 | 40.10 | 225.60 | 148.90 | 20.66 | 0.50 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 2.10 | 0.00 | 0.00 |
| 1990 | 1.20 | 3.80 | 33.40 | 0.00 | 3.35 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.78 | 0.00 | 3.08 |
| 1991 | 0.68 | 2.14 | 3.12 | 2.93 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 1.96 | 3.15 |
| 1992 | 2.02 | 13.14 | 167.52 | 79.38 | 7.95 | 0.78 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 1993 | 1.08 | 113.33 | 169.85 | 9.15 | 2.08 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.88 | 6.11 |
| 1994 | 8.17 | 19.85 | 77.61 | 19.12 | 1.27 | 0.00 | 0.00 | 0.66 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 16.16 |
| 1995 | 11.94 | 57.81 | 2.84 | 3.79 | 0.00 | 0.00 | 1.31 | 0.00 | 2.69 | 0.73 | 0.93 | 6.97 |
| 1996 | 3.45 | 3.19 | 11.07 | 8.26 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 1.85 |
| 1997 | 0.67 | 28.93 | 64.60 | 66.70 | 0.00 | 1.60 | 0.00 | 0.00 | 1.80 | 1.00 | 6.60 | 172.19 |
| 1998 | 738.21 | 812.29 | 724.66 | 332.23 | 40.81 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 1.70 | 0.00 | 0.90 | 0.00 |
| 1999 | 15.00 | 281.10 | 44.00 | 63.80 | 11.00 | 0.90 | 0.00 | 0.00 | 0.20 | 5.20 | 0.00 | 10.00 |
| 2000 | 10.40 | 80.00 | 99.00 | 54.50 | 12.60 | 10.10 | 0.00 | 0.20 | 0.40 | 0.00 | 0.00 | 20.70 |
| 2001 | 42.80 | 134.10 | 438.60 | 48.60 | 0.40 | 0.10 | 0.60 | 0.00 | 0.10 | 0.30 | 1.70 | 9.20 |
| 2002 | 0.00 | 79.30 | 341.70 | 211.30 | 0.60 | 0.10 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 5.90 | 0.10 | 0.30 |
| 2003 | 29.30 | 63.50 | 17.80 | 4.50 | 0.20 | 1.00 | 0.00 | 0.00 | 0.80 | 0.00 | 0.00 | 3.40 |
| 2004 | 56.50 | 22.20 | 1.60 | 41.60 | 1.70 | 0.00 | 0.10 | 0.00 | 0.50 | 6.40 | 0.00 | 11.10 |
| 2005 | 1.50 | 1.70 | 94.90 | 0.90 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 1.10 | 0.10 | 3.90 |
| 2006 | 25.70 | 151.00 | 135.20 | 28.80 | 0.00 | 0.80 | 0.20 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 9.70 | 2.90 |
| 2007 | 27.30 | 3.20 | 40.30 | 0.90 | 0.60 | 0.50 | 0.10 | 0.00 | 0.00 | 6.80 | 1.80 | 0.70 |
| 2008 | 36.30 | 546.50 | 287.50 | 31.20 | 1.60 | 1.70 | 1.50 | 0.30 | 0.00 | 0.00 | 6.80 | 0.00 |
| Prom | 46.50 | 117.48 | 131.94 | 46.57 | 3.76 | 0.71 | 0.16 | 0.24 | 0.36 | 1.52 | 1.44 | 11.03 |
| Max | 738.21 | 812.29 | 724.66 | 332.23 | 40.81 | 10.10 | 1.50 | 3.20 | 2.69 | 6.80 | 9.70 | 172.19 |
| Min | 0.00 | 1.70 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |

Cuadro 3. Precipitación promedio mensual (mm) de la estación Huarmaca.

| Año | Estación Huarmaca | | | | | | | | | | | |
|------|-------------------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Set | Oct | Nov | Dic |
| 1984 | 105.60 | 457.30 | 232.00 | 121.90 | 51.30 | 16.70 | 13.40 | 1.70 | 27.50 | 66.60 | 30.00 | 45.10 |
| 1985 | 140.10 | 97.60 | 173.40 | 39.30 | 44.40 | 0.00 | 0.30 | 7.10 | 0.80 | 12.10 | 1.70 | 80.70 |
| 1986 | 122.30 | 179.50 | 92.60 | 242.40 | 13.00 | 0.00 | 0.00 | 14.30 | 7.00 | 9.60 | 42.30 | 88.90 |
| 1987 | 152.50 | 77.10 | 319.30 | 155.60 | 14.60 | 0.50 | 30.30 | 1.90 | 0.80 | 35.90 | 12.90 | 14.60 |
| 1988 | 170.80 | 186.40 | 25.30 | 85.10 | 41.10 | 1.60 | 3.30 | 0.00 | 6.40 | 7.70 | 66.00 | 62.40 |
| 1989 | 195.90 | 269.50 | 562.60 | 118.20 | 18.30 | 10.40 | 0.30 | 0.60 | 11.70 | 45.00 | 1.10 | 18.40 |

| | | | | | | | | | | | | |
|-------------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
| 1990 | 36.20 | 145.20 | 107.10 | 158.40 | 20.80 | 8.10 | 4.30 | 3.50 | 0.20 | 87.50 | 90.20 | 50.60 |
| 1991 | 25.40 | 125.80 | 277.10 | 66.90 | 30.20 | 13.30 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 20.20 | 10.60 | 96.00 |
| 1992 | 113.60 | 147.80 | 250.20 | 311.40 | 160.50 | 16.20 | 0.70 | 5.70 | 4.50 | 3.48 | 41.90 | 66.10 |
| 1993 | 83.30 | 316.50 | 449.60 | 234.80 | 56.60 | 0.00 | 1.32 | 0.00 | 8.20 | 20.30 | 24.54 | 103.70 |
| 1994 | 197.19 | 190.73 | 207.42 | 137.81 | 38.36 | 7.80 | 0.00 | 2.10 | 17.20 | 6.00 | 9.90 | 110.30 |
| 1995 | 131.40 | 248.80 | 211.80 | 90.30 | 25.60 | 0.90 | 10.10 | 2.70 | 4.90 | 7.80 | 15.70 | 105.20 |
| 1996 | 63.20 | 100.50 | 171.80 | 81.90 | 15.40 | 3.50 | 1.90 | 1.50 | 0.30 | 21.40 | 2.50 | 29.80 |
| 1997 | 58.40 | 99.20 | 172.70 | 135.40 | 7.00 | 9.00 | 5.40 | 0.90 | 37.90 | 18.80 | 88.60 | 378.40 |
| 1998 | 169.70 | 400.90 | 422.60 | 426.20 | 86.10 | 4.70 | 1.20 | 4.90 | 12.00 | 41.50 | 30.00 | 72.80 |
| 1999 | 144.70 | 552.50 | 274.10 | 160.20 | 108.80 | 21.40 | 5.00 | 1.60 | 20.67 | 20.50 | 11.61 | 107.77 |
| 2000 | 131.31 | 318.70 | 517.50 | 243.10 | 118.30 | 27.50 | 0.00 | 4.00 | 44.80 | 0.30 | 1.30 | 81.30 |
| 2001 | 224.70 | 338.20 | 251.92 | 125.10 | 27.60 | 5.20 | 1.70 | 5.00 | 13.90 | 10.00 | 64.50 | 54.10 |
| 2002 | 23.20 | 333.00 | 368.30 | 271.00 | 31.00 | 8.70 | 4.70 | 0.80 | 0.00 | 77.20 | 28.50 | 97.90 |
| 2003 | 136.00 | 196.60 | 128.10 | 77.90 | 24.10 | 31.60 | 1.20 | 0.50 | 2.60 | 3.30 | 20.80 | 57.60 |
| 2004 | 85.50 | 75.10 | 112.20 | 121.20 | 19.40 | 4.90 | 3.30 | 0.00 | 7.50 | 59.20 | 14.90 | 81.20 |
| 2005 | 39.20 | 232.50 | 450.10 | 68.40 | 12.10 | 1.40 | 0.00 | 0.00 | 6.60 | 24.60 | 12.70 | 98.20 |
| 2006 | 69.50 | 392.60 | 571.10 | 126.40 | 13.70 | 20.40 | 6.50 | 0.00 | 10.10 | 6.40 | 76.00 | 75.00 |
| 2007 | 102.20 | 105.90 | 237.90 | 121.70 | 33.80 | 8.90 | 4.30 | 0.40 | 5.00 | 55.10 | 75.60 | 16.40 |
| 2008 | 314.20 | 607.20 | 524.70 | 408.70 | 38.30 | 12.50 | 3.10 | 12.60 | 3.10 | 59.70 | 60.40 | 30.40 |
| Prom | 121.44 | 247.81 | 284.46 | 165.17 | 42.01 | 9.41 | 4.09 | 2.87 | 10.15 | 28.81 | 33.37 | 80.91 |
| Max | 314.20 | 607.20 | 571.10 | 426.20 | 160.50 | 31.60 | 30.30 | 14.30 | 44.80 | 87.50 | 90.20 | 378.40 |
| Min | 23.20 | 75.10 | 25.30 | 39.30 | 7.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.30 | 1.10 | 14.60 |

