



Título del Trabajo Fin de Máster:

***EVALUACIÓN DEL EFECTO DEL
CAMBIO CLIMÁTICO BAJO
ESCENARIOS DE EMISIONES SRES Y
RCP EN LA DEMARCACIÓN
HIDROGRÁFICA DE MANABÍ -
ECUADOR***

Intensificación:

ORDENACIÓN, RESTAURACIÓN Y GESTIÓN DE CUENCAS

Autor:

RIVADENEIRA VERA, JONNY FERNANDO

Director/es:

DR. MIGUEL ÁNGEL PÉREZ MARTÍN

Fecha: JULIO, 2014

Título del Trabajo Fin de Máster:

Evaluación del efecto del cambio climático bajo escenarios de emisiones SRES y RCP en la Demarcación Hidrográfica de Manabí - Ecuador.

Autor: **RIVADENEIRA VERA, JONNY FERNANDO**

Tipo	A <input type="checkbox"/> B <input checked="" type="checkbox"/>	Lugar de Realización	VALENCIA
Director	MIGUEL ÁNGEL PÉREZ MARTÍN	Fecha de Lectura	JULIO, 2014
Codirector1			
Codirector2			
Tutor			

Resumen:

El calentamiento en el sistema climático ha incrementado en los últimos decenios y se prevé se intensifique con el transcurso de los años. Los efectos del cambio climático varían de una región a otra; ocasionando drásticas consecuencias sociales, económicas y ambientales.

En la presente investigación se evaluó el efecto del cambio climático en la Demarcación Hidrográfica de Manabí - Ecuador, utilizando resultados de escenarios de cambio climático de los modelos CCMS3 y ECHAM5 del AR4 (Special Report on Emissions Scenarios) y CCSM4 y ECHAM6 del AR5 (Representative Concentration Pathways) para el periodo 2010 - 2039 (corto plazo) 2040 - 2069 (mediano plazo) y 2070- 2099 (largo plazo).

Mediante la aplicación del Modelo Hidrológico Agregado de Témez y el Modelo Distribuido PATRICAL, se simularon los periodos históricos de aportaciones hidrológicas en la subcuenca del río Carrizal en la cuenca río Chone y en la subcuenca cabecera del río Portoviejo y del río Chico en la cuenca del río Portoviejo.

Posterior a ello se analizó el cambio en dichas aportaciones bajo el contexto de cambio climático, utilizando las anomalías de precipitación y temperatura establecidas por los modelos. Obteniendo como resultado que las mismas disminuían bajo los escenarios de los modelos CCSM3 y CCSM4 y aumentaban en los escenarios de los modelos ECHAM5 Y ECHAM6.

También se identificó el efecto del cambio climático en el ciclo hidrológico mediante el análisis de sus variables, concluyendo que si la temperatura aumenta, también lo hace la evapotranspiración potencial; y si las precipitaciones disminuyen, la evaporación real también disminuirá; traduciéndose esto en un aumento de las necesidades hídricas de los cultivos. El incremento de las necesidades hídricas obliga a aumentar las demandas agrícolas actuales, conforme al porcentaje de incremento de las necesidades. Por ello se simuló la gestión de uno de los embalses de la demarcación (embalse La Esperanza), para conocer el comportamiento de este con las demandas actuales y futuras y consecuentemente plantear acciones de gestión con medidas de adaptación al cambio climático.

ABSTRACT

The heating in the climate system has increased in recent decades and it is expected to intensify over the years. The effects of climate change vary from region to region; causing drastic social, economic and environmental consequences.

In the present investigation the effect of climate change was assessed in the River Basin of Manabí -

Ecuador, using results of climate change scenarios models CCMS3 and ECHAM5 of AR4 (Special Report on Emissions Scenarios) and CCSM4 and ECHAM6 of AR5 (Representative Concentration Pathways) for the period 2010 – 2039 (short term) from 2040 to 2069 (medium term) and 2070-2099 (long term).

By applying Hydrological Model Adding Témez and Distributed Model PATRICAL, historical periods of hydrological inputs were simulated in the river basin of the river Carrizal basin and Chone River sub basin, Portoviejo header and the Chico River Basin, Portoviejo River.

Following this change was analyzed in these contributions under the context of climate change, using anomalies of precipitation and temperature established by the models. Resulting a decreased under the same scenarios models CCSM3 and CCSM4 and increased in the scenarios of the models ECHAM5 and ECHAM6.

The effect of the climate changes on the hydrological cycle is also identified by the analysis of it's variables, concluding that if the temperature increases, so does the potential evapotranspiration; and if rainfall decreases the actual evaporation will also decrease; translating into an increase of the water needs of crops. The increase in water requirements is necessary to increase current agricultural demands, according to the percentage increase of needs. Therefore the management of one of the reservoirs of the district was simulated (reservoir La Esperanza), for this behavior with current and future demands and therefore management actions plated with measures to adapt to climate change.

Resun

L'escalfament en el sistema climàtic ha incrementat en els últims decennis i es preveu s'intensifiqui amb el transcurs dels anys. Els efectes del canvi climàtic varien d'una regió a una altra; ocasionant dràstiques conseqüències socials, econòmiques i ambientals.

En la present investigació es va avaluar l'efecte del canvi climàtic en la Demarcació Hidrogràfica de Manabí - Ecuador, utilitzant resultats d'escenaris de canvi climàtic dels models CCMS3 i ECHAM5 del AR4 (Special Report on Emissions Scenarios) i CCSM4 i ECHAM6 del AR5 (Representative Concentration Pathways) per al període 2010 - 2039 (curt termini) 2040-2069 (mitjà termini) i 2070-2099 (llarg termini).

Mitjançant l'aplicació del Model hidrològic Agregat de Témez i el Model Distribuït PATRICAL, es van simular els períodes històrics d'aportacions hidrològiques a la subconca del riu Carrizal a la conca riu Chone i en la subconca capçalera del riu Portoviejo i del riu Chico a la conca del riu Portoviejo.

Posterior a això s'analitza el canvi en aquestes aportacions sota el context de canvi climàtic, utilitzant les anomalies de precipitació i temperatura establertes pels models. Obtenint com a resultat que les mateixes disminueixen sota els escenaris dels models CCSM3 i CCSM4 i augmentaven en els escenaris dels models ECHAM5 i ECHAM6.

També es va identificar l'efecte del canvi climàtic en el cicle hidrològic mitjançant l'anàlisi de les seves variables, conclouent que si la temperatura augmenta, també ho fa l'evapotranspiració potencial; i si les precipitacions disminueixen, l'evaporació real també disminuirà; traduint això en un augment de les necessitats hídriques dels cultius. L'increment de les necessitats hídriques obliga a augmentar les demandes agrícoles actuals, d'acord amb el percentatge d'increment de les necessitats. Per això es va simular la gestió d'un dels embassaments de la demarcació (embassament L'Esperança), per conèixer el comportament d'aquest amb les demandes actuals i futures i conseqüentment plantejar accions de gestió amb mesures d'adaptació al canvi climàtic.

Palabras clave:

CAMBIO CLIMÁTICO / SRES / RCP / MODELOS HIDROLÓGICOS

AGRADECIMIENTO

Me gustaría agradecer sinceramente y desde el fondo de mi corazón:

A **DIOS** por haberme guiado por el camino del bien en mi vida, por darme las fuerzas necesarias para alcanzar mis metas, por ser mi regocijo en aquellos malos momentos que eh tenido; a él mil gracias;

A mis **PADRES**, por su amor y su apoyo incondicional en cada paso de mi vida. Sus orientaciones y motivación han sido fundamentales para el éxito de mi vida profesional.

A mi **TUTOR** de Trabajo de Fin de Máster Dr. Miguel Ángel Pérez Martín, un agradecimiento especial ya que sin su ayuda y su interés, esta investigación difícilmente habría llegado a concluirse en los plazos y forma que hoy tiene.

A la **SENESCYT**, por el apoyo y financiamiento brindado para la realización de mis estudios.

Jonny Fernando Rivadeneira Vera

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	1
2. ÁMBITO DE ESTUDIO	3
3. ESTADO DEL ARTE	4
3.1. Escenarios de Emisiones de Cambio Climático	6
3.2. Modelos climáticos globales	9
3.3. Cambio climático global y regional	11
3.3.1. Efecto del cambio climático en el ciclo hidrológico	12
3.4. Estudios del efecto del cambio climático en los recursos hídricos	15
3.5. Modelos hidrológicos en estudios del efecto del cambio climático en los recursos hídricos	16
3.5.1. Modelo Hidrológico Agregado Témez	17
3.5.2. Modelo Distribuido PATRICAL	18
3.6. Cambio Climático en Ecuador	19
4. METODOLOGÍA	23
4.1. Etapa 1: Análisis de los escenarios de cambio climático	24
4.2. Etapa 2: Resultados hidrológicos para el periodo histórico	25
4.3. Etapa 3: Evaluación del efecto del cambio climático en el ciclo hidrológico	27
4.4. Etapa 4: Gestión de los embalses como medida de adaptación	27
5. APLICACIÓN Y RESULTADOS	28
5.1. Análisis de los escenarios de cambio climático	28
5.2. Resultados hidrológicos para el periodo histórico	39
5.2.1. Análisis de datos históricos	39
5.2.2. Modelo hidrológico Agregado de Témez	43
5.2.3. Modelo Hidrológico Distribuido PATRICAL	50
5.3. Evaluación del efecto del cambio climático en el ciclo hidrológico	51
5.4. Gestión de los embalses como medida de adaptación	63
5.4.1. Simulación del comportamiento del embalse	63
5.4.2. Simulación del comportamiento del embalse futuro	65
6. CONCLUSIONES	69
7. LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN	71
8. REFERENCIAS	72

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

El Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC), afirma que el calentamiento en el sistema climático es inequívoco, debido a los cambios en los últimos decenios. El cambio climático global, predice un mundo más cálido, con cambios en la precipitación y aumento de la frecuencia de fenómenos meteorológicos extremos. Esto se traduce en graves consecuencias sociales, ambientales y económicas, con mayores repercusiones en los países en vías de desarrollo.

En América Latina, se anticipa que hasta mediados del siglo XXI los bosques tropicales de la Amazonía serían gradualmente reemplazados por sabanas y la vegetación semiárida, por vegetación de tierras áridas. Además se podrían experimentar pérdidas de diversidad biológica, con extinciones de especies, y disminuciones de la productividad agrícola y pecuaria con consecuencias adversas para la seguridad alimentaria, aumentando el número de personas amenazadas por el hambre. En lo referente al agua, cambios en las pautas de precipitación y la desaparición de los glaciares afectarían notablemente la disponibilidad del recurso para el consumo humano, agrícola e hidroeléctrico (*IPCC 2007*).

Se espera que el calentamiento climático intensifique y acelere el ciclo hidrológico a nivel mundial. Las tendencias de sus variables y estudios de balances hídricos afirman este hecho. (*Huntington 2010*). Estas alteraciones generan incertidumbre en la gestión de los recursos hídricos, situación *que* plantea un desafío para los gestores del agua. (*García-Ruiz, López-Moreno et al. 2011*).

La presente investigación se realizó en la Demarcación Hidrográfica de Manabí - Ecuador, bajo un escenario limitado al no contar con la información necesaria para su ejecución debido a la carencia de esta. Así, gran parte de los datos utilizados fueron previamente generados. Además, fue preciso someter a una crítica homogenización la información disponible, debido a la discontinuidad y fiabilidad de los registros.

El objetivo general de la presente investigación es evaluar del efecto del cambio climático bajo escenarios de emisiones SRES y RCP en la Demarcación Hidrográfica de Manabí - Ecuador. Para ello se cumplieron con los objetivos específicos detallados a continuación:

- Analizar las anomalías de precipitación y temperatura obtenidas de los modelos climáticos globales CCSM (National Center for Atmospheric Research) y ECHAM (Max Planck Institute for Meteorology) del cuarto (AR4) y quinto (AR5) informe del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC), para los periodos

2010 - 2039 (corto plazo), 2040 - 2069 (mediano plazo) y 2070 - 2099 (largo plazo).

- Simular las aportaciones históricas de la demarcación mediante la aplicación del Modelo Hidrológico Agregado de Témez y el Modelo Distribuido PATRICAL para representar el comportamiento hidrológico de las cuencas y determinar a su vez el balance hídrico, además realizar la simulación de las aportaciones futuras con la inclusión de las anomalías de precipitación y temperatura resultantes del objetivo específico anterior.
- Contrastar el periodo histórico simulado con el periodo futuro simulado para definir la variación hidrológica en la demarcación bajo un escenario de cambio climático, identificando los cambios que se producen en cada variable del ciclo hidrológico haciendo énfasis en las necesidades hídricas que podrían sufrir los cultivos.
- Aplicar un modelo de gestión de embalses para simular su comportamiento histórico y establecer si las demandas futuras bajo un contexto de cambio climático cumplirían los criterios de garantía, en caso de no cumplimentar las demandas proponer medidas de gestión.

2. ÁMBITO DE ESTUDIO

La presente investigación se desarrolló en la Demarcación Hidrográfica de Manabí en Ecuador, la misma limita al norte con la Demarcación Hidrográfica de Esmeraldas, al sur y al este con la Demarcación Hidrográfica de Guayas y al oeste con el océano pacífico.



Figura 1: Ubicación de la Demarcación Hidrográfica de Manabí.

Fuente: Elaboración propia.

La demarcación está conformada por 17 cuencas hidrográficas, 2 de las cuales son objeto de esta investigación: Cuenca del río Chone y Cuenca del río Portoviejo.

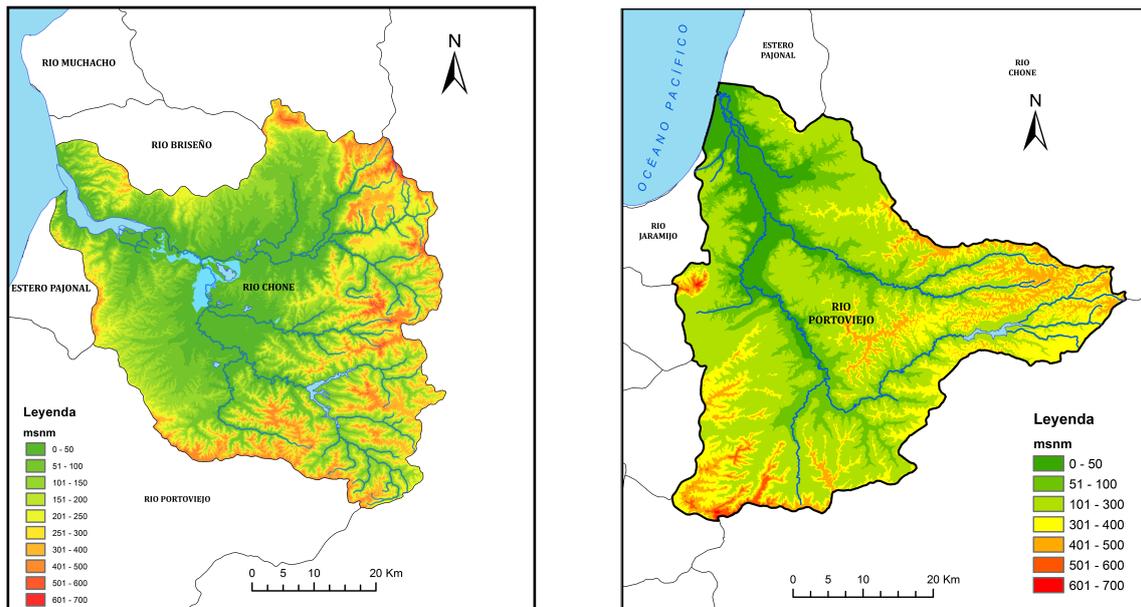


Figura 2: Cuenca del río chone y cuenca del río Portoviejo.

Fuente: Elaboración propia.

3. ESTADO DEL ARTE

Para el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (*Intergovernmental Panel on Climate Change*, IPCC) el término “cambio climático” denota un cambio en el estado del clima identificable (por ejemplo, mediante análisis estadísticos) a raíz de un cambio en el valor medio y/o en la variabilidad de sus propiedades, y que persiste durante un periodo prolongado, generalmente cifrado en decenios o en periodos más largos. Denota todo cambio del clima a lo largo del tiempo, tanto si es debido a la variabilidad natural como si es consecuencia de la actividad humana.

Este significado difiere del utilizado por la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) en su Artículo 1, que describe el “cambio climático” como un cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables.

El calentamiento en el sistema climático es inequívoco, desde la década de 1950, muchos de los cambios observados no han tenido precedentes en los últimos decenios a milenios. La atmósfera y el océano se han calentado, los volúmenes de nieve e hielo han disminuido, el nivel del mar se ha elevado y las concentraciones de gases de efecto invernadero han aumentado (*IPCC 2013*).

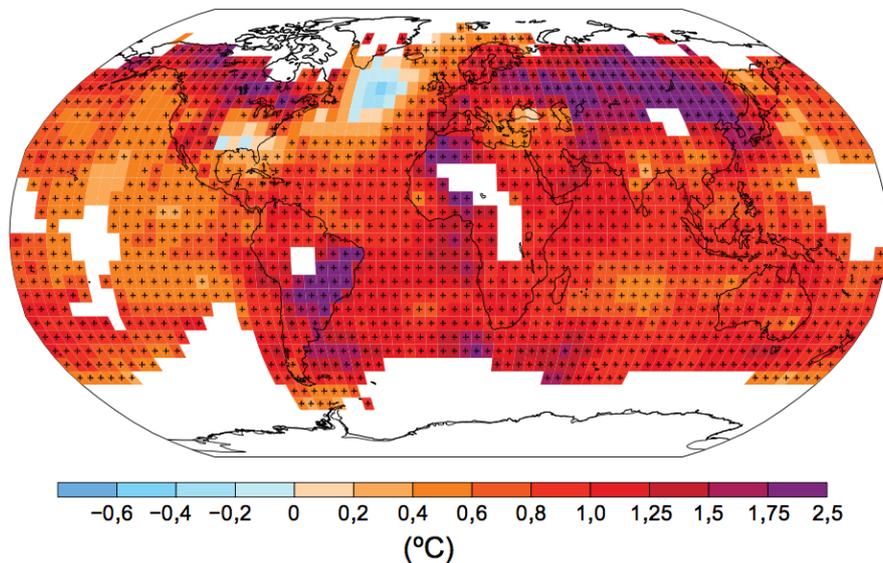


Figura 3: Cambio observado en la temperatura en superficie global.

Mapa de los cambios observados en la temperatura en superficie entre 1901 y 2012, derivado de las tendencias en la temperatura determinadas por regresión lineal de un conjunto de datos (Tomado de IPCC, 2013)

El equilibrio energético del sistema climático se ve alterado por la variación de las concentraciones de gases de efecto invernadero (GEI) y aerosoles en la atmósfera, y las variaciones de la cubierta terrestre y la radiación solar (IPCC 2007). El Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático, concluyó que hay consenso en que el aumento de los GEI se traducirá en un aumento del nivel del mar e incremento de la frecuencia de eventos climáticos extremos, tales como; tormentas intensas, lluvias fuertes y sequías. Lo que resulta en un incremento de frecuencia de amenazas relacionadas con el clima, que traen como consecuencia la pérdida de la vida, los trastornos sociales y las dificultades económicas. Hay menos consenso sobre la magnitud del cambio de las variables climáticas, pero varios estudios han demostrado que el cambio climático impactará en la disponibilidad y la demanda de los recursos hídricos (Kusangaya, Warburton et al. 2014).

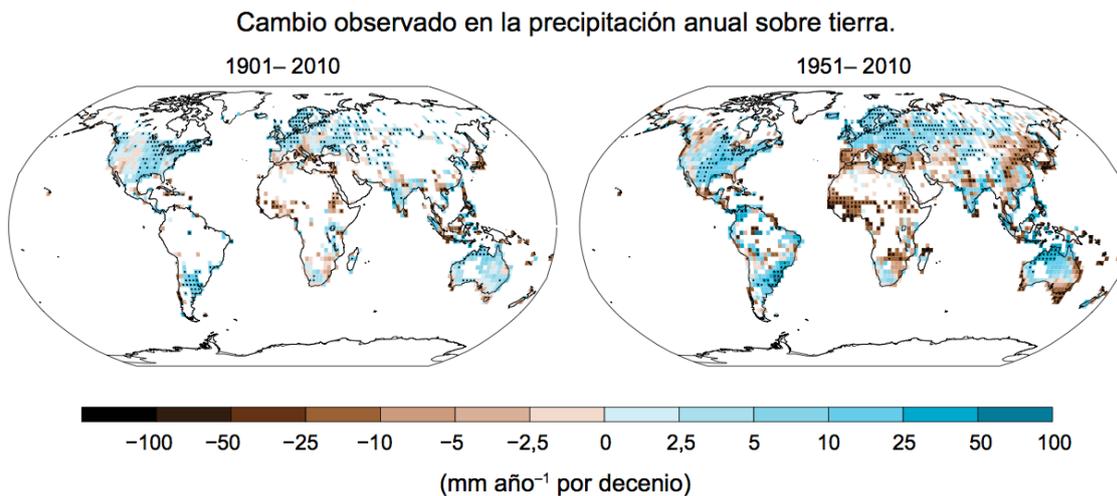


Figura 4: Cambio observado en la precipitación anual sobre tierra.

Mapas de los cambios observados en la precipitación, entre 1901 y 2010, y entre 1951 y 2010. (Tomado de IPCC, 2013)

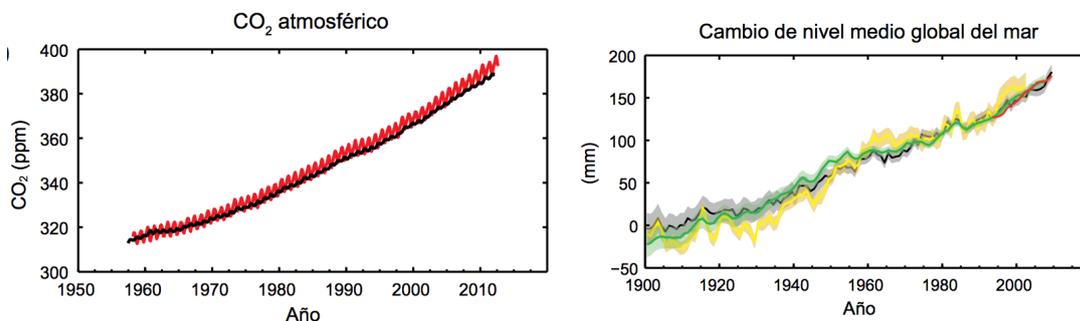


Figura 5: Cambios globales en el CO₂ atmosférico y nivel global del mar.

(Izquierda) concentraciones atmosféricas de dióxido de carbono (CO₂) en Mauna Loa (19°32 N, 155°34 W, en rojo) y en el Polo Sur (89°59 S, 24°48 W, en negro), desde 1958; (derecha) cambio de nivel medio global del mar calculado en base a datos registrados en 1900 a 1905 y desde 1993 en adelante. (Tomado de IPCC, 2013)

El aumento de temperatura afectaría particularmente; la gestión agrícola y forestal en latitudes superiores del Hemisferio Norte; por ejemplo en una plantación más temprana de los cultivos en primavera; ciertos aspectos de la salud humana, como la mortalidad a causa del calor en Europa; ciertas actividades humanas en la región ártica como los viajes a través de nieve o hielo) (*IPCC 2007*).

3.1. Escenarios de Emisiones de Cambio Climático

En los años 1990 y 1992, el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) desarrolló varios escenarios de emisiones a largo plazo que consideraban variables sociales y económicas, que servirían de base para los modelos de la circulación mundial. En 1992 fueron publicados denominándolos “escenarios IS92”, siendo entonces la primera familia de escenarios mundiales que proporcionaron estimaciones de los gases de efecto invernadero. En 1995 estos escenarios fueron evaluados considerando los importantes cambios (desde 1992) en cuanto a la comprensión tanto de las fuerzas que rigen las emisiones como de las metodologías. Por ello la reunión plenaria de 1996 del IPCC decidió desarrollar escenarios que representaran las fuerzas determinantes de las emisiones y su evolución, solicitando así un Informe Especial sobre Escenarios de Emisiones (Special Report on Emissions Scenarios, SRES) (*IPCC 2000*).

El informe fue aceptado por el Grupo de trabajo III (GTIII) en su reunión plenaria de marzo de 2000. Los nuevos escenarios fueron publicados por el IPCC en el 2001, siendo desde entonces ampliamente utilizados para modelar las emisiones futuras.

Los escenarios SRES están agrupados en cuatro familias denominadas A1, A2, B1 y B2, que exploran vías de desarrollo alternativas incorporando toda una serie de fuerzas originantes demográficas, económicas y tecnológicas, junto con las emisiones de GEI resultantes. No contemplan otras políticas climáticas además de las existentes. (*IPCC 2000*).

La línea evolutiva y familia de escenarios A1, presupone un crecimiento económico mundial muy rápido, un máximo de la población mundial hacia mediados de siglo, y una rápida introducción de tecnologías nuevas y más eficientes. Se divide en tres grupos, que reflejan tres direcciones alternativas de cambio tecnológico: intensiva en combustibles fósiles (A1FI), energías de origen no fósil (A1T), y equilibrio entre las distintas fuentes (A1B).

La familia de líneas evolutivas y escenarios A2, describe un mundo muy heterogéneo con crecimiento de población fuerte, desarrollo económico y cambio tecnológico lento.

La familia de líneas evolutivas y escenarios B1, describe un mundo convergente, con la misma población mundial que A1, pero con una evolución más rápida de las estructuras económicas hacia una economía de servicios y de información.

La familia de líneas evolutivas y escenarios B2, describe un planeta con una población intermedia y un crecimiento económico intermedio, más orientada a las soluciones locales para alcanzar la sostenibilidad económica, social y medioambiental. (IPCC 2000).

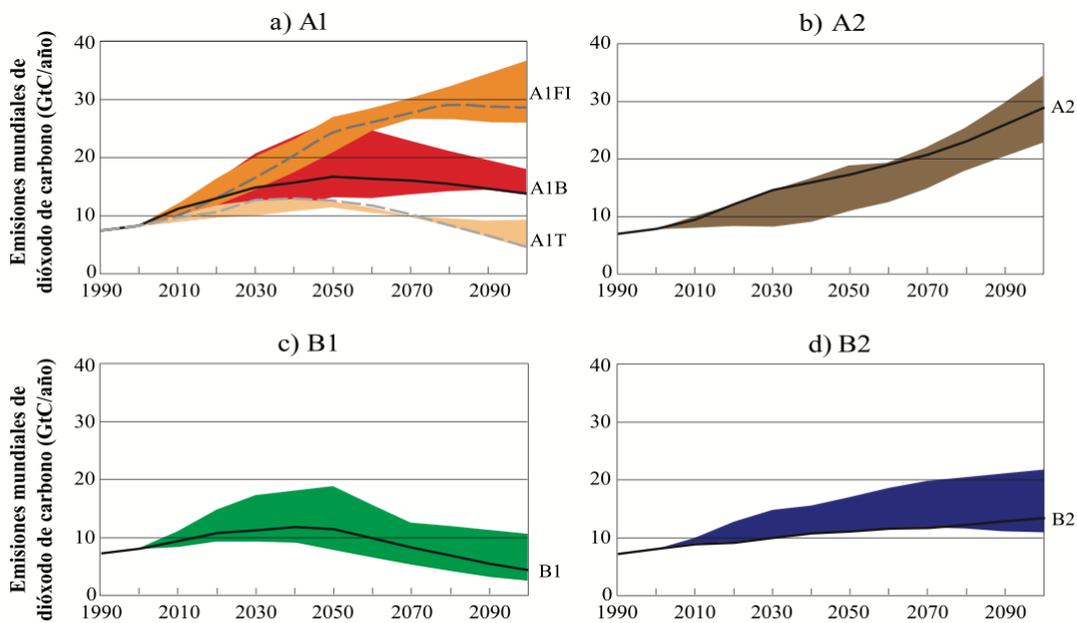


Figura 6: Emisiones mundiales de CO₂ para escenarios SRES.

Emisiones anuales totales de CO provenientes de todas las fuentes (energía, industria y cambio de uso de las tierras) entre 1990 y 2100 (en gigatoneladas de carbono (GtC/año) para las familias y los seis grupos de escenarios. (Tomado de IPCC, 2000)

Para el Quinto Informe de Evaluación del IPCC, la comunidad científica ha definido un conjunto de cuatro escenarios nuevos, denominados Trayectorias de Concentración Representativas (Representative Concentration Pathway, RCP), que se caracterizan por el cálculo aproximado que hacen del forzamiento radiativo total en el año 2100 en relación con 1750; esto es, 2,6 W/m², en el caso del escenario RCP2,6; 4,5 W/m², en el caso del escenario RCP4,5; 6,0 W/m² en el caso del escenario RCP6,0; y 8,5 W/m², en el caso del escenario RCP8,5.

Los cuatro escenarios de RCP comprenden un escenario de mitigación conducente a un nivel de forzamiento muy bajo (RCP2,6); dos escenarios de estabilización (RCP4,5

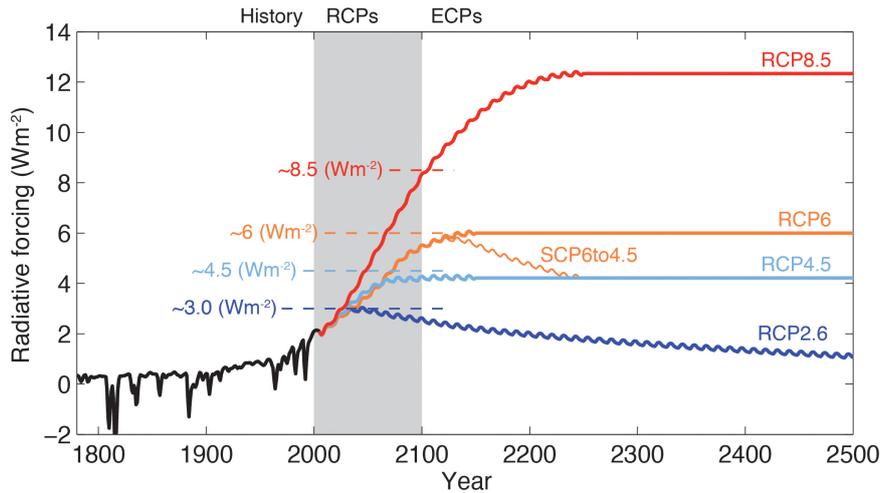


Figura 7: Forzamiento radiativo de los escenarios RCP.

Forzamiento radiativo total (antropogénico más natural) para los RCPs y ECPs (trayectorias de concentración extendida). (Tomado de IPCC, 2013).

y RCP6,0), y un escenario con un nivel muy alto de emisiones de gases de efecto invernadero (RCP8,5). Por consiguiente, los escenarios de RCP pueden representar una variedad de políticas climáticas del siglo XXI, frente a los Escenarios del SRES, que no contemplaban políticas climáticas, utilizados en el Tercer y Cuarto Informe de Evaluación (IPCC 2013). Los escenarios RCP especifican las concentraciones y las emisiones correspondientes, pero no están directamente basados en argumentos socioeconómicos como los escenarios SRES. Los escenarios RCP se basan en un enfoque diferente e incluyen más consistente los gases de vida corta y cambios de uso del suelo. No son necesariamente más capaces de representar la evolución futura que los escenarios SRES (IPCC 2013).

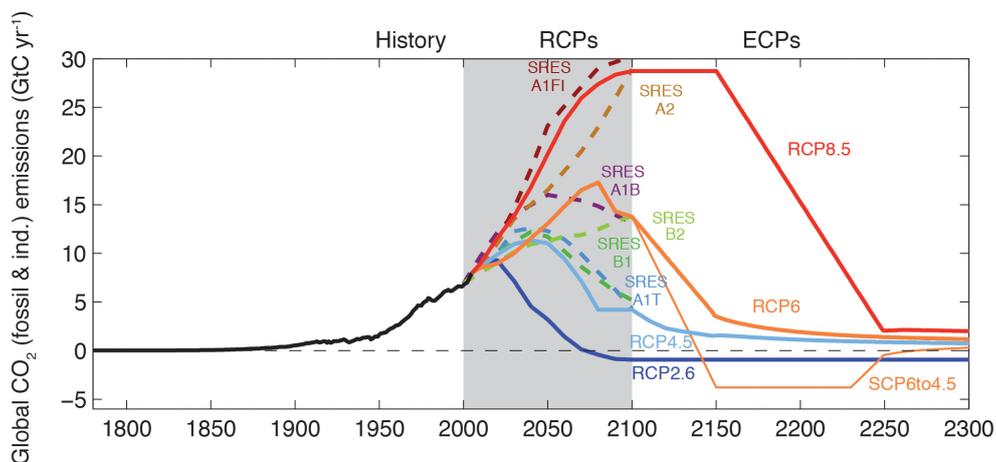


Figura 8: Emisiones mundiales de CO2 para escenarios RCP y sus ECP.

Las emisiones de CO2 (con excepción de las emisiones por uso del suelo) para los cuatro RCP y sus ECP, así como algunos escenarios de emisiones SRES. (Tomado de IPCC, 2013).

3.2. Modelos climáticos globales

Los modelos de circulación general o modelos climáticos globales (GCMs) son herramientas importantes en la evaluación del cambio climático (*Fowler, Blenkinsop et al. 2007*). Los GCMs son modelos numéricamente acoplados que representan diversos sistemas de la Tierra, incluyendo la atmósfera y la superficie terrestre y se basan en los principios generales de la dinámica y la termodinámica de fluidos (*Moradkhani, Baird et al. 2010*).

Los GCMs se utilizan generalmente para simular el clima actual y proyectar el clima futuro con forzamiento de gases de efecto invernadero y aerosoles, suelen dividir la atmósfera y el océano en una rejilla horizontal, con una resolución horizontal de 2 a 4 ° de latitud y longitud, con 10 a 20 capas en la vertical. En general, la mayoría de los modelos de circulación general simulan los procesos a escala global y continental en detalle y proporcionan una representación bastante exacta del clima planetario promedio. Durante la última década, la sofisticación de este tipo de modelos se ha incrementado y su capacidad para simular climas presentes y ha mejorado sustancialmente (*Dibike and Coulibaly 2005*).

Los GCMs han evolucionado, incluyendo la mejora de núcleos dinámicos y resoluciones verticales y horizontales; también se ha mejorado la incorporación de más componentes físicos como la superficie de la tierra y los procesos de hielo de mar, y parametrizaciones de procesos físicos (*Randall, DeMott et al. 2007*). Los resultados de los modelos de circulación general pueden ser de gran utilidad en la proyección y la comprensión de los futuros cambios climáticos globales, sin embargo, su baja resolución (generalmente superior a 2° x 2°) les dificulta resolver a escala de cuenca (*Moradkhani, Baird et al. 2010*).