Cuadro 4. Precipitación promedio mensual (mm) de la estación Miraflores.

| Año | Estación Miraflores | | | | | | | | | | | |
|------|---------------------|--------|--------|--------|-------|------|------|------|------|------|------|--------|
| | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Set | Oct | Nov | Dic |
| 1984 | 0.40 | 29.70 | 8.00 | 0.30 | 2.80 | 0.00 | 1.10 | 0.00 | 0.00 | 0.80 | 0.00 | 0.10 |
| 1985 | 2.80 | 3.00 | 21.56 | 0.00 | 2.00 | 0.00 | 0.00 | 0.30 | 0.00 | 1.30 | 0.00 | 1.10 |
| 1986 | 1.50 | 7.10 | 0.45 | 7.00 | 0.80 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 8.40 | 0.00 |
| 1987 | 22.80 | 78.10 | 98.60 | 16.40 | 0.00 | 0.00 | 0.40 | 0.00 | 0.00 | 6.70 | 0.40 | 0.00 |
| 1988 | 7.20 | 0.30 | 0.00 | 5.90 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.20 | 0.90 |
| 1989 | 8.30 | 42.00 | 9.10 | 7.27 | 0.40 | 1.10 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.60 | 0.00 | 0.00 |
| 1990 | 0.00 | 0.50 | 3.70 | 0.00 | 1.90 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.40 | 0.00 | 2.70 |
| 1991 | 0.20 | 0.80 | 1.60 | 1.24 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 1.60 | 4.00 |
| 1992 | 2.90 | 11.00 | 187.10 | 128.30 | 12.50 | 0.40 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 1993 | 1.00 | 56.87 | 91.19 | 5.56 | 0.68 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.60 | 2.35 |
| 1994 | 4.11 | 9.82 | 40.09 | 8.86 | 0.23 | 0.00 | 0.00 | 0.16 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 12.26 |
| 1995 | 5.70 | 3.10 | 0.00 | 1.10 | 0.00 | 0.00 | 0.30 | 0.00 | 1.10 | 0.30 | 0.70 | 7.80 |
| 1996 | 1.80 | 0.00 | 0.00 | 0.40 | 0.00 | 0.60 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 1997 | 0.00 | 23.90 | 0.60 | 36.80 | 0.00 | 0.70 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.60 | 2.40 | 165.00 |
| 1998 | 768.70 | 500.00 | 485.80 | 95.10 | 5.60 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.20 | 2.00 | 0.10 | 0.20 |
| 1999 | 5.80 | 33.60 | 1.10 | 18.50 | 3.40 | 1.40 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.20 | 0.00 | 3.30 |
| 2000 | 2.20 | 10.50 | 6.20 | 24.50 | 2.70 | 0.80 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 19.90 |

| | | | | | | | | | | | | |
|-------------|--------|--------|--------|--------|-------|------|------|------|------|------|------|--------|
| 2001 | 11.30 | 5.90 | 162.30 | 18.60 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.70 | 0.00 | 7.30 |
| 2002 | 0.00 | 4.10 | 132.00 | 136.70 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 2.30 | 0.40 |
| 2003 | 4.10 | 22.40 | 4.50 | 0.00 | 0.00 | 1.30 | 0.00 | 0.00 | 0.50 | 0.00 | 6.20 | 2.10 |
| 2004 | 4.60 | 0.70 | 0.00 | 4.70 | 1.10 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.80 | 0.80 | 6.70 |
| 2005 | 2.20 | 0.70 | 17.70 | 0.60 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 2.50 | 0.00 | 0.00 |
| 2006 | 0.00 | 26.90 | 30.70 | 0.00 | 0.00 | 0.60 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.30 | 0.30 | 0.60 |
| 2007 | 6.50 | 0.00 | 3.70 | 3.50 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.60 | 0.00 |
| 2008 | 7.20 | 92.30 | 54.10 | 35.90 | 1.00 | 0.30 | 2.30 | 0.00 | 0.00 | 0.20 | 0.20 | 0.00 |
| Prom | 34.85 | 38.53 | 54.40 | 22.29 | 1.40 | 0.29 | 0.16 | 0.02 | 0.07 | 0.70 | 0.99 | 9.47 |
| Max | 768.70 | 500.00 | 485.80 | 136.70 | 12.50 | 1.40 | 2.30 | 0.30 | 1.10 | 6.70 | 8.40 | 165.00 |
| Min | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |

Cuadro 5. Precipitación promedio mensual (mm) de la estación Morropon.