Esta limitante conlleva a una reducción de escala de los modelos climáticos globales resultando así los denominados modelos climáticos regionales (RCMs). Los métodos de reducción de escala más utilizados se clasifican en métodos estadísticos y dinámicos. Los Métodos de regionalización estadística emplean funciones de transferencia estadística o empíricas para relacionar el clima local a las salidas de los GCMs. En los métodos de reducción de escala dinámica, un modelo climático regional utiliza salidas de modelos climáticos globales como sus condiciones iniciales y de contorno (*Fujihara, Tanaka et al. 2008*). Tanto los modelos climáticos regionales estadísticos como los dinámicos pueden proporcionar resultados significativos a nivel local o regional (*Block, Souza Filho et al. 2008*).

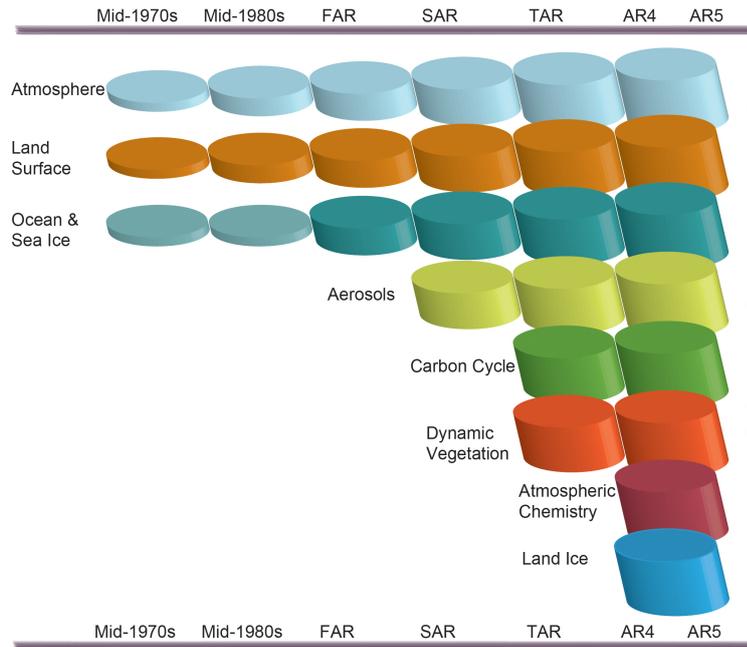


Figura 9: Evolución de los modelos climáticos globales.

En los últimos 35 años la complejidad y variedad de los procesos ha aumentado con el tiempo (ilustrado por cilindros de crecimiento). (Tomado de IPCC, 2013)

La necesidad imperante de evaluar la incidencia del cambio climático sobre sistema hidrológico conlleva al uso de una amplia gama de modelos climáticos con el objetivo de proveer una visión futura de la disponibilidad del agua. Esta herramienta proporciona estimaciones que permite a los responsables de la toma de decisiones proyectarse a un futuro plausible. Sin embargo (Harding, Best et al. 2011) pese a los esfuerzos constantes de investigación, todavía hay incertidumbres considerables en los controladores climáticos futuros, y en cómo los sistemas hidrológicos globales responden a su comportamiento. La captura de la variabilidad climática interanual en lugar de las propiedades estadísticas del clima todavía representa un desafío para los modelos (Kyselý and Dubrovský 2005) lo que dificulta la precisión de estimación de la disponibilidad del recurso.

El modelo de circulación general atmosférica de quinta generación (Fifth-Generation Atmospheric General Circulation Model,) ECHAM5, fue desarrollado por Max Planck Institute for Meteorology (MPI-M), actualizado en su última versión como ECHAM6 (Roeckner, Arpe et al. 1996). El Modelo Comunitario del Sistema Climático versión 3 CCSM3 (The Community Climate System Model version 3), fue desarrollado por el Centro Nacional de Investigaciones Atmosféricas, compuesto por cuatro modelos diferentes que simulan simultáneamente la atmósfera de la tierra, el océano, la superficie terrestre y el hielo marino, y un componente central de acoplador, (Collins, Bitz et al. 2006).

3.3. Cambio climático global y regional

Las proyecciones para los próximos decenios muestran unos patrones espaciales de cambio climático similares a los proyectados para el final del siglo XXI, aunque de menor magnitud. La variabilidad interna natural continuará ejerciendo una importante influencia en el clima, especialmente a corto plazo y a escala regional. Las emisiones continuas de gases de efecto invernadero causarán un mayor calentamiento y nuevos cambios en todos los componentes del sistema climático. (IPCC, 2013)

Es probable que el cambio en la temperatura media global en superficie para el período 2016-2035, en relación con el período 1986-2005, esté en el rango de 0,3 °C a 0,7 °C, para 2081-2100, se sitúe en los rangos derivados de las simulaciones determinadas por la concentración de la CMIP5, esto es, de 0,3 °C a 1,7 °C (RCP2,6), de 1,1 °C a 2,6 °C (RCP4,5), de 1,4 °C a 3,1 °C (RCP6,0), y de 2,6 °C a 4,8 °C (RCP8,5). (IPCC, 2013)

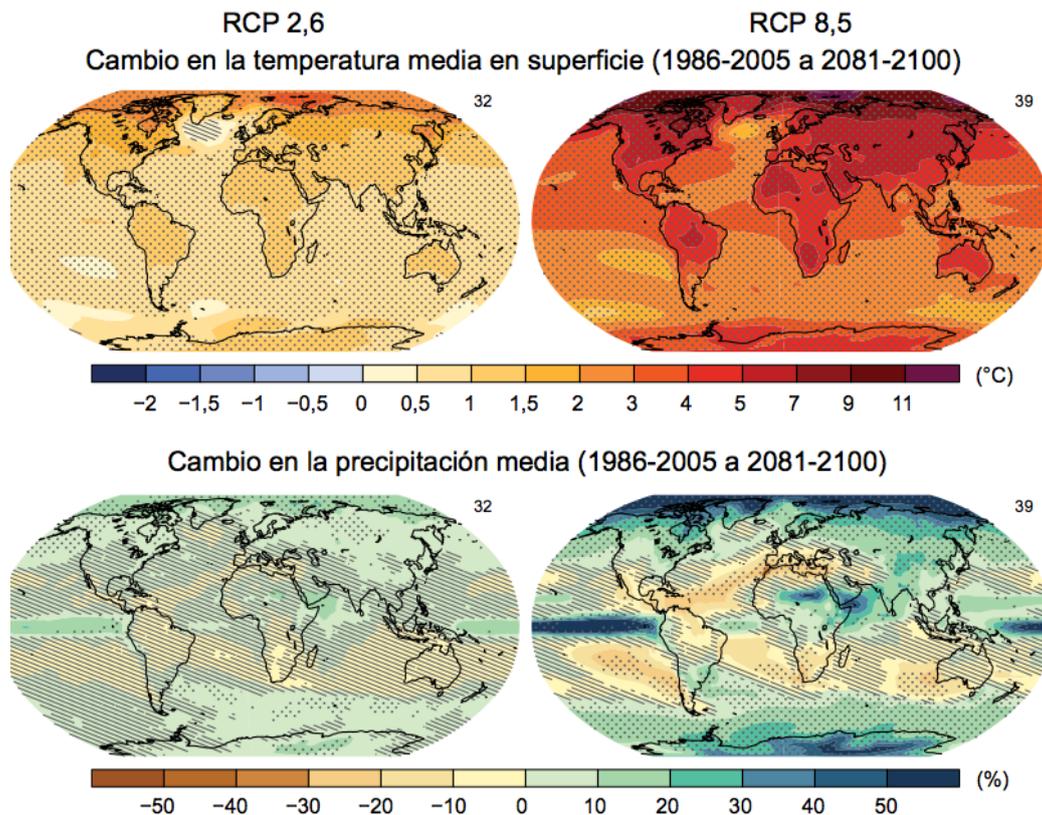


Figura 10: Proyección Global de temperatura media y precipitación media futura.

Mapas de resultados medios de múltiples modelos de la quinta fase del Proyecto de comparación de modelos acoplados (CMIP5) de los escenarios RCP2,6 y RCP8,5, correspondientes al período 2081-2100 arriba el cambio anual en la temperatura media en superficie; abajo el cambio de la media porcentual de la precipitación media anual. (número en la parte superior derecha de cada imagen es el número de modelos utilizados para el cálculo). (Tomado de IPCC, 2013)

Para el final de este siglo, en las latitudes altas y en el océano Pacífico ecuatorial se experimenta un aumento en la precipitación media anual en el marco del escenario RCP8,5. Es probable que, en el marco del escenario RCP8,5, para el final de este siglo la precipitación media disminuya en muchas regiones secas de latitud media y subtropicales, mientras que es probable que en muchas regiones húmedas de latitud media la precipitación media aumente, además que sean más intensos y frecuentes los fenómenos de precipitación extrema en la mayoría de las masas térricas de latitud media y en las regiones tropicales húmedas, conforme vaya aumentando la temperatura media global en superficie. (IPCC, 2013)

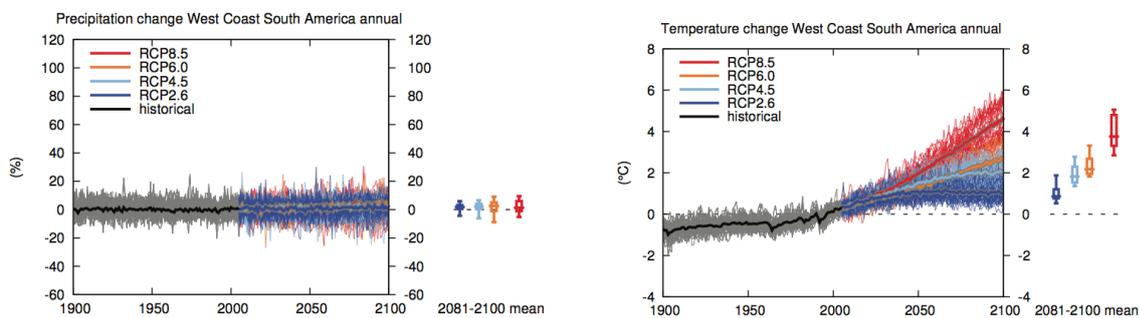


Figura 11: Proyección regional de cambio en la temperatura media y precipitación media. Series de tiempo de cambio relativo de la precipitación anual y cambio en la temperatura anual en relación con 1986-2005. (Tomado de IPCC, 2013)

3.3.1. Efecto del cambio climático en el ciclo hidrológico

Está establecido que la temperatura del aire superficial y la precipitación sobre la tierra han aumentado durante el siglo 20 (Folland, Karl et al. 2001) y aunque existe una gran incertidumbre acerca de la magnitud de los aumentos futuros, la mayoría de las evaluaciones indican que el calentamiento futuro es "muy probable" (Houghton, Ding et al. 2001). De acuerdo al Cuarto Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC), en el futuro previsible, el cambio climático continuaría; y peor aún, el proceso de cambio climático aceleraría (Parry, Canziani et al. 2007). Resultados de diferentes salidas de modelos climáticos globales (GCM) evidencian el efecto del cambio de las condiciones climáticas sobre el régimen hidrológico; sin embargo el efecto varía de región a región (IPCC 2007).

Se espera que el calentamiento climático intensifique y acelere el ciclo hidrológico mundial. Las tendencias mundiales y regionales en la evaporación, evapotranspiración

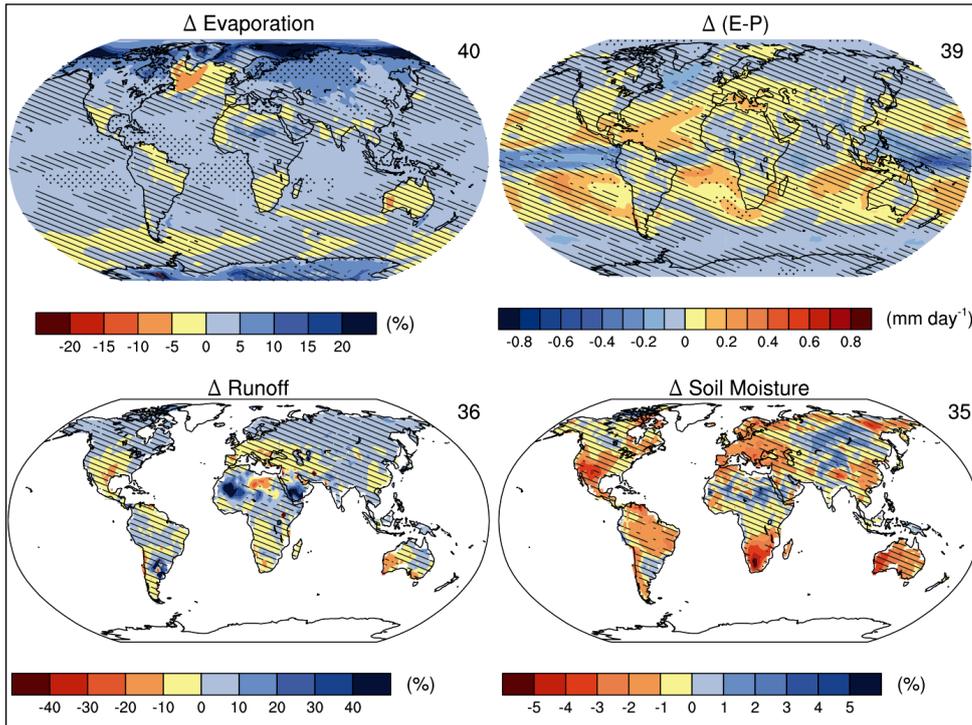


Figura 12: Cambios en las variables del ciclo del agua a corto plazo.

Cambios promedio anual en el ciclo del agua de múltiples modelos proyectados para el periodo 2016-2035 con respecto a 1986-2005 bajo el escenario RCP4.5. (número en la parte superior derecha de cada imagen es el número de modelos utilizados para el cálculo) (Tomado de IPCC, 2013).

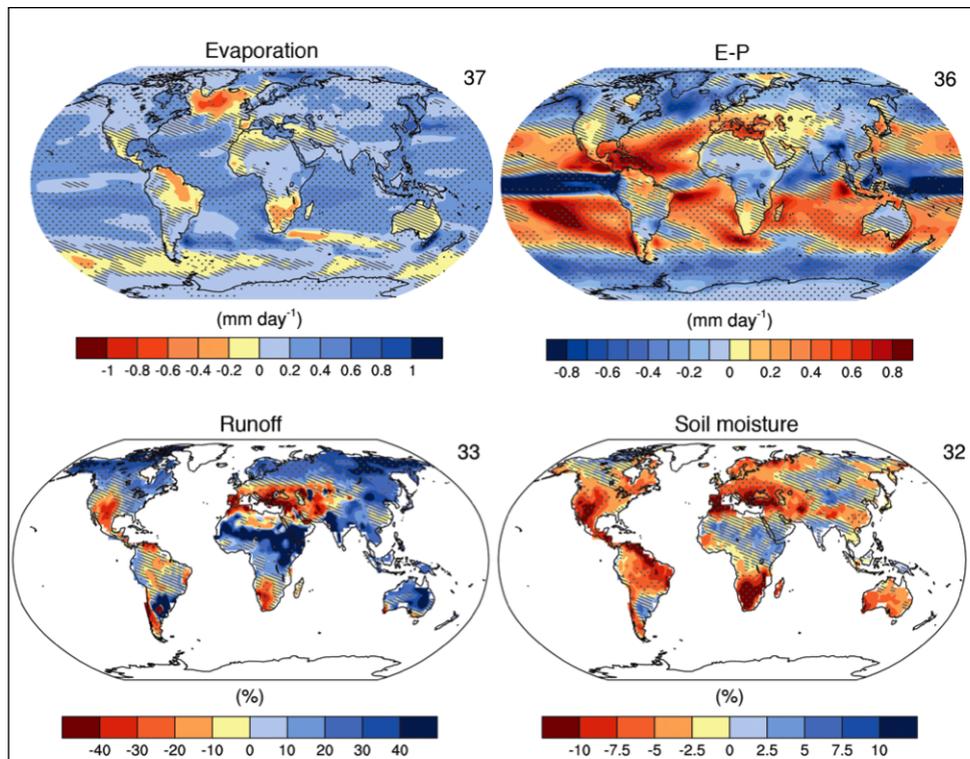


Figura 13: Cambios en las variables del ciclo del agua a largo plazo.

Cambios promedio anuales en el ciclo del agua para el periodo 2081-2100 con respecto a 1986-2005 bajo el escenario RCP8.5. (número en la parte superior derecha de cada imagen es el número de modelos utilizados para el cálculo) (Tomado de IPCC, 2013).

y el contenido de vapor de agua atmosférico, así como varios estudios del balance hídrico de cuencas hidrográficas apoyan una intensificación constante del ciclo hidrológico, resultando un incremento de estas variables y de la precipitación. Sin embargo tendencias globales en la precipitación, escorrentía y humedad del suelo son más inciertas debido en parte a la alta variabilidad espacial y temporal (*Huntington 2010*).