| Año | Estación Morropon | | | | | | | | | | | |
|-------------|-------------------|--------|--------|--------|-------|------|------|------|------|------|-------|--------|
| | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Set | Oct | Nov | Dic |
| 1984 | 26.90 | 206.40 | 109.11 | 6.90 | 2.86 | 3.68 | 1.40 | 0.20 | 1.30 | 2.50 | 0.60 | 0.00 |
| 1985 | 0.00 | 28.40 | 88.40 | 0.10 | 8.70 | 0.00 | 0.00 | 1.90 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 2.50 |
| 1986 | 20.40 | 17.80 | 12.71 | 34.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 4.40 | 0.00 | 8.70 |
| 1987 | 70.50 | 86.90 | 396.70 | 121.80 | 1.00 | 0.00 | 0.80 | 0.70 | 0.00 | 3.40 | 0.00 | 0.00 |
| 1988 | 20.40 | 14.60 | 0.30 | 13.40 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 2.80 | 0.60 |
| 1989 | 108.20 | 155.00 | 121.03 | 32.73 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 1.70 | 0.40 | 4.75 |
| 1990 | 0.00 | 8.50 | 17.50 | 0.00 | 5.60 | 0.20 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 1991 | 0.00 | 17.00 | 45.60 | 7.80 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 1.00 | 0.00 | 8.80 |
| 1992 | 41.40 | 86.90 | 414.80 | 264.90 | 39.00 | 0.30 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 12.90 |
| 1993 | 7.00 | 156.10 | 293.10 | 55.00 | 4.80 | 0.31 | 0.00 | 0.00 | 2.21 | 1.28 | 5.70 | 7.10 |
| 1994 | 14.10 | 80.20 | 119.60 | 29.30 | 0.90 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 15.00 |
| 1995 | 90.50 | 66.30 | 11.20 | 41.50 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 1.10 | 8.20 |
| 1996 | 1.60 | 0.40 | 129.30 | 0.00 | 0.10 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.80 | 0.00 | 1.80 |
| 1997 | 2.70 | 66.40 | 89.00 | 33.30 | 0.10 | 1.70 | 0.00 | 1.10 | 2.10 | 3.80 | 3.50 | 220.31 |
| 1998 | 0.82 | 535.79 | 479.00 | 276.88 | 34.80 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 2.40 | 0.00 | 0.00 |
| 1999 | 10.00 | 340.30 | 133.40 | 97.50 | 18.20 | 1.00 | 0.00 | 0.00 | 2.60 | 1.00 | 0.00 | 8.50 |
| 2000 | 26.00 | 219.50 | 247.10 | 46.20 | 9.10 | 5.30 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 41.20 |
| 2001 | 77.60 | 115.60 | 433.10 | 83.10 | 1.40 | 0.40 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 4.10 | 1.70 |
| 2002 | 0.40 | 145.20 | 391.60 | 222.70 | 3.10 | 0.00 | 0.50 | 0.00 | 0.00 | 8.80 | 0.00 | 1.00 |
| 2003 | 33.90 | 79.50 | 18.30 | 4.30 | 0.00 | 1.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.40 | 4.50 |
| 2004 | 67.50 | 21.10 | 10.20 | 81.50 | 3.20 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 8.20 | 0.00 | 16.30 |
| 2005 | 2.00 | 14.30 | 125.90 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.70 | 0.00 | 0.80 |
| 2006 | 15.90 | 290.70 | 177.60 | 107.60 | 0.00 | 0.30 | 0.20 | 0.00 | 0.00 | 0.20 | 2.00 | 5.60 |
| 2007 | 39.20 | 9.00 | 123.20 | 4.40 | 0.00 | 0.30 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 5.40 | 7.30 | 0.00 |
| 2008 | 55.80 | 581.40 | 444.00 | 81.00 | 2.00 | 0.20 | 0.50 | 0.00 | 0.00 | 2.90 | 13.40 | 0.00 |
| Prom | 29.31 | 133.73 | 177.27 | 65.84 | 5.39 | 0.59 | 0.14 | 0.16 | 0.33 | 1.94 | 1.65 | 14.81 |
| Max | 108.20 | 581.40 | 479.00 | 276.88 | 39.00 | 5.30 | 1.40 | 1.90 | 2.60 | 8.80 | 13.40 | 220.31 |
| Min | 0.00 | 0.40 | 0.30 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |

Cuadro 6. Precipitación promedio mensual (mm) de la estación Tejedores.

| Año | Estación Tejedores | | | | | | | | | | | |
|-------------|--------------------|--------|--------|--------|-------|------|------|------|------|------|------|--------|
| | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Set | Oct | Nov | Dec |
| 1984 | 16.63 | 79.80 | 59.94 | 0.86 | 2.79 | 0.24 | 0.92 | 1.23 | 0.70 | 3.10 | 0.00 | 0.58 |
| 1985 | 6.69 | 28.09 | 47.87 | 0.00 | 4.00 | 0.00 | 0.00 | 0.63 | 0.00 | 1.25 | 0.00 | 3.20 |
| 1986 | 11.91 | 10.29 | 3.97 | 15.53 | 1.34 | 0.00 | 0.24 | 0.00 | 0.00 | 2.39 | 7.50 | 1.35 |
| 1987 | 43.74 | 118.80 | 192.45 | 70.44 | 0.00 | 0.00 | 0.56 | 2.04 | 0.00 | 4.24 | 0.56 | 0.00 |
| 1988 | 10.33 | 6.00 | 0.00 | 13.09 | 2.33 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.46 | 0.64 |
| 1989 | 29.70 | 156.76 | 94.46 | 16.80 | 0.85 | 0.74 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 1.88 | 0.00 | 0.00 |
| 1990 | 1.05 | 3.00 | 22.74 | 0.00 | 3.45 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.84 | 0.00 | 3.71 |
| 1991 | 0.68 | 2.19 | 3.34 | 3.05 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 2.31 | 4.23 |
| 1992 | 2.83 | 14.51 | 195.09 | 113.98 | 11.54 | 0.84 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 1993 | 1.32 | 98.51 | 148.73 | 10.12 | 2.09 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 1.00 | 5.65 |
| 1994 | 8.45 | 19.59 | 67.75 | 17.24 | 1.21 | 0.00 | 0.00 | 0.64 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 17.08 |
| 1995 | 10.39 | 36.64 | 1.83 | 3.12 | 0.00 | 0.00 | 1.27 | 0.00 | 2.66 | 0.76 | 1.08 | 8.57 |
| 1996 | 3.46 | 2.21 | 7.69 | 6.79 | 0.00 | 0.66 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 1.25 |
| 1997 | 0.57 | 29.92 | 38.77 | 59.19 | 0.00 | 1.82 | 0.00 | 0.00 | 1.23 | 1.42 | 6.13 | 188.13 |
| 1998 | 826.06 | 731.99 | 674.85 | 245.89 | 27.66 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 1.63 | 1.20 | 0.75 | 0.28 |
| 1999 | 13.11 | 184.58 | 28.11 | 48.87 | 9.74 | 1.77 | 0.00 | 0.00 | 0.29 | 3.48 | 0.00 | 9.10 |
| 2000 | 7.88 | 54.74 | 63.96 | 46.34 | 9.78 | 7.71 | 0.00 | 0.29 | 0.59 | 0.00 | 0.00 | 23.09 |
| 2001 | 32.44 | 83.33 | 342.78 | 39.90 | 0.77 | 0.24 | 0.53 | 0.00 | 0.24 | 0.89 | 1.52 | 10.15 |
| 2002 | 0.00 | 50.89 | 270.59 | 194.83 | 0.71 | 0.24 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 3.61 | 1.59 | 0.73 |
| 2003 | 20.03 | 50.51 | 13.54 | 3.69 | 0.29 | 1.96 | 0.00 | 0.00 | 0.90 | 0.00 | 3.34 | 3.94 |
| 2004 | 36.10 | 14.87 | 1.46 | 27.49 | 2.44 | 0.00 | 0.24 | 0.00 | 0.47 | 4.49 | 0.59 | 10.41 |
| 2005 | 2.35 | 2.59 | 66.91 | 1.36 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 2.81 | 0.24 | 2.62 |
| 2006 | 15.66 | 105.66 | 96.98 | 18.18 | 0.00 | 1.13 | 0.29 | 0.00 | 0.00 | 0.33 | 6.51 | 2.71 |
| 2007 | 20.44 | 2.40 | 27.64 | 3.02 | 0.53 | 0.47 | 0.24 | 0.00 | 0.00 | 4.67 | 1.89 | 0.76 |
| 2008 | 27.46 | 368.92 | 199.66 | 38.79 | 1.98 | 2.21 | 3.29 | 0.53 | 0.00 | 0.28 | 5.13 | 0.00 |
| Prom | 45.97 | 90.27 | 106.84 | 39.94 | 3.34 | 0.80 | 0.30 | 0.21 | 0.35 | 1.51 | 1.62 | 11.93 |
| Max | 826.06 | 731.99 | 674.85 | 245.89 | 27.66 | 7.71 | 3.29 | 2.04 | 2.66 | 4.67 | 7.50 | 188.13 |
| Min | 0.00 | 2.19 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |

Anexo 2: Datos de caudales observados (m³/s) en la estación hidrométrica Sánchez Cerro para el periodo de enero de 1984 a diciembre del 2008.

| Año | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Set | Oct | Nov | Dic | Prom |
|-------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|-------------|
| 1984 | 8.83 | 145.3 | 234.25 | 122.1 | 71.19 | 26.96 | 26.56 | 16.08 | 16.0 | 12.2 | 4.03 | 3.99 | 57.3 |
| 1985 | 26.56 | 26.71 | 51.6 | 22.58 | 16.09 | 10.72 | 11.88 | 4.89 | 2.99 | 3.3 | 3.24 | 2.83 | 15.3 |
| 1986 | 8.74 | 7.85 | 8.02 | 6.24 | 7.68 | 5.32 | 3.94 | 3.56 | 2.68 | 2.31 | 2.87 | 2.79 | 5.2 |
| 1987 | 4.76 | 44.56 | 207.81 | 86.58 | 83.07 | 27.72 | 5.55 | 2.53 | 1.42 | 0.91 | 1.56 | 2.67 | 39.1 |
| 1988 | 2.01 | 3.18 | 3.01 | 1.22 | 1.39 | 1.81 | 1.08 | 0.5 | 0.54 | 0.72 | 1.14 | 1.4 | 1.5 |
| 1989 | 1.09 | 106.5 | 227.13 | 109.3 | 14.32 | 8.35 | 3.8 | 2.82 | 1.95 | 7.19 | 6.0 | 0.83 | 40.8 |
| 1990 | 0.03 | 0.9 | 0.00 | 0.31 | 0.85 | 0.28 | 0.51 | 0.49 | 0.16 | 0.04 | 0.00 | 0.06 | 0.3 |
| 1991 | 0.00 | 0.24 | 2.76 | 0.67 | 0.49 | 0.88 | 0.00 | 0.28 | 0.07 | 1.48 | 0.64 | 0.14 | 0.6 |
| 1992 | 0.00 | 0.43 | 186.31 | 462.7 | 83.16 | 13.75 | 3.27 | 0.45 | 0.00 | 0.00 | 0.04 | 0.08 | 62.5 |
| 1993 | 0.00 | 17.31 | 243.58 | 158.7 | 26.81 | 27.13 | 9.54 | 1.06 | 0.24 | 0.34 | 1.2 | 1.03 | 40.6 |
| 1994 | 4.79 | 78.8 | 110.29 | 155.1 | 34.96 | 49.12 | 6.48 | 3.02 | 2.29 | 1.83 | 0.18 | 0.02 | 37.2 |
| 1995 | 0.00 | 11.93 | 8.03 | 5.71 | 1.5 | 0.82 | 0.13 | 0.00 | 0.45 | 0.02 | 0.14 | 0.00 | 2.4 |
| 1996 | 0.24 | 0.43 | 18.24 | 0.39 | 0.09 | 0.32 | 0.66 | 0.58 | 0.19 | 0.00 | 0.16 | 0.69 | 1.8 |
| 1997 | 0.07 | 0.02 | 0.27 | 1.27 | 0.43 | 1.1 | 2.07 | 0.01 | 0.14 | 0.00 | 0.00 | 107.7 | 9.4 |
| 1998 | 706.8 | 1225.9 | 1659.1 | 1207.2 | 322.3 | 106.6 | 38.0 | 32.7 | 3.09 | 1.42 | 2.02 | 0.1 | 442.1 |
| 1999 | 1.75 | 348.4 | 314.4 | 130.69 | 96.92 | 50.18 | 29.96 | 13.39 | 9.99 | 3.37 | 3.06 | 2.54 | 83.7 |
| 2000 | 0.01 | 46.6 | 345.36 | 180.63 | 85.79 | 51.81 | 36.16 | 18.31 | 1.87 | 1.13 | 0.00 | 7.02 | 64.6 |
| 2001 | 19.85 | 48.6 | 658.8 | 308.93 | 82.09 | 82.9 | 62.33 | 39.25 | 2.39 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 108.8 |
| 2002 | 0.00 | 40.2 | 365.98 | 547.4 | 63.55 | 41.79 | 39.59 | 15.94 | 0.83 | 0.85 | 3.28 | 7.0 | 93.9 |
| 2003 | 13.75 | 10.2 | 10.78 | 1.63 | 3.89 | 14.17 | 5.09 | 0.89 | 0.41 | 0.09 | 0.11 | 0.08 | 5.1 |
| 2004 | 3.08 | 0.39 | 0.00 | 0.07 | 0.00 | 0.00 | 0.24 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.3 |
| 2005 | 1.14 | 0.00 | 37.2 | 18.59 | 0.22 | 0.76 | 0.42 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 4.9 |
| 2006 | 0.00 | 96.1 | 306.4 | 205 | 28.0 | 4.5 | 3.5 | 1.7 | 0.4 | 0.2 | 0.2 | 0.8 | 53.9 |
| 2007 | 0.13 | 0.05 | 3.64 | 10.91 | 3.67 | 20.36 | 2.18 | 0.28 | 0.66 | 0.37 | 0.27 | 0.3 | 3.6 |
| 2008 | 1.22 | 303.3 | 442.4 | 416.66 | 101.1 | 59.92 | 45.79 | 7.4 | 3.33 | 3.07 | 2.39 | 6.61 | 116.1 |
| Prom | 33.45 | 103.9 | 224.3 | 174.6 | 45.3 | 24.8 | 13.1 | 6.31 | 1.4 | 1.1 | 1.10 | 6.17 | 52.9 |
| Max | 706.8 | 1225.9 | 1659.1 | 1207.2 | 322.3 | 106.6 | 62.3 | 39.3 | 9.9 | 7.19 | 6.0 | 107.7 | 442.1 |
| Min | 0 | 0 | 0 | 0.07 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.3 |

Anexo 3: Datos de caudales simulados (m3/s) en la estación hidrométrica Sánchez Cerro para el periodo futuro de enero de 2025 a diciembre del 2054.