La mayoría de los estudios sugieren que se espera un clima más cálido para desplazar los tiempos de deshielo a principios de año (*IPCC 2007*) y causar escasez de agua durante los meses secos del verano. Por otra parte, un cambio en el clima aumenta la frecuencia y gravedad de los fenómenos hidrológicos extremos, como las inundaciones (*Mosquera-Machado and Ahmad 2007*) y las sequías (*Puri, Stephen et al. 2011*). Estos fenómenos pueden afectar directamente el bienestar humano a través de daños catastróficos, o indirectamente a través de los efectos adversos sobre la productividad de los cultivos. Tales amenazas pueden producirse de manera desproporcionada en los países en desarrollo que tienen menos recursos para la mitigación y la adaptación (*Manabe, Wetherald et al. 2004*).

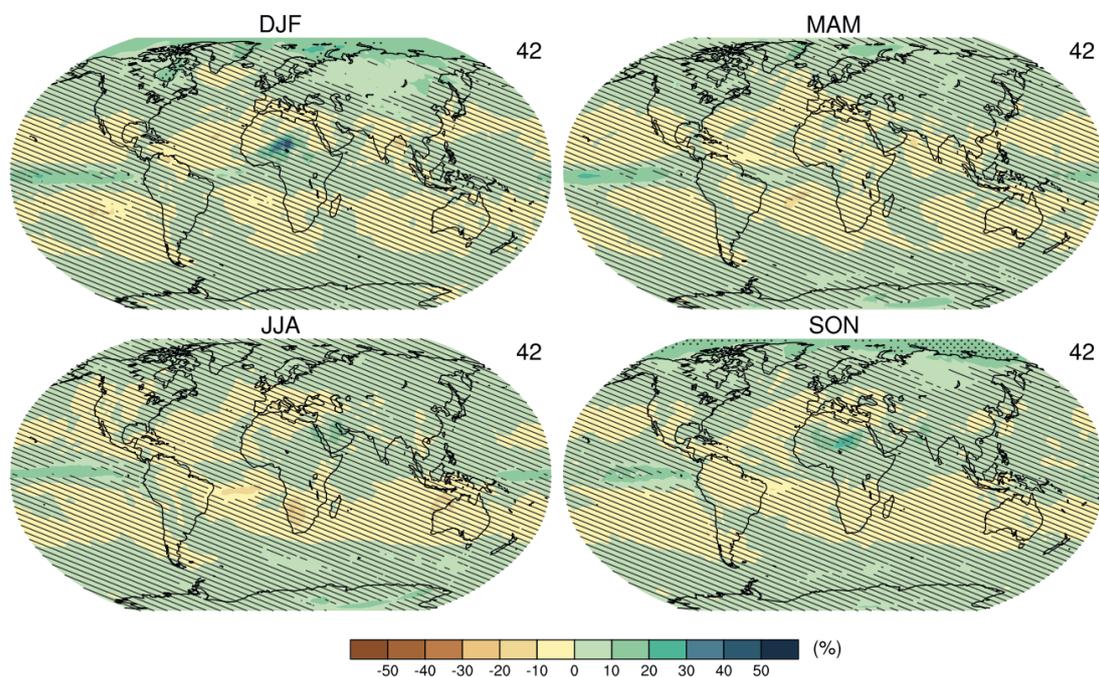


Figura 14: Cambios proyectados en la precipitación estacional a corto plazo.

Proyección media de los modelos climáticos del AR5 realizada para 2016-2035 en relación con 1986-2005 bajo el escenario RCP4.5 para las cuatro estaciones. (Tomado de IPCC, 2013)

Los recursos hídricos están sujetos a sufrir cambios significativos debido a la variabilidad en los períodos de lluvias y a los cambios estacionales. Se espera que el

cambio climático afecte los patrones de precipitación y evapotranspiración (*Tsanis, Koutroulis et al. 2011*) y, consecuentemente, a variables como la disponibilidad local de agua, descarga de los ríos y la disponibilidad estacional de suministro del recurso (*Arnell, van Vuuren et al. 2011*). Los cambios en los recursos hídricos son particularmente relevantes en las áreas donde la disponibilidad de agua es un factor limitante para el desarrollo económico (*Cudennec, Leduc et al. 2007*).

Las alteraciones que supone el cambio climático en el ciclo hidrológico genera incertidumbre en la gestión de los recursos hídricos, situación que plantea un desafío para los gestores del agua. Las decisiones de planificación de los recursos hídricos futuros deben basarse no sólo en la demanda de agua, sino también en los escenarios futuros del clima y el caudal (*García-Ruiz, López-Moreno et al. 2011*).

3.4. Estudios del efecto del cambio climático en los recursos hídricos

Se espera que el cambio climático intensifique el estrés que ya padecen los recursos hídricos, acelere las pérdidas de masa generalizadas de los glaciares y las reducciones de la cubierta de nieve observadas durante los últimos decenios, disminuya la disponibilidad de agua en numerosas zonas semiáridas (por ejemplo, la cuenca mediterránea, el oeste de Estados Unidos, el sur de África o el nordeste de Brasil), aumente apreciablemente las lluvias intensas en numerosas regiones, así como disminuyan los valores medios de precipitación en otras (*IPCC 2007*).

El efecto en los sistemas hidrológicos, puede variar a nivel mundial. Por ejemplo; en el suroeste de Australia el efecto de los escenarios climáticos futuros sobre los recursos hídricos superficiales y subterráneos, tienen un consecuente impacto en los ecosistemas dependientes del agua. Se proyecta que el cambio climático puede causar condiciones de secado en la región, al igual que otras regiones del mundo con un tipo de clima mediterráneo (*Barron, Silberstein et al. 2012*).

Los cambios de temperatura y precipitación proyectados para el próximo siglo pueden inducir modificaciones importantes en los regímenes hidrológicos de los afluentes de San Lorenzo (Quebec, Canadá). El aumento de la temperatura prevista durante las temporadas de invierno y primavera afectará la fase de precipitación y en consecuencia la relación de la nieve/precipitación y el volumen de agua almacenada en la capa de nieve (*Boyer, Chaumont et al. 2010*).

En el Noroeste del Pacífico, la hidrología es particularmente sensible a cambios en el clima debido a que el derretimiento nival domina la escorrentía estacional, y el impacto del cambio de temperatura influencia el balance lluvia/nieve (*Elsner, Cuo et al. 2010*).

En Canadá, la proyección climática futura de la cuenca Lago Winnipeg muestra aumento de la precipitación y temperatura anual en distintas estaciones y regiones de la cuenca. Se espera que tales cambios influyan en el volumen de la acumulación de nieve y fusión, así como en el tiempo y la intensidad de la escorrentía (*Shrestha, Dibike et al. 2012*).

El sistema de agua de California es especialmente vulnerable al calentamiento global debido a su dependencia en la acumulación de nieve de las montañas y el proceso de derretimiento nival (*Vicuna and Dracup 2007*).

El régimen de lluvias Ibérica se caracteriza por un fuerte ciclo estacional y una gran variabilidad interanual. Escenarios de precipitación contruidos para el futuro 2041-90 revelan un aumento de las precipitaciones en invierno y una pequeña disminución en la mayoría de los sectores de Iberia para las temporadas de primavera y otoño. (*Trigo and Palutikof 2001*).

3.5. Modelos hidrológicos en estudios del efecto del cambio climático en los recursos hídricos

La respuesta hidrológica al cambio climático se ha estudiado a través de la aplicación de modelos hidrológicos a escala de cuencas por ejemplo; (*Toth, Pietroniro et al. 2006*), y (*Forbes, Kienzle et al. 2011*).

En España (*Kilsby, Tellier et al. 2007*) evalúan el efecto del cambio climático en la producción de escorrentía, caudales de los ríos y la disponibilidad del recurso hídrico a escala mensual, en las cuencas del río Tajo y río Guadiana, utilizando el modelo conceptual precipitación - escorrentía UP2. Para la evaluación utilizan el modelo climático regional (RCM) HadRM3H.

(*Shrestha, Dibike et al. 2012*) evalúan los cambios hidrológicos inducidos por el cambio climático en la cuenca Lago Winnipeg en Canadá, empleando el modelo hidrológico Herramienta de Evaluación de Suelo y Agua (Soil and Water Assessment Tool, SWAT)

(*Reclamation 2011*) en colaboración con otras instituciones generó mallas de proyecciones hidrológicas para el Oeste de Estados Unidos, usando el modelo hidrológico de macroescala VIC (Variable Infiltration Capacity), y proyecciones

climáticas procedentes del Coupled Model Intercomparison Project Phase 3 (CMIP3). El modelo VIC simula el balance hídrico para cada celda de la malla, a escala diaria.

Otro modelo ampliamente utilizado en España, para estudios de impactos del cambio climático es el modelo SIMPA (Simulación Precipitación-Aportación) (Estrela and Quintas 1996). Se trata de un modelo distribuido a escala mensual.

3.5.1. Modelo Hidrológico Agregado Témez

El modelo Témez (Témez 1977, Estrela and Quintas 1996, Cabezas Calvo-Rubio, Estrada Lorenzo et al. 1999, Ruiz 1999, Álvarez 2005) es un modelo hidrológico de simulación continua, conceptual, que simula los flujos medios mensuales en régimen natural en cualquier punto de la red hidrográfica. Pertenece al grupo de los denominados modelos agregados de simulación de cuencas (Estrela 1992b).

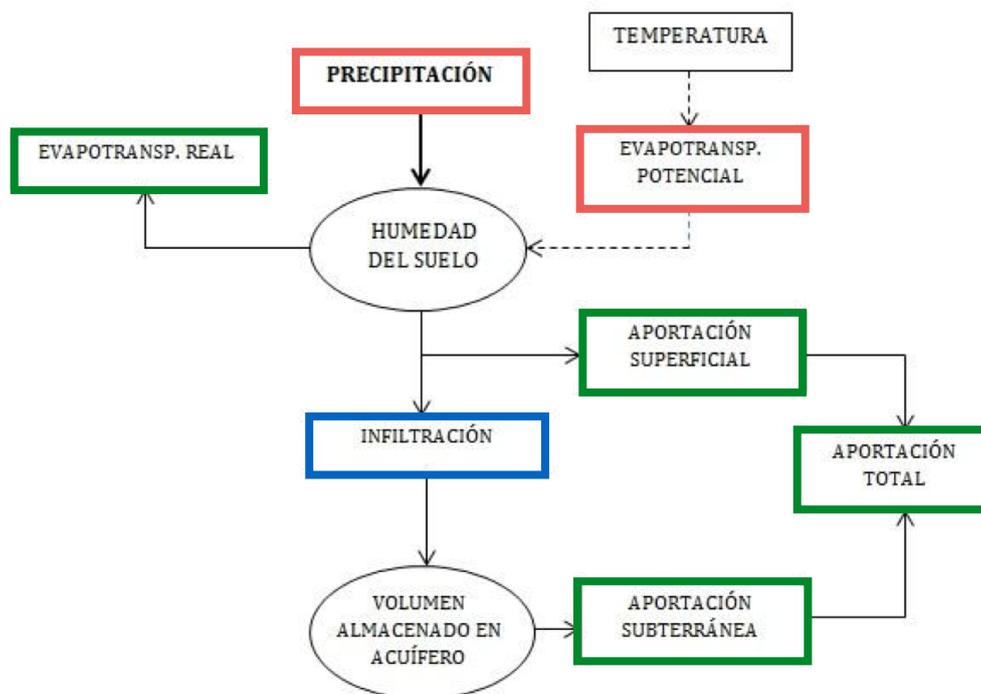


Figura 15: Esquema conceptual del Modelo Hidrológico Agregado Témez.

Recuadros de color rojo pertenecen a flujos de entrada, de verde flujos de salida y de azul flujos indirectos. (Tomado de memorias MIMHA, 2013)

El modelo opera realizando balances de humedad entre los distintos procesos que tienen lugar en un sistema hidrológico desde el instante en que comienza a llover hasta el momento en que se genera escorrentía y la posterior descarga de los acuíferos a los ríos. (Témez 1977).

El modelo realiza una valoración global, ya que no considera la distribución espacial de las variables y parámetros que intervienen en los cálculos, que se sustituyen por un valor medio, por lo que su aplicación se limita a cuencas pequeñas o de tamaño intermedio donde existe una cierta homogeneidad climática, edafológica y geológica. Su aplicación a grandes cuencas implica realizar una subdivisión en otras de menor tamaño, que verifiquen los condicionantes del método. El desarrollo teórico del modelo de Témez es de índole general, por lo que en principio se puede aplicar cualquier intervalo de tiempo (horario, diario, semanal, mensual, anual), aunque se debe verificar que los periodos temporales que se utilicen proporcionen una respuesta coherente con la realidad física del sistema hidrológico en estudio. El intervalo temporal que más se usa es el mensual. Las entradas al modelo corresponden a datos de precipitación y evapotranspiración potencial. Otra información que precisa el modelo son datos sobre topología y clasificación de las subcuencas consideradas y los mapas de unidades hidrogeológicas (Témez 1977). El modelo Témez es un modelo de pocos parámetros con una larga trayectoria de aplicación en España para la evaluación de recursos hídricos. Su bajo número de parámetros lo hace especialmente adecuado en cuencas con un número reducido de datos.

3.5.2. Modelo Distribuido PATRICAL

El módulo PATRICAL (Perez Martin 2005) (precipitación aportación en tramos de red integrados con calidad del agua) permite construir modelos especialmente distribuidos con paso de tiempo de simulación mensual del ciclo hidrológico, obteniendo los flujos de agua que se producen en los diferentes puntos de la cuenca y los niveles piezométricos medios en los acuíferos. Además incluye la simulación del contenido de nitrato y de la conductividad eléctrica del agua en el suelo, en el medio saturado, en los acuíferos y en las aguas superficiales.

Este modelo realiza la simulación del ciclo hidrológico en régimen natural o en régimen alterado, por la actividad antrópica, aplicando la formulación de Témez (1977) en cada pequeño elemento (por ejemplo resolución de 1 km x 1 km) en que discretiza la cuenca hidrográfica, incluyendo la menor posibilidad de evapotranspiración de la vegetación con contenidos bajos de humedad en el suelo, las transferencias laterales entre acuíferos, las relaciones río-acuífero (incluyendo la posibilidad de pérdidas en cauces) y la evolución de la piezometría media de los acuíferos (Perez Martin 2005).

El modelo PATRICAL puede funcionar, como se ha indicado, en régimen natural o en régimen alterado antrópicamente. En este último caso incluye la evolución temporal y

distribución espacial de los retornos de riego que recargan los acuíferos, y las extracciones de aguas subterráneas (agrícolas y urbanas), y adicionalmente, para el caso de simulación de la calidad del agua, también los retornos de riego superficiales y los retornos urbanos superficiales. Debe tenerse en cuenta que el modelo reproduce el ciclo hidrológico natural y parte del ciclo hidrológico alterado, ya que no incluye la gestión de embalses ni las modificaciones que se producen en el régimen de caudales por los mismos (Pérez 2005).

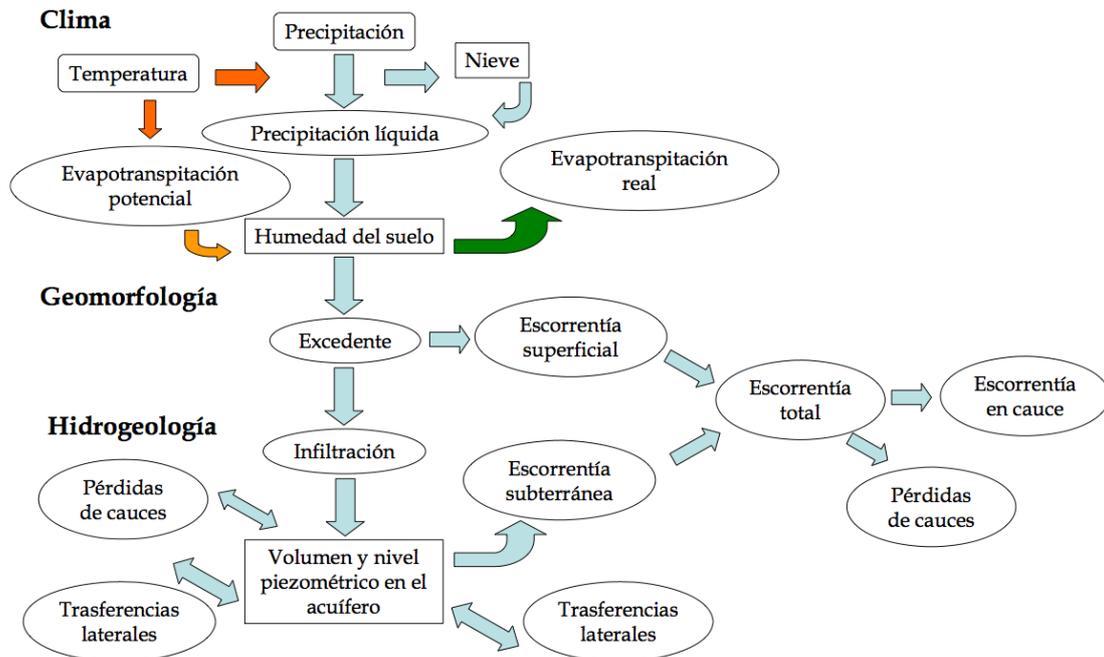


Figura 16: Esquema conceptual del Modelo distribuido PATRICAL.
(Tomado de memorias MIMHA, 2013)

3.6. Cambio Climático en Ecuador

Ecuador representa el 0.2% de la población mundial, siendo responsable de un 0.1% de las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) a nivel mundial, con un promedio de emisión de 2.2 toneladas de CO₂ persona/año. Estos niveles están bastante por debajo de los de América Latina y el Caribe (MAE and PNUD 2009).