Cuadro 7. Caudal promedio mensual (m3/s) según el escenario HadGEM2-ES RCP 4.5

| Año | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Set | Oct | Nov | Dic | Prom. |
|-------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|--------------|
| 2025 | 16.7 | 46.7 | 121.8 | 104.4 | 26.2 | 9.4 | 0.6 | 0.1 | 0.0 | 0.0 | 0.5 | 47.0 | 31.12 |
| 2026 | 67.8 | 31.1 | 228.6 | 154.2 | 5.1 | 4.5 | 5.8 | 2.3 | 0.0 | 5.8 | 4.9 | 22.6 | 44.39 |
| 2027 | 15.9 | 70.2 | 348.1 | 162.2 | 43.1 | 25.0 | 4.3 | 0.5 | 0.1 | 1.4 | 2.6 | 1.8 | 56.26 |
| 2028 | 36.1 | 111.1 | 239.0 | 231.4 | 60.5 | 16.9 | 2.0 | 0.4 | 0.0 | 8.5 | 13.0 | 9.1 | 60.68 |
| 2029 | 82.9 | 69.4 | 182.4 | 150.5 | 14.5 | 37.2 | 2.4 | 0.2 | 0.4 | 3.9 | 15.4 | 18.0 | 48.11 |
| 2030 | 35.3 | 83.3 | 130.3 | 48.8 | 3.0 | 1.9 | 0.1 | 0.1 | 1.2 | 0.0 | 2.7 | 3.6 | 25.85 |
| 2031 | 16.5 | 155.1 | 101.9 | 80.3 | 48.8 | 26.7 | 2.6 | 0.8 | 0.2 | 1.5 | 12.0 | 1.7 | 37.35 |
| 2032 | 33.7 | 159.9 | 191.3 | 103.1 | 58.0 | 16.4 | 3.2 | 0.9 | 0.3 | 0.0 | 8.4 | 3.3 | 48.21 |
| 2033 | 50.6 | 118.4 | 93.7 | 98.7 | 133.0 | 22.3 | 6.9 | 0.1 | 0.0 | 0.8 | 2.3 | 24.8 | 45.97 |
| 2034 | 36.2 | 33.6 | 113.1 | 44.1 | 4.7 | 4.7 | 0.3 | 0.0 | 0.3 | 11.3 | 54.9 | 101.4 | 33.71 |
| 2035 | 100.1 | 173.3 | 184.8 | 41.3 | 19.2 | 11.1 | 1.6 | 0.4 | 1.8 | 3.6 | 2.5 | 6.8 | 45.55 |
| 2036 | 17.3 | 40.9 | 116.8 | 121.0 | 88.2 | 46.4 | 10.4 | 1.3 | 3.9 | 13.1 | 0.7 | 25.5 | 40.45 |
| 2037 | 49.3 | 108.5 | 194.6 | 23.4 | 12.2 | 3.8 | 1.2 | 0.8 | 0.2 | 0.0 | 6.9 | 5.7 | 33.90 |
| 2038 | 35.0 | 136.0 | 155.4 | 86.9 | 57.8 | 16.7 | 1.9 | 2.5 | 0.6 | 1.7 | 2.0 | 16.3 | 42.74 |
| 2039 | 9.3 | 18.8 | 89.0 | 143.7 | 9.9 | 12.1 | 1.7 | 0.1 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.6 | 23.77 |
| 2040 | 48.9 | 69.7 | 307.8 | 97.0 | 19.9 | 24.6 | 4.7 | 2.7 | 1.0 | 0.3 | 34.2 | 32.9 | 53.64 |
| 2041 | 77.9 | 115.4 | 172.2 | 166.0 | 13.1 | 13.4 | 1.4 | 2.2 | 1.5 | 21.3 | 21.8 | 80.1 | 57.19 |
| 2042 | 42.5 | 220.7 | 188.6 | 182.7 | 83.0 | 21.9 | 3.1 | 1.2 | 0.6 | 36.8 | 18.0 | 61.2 | 71.70 |
| 2043 | 144.3 | 319.4 | 133.6 | 22.6 | 41.4 | 13.3 | 2.1 | 1.4 | 0.1 | 17.7 | 3.7 | 10.9 | 59.20 |
| 2044 | 41.1 | 137.4 | 319.3 | 303.1 | 35.5 | 21.9 | 4.9 | 1.3 | 0.0 | 20.4 | 1.9 | 4.5 | 74.29 |
| 2045 | 37.7 | 111.7 | 146.6 | 134.0 | 19.5 | 9.2 | 0.7 | 0.2 | 0.1 | 0.0 | 2.4 | 23.7 | 40.48 |
| 2046 | 65.1 | 59.2 | 192.6 | 221.5 | 35.5 | 5.5 | 8.9 | 0.6 | 0.1 | 0.8 | 0.5 | 46.5 | 53.07 |
| 2047 | 48.4 | 95.2 | 191.9 | 183.6 | 75.2 | 27.9 | 3.7 | 13.6 | 11.8 | 1.4 | 4.1 | 48.4 | 58.76 |
| 2048 | 22.3 | 41.2 | 235.5 | 166.3 | 47.6 | 5.8 | 1.1 | 1.2 | 0.0 | 3.1 | 8.6 | 11.9 | 45.39 |
| 2049 | 77.9 | 172.8 | 360.9 | 76.5 | 45.6 | 5.7 | 0.6 | 1.0 | 0.0 | 0.3 | 0.1 | 29.4 | 64.23 |
| 2050 | 69.8 | 37.5 | 137.5 | 83.7 | 15.9 | 7.4 | 3.7 | 1.4 | 0.0 | 14.4 | 0.8 | 13.8 | 32.16 |
| 2051 | 40.3 | 102.2 | 215.3 | 29.6 | 10.8 | 31.5 | 2.0 | 0.1 | 0.0 | 0.5 | 12.6 | 4.4 | 37.44 |
| 2052 | 43.7 | 117.7 | 134.6 | 46.0 | 29.7 | 10.5 | 14.4 | 1.1 | 0.7 | 4.5 | 5.5 | 25.9 | 36.19 |
| 2053 | 8.6 | 34.3 | 255.9 | 121.9 | 60.4 | 50.1 | 5.7 | 5.6 | 3.2 | 6.7 | 0.7 | 13.6 | 47.22 |
| 2054 | 24.8 | 163.8 | 338.9 | 180.4 | 21.6 | 4.3 | 1.3 | 0.4 | 0.7 | 1.9 | 6.4 | 22.4 | 63.90 |
| Prom | 46.53 | 105.2 | 194.06 | 120.3 | 37.97 | 16.93 | 3.44 | 1.49 | 0.96 | 6.06 | 8.34 | 23.93 | 47.10 |
| Max | 144.3 | 319.4 | 360.90 | 303.1 | 133.0 | 50.08 | 14.35 | 13.62 | 11.8 | 36.81 | 54.85 | 101.4 | 74.29 |
| Min | 8.56 | 18.83 | 88.99 | 22.64 | 3.04 | 1.88 | 0.11 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.62 | 23.77 |