Sobre la base del principio de asumir “responsabilidades comunes pero diferenciadas”, el Ecuador suscribió y ratificó la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (CMNUCC) y el Protocolo de Kyoto. Iniciando en 1993, el denominado Proceso del Cambio Climático en Ecuador (PCCE), con cuatro objetivos a largo plazo (Cáceres 2001):

- Implementar una capacidad institucional básica para enfrentar la problemática del cambio climático.

- Analizar el cambio climático y sus posibles impactos en áreas estratégicas del país.
- Definir alternativas de respuestas ante el cambio climático para la toma de decisiones.
- Cumplir con los compromisos internacionales.

Ecuador forma parte del grupo de países que no tienen que cumplir con metas específicas de reducción de emisiones (*UNDP 2007*). Sin embargo, ha implementado medidas que contribuyen a la reducción, entre ellas se encuentra el programa impulsado por el Ministerio de Ambiente, denominado Socio Bosque / Socio Páramo; el cual consiste en proveer incentivos económicos para la conservación de bosques y la disminución de la deforestación. Cabe mencionar que gran parte de las emisiones de GEI en Ecuador proceden de la deforestación y reemplazo de ecosistemas naturales (páramos, bosques) esto con el fin de utilizar el territorio con fines urbanos o productivos. Adicional a ello existen políticas para disminuir el consumo de combustibles fósiles en la generación eléctrica promoviendo el uso de energías renovables (*MAE and PNUD 2009*). Se han identificado cinco sectores especialmente vulnerables al cambio climático, estos son; los sectores agropecuario, energético, forestal, de recursos hídricos y recursos marino costero. Considerando particularmente sensible el sector de recursos hídricos (*MAE and PNUD 2009*).

Con el fin de evaluar el impacto del cambio climático en los recursos hídricos del país, en el año 2000 se efectuó un estudio denominado “Análisis del Impacto del Climático en los recursos Hídricos en el Ecuador”. El área de estudio cubrió una extensión de 82.236 Km² y abarcó a las cuencas hidrográficas de los ríos Esmeraldas, Mira, Carchi, Jama, Chone, Portoviejo, Pastaza (hasta el Proyecto Agoyán), Paute (hasta la represa Daniel Palacios), y Napo en las subcuencas del río Quijos (limitada por la estación hidrométrica Quijos en Baeza) y en la subcuenca del río Jatunyacu (limitada por la estación hidrométrica Jatunyacu D.J. Iloculin, incluyendo la cuenca del Guayas). El estudio utilizó cuatro escenarios de precipitación (P) y temperatura (T) definidos en la publicación: “Escenarios de Cambio Climático (ECC) en Ecuador, Investigación y Aplicación”.

- Escenario ECC1: (incremento T 1°C, disminución P 15%)
- Escenario ECC2: (incremento T 1°C, incremento P 20%)
- Escenario ECC3: (incremento T 2°C, disminución P 15%)
- Escenario ECC4: (incremento T 2°C, incremento P 20%)

De los resultados obtenidos se concluye que las cuencas de los Ríos Esmeraldas, Portoviejo, Chone, Jama, Briceño, Pastaza, Paute, Mira, Carchi y Napo ya mostraban en el año 2000 un déficit para cubrir la demanda de agua en las épocas secas. Intensificándose este en los escenarios ECC1 y ECC3.

El escenario ECC2 es menos preocupante que el escenario ECC1, sin embargo, se mantendrían valores altos en déficit, coincidiendo los mayores problemas en las cuencas mencionadas. Evidentemente el escenario ECC4 es el menos desfavorable, ya que al nivel global de cuencas se tendría mayores precipitaciones, lo que generaría un incremento de oferta disminuyendo en tiempo y cantidad los déficit frente a la demanda.

En el año 2009 el estudio del Proyecto GEF/MAE/PNUD “Adaptación al Cambio Climático a través de una Efectiva Gobernabilidad del Agua en Ecuador – PACC”, presentó un retrato de la vulnerabilidad al clima y la variabilidad climática actual en seis cuencas hidrográficas (cuencas de los ríos Paute, Jubones, Catamayo-Chira, Chone, Portoviejo y Babahoyo) claves del Ecuador, con énfasis en los recursos hídricos. Para cada cuenca se determinó la variación de temperatura y precipitación durante los últimos años. Se calculó el valor de la media móvil de la temperatura media mensual ($^{\circ}\text{C}$) y la precipitación mensual acumulada (mm) cada cinco años, para el período 1961-2005. Todas las cuencas presentan un ascenso de la temperatura en los últimos 64 años, existiendo menos intensidad en la cuenca Catamayo – Chira (Ver *Tabla 1*).

Cuenca	Comportamiento de la temperatura
Chone	incremento, 0.22°C por década
Portoviejo	incremento, 0.18°C por década
Babahoyo	incremento, 0.19°C por década
Catamayo - Chira	incremento, 0.13°C por década
Jubones	incremento, 0.31°C por década
Paute	incremento, 0.28°C por década

Tabla 1: Comportamiento de la temperatura en las cuencas estudiadas 1961-2006.
(Tomado de MAE & PNUD 2009)

La falta de series completas de datos hidrometeorológicos, deficiencias en la densidad en las estaciones y la longitud de las series de datos, impidió establecer los cambios en la precipitación y estimar la frecuencia de eventos extremos. Aunque el IPCC afirma



que en Ecuador se ha registrado un incremento de la precipitación y de fenómenos extremos en las últimas tres décadas.

Este estudio se enfocó en el riesgo originado por la interacción de amenazas climatológicas, de vulnerabilidad y de exposición de las poblaciones humanas, especialmente en lo relativo a los recursos hídricos. Concluyendo que el 70% de todos los desastres registrados por la prensa escrita en los últimos 30 años se origina en fenómenos hidrometeorológicos. Los desastres más frecuentes son inundaciones y deslizamientos, que juntos representan casi un 90% del total, mientras que las sequías representan solo un 6%, esto puede obedecer a subregistros, puesto que estos fenómenos son menos atractivos y pueden ser obviados por los medios de comunicación. El estudio también concluye de acuerdo a los registros climatológicos que la amenaza principal de las cuencas Portoviejo, Catamayo y Jubones; es la sequía (*MAE and PNUD 2009*). A nivel nacional, las sequías explican el 45% de pérdidas en los cultivos transitorios y el 11% de pérdidas en cultivos permanentes. Las inundaciones causan el 10% de pérdidas en cultivos transitorios y menos del 1% de pérdidas en cultivos permanentes.

4. METODOLOGÍA

Para el desarrollo de la presente investigación es necesario la ejecución de diversas etapas. Estas permitirán cumplir los objetivos específicos y estos a su vez el objetivo general de la investigación.

- **Etapas 1:** Análisis de los escenarios de cambio climático.
- **Etapas 2:** Resultados hidrológicos para el periodo histórico.
- **Etapas 3:** Evaluación del efecto del cambio climático en el ciclo hidrológico.
- **Etapas 4:** Gestión de los embalses como medida de adaptación.

Para la correcta ejecución de estas etapas es necesario contar con información disponible de diversa índole, la misma que en la presente investigación fue bastante escasa. La información disponible fueron series mensuales de precipitación y temperatura de las estaciones pluviométricas y climatológicas de la provincia de Manabí, proporcionados por el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología del Ecuador (INAMHI), datos mensuales de estaciones de aforo de caudales (discontinuas) en las cuenca del río Portoviejo y río Chone y niveles de los embalses proporcionados por la Secretaría de la Demarcación Hidrográfica de Manabí (SENAGUA), así como la información digital descargable del Instituto Geográfico Militar y del Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca (MAGAP) del Ecuador.

Para el desarrollo de las etapas se han utilizado diversas herramientas entre ellas; Cuatro Modelos Climáticos Globales presentados en el cuarto y quinto informe del IPCC, el Modelo Hidrológico Agregado de Témez y el Modelo Hidrológico Distribuido PATRICAL, para este último fue necesario la generación de información geográfica adicional como el Modelo Digital del Terreno, delimitación de acuíferos, corrección de la red hidrográfica, entre otros; así como establecer valores preliminares de capacidad de almacenamiento de agua para los diversos usos de suelo y valores de infiltración según la geología del terreno. Todo esto con el fin de generar información en toda el área de estudio

Además para efectuar sistemáticamente las etapas de la investigación se codificaron las subcuencas del ámbito de estudio como medida de simplificación a la al trabajar con diversas áreas.

4.1. Etapa 1: Análisis de los escenarios de cambio climático

En esta etapa se utilizaron 2 modelos climáticos globales del cuarto (AR4) y 2 modelos del quinto informe (AR5) del IPCC.

Los modelos del cuarto informe fueron el CCSM3 y el ECHAM5, en los escenarios SRES A1B, A2 y B1, a corto (2010-2039), mediano (2040-2069) y largo plazo (2070-2099). Mientras que los modelos del quinto informe fueron el CCSM4 y ECHAM6, con los escenarios RCP2.6, RCP 4.5 y RCP8.5, a corto (2010-2039), mediano (2040-2069) y largo plazo (2070-2099).

De cada modelo (con su respectivo escenario y periodo) se obtuvo las anomalías de precipitación y temperatura (SRES), y la precipitación y temperatura media mensual (RCP) para cada cuenca hidrográfica.

Además se contrastaron los periodos de control de cada modelo con los datos observados para cada cuenca, esto con el fin de identificar el modelo que mejor se adaptaba a los patrones reales de precipitación y temperatura.

Informe IPCC	AR4	AR5
Modelos	<ul style="list-style-type: none"> • CCSM3 National Center for Atmospheric Research • ECHAM5 Max Planck Institute for Meteorology 	<ul style="list-style-type: none"> • CCSM4 National Center for Atmospheric Research • ECHAM6 Max Planck Institute for Meteorology
Escenarios	SRES A1B SRES B1 SRES A2	RCP 2.6 RCP 4.5 RCP 8.5
Periodos	2010-2039 2040-2069 2070-2099	2010-2039 2040-2069 2070-2099
Resultados	36 Series mensuales de anomalías de precipitación 36 Series mensuales de anomalías de Temperatura	

Figura 17: Síntesis del análisis de los Escenarios climáticos SRES (AR4) Y AR5 (RCP).

4.2. Etapa 2: Resultados hidrológicos para el periodo histórico

En esta etapa se utilizaron dos modelos hidrológicos:

- Modelo Hidrológico Agregado de Témez.
- Modelo Hidrológico Distribuido PATRICAL.

Para la utilización del modelo agregado de Témez primero fue necesario calibrarlo y una vez realizado esto se procedió a la simulación. Los datos de entrada utilizados para la calibración fueron: serie histórica mensual de precipitación y temperatura media (series resultantes de la interpolación areal de los datos de las estaciones pluviométricas y climatológicas ingresadas y procesadas por el modelo PATRICAL), series históricas mensuales de estaciones de aforo de caudales que completaban un año hidrológico (los años incompletos no se utilizaron para evitar alterar los resultados del modelo). Para obtener la evapotranspiración potencial (ETP), se realizaron cuatro cálculos con diferentes métodos.

Una vez obtenida la ETP se calibró el modelo, iterando manualmente los parámetros de calibración hasta obtener el menor error posible. Este proceso se realizó para la subcuenca del río Carrizal en la cuenca del río Chone y en la subcuenca del río Chico en la cuenca del río Portoviejo. Luego se realizó la simulación de la subcuenca de la cabecera del río Portoviejo con los parámetros de calibración de la subcuenca del río Carrizal, debido a que las condiciones geológicas son muy similares. Para cada subcuenca se utilizó su respectiva serie histórica media mensual de precipitación y temperatura.

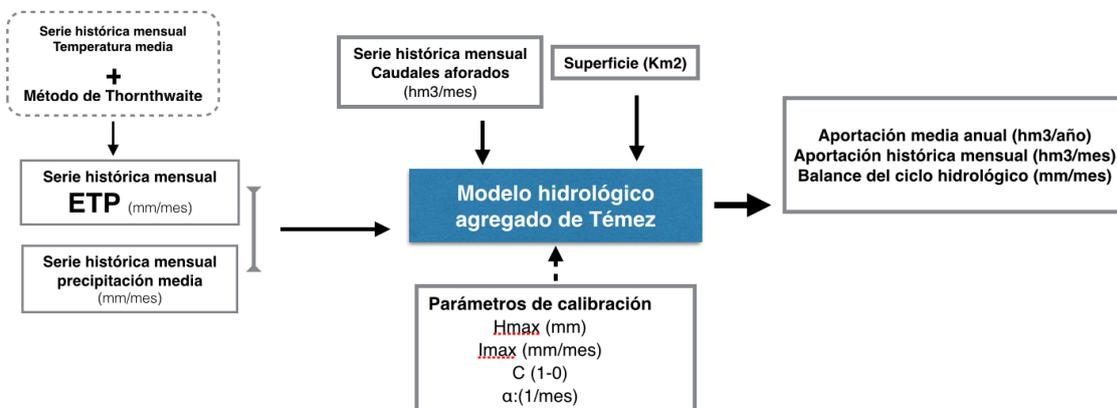


Figura 18: Esquema metodológico de la calibración del Modelo Agregado de Témez.

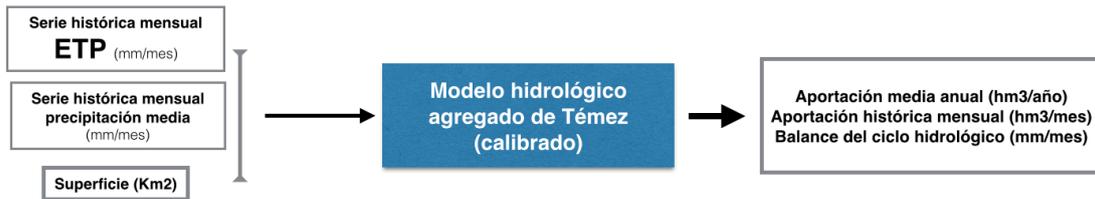


Figura 19: Esquema metodológico de la simulación del Modelo Agregado de Témez.

Como se mencionó anteriormente, el Modelo Distribuido PATRICAL, fue necesario inicialmente para la generación de series medias de precipitación, temperatura y ETP. Pero además fue esencial para la generación de series de aportaciones en cualquier punto de la red hidrológica.

Una vez simulado el comportamiento de las subcuencas, se realizó el análisis de las variables del ciclo hidrológico resumiendo en un esquema el balance hidrológico.

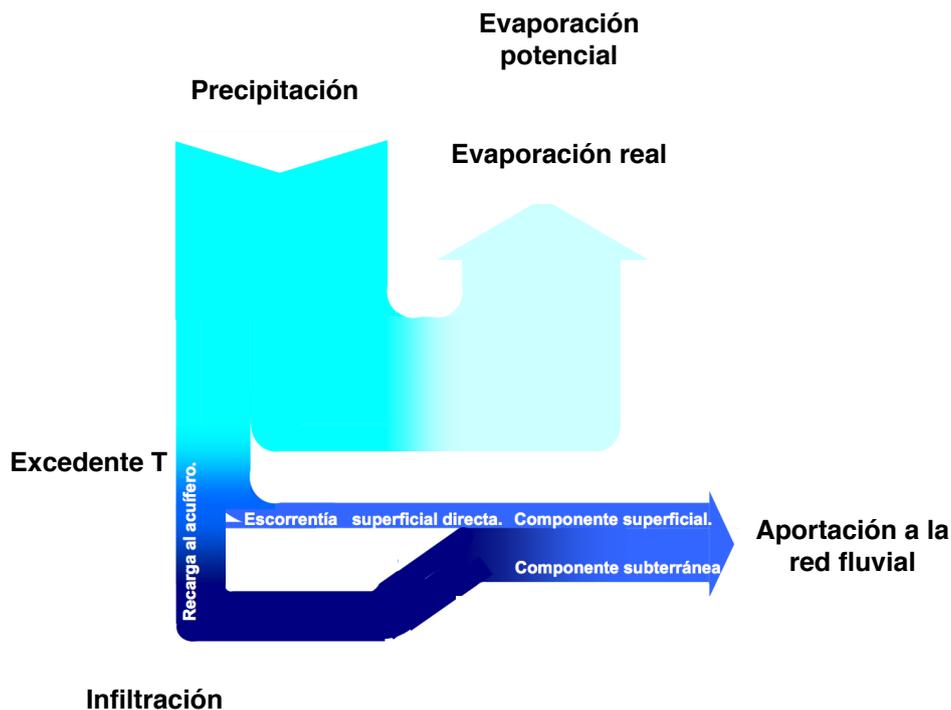


Figura 20: Esquema para representar el balance ciclo hidrológico.

4.3. Etapa 3: Evaluación del efecto del cambio climático en el ciclo hidrológico

En esta etapa el proceso a seguir fue aplicar las anomalías de temperatura y precipitación resultantes de la primera etapa, a la simulación del Modelo de Témez de para cada subcuenca (segunda etapa). Posterior a ello se analizó la variación de las aportaciones por efecto del cambio climático.

Este mismo análisis se efectuó a las variables del ciclo hidrológico (precipitación, evaporación real, infiltración y escorrentía superficial) y a las necesidades hídricas.