Cuadro 8. Caudal promedio mensual (m3/s) según el escenario HadGEM2-ES RCP 8.5

| Año | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Set | Oct | Nov | Dic | Prom. |
|-------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|--------------|
| 2025 | 51.26 | 36.98 | 128.8 | 96.29 | 14.97 | 15.28 | 1.70 | 1.49 | 0.00 | 4.65 | 0.20 | 36.42 | 388.04 |
| 2026 | 39.02 | 223.2 | 472.8 | 288.8 | 25.95 | 10.31 | 3.66 | 0.95 | 0.14 | 0.38 | 5.30 | 17.88 | 1088.4 |
| 2027 | 131.6 | 29.1 | 248.0 | 111.8 | 5.78 | 5.67 | 1.59 | 0.15 | 0.00 | 0.12 | 1.15 | 7.05 | 542.01 |
| 2028 | 41.59 | 95.86 | 112.2 | 182.6 | 77.38 | 1.98 | 8.66 | 1.05 | 0.08 | 1.96 | 4.04 | 40.52 | 567.93 |
| 2029 | 200.0 | 211.1 | 147.1 | 115.1 | 30.32 | 33.17 | 2.53 | 0.53 | 0.07 | 0.14 | 0.07 | 5.02 | 745.14 |
| 2030 | 277.2 | 143.4 | 362.5 | 200.6 | 19.41 | 4.45 | 0.88 | 0.41 | 0.00 | 0.18 | 3.85 | 21.65 | 1034.6 |
| 2031 | 35.25 | 168.1 | 108.7 | 108.2 | 36.32 | 13.28 | 3.13 | 0.80 | 0.13 | 2.29 | 2.89 | 3.11 | 482.19 |
| 2032 | 19.43 | 149.1 | 144.4 | 123.9 | 52.93 | 6.80 | 2.97 | 0.91 | 0.03 | 3.02 | 0.53 | 25.39 | 529.41 |
| 2033 | 60.74 | 238.5 | 218.4 | 138.6 | 82.74 | 33.09 | 4.05 | 1.59 | 0.09 | 0.23 | 0.77 | 27.32 | 806.12 |
| 2034 | 41.43 | 105.2 | 127.0 | 57.49 | 23.09 | 5.19 | 1.34 | 0.01 | 0.00 | 0.25 | 0.00 | 8.91 | 369.91 |
| 2035 | 68.09 | 213.9 | 337.7 | 44.87 | 9.79 | 8.12 | 0.75 | 0.40 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 9.64 | 693.27 |
| 2036 | 58.39 | 132.9 | 179.8 | 165.0 | 44.81 | 15.25 | 5.04 | 0.33 | 0.10 | 2.17 | 1.45 | 21.10 | 626.35 |
| 2037 | 24.38 | 140.9 | 187.6 | 77.39 | 14.87 | 15.45 | 0.53 | 1.27 | 0.27 | 0.02 | 0.22 | 5.18 | 468.07 |
| 2038 | 15.14 | 77.39 | 199.5 | 190.5 | 77.89 | 30.30 | 6.05 | 3.76 | 0.00 | 10.49 | 7.03 | 15.66 | 633.72 |
| 2039 | 45.73 | 27.76 | 175.5 | 145.9 | 36.70 | 6.63 | 1.64 | 0.81 | 0.00 | 0.01 | 0.04 | 4.98 | 445.69 |
| 2040 | 35.84 | 110.7 | 434.1 | 204.7 | 43.67 | 23.14 | 4.94 | 2.37 | 0.22 | 0.33 | 7.09 | 27.14 | 894.25 |
| 2041 | 78.32 | 68.68 | 389.5 | 148.8 | 51.76 | 15.30 | 26.3 | 4.05 | 1.11 | 0.08 | 0.86 | 15.99 | 800.79 |
| 2042 | 35.69 | 167.7 | 69.2 | 48.44 | 34.29 | 9.81 | 2.70 | 0.06 | 0.00 | 0.11 | 0.50 | 21.84 | 390.34 |
| 2043 | 41.84 | 216.3 | 156.5 | 112.1 | 66.87 | 14.46 | 2.37 | 0.35 | 0.03 | 3.27 | 1.07 | 0.87 | 616.02 |
| 2044 | 81.28 | 162.5 | 444.5 | 195.7 | 28.49 | 7.62 | 2.06 | 0.85 | 0.01 | 16.9 | 4.93 | 17.91 | 962.76 |
| 2045 | 171.9 | 88.53 | 178.6 | 100.1 | 51.45 | 18.21 | 2.17 | 1.70 | 0.11 | 2.63 | 14.2 | 18.84 | 648.40 |
| 2046 | 108.7 | 85.26 | 262.7 | 141.9 | 40.16 | 23.97 | 3.67 | 5.35 | 0.64 | 0.15 | 1.62 | 7.37 | 681.47 |
| 2047 | 64.06 | 62.24 | 125.7 | 159.1 | 96.49 | 24.67 | 3.04 | 1.14 | 0.01 | 1.35 | 1.51 | 17.45 | 556.76 |
| 2048 | 172.1 | 142.6 | 319.7 | 104.0 | 133.2 | 34.39 | 5.99 | 15.94 | 0.19 | 0.24 | 6.45 | 8.29 | 943.09 |
| 2049 | 85.39 | 68.13 | 239.8 | 109.7 | 6.48 | 2.67 | 1.58 | 0.15 | 0.37 | 1.26 | 27.9 | 24.13 | 567.53 |
| 2050 | 39.78 | 74.41 | 216.6 | 128.8 | 54.03 | 23.05 | 18.2 | 5.10 | 0.39 | 0.00 | 12.4 | 24.80 | 597.56 |
| 2051 | 85.50 | 102.6 | 351.8 | 279.1 | 69.01 | 28.15 | 9.44 | 5.25 | 0.07 | 0.42 | 0.33 | 1.68 | 933.35 |
| 2052 | 22.8 | 94.70 | 318.3 | 99.2 | 88.73 | 18.35 | 1.58 | 1.11 | 0.21 | 3.28 | 7.29 | 16.83 | 672.39 |
| 2053 | 34.6 | 159.1 | 182.5 | 99.26 | 64.83 | 10.17 | 15.9 | 2.16 | 0.60 | 2.95 | 5.69 | 7.22 | 584.99 |
| 2054 | 27.43 | 34.27 | 157.4 | 226.7 | 20.38 | 17.92 | 13.6 | 6.91 | 0.13 | 1.60 | 3.82 | 34.92 | 545.08 |
| Prom | 73.15 | 121.0 | 233.2 | 140.2 | 46.76 | 15.89 | 5.27 | 2.23 | 0.17 | 2.02 | 4.10 | 16.50 | 660.52 |
| Max | 277.2 | 238.5 | 472.8 | 288.8 | 133.2 | 34.39 | 26.3 | 15.94 | 1.11 | 16.9 | 27.9 | 40.52 | 1088.4 |
| Min | 15.14 | 27.76 | 69.19 | 44.87 | 5.78 | 1.98 | 0.53 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.87 | 369.91 |