4.4. Etapa 4: Gestión de los embalses como medida de adaptación

En esta última etapa consistió en simular el comportamiento histórico del embalse La Esperanza ubicado en la subcuenca del río Carrizal e identificar si las demandas actuales cumplen las garantías mensuales, anuales y volumétricas, así como los criterios UTAH para 1, 2 y 10 años, criterios que establecen que el déficit no debe superar el 50% de la demanda anual para 1 año, el 75 % para 2 años consecutivos y el 100% de la demanda anual para 10 años consecutivos. Además se analizó lo que sucedería con las demandas si se incrementaran las necesidades hídricas producto del cambio climático.

5. APLICACIÓN Y RESULTADOS

En este apartado se encuentran los resultados de la aplicación de cada etapa presentada en la metodología, cada etapa tiene actividades adicionales que han permitido el desarrollo metodológico, mismas que se detallan dentro de estas.

5.1. Análisis de los escenarios de cambio climático

En el análisis de los escenarios de cambio climático, se obtuvo como resultado final las anomalías de precipitación y temperatura para el ámbito de estudio, las mismas que son extraídas de cada modelo, escenario y periodo estudiado. Además de las anomalías también se realizó el contraste de los periodos de control de los modelos analizados con el periodo observado en el área de estudio.

5.1.1. Contraste periodo de control observado vs periodo de control de modelos

En la tabla 2 se resumen la precipitación media mensual observada en el ámbito de estudio entre 1964 y 2012 y el periodo de control en el que se basan los modelos para realizar las proyecciones futuras. Estos datos se obtuvieron a partir de la diferencia entre las proyecciones futuras de precipitación de los modelos analizados y las anomalías que resultaron de ellos.

Mes	Observado	CCSM3	ECHAM5	CCSM4	ECHAM6
Octubre	7.3	80.4	88.1	284.7	83.3
Noviembre	14.2	145.2	75.2	347.0	59.8
Diciembre	45.6	134.8	134.8	404.9	72.9
Enero	135.2	114.0	145.2	363.9	92.8
Febrero	227.7	95.9	186.6	383.6	155.0
Marzo	205.2	106.3	241.1	412.5	253.2
Abril	143.3	181.4	197.0	361.2	249.8
Mayo	59.4	300.7	106.3	228.8	119.3
Junio	22.3	259.2	41.5	110.7	37.3
Julio	8.9	103.7	36.3	47.6	9.5
Agosto	6.8	70.0	75.2	94.0	42.6
Septiembre	6.5	75.2	98.5	199.9	97.2
coef. de correlación		-0.05	0.89	0.67	0.79

Tabla 2: Resumen de periodos de control de la precipitación.

Precipitación media mensual observada en la DHM y del periodo de control de los modelos analizados. Unidades en mm/mes

Los datos mostrados en la tabla 2, fueron contrastados en la figura 21, y se estableció que los modelos que mejor correlación presentan con el periodo observado de precipitación media son el ECHAM5 y ECHAM6.

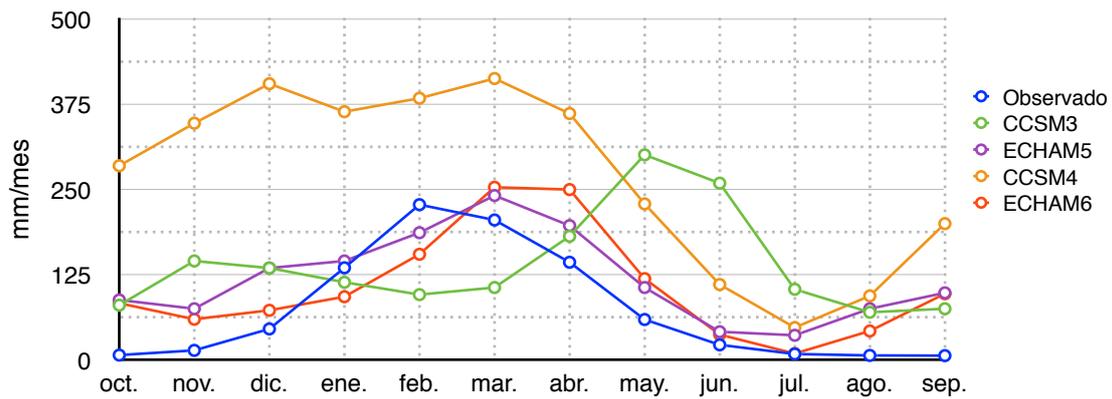


Figura 21: Contraste de la precipitación media mensual observada en la DHM con el periodo de control de los modelos.

En la tabla 3 se resumen la temperatura media mensual observada en el ámbito de estudio y el periodo de control en el que se basan los modelos para realizar las proyecciones futuras.

Mes	Observado	CCSM3	ECHAM5	CCSM4	ECHAM6
Octubre	24.8	22.7	21.9	21.6	20.4
Noviembre	25.0	22.8	22.1	21.4	20.0
Diciembre	25.7	22.9	22.5	21.6	19.9
Enero	26.1	23.3	23.3	21.8	20.1
Febrero	26.1	23.4	23.6	22.0	20.3
Marzo	26.5	23.0	23.3	21.8	20.5
Abril	26.6	21.9	22.8	22.0	20.5
Mayo	26.1	21.6	22.2	21.8	20.7
Junio	25.1	21.9	22.0	21.4	20.9
Julio	24.7	22.5	21.8	21.6	20.8
Agosto	24.5	22.9	21.7	22.1	21.4
Septiembre	24.7	23.0	21.8	21.9	21.0
coef. de correlación		-0.09	0.85	0.29	-0.46

Tabla 3: Resumen de periodos de control de la temperatura

Temperatura media mensual observada en la DHM y del periodo de control de los modelos analizados. unidades en °C

El contraste de los datos observados con el periodo de control de los modelos, establece que el modelo que mejor representa la temperatura media del área estudiada es el ECHAM5 con un 89% de correlación, seguido del CCSM4 con un coeficiente de correlación muy bajo 29%.

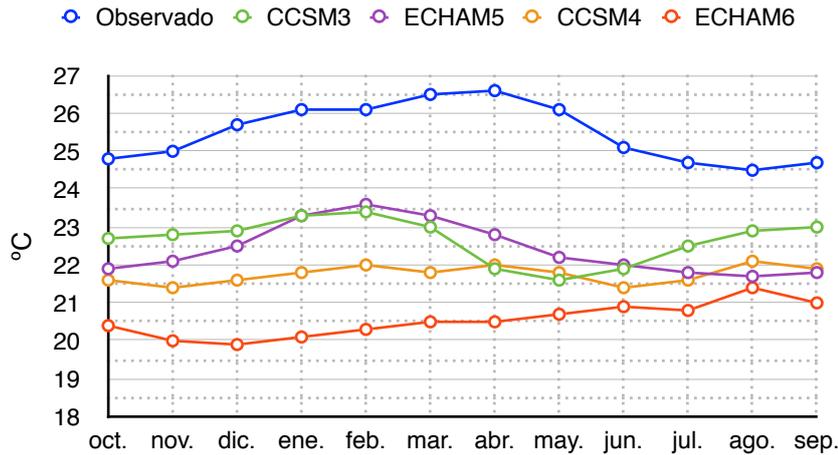


Figura 22: Contraste de la temperatura media mensual observada en la DHM con el periodo de control de los modelos.

5.1.2. Anomalías de escenarios SRES (AR4)

A continuación se resumen las anomalías de temperatura obtenidas a partir de los modelos utilizados del cuarto informe del IPCC en sus respectivos escenarios y periodos Debido a la resolución de los modelos utilizados, las anomalías son las mismas para las 2 cuencas de estudio.

MES	CCSM3			ECHAM5		
	SRES A1B	SRES B1	SRES A2	SRES A1B	SRES B1	SRES A2
Octubre	0.9	0.7	0.9	1.0	0.8	0.8
Noviembre	1.2	0.8	1.2	1.0	0.7	0.7
Diciembre	1.0	0.7	1.0	0.9	0.7	0.6
Enero	0.9	0.8	1.0	0.9	0.6	0.7
Febrero	0.9	0.7	1.0	0.8	0.7	0.7
Marzo	0.8	0.7	0.9	0.9	0.8	0.6
Abril	0.8	0.7	0.8	1.1	0.7	0.6
Mayo	0.8	0.6	0.8	1.2	0.7	0.7
Junio	0.7	0.5	0.6	1.1	0.8	0.7
Julio	0.9	0.6	0.9	1.1	0.7	0.8
Agosto	0.8	0.7	0.8	1.0	0.8	0.8
Septiembre	0.8	0.6	0.7	1.0	0.7	0.9

Tabla 4: Anomalías de temperatura mensual de los modelos del AR4 para el periodo 2010-2039.

Unidades en °C

Las anomalías reflejan la conceptualización de los escenarios, siendo el mejor escenario el SRES B1, seguido del SRES A1B y el escenario menos favorable SRES A2, incrementando la temperatura uno más que otro.

MES	CCSM3			ECHAM5		
	SRES A1B	SRES B1	SRES A2	SRES A1B	SRES B1	SRES A2
Octubre	1.7	1.0	1.6	2.0	1.6	1.7
Noviembre	1.9	1.3	1.9	1.9	1.5	1.6
Diciembre	1.7	1.2	1.7	1.8	1.4	1.6
Enero	1.7	1.1	1.6	1.8	1.5	1.5
Febrero	1.7	1.1	1.7	2.0	1.5	1.6
Marzo	1.7	1.2	1.7	2.0	1.7	1.7
Abril	1.8	1.1	1.7	2.1	1.9	1.8
Mayo	1.6	1.0	1.5	2.4	1.9	1.9
Junio	1.4	0.9	1.3	2.3	1.8	1.8
Julio	1.6	1.0	1.5	2.2	1.8	1.6
Agosto	1.6	1.1	1.6	2.1	1.7	1.6
Septiembre	1.6	1.0	1.5	1.9	1.6	1.6

Tabla 5: Anomalías de temperatura mensual de los modelos del AR4 para el periodo 2040-2069.

Unidades en °C

MES	CCSM3			ECHAM5		
	SRES A1B	SRES B1	SRES A2	SRES A1B	SRES B1	SRES A2
Octubre	2.0	1.3	2.8	3.3	2.3	3.5
Noviembre	2.3	1.5	3.1	3.4	2.2	3.5
Diciembre	2.2	1.3	2.9	3.2	2.1	3.3
Enero	2.3	1.4	2.9	3.1	2.1	3.4
Febrero	2.3	1.5	3.1	3.3	2.0	3.5
Marzo	2.3	1.6	3.1	3.3	2.2	3.5
Abril	2.3	1.4	3.1	3.3	2.4	3.6
Mayo	2.1	1.3	2.7	3.7	2.5	4.1
Junio	1.9	1.1	2.3	3.7	2.5	4.2
Julio	2.0	1.3	2.6	3.4	2.4	3.8
Agosto	2.1	1.3	2.7	3.1	2.3	3.5
Septiembre	2.0	1.3	2.7	3.1	2.2	3.4

Tabla 6: Anomalías de temperatura mensual de los modelos del AR4 para el periodo 2070-2099.

Unidades en °C

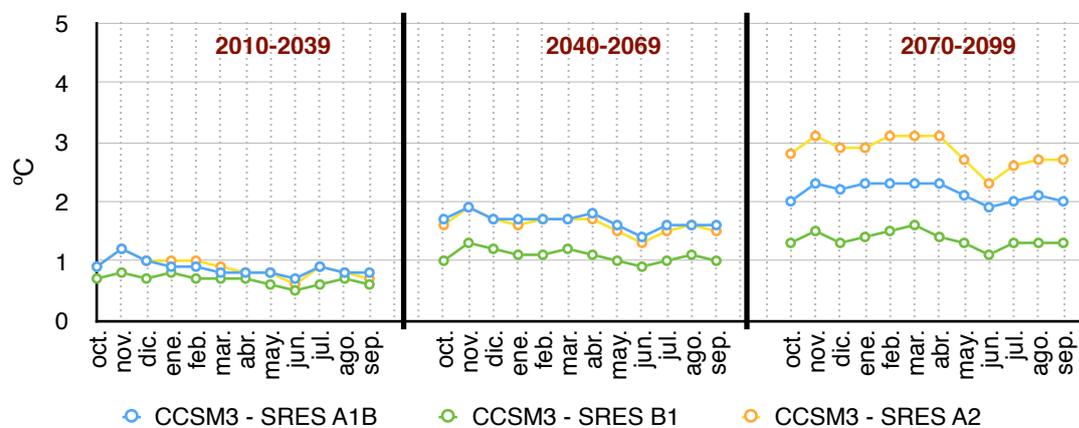


Figura 23: Contraste de las anomalías de temperatura del modelo CCSM3.

Anomalías a corto, mediano y largo plazo en los escenarios SRES A1B, SRES B1, SRES A2.

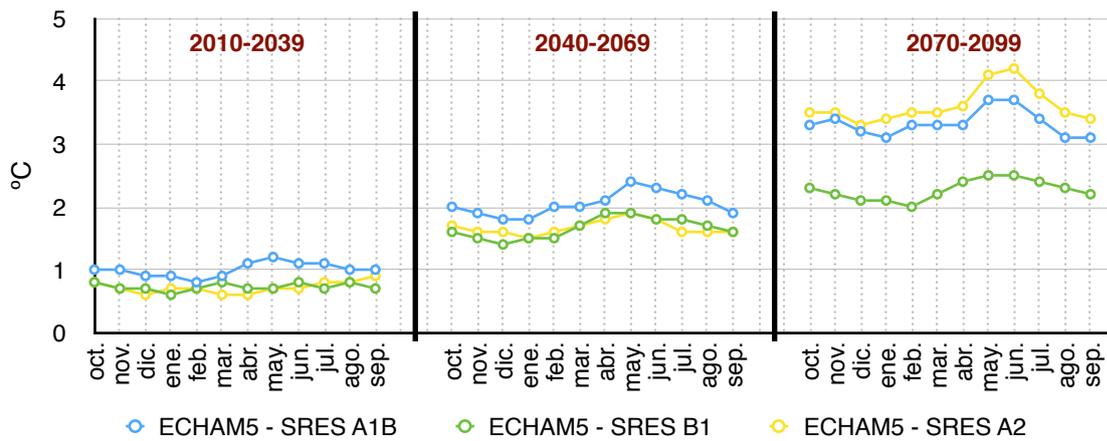


Figura 24: Contraste de las anomalías de temperatura del modelo ECHAM5.

Anomalías a corto, mediano y largo plazo en los escenarios SRES A1B, SRES B1, SRES A2

Las anomalías de precipitación y temperatura son las mismas para las dos cuencas debido a la resolución de los modelos. A continuación se detallan las anomalías de precipitación de los modelos del cuarto informe del IPCC.

Las anomalías de precipitación son distintas para cada modelo, mientras que el modelo CCSM3 refleja una disminución de la precipitación, el modelo ECHAM5 indica lo contrario.

MES	CCSM3			ECHAM5		
	SRES A1B	SRES B1	SRES A2	SRES A1B	SRES B1	SRES A2
Octubre	-18.1	-20.7	-20.7	20.7	13.0	10.4
Noviembre	-38.9	-38.9	-41.5	28.5	18.1	20.7
Diciembre	-5.2	-7.8	5.2	23.3	15.6	-23.3
Enero	-7.8	-5.2	-7.8	38.9	25.9	20.7
Febrero	-15.6	-13.0	-10.4	31.1	23.3	33.7
Marzo	-20.7	-13.0	-13.0	-28.5	-23.3	-2.6
Abril	-36.3	-36.3	-28.5	7.8	5.2	10.4
Mayo	-33.7	-23.3	-72.6	10.4	-7.8	-15.6
Junio	-49.2	-59.6	-57.0	18.1	-2.6	10.4
Julio	-18.1	-25.9	-23.3	2.6	2.6	2.6
Agosto	-2.6	-2.6	-2.6	5.2	-5.2	0.0
Septiembre	-5.2	-5.2	-5.2	0.0	2.6	-10.4

Tabla 7: Anomalías de precipitación mensual de los modelos del AR4 para el periodo 2010-2039.

Unidades en mm/mes

MES	CCSM3			ECHAM5		
	SRES A1B	SRES B1	SRES A2	SRES A1B	SRES B1	SRES A2
Octubre	-7.8	-15.6	-20.7	5.2	13.0	-15.6
Noviembre	-41.5	-33.7	-54.4	20.7	31.1	18.1
Diciembre	-13.0	-13.0	-7.8	20.7	15.6	46.7
Enero	-13.0	-7.8	-10.4	59.6	59.6	31.1
Febrero	-10.4	-18.1	-13.0	18.1	20.7	18.1
Marzo	-20.7	-7.8	-15.6	46.7	10.4	5.2
Abril	-25.9	-15.6	-23.3	13.0	46.7	-0.3
Mayo	-70.0	-67.4	-103.7	41.5	57.0	13.0
Junio	-82.9	-64.8	-95.9	18.1	38.9	10.4
Julio	-25.9	-15.6	-25.9	15.6	25.9	-0.3
Agosto	2.6	-2.6	0.0	0.0	7.8	-13.0
Septiembre	-10.4	-5.2	-7.8	-5.2	-10.4	-28.5

Tabla 8: Anomalías de precipitación mensual de los modelos del AR4 para el periodo 2040-2069.