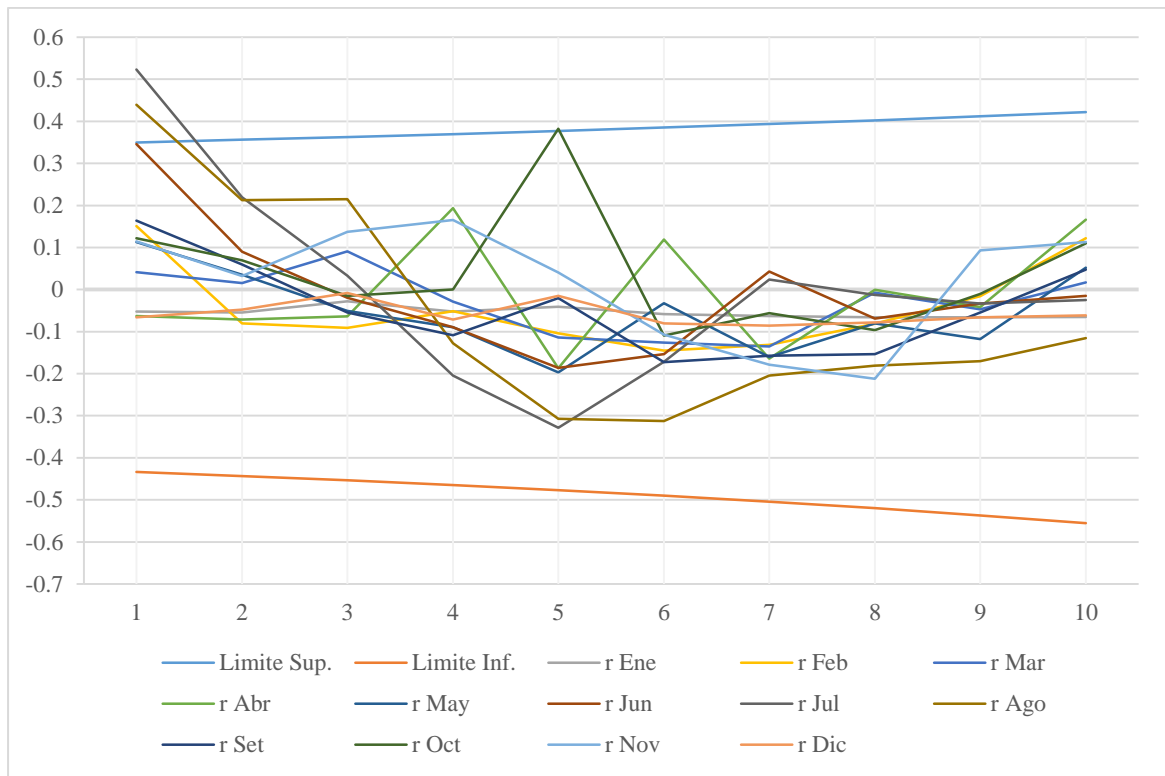
Cuadro 9. Caudal promedio mensual (m3/s) según el escenario CSIRO-Mk3-6-0 RCP 4.5

| Año | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Set | Oct | Nov | Dic | Prom. |
|-------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|--------------|
| 2025 | 2.95 | 10.2 | 33.1 | 69.25 | 19.64 | 1.54 | 0.24 | 1.23 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 1.77 | 139.9 |
| 2026 | 19.13 | 108.0 | 136.6 | 172.4 | 2.88 | 1.31 | 0.11 | 0.22 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.39 | 441.0 |
| 2027 | 21.91 | 72.6 | 416.2 | 50.50 | 14.69 | 3.03 | 0.78 | 1.44 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.02 | 581.2 |
| 2028 | 66.90 | 62.3 | 458.0 | 86.06 | 18.99 | 1.94 | 0.89 | 7.97 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 8.21 | 711.3 |
| 2029 | 90.14 | 60.5 | 233.5 | 164.6 | 18.50 | 3.63 | 0.81 | 0.07 | 0.01 | 0.79 | 0.12 | 6.34 | 579.0 |
| 2030 | 90.20 | 101.4 | 213.6 | 5.73 | 2.30 | 0.42 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 2.32 | 416.0 |
| 2031 | 10.68 | 43.4 | 101.4 | 72.66 | 12.02 | 3.69 | 0.19 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.11 | 244.1 |
| 2032 | 32.84 | 90.5 | 148.5 | 86.27 | 54.01 | 1.49 | 1.25 | 2.67 | 0.01 | 0.11 | 0.00 | 4.14 | 421.8 |
| 2033 | 16.92 | 78.7 | 189.5 | 78.59 | 69.99 | 2.64 | 1.19 | 7.30 | 0.04 | 0.00 | 0.00 | 0.66 | 445.6 |
| 2034 | 21.44 | 84.2 | 119.5 | 42.62 | 11.80 | 1.49 | 0.69 | 0.64 | 1.33 | 0.00 | 0.00 | 0.76 | 284.5 |
| 2035 | 27.42 | 214.8 | 239.1 | 5.32 | 4.83 | 3.40 | 0.06 | 1.06 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.17 | 496.2 |
| 2036 | 41.01 | 71.2 | 239.7 | 116.2 | 27.00 | 13.3 | 1.65 | 0.34 | 0.00 | 0.46 | 0.00 | 20.41 | 531.3 |
| 2037 | 68.55 | 72.6 | 114.1 | 36.16 | 3.31 | 0.35 | 0.00 | 0.04 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 295.1 |
| 2038 | 57.73 | 134.9 | 122.3 | 194.9 | 9.33 | 1.90 | 0.29 | 2.97 | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 7.11 | 531.4 |
| 2039 | 30.80 | 2.8 | 242.8 | 129.7 | 3.88 | 0.84 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 19.02 | 429.8 |
| 2040 | 50.70 | 96.1 | 273.9 | 97.71 | 13.48 | 2.56 | 0.55 | 5.04 | 0.14 | 0.00 | 0.10 | 5.86 | 546.1 |
| 2041 | 96.35 | 118.2 | 261.3 | 125.3 | 24.83 | 3.42 | 0.56 | 3.70 | 1.85 | 0.00 | 0.00 | 9.35 | 644.9 |
| 2042 | 51.01 | 214.9 | 155.3 | 55.93 | 10.85 | 4.62 | 0.43 | 0.03 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 6.05 | 499.1 |
| 2043 | 42.98 | 93.7 | 188.1 | 57.37 | 24.92 | 1.89 | 0.22 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 409.2 |
| 2044 | 27.27 | 252.4 | 402.0 | 203.5 | 9.55 | 2.27 | 1.62 | 0.54 | 0.01 | 0.01 | 0.03 | 4.11 | 903.3 |
| 2045 | 76.66 | 61.5 | 211.1 | 93.80 | 13.28 | 3.62 | 0.53 | 0.08 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 11.62 | 472.2 |
| 2046 | 11.31 | 50.5 | 149.7 | 97.38 | 24.60 | 2.43 | 0.72 | 0.28 | 0.06 | 0.00 | 0.00 | 2.03 | 339.0 |
| 2047 | 59.10 | 139.7 | 141.9 | 115.4 | 7.70 | 1.98 | 0.28 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 1.00 | 467.1 |
| 2048 | 46.06 | 55.8 | 133.7 | 112.2 | 0.46 | 0.62 | 0.04 | 0.02 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 20.14 | 369.0 |
| 2049 | 68.96 | 303.0 | 348.4 | 140.1 | 55.18 | 5.81 | 2.32 | 1.04 | 0.20 | 0.00 | 0.00 | 14.82 | 939.8 |
| 2050 | 81.27 | 293.2 | 510.8 | 317.6 | 38.13 | 24.7 | 3.11 | 2.45 | 0.09 | 0.01 | 0.00 | 5.86 | 1277.2 |
| 2051 | 77.54 | 66.0 | 184.3 | 135.9 | 50.79 | 1.88 | 0.75 | 0.23 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 9.18 | 526.5 |
| 2052 | 20.81 | 170.5 | 220.8 | 101.4 | 6.73 | 2.41 | 0.16 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 14.43 | 537.2 |
| 2053 | 71.18 | 219.9 | 199.4 | 184.1 | 8.05 | 12.1 | 1.13 | 0.27 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 9.33 | 705.4 |
| 2054 | 33.01 | 143.3 | 253.1 | 72.07 | 8.28 | 2.54 | 0.62 | 0.02 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 18.50 | 531.4 |
| Prom | 47.09 | 116.2 | 221.4 | 107.4 | 19.00 | 3.79 | 0.71 | 1.32 | 0.13 | 0.05 | 0.01 | 6.79 | 523.9 |
| Max | 96.35 | 303.0 | 510.8 | 317.6 | 69.99 | 24.7 | 3.11 | 7.97 | 1.85 | 0.79 | 0.12 | 20.41 | 1277.2 |
| Min | 2.95 | 2.78 | 33.07 | 5.32 | 0.46 | 0.35 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 139.9 |