Unidades en mm/mes

MES	CCSM3			ECHAM5		
	SRES A1B	SRES B1	SRES A2	SRES A1B	SRES B1	SRES A2
Octubre	-20.7	-10.4	-20.7	7.8	7.8	7.8
Noviembre	-51.8	-36.3	-46.7	44.1	20.7	54.4
Diciembre	-10.4	-20.7	7.8	114.0	59.6	90.7
Enero	-5.2	-10.4	5.2	82.9	59.6	101.1
Febrero	-2.6	-5.2	5.2	62.2	44.1	80.4
Marzo	5.2	2.6	0.0	31.1	-38.9	51.8
Abril	-28.5	-10.4	-31.1	57.0	51.8	51.8
Mayo	-116.6	-54.4	-140.0	38.9	28.5	70.0
Junio	-95.9	-70.0	-127.0	10.4	10.4	25.9
Julio	-23.3	-20.7	-28.5	13.0	5.2	36.3
Agosto	2.6	2.6	2.6	-13.0	-5.2	10.4
Septiembre	-5.2	-5.2	-5.2	-28.5	-18.1	-7.8

Tabla 9: Anomalías de precipitación mensual de los modelos del AR4 para el periodo 2070-2099.

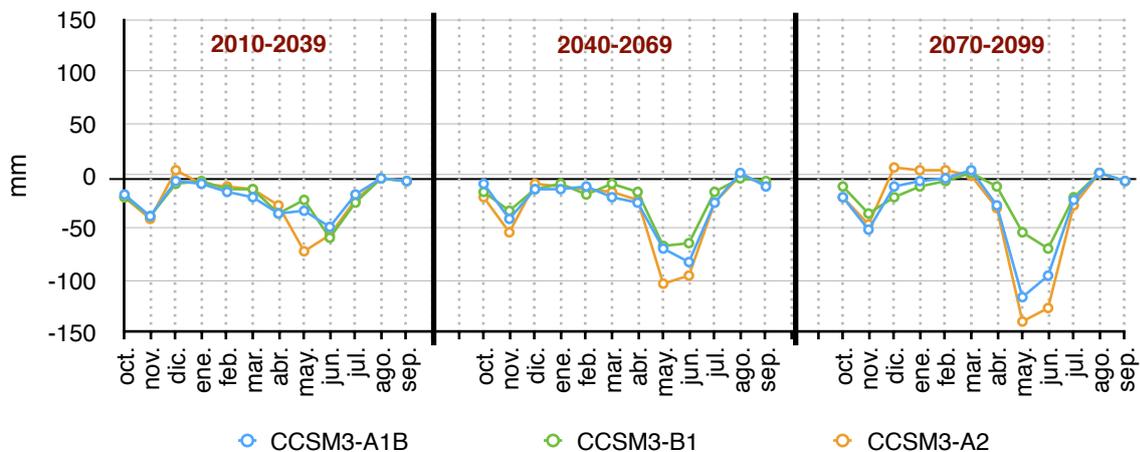


Figura 25: Contraste de las anomalías de precipitación del modelo CCSM3.

Anomalías a corto, mediano y largo plazo en los escenarios SRES A1B, SRES B1, SRES A2.

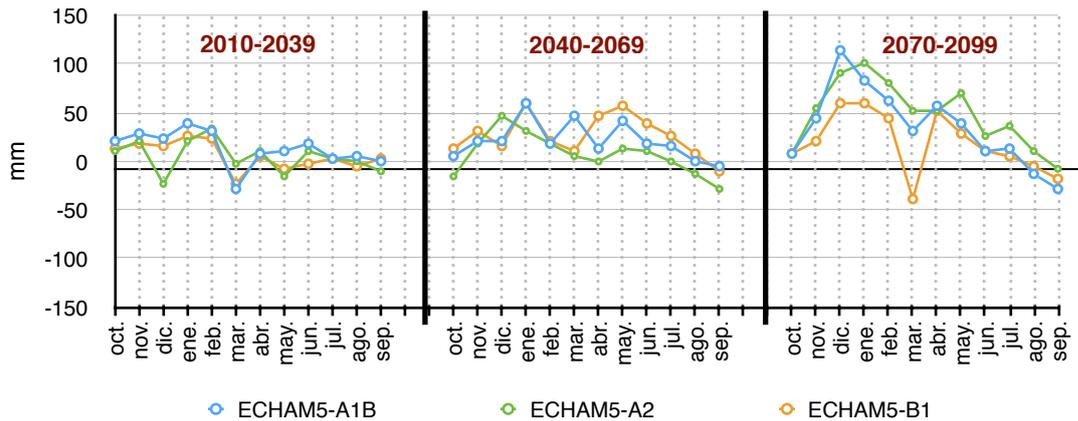


Figura 26: Contraste de las anomalías de precipitación del modelo ECHAM5.

Anomalías a corto, mediano y largo plazo en los escenarios SRES A1B, SRES B1, SRES A2. Anomalías de temperatura escenarios RCP (AR5)

5.1.3. Anomalías de escenarios RCP (AR5)

Las anomalías de temperatura para los escenarios RCP están representadas en dos partes según la ubicación del área de estudio. La primera para las coordenadas 0° - 1° Sur de latitud y 80° - 79° Oeste de longitud, y la segunda para las coordenadas 1° - 2° Sur de latitud y 80° - 79° Oeste de longitud. El motivo de estos dos resultados, es la resolución de los modelos, ya que presentan mejor resolución que los AR4.

A continuación se presentan las anomalías de temperatura para cada modelo analizado (CCSM4, ECHAM6) en los escenarios seleccionados (RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5). Cada tabla representa un periodo de tiempo diferente.

MES	CCSM4			ECHAM6		
	RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5	RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5
Octubre	0.9	0.9	0.9	1.0	1.1	1.2
Noviembre	1.0	0.9	1.1	1.1	1.1	1.2
Diciembre	1.0	1.0	1.1	1.1	1.0	1.2
Enero	1.0	1.1	1.2	1.2	1.0	1.2
Febrero	1.0	0.7	1.1	1.2	1.0	1.3
Marzo	0.9	1.1	1.1	1.0	1.0	1.2
Abril	1.0	1.0	1.1	1.0	1.1	1.3
Mayo	1.1	1.1	1.3	1.3	1.3	1.3
Junio	1.1	1.1	1.3	1.1	1.3	1.4
Julio	1.0	1.0	1.3	1.3	1.5	1.5
Agosto	1.0	1.0	1.1	1.3	1.3	1.4
Septiembre	0.8	0.8	0.9	1.2	1.2	1.4

Tabla 10: Anomalías de temperatura mensual de los modelos del AR5 para el periodo 2010-2039.

Latitud (0° S 1° S) Longitud (80° O 79° O). Unidades en °C

MES	CCSM4			ECHAM6		
	RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5	RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5
Octubre	0.8	1.3	1.8	1.5	1.9	2.5
Noviembre	1.2	1.5	2.1	1.4	1.9	2.5
Diciembre	1.2	1.5	2.0	1.3	1.8	2.5
Enero	1.3	1.4	2.0	1.3	1.9	2.4
Febrero	1.2	1.4	1.8	1.3	1.8	2.4
Marzo	1.2	1.4	2.1	1.4	2.0	2.4
Abril	1.3	1.5	2.1	1.4	2.0	2.4
Mayo	1.4	1.7	2.3	1.5	2.2	2.7
Junio	1.4	1.8	2.4	1.4	2.2	2.7
Julio	1.2	1.7	2.3	1.6	2.2	2.7
Agosto	1.2	1.5	2.2	1.5	2.2	2.6
Septiembre	0.9	1.3	1.6	1.5	2.0	2.6

Tabla 11: Anomalías de temperatura mensual de los modelos del AR5 para el periodo 2040-2069.

Latitud (0° S 1° S) Longitud (80° O 79° O). Unidades en °C

MES	CCSM4			ECHAM6		
	RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5	RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5
Octubre	0.9	1.6	2.9	1.3	2.0	3.7
Noviembre	1.2	1.8	3.3	1.3	2.1	3.9
Diciembre	1.1	1.8	3.2	1.3	2.0	3.8
Enero	1.1	1.8	3.1	1.3	2.0	3.9
Febrero	1.0	1.7	3.0	1.3	2.1	3.7
Marzo	1.2	1.8	2.9	1.3	2.0	3.8
Abril	1.1	1.9	3.3	1.4	2.1	3.8
Mayo	1.2	2.0	3.6	1.6	2.3	4.1
Junio	1.2	2.1	3.8	1.5	2.3	4.1
Julio	1.1	1.9	3.6	1.6	2.4	4.3
Agosto	1.2	1.7	3.3	1.6	2.2	4.0
Septiembre	0.9	1.5	2.6	1.5	2.1	3.6

Tabla 12: Anomalías de temperatura mensual de los modelos del AR5 para el periodo 2070-2099.

Latitud (0° S 1° S) Longitud (80° O 79° O). Unidades en °C

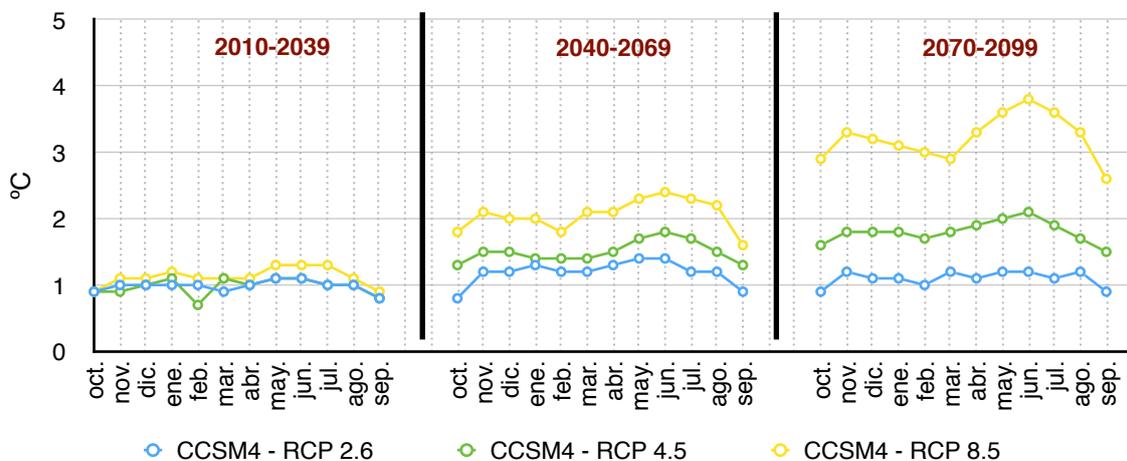


Figura 27: Contraste de las anomalías de temperatura del modelo CCSM4.

Anomalías a corto, mediano y largo plazo en los escenarios RCP2.6, RCP4.5 y RCP 8.5. Latitud (0° S 1° S) Longitud (80° O 79° O).

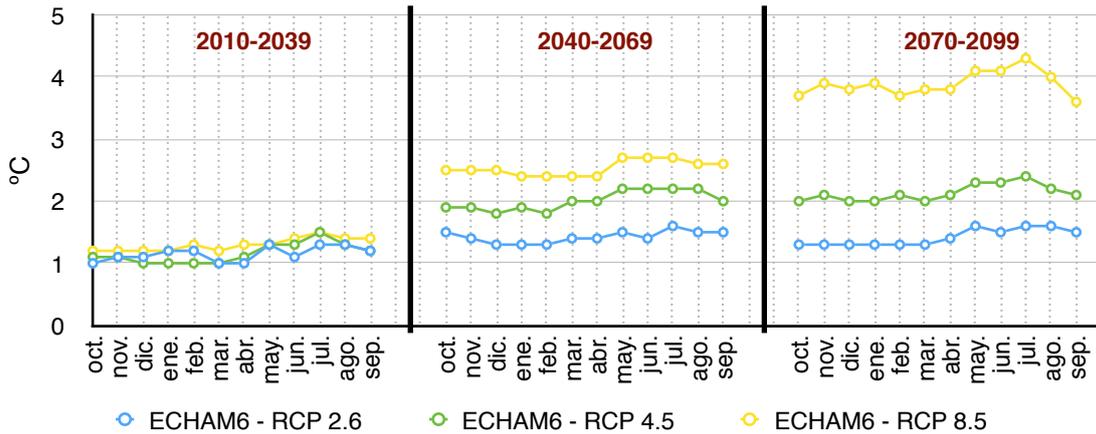


Figura 28: Contraste de las anomalías de temperatura del modelo ECHAM6

Anomalías a corto, mediano y largo plazo en los escenarios RCP2.6, RCP4.5 y RCP 8.5. Latitud (0°0 S 1°0 S) Longitud (80°0 O 79°0 O).

Estas anomalías presentadas se obtuvieron a partir de la diferencia entre la temperatura futura proyectada por los modelos y el periodo de control 1960-1990 de la serie observada que presentan los modelos.

Las anomalías de temperatura resultantes de los escenarios RCP tienen similitud con los escenarios SRES. Ambos escenarios concuerdan en que la temperatura se incrementará gradualmente de un periodo a otro.

Las anomalías de temperatura no varían significativamente de una cuenca a otra. Los incrementos de temperatura en los escenarios RCP en los dos modelos a corto plazo son de hasta 1.5°C, a medio plazo de 1°C a 3°C y a largo plazo hasta 5°C.

Al igual que las anomalías de temperatura, las anomalías de precipitación para los escenarios RCP se presentan en dos ubicaciones diferentes por la resolución que tienen los escenarios del AR5. Estas anomalías han sido calculadas en base a la proyección futura de los modelos para cada escenario en el periodo comprendido entre 2006 y 2100. Esta serie fue dividida en corto, mediano y largo plazo para ser contrastados con los periodos presentados en el AR4.

Las anomalías de precipitación, en los escenarios RCP al igual que en los escenarios SRES presentan incertidumbre, ya que si bien el modelo CCSM4 demuestra que la precipitación de febrero a mayo disminuye y el resto de meses se incrementa, el modelo ECHAM6 muestra un aumento generalizado (en todos los meses), existiendo menor incremento de junio a octubre.

MES	CCSM4			ECHAM6		
	RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5	RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5
Octubre	-17.2	-16.1	-22.4	-4.1	21.5	56.3
Noviembre	-3.8	-7.0	-16.4	36.7	15.3	48.8
Diciembre	-2.7	0.1	5.0	23.3	28.0	24.2
Enero	0.1	0.1	20.9	30.9	22.4	7.6
Febrero	3.8	12.8	11.2	2.2	34.4	-10.7
Marzo	-20.2	-22.1	-15.6	-8.9	-28.2	-23.9
Abril	-11.0	-20.9	-20.5	31.7	12.8	21.8
Mayo	-6.8	-25.7	-42.3	3.1	-2.3	17.6
Junio	21.5	38.1	23.4	17.2	-23.3	0.7
Julio	12.1	3.2	15.0	6.6	6.8	12.9
Agosto	7.4	9.5	4.4	12.6	3.8	-7.7
Septiembre	2.7	-3.9	5.2	12.1	31.0	22.0

Tabla 13: Anomalías de precipitación mensual de los modelos del AR5 para el periodo 2010-2039.

Latitud (0°0 S 1°0 S) Longitud (80°0 O 79°0 O). Unidades en mm/mes

MES	CCSM4			ECHAM6		
	RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5	RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5
Octubre	-27.0	-31.9	-31.4	23.5	32.0	33.8
Noviembre	6.0	12.4	-6.2	23.9	26.3	59.6
Diciembre	22.9	-13.3	28.5	31.9	50.3	67.3
Enero	3.2	30.6	43.3	43.9	47.8	54.1
Febrero	3.1	28.4	21.6	6.8	-12.5	29.0
Marzo	-15.4	-11.2	-4.6	13.3	16.8	40.4
Abril	-54.1	-45.9	-60.0	20.7	25.2	43.0
Mayo	-10.8	-19.6	-12.6	19.8	26.1	14.6
Junio	25.0	23.0	23.7	11.1	-8.1	-11.6
Julio	22.2	16.7	21.3	-0.1	21.3	6.9
Agosto	6.8	12.6	23.8	1.8	-16.4	-7.5
Septiembre	-6.8	2.4	-17.9	11.0	18.0	-2.3

Tabla 14: Anomalías de precipitación mensual de los modelos del AR5 para el periodo 2040-2069.

Latitud (0°0 S 1°0 S) Longitud (80°0 O 79°0 O). Unidades en mm/mes

MES	CCSM4			ECHAM6		
	RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5	RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5
Octubre	-17.4	-9.3	-57.4	32.7	35.0	31.2
Noviembre	-9.2	18.2	8.8	22.4	36.0	69.1
Diciembre	-2.4	-1.5	93.0	42.7	43.1	99.0
Enero	21.0	38.9	93.0	38.0	43.5	62.1
Febrero	21.1	52.9	27.0	59.0	19.4	63.4
Marzo	2.3	-21.3	16.4	-2.6	25.3	35.0
Abril	-58.9	-63.5	11.8	3.3	6.4	59.2
Mayo	-9.5	-19.9	25.4	5.1	43.3	76.4
Junio	22.8	7.4	99.2	-23.6	1.5	28.7
Julio	1.7	23.6	31.4	1.9	30.2	13.8
Agosto	23.5	19.1	32.0	-10.7	17.2	-22.9
Septiembre	16.2	9.8	-7.1	23.5	20.1	-14.5

Tabla 15: Anomalías de precipitación mensual de los modelos del AR5 para el periodo 2070-2099.