Cuadro 10. Caudal promedio mensual (m³/s) según el escenario CSIRO-Mk3-6-0 RCP
8.5

| Año | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Set | Oct | Nov | Dic | Prom. |
|-------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|--------------|
| 2025 | 38.96 | 95.87 | 313.9 | 158.4 | 55.27 | 5.04 | 2.36 | 1.72 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 4.99 | 676.5 |
| 2026 | 56.79 | 71.94 | 200.6 | 98.17 | 20.18 | 3.06 | 0.21 | 0.24 | 0.03 | 0.00 | 0.27 | 12.80 | 464.3 |
| 2027 | 40.86 | 28.91 | 301.5 | 176.0 | 3.86 | 3.55 | 0.05 | 3.52 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 1.18 | 559.4 |
| 2028 | 3.98 | 23.11 | 110.5 | 21.62 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 11.65 | 170.9 |
| 2029 | 45.29 | 192.2 | 477.4 | 139.0 | 20.25 | 1.59 | 0.16 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.99 | 1.75 | 878.6 |
| 2030 | 4.48 | 61.82 | 316.2 | 129.9 | 10.98 | 1.71 | 0.33 | 0.05 | 0.00 | 0.29 | 0.02 | 6.84 | 532.6 |
| 2031 | 48.16 | 211.6 | 162.1 | 30.28 | 14.52 | 0.57 | 0.03 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 77.84 | 545.1 |
| 2032 | 160.5 | 126.2 | 304.8 | 63.68 | 2.51 | 1.70 | 0.13 | 2.00 | 0.00 | 0.17 | 0.00 | 2.50 | 664.2 |
| 2033 | 34.58 | 192.4 | 414.0 | 93.25 | 147.3 | 2.70 | 1.31 | 0.04 | 0.00 | 0.12 | 0.00 | 0.00 | 885.7 |
| 2034 | 8.91 | 46.59 | 137.6 | 117.8 | 0.49 | 0.61 | 0.45 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 5.27 | 317.7 |
| 2035 | 9.04 | 70.93 | 211.4 | 34.4 | 0.42 | 2.17 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.07 | 328.4 |
| 2036 | 86.62 | 135.3 | 147.4 | 83.84 | 33.37 | 2.40 | 0.99 | 0.02 | 0.00 | 0.00 | 0.12 | 10.09 | 500.1 |
| 2037 | 106.2 | 117.7 | 180.8 | 108.5 | 10.67 | 2.18 | 0.37 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 4.45 | 530.9 |
| 2038 | 77.70 | 41.54 | 98.0 | 163.9 | 6.70 | 4.14 | 0.90 | 0.01 | 0.00 | 1.47 | 0.00 | 3.33 | 397.7 |
| 2039 | 49.52 | 183.50 | 204.2 | 74.45 | 7.65 | 1.51 | 0.06 | 0.04 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 2.05 | 523.0 |
| 2040 | 39.05 | 52.64 | 271.8 | 123.1 | 1.57 | 3.30 | 0.24 | 0.05 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 5.38 | 497.1 |
| 2041 | 77.18 | 17.52 | 254.5 | 87.03 | 18.15 | 2.08 | 0.17 | 0.18 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 5.73 | 462.5 |
| 2042 | 30.30 | 36.79 | 210.2 | 71.02 | 6.64 | 1.09 | 2.56 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.65 | 359.3 |
| 2043 | 81.67 | 131.9 | 243.2 | 97.96 | 11.51 | 3.38 | 0.46 | 0.04 | 0.00 | 0.06 | 0.00 | 18.71 | 588.9 |
| 2044 | 13.45 | 179.0 | 237.6 | 116.4 | 38.72 | 6.43 | 2.51 | 2.72 | 0.25 | 0.00 | 0.00 | 3.93 | 601.0 |
| 2045 | 34.99 | 55.53 | 341.0 | 112.4 | 11.56 | 2.90 | 0.62 | 0.06 | 0.00 | 0.04 | 0.07 | 0.52 | 559.7 |
| 2046 | 76.73 | 4.73 | 129.3 | 32.01 | 2.11 | 0.36 | 0.06 | 0.06 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 1.05 | 246.4 |
| 2047 | 90.60 | 232.5 | 366.3 | 199.8 | 15.50 | 2.32 | 0.51 | 0.04 | 0.09 | 0.00 | 0.00 | 5.27 | 912.9 |
| 2048 | 55.34 | 115.6 | 97.78 | 97.13 | 10.49 | 1.58 | 0.13 | 1.30 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 2.86 | 382.2 |
| 2049 | 78.67 | 181.9 | 304.5 | 78.46 | 40.28 | 7.57 | 1.99 | 0.39 | 0.07 | 0.00 | 0.00 | 27.06 | 720.9 |
| 2050 | 89.06 | 200.8 | 388.7 | 73.31 | 6.35 | 8.61 | 1.22 | 1.34 | 0.00 | 0.02 | 0.00 | 0.19 | 769.6 |
| 2051 | 31.63 | 87.31 | 260.6 | 172.6 | 30.29 | 1.43 | 1.57 | 0.30 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 15.55 | 601.3 |
| 2052 | 77.10 | 182.2 | 318.0 | 166.7 | 27.35 | 1.46 | 0.28 | 0.06 | 0.03 | 0.00 | 0.00 | 36.39 | 809.6 |
| 2053 | 93.91 | 134.7 | 415.3 | 107.4 | 14.56 | 8.27 | 1.20 | 0.06 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 7.97 | 783.4 |
| 2054 | 99.04 | 119.8 | 205.9 | 180.1 | 9.97 | 2.57 | 0.99 | 0.03 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 8.81 | 627.2 |
| Prom | 58.01 | 111.1 | 254.2 | 106.9 | 19.31 | 2.88 | 0.73 | 0.48 | 0.02 | 0.07 | 0.05 | 9.50 | 563.24 |
| Max | 160.5 | 232.5 | 477.4 | 199.8 | 147.3 | 8.61 | 2.56 | 3.52 | 0.25 | 1.47 | 0.99 | 77.84 | 912.94 |
| Min | 3.98 | 4.73 | 97.78 | 21.62 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 170.86 |

Anexo 4: Prueba de Independencia para los valores mensuales de caudal observado en el escenario base.



**Menos del 10% de los valores sobrepasan los límites de confianza, se considera que la muestra analizada es independiente y sigue las leyes de la probabilidad.*