Latitud (0°0 S 1°0 S) Longitud (80°0 O 79°0 O). Unidades en mm/mes

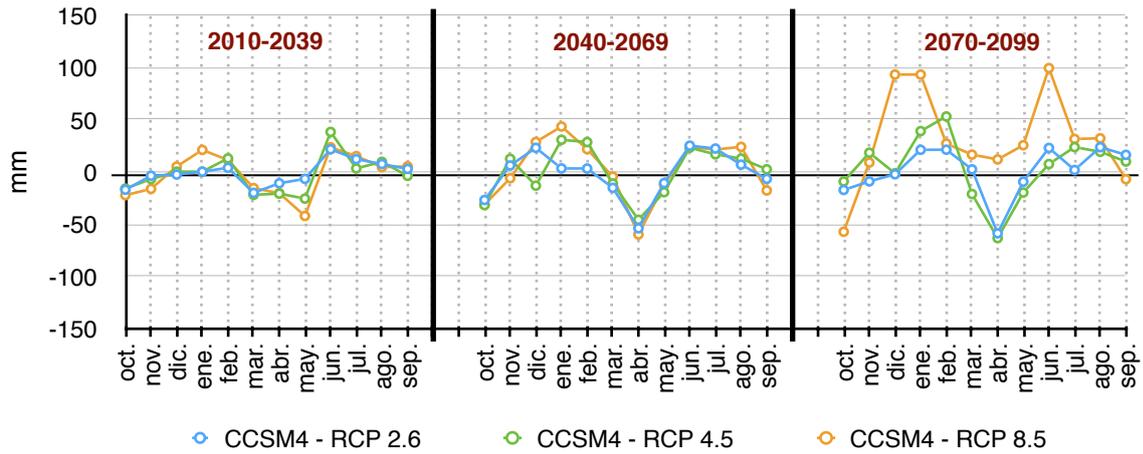


Figura 29: Contraste de las anomalías de precipitación del modelo CCSM4

Anomalía a corto, mediano y largo plazo en los escenarios RCP2.6, RCP4.5 y RCP 8.5. Latitud (0° S 1° S) Longitud (80° O 79° O)

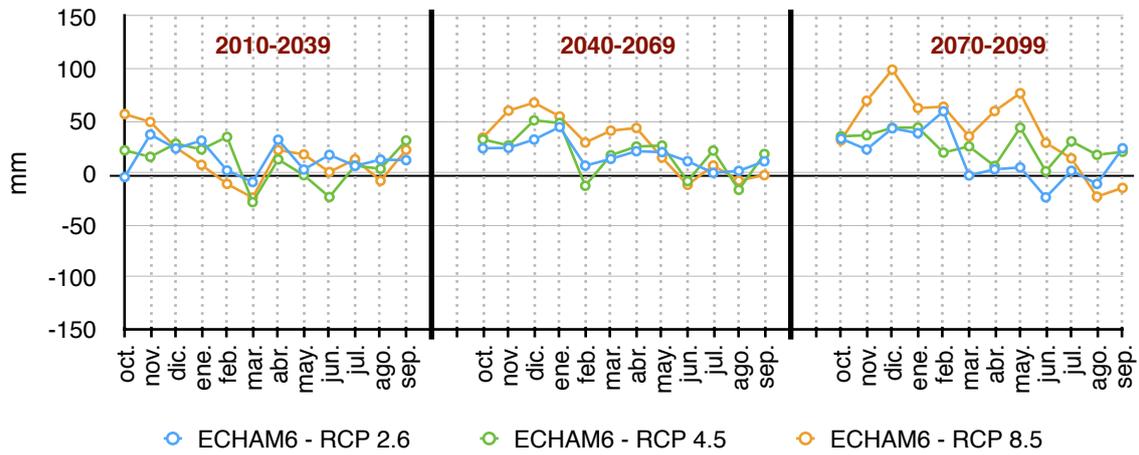


Figura 30: Contraste de las anomalías de precipitación del modelo ECHAM6

Anomalía a corto, mediano y largo plazo en los escenarios RCP2.6, RCP4.5 y RCP 8.5. Latitud (0° S 1° S) Longitud (80° O 79° O).

5.2. Resultados hidrológicos para el periodo histórico

En este apartado se detallan los resultados de las simulaciones hidrológicas realizadas, así como la presentación de los datos utilizados para dicha simulaciones.

5.2.1. Análisis de datos históricos

Para realizar la simulación hidrológica se requirieron datos históricos de precipitación, temperatura y caudales. Para ello se ingresó la información bruta de precipitación y temperatura, en el Modelo Distribuido PATRICAL, del cual se obtuvo una serie histórica media ponderada para cada área de estudio. Las estaciones que registraron información histórica se distribuyen de la siguiente manera:

- 35 estaciones que registran temperatura
- 89 estaciones que registran precipitación

Los registros históricos de temperatura no han sido muy frecuentes en el ámbito de estudio, exceptuado ocho estaciones que tienen un registro histórico de más de 30 años, el resto no han recopilado datos por más de 20 años ya sea por la fecha de puesta en marcha o por la paralización de estas.

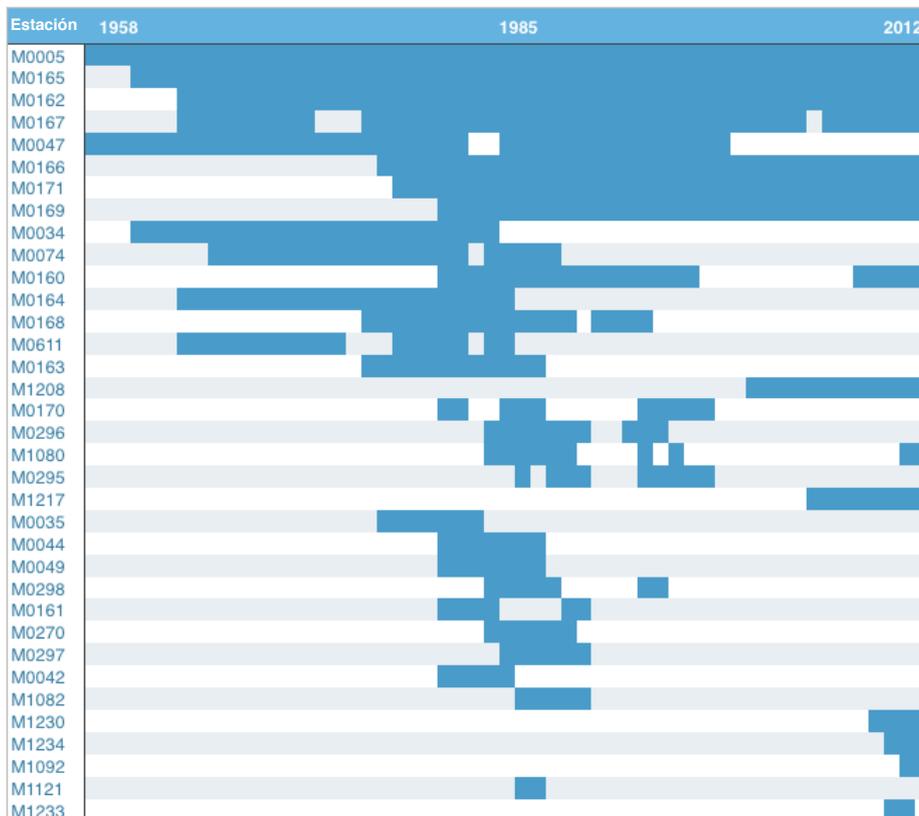


Figura 31: Cronograma gráfico de estaciones climatológicas que registraron temperatura en Manabí.

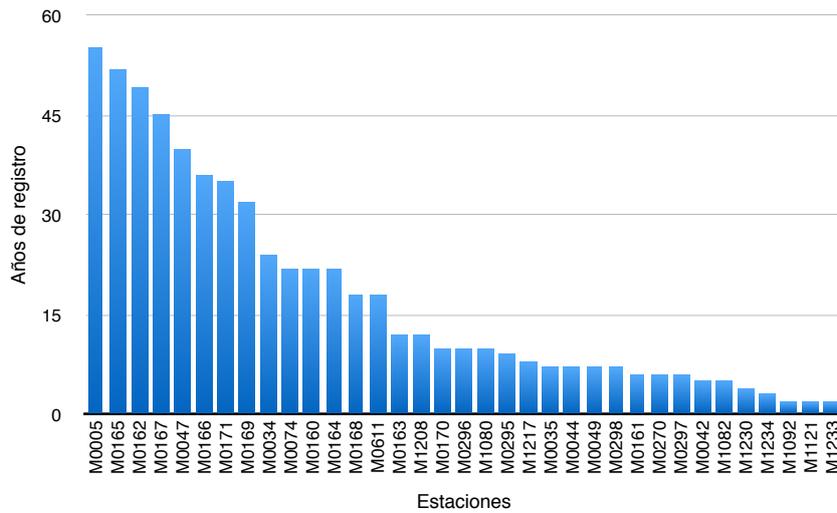


Figura 32: Número de años que la estaciones climatológicas registraron temperatura en Manabí.

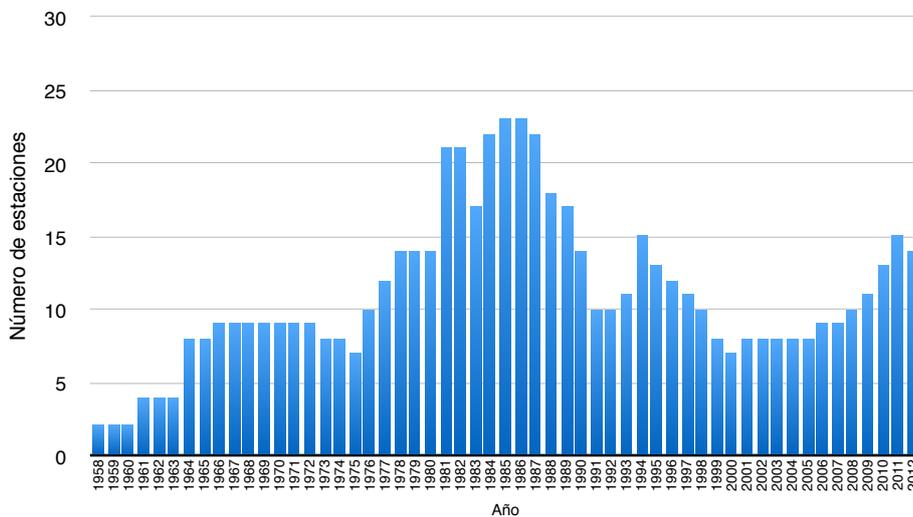


Figura 33: Número de estaciones por año que registraron temperatura en Manabí.

Los registros históricos de precipitación, son más abundantes que los registros de temperatura, ya que existen un mayor número de estaciones pluviométricas, las mismas que se encuentran distribuidas por todo el ámbito de estudio lo que hace que este tipo de información sea ideal para realizar las simulaciones con los modelos hidrológicos planteados. Al contar con un número de estaciones significativas, no se presenta un cronograma de la recolección histórica de datos pluviométricos, sin embargo se presenta el número de años que registró cada estación, resultando que aproximadamente el 30% de los registros son mayores a 30 años, un 15% entre 30 y 20 años y el 55% restante menores a 20 años.

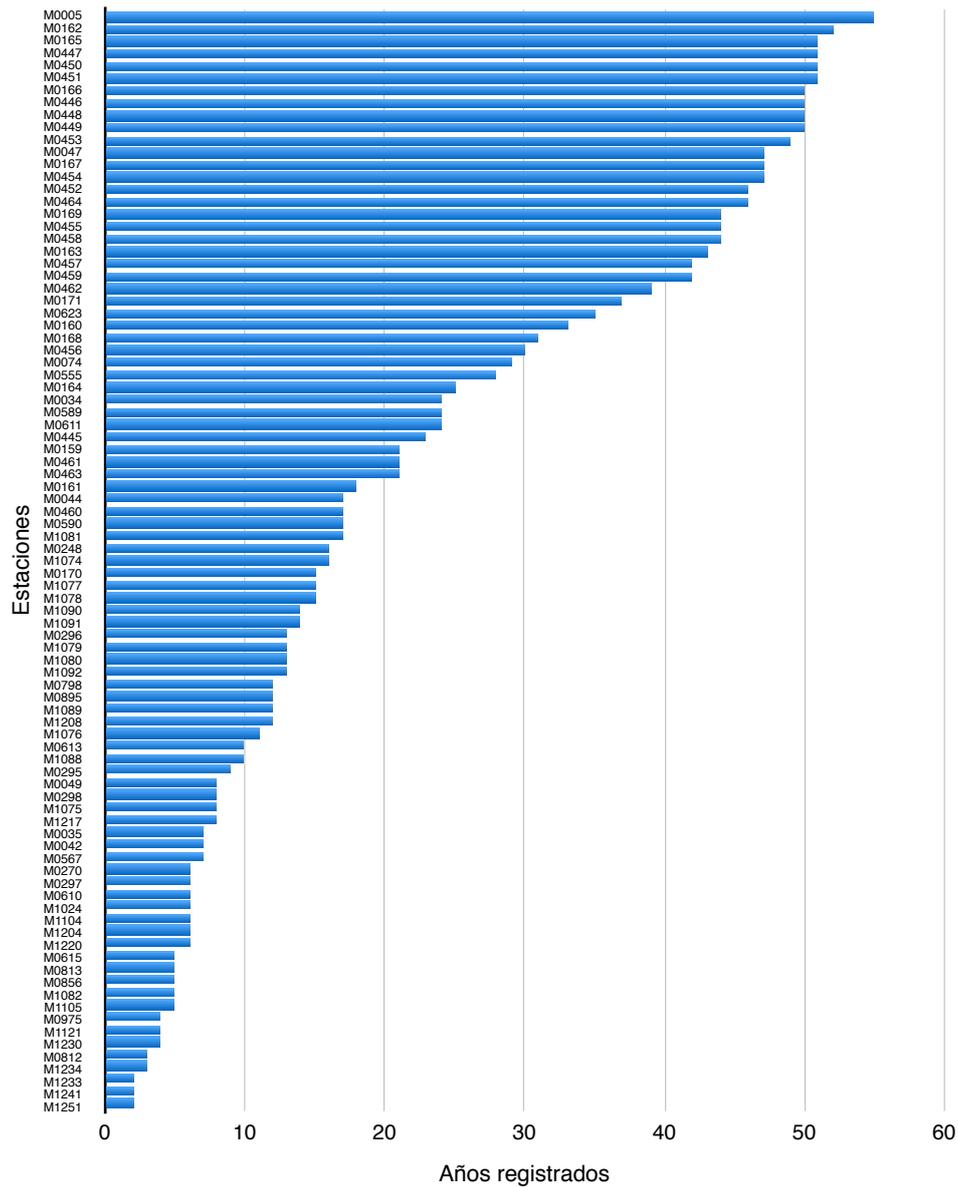


Figura 34: Número de años que registraron datos las estaciones pluviométricas en Manabí.

Una vez identificada la cantidad de datos de registro histórico mensual de precipitación y temperatura, se decidió que las simulaciones a realizar en los modelos hidrológicos estaría comprendida entre octubre 1964 y septiembre 2012, teniendo así 48 años de simulación lo que representa 576 meses. Esta decisión se basa en la cantidad de estaciones que registraron datos de temperatura y precipitación a partir de estos años; teniendo un mínimo de 7 estaciones y un máximo de 23; y un mínimo de 31 estaciones y un máximo de 56, respectivamente.

Para la calibración del modelo hidrológico además de ser necesaria la precipitación y la temperatura (cálculo de la ETP), también es necesario contar con registros históricos de aforos de caudales. En el ámbito de estudio se encuentran 2 estaciones

hidrológicas, que disponen de series discontinuas de datos históricos, razón por la cual solo se utilizaron series de años hidrológicos completos, es decir, que tengan 12 meses de registro. La serie histórica de aforo de caudales utilizada se muestra a continuación:

Año hidrológico	Meses aforados (%)	Aportación anual aforada (hm ³)
1964/65	100%	433.7
1965/66	100%	323.4
1966/67	100%	378.4
1968/69	100%	319.3
1971/72	100%	321.8
1972/73	100%	498.4
1973/74	100%	109.7
1974/75	100%	572.5
1975/76	100%	646.0
1976/77	100%	404.6
1980/81	100%	284.6
1981/82	100%	131.0
1985/86	100%	286.9
1986/87	100%	687.1
1987/88	100%	216.8
1988/89	100%	478.2
1989/90	100%	137.7

Tabla 16: Años hidrológicos completos de la estación hidrológica H229 en Calceta-Manabí
Unidades hm³

En la estación hidrológica H229, solo se disponían de 17 años de registros completos. Cabe indicar que en los periodos donde se produjo el fenómeno de El Niño, la estación no registró el año en su totalidad, debido a ello; no se consideró el evento en la calibración. Además para obtener el comportamiento en régimen natural de la cuenca estudiada, no se tomaron en cuenta los datos registrados a partir del año 1995, ya que desde este año hasta la actualidad el embalse La Esperanza se encuentra operativo.

La estación hidrológica H272, registró solamente 16 años completos. De igual manera que la estación anterior, en los años que se produjo el fenómeno de El Niño no se registraron datos en su totalidad, por ello no se consideró el evento en la calibración del modelo.

Año hidrológico	Meses aforados (%)	Aportación anual aforada (hm ³)
1983/84	100%	113.1
1984/85	100%	44.0
1985/86	100%	42.7
1986/87	100%	101.6
1987/88	100%	41.9
1988/89	100%	92.3
1989/90	100%	49.2
1992/93	100%	74.0
1993/94	100%	57.2
2004/05	100%	73.7
2005/06	100%	109.4
2006/07	100%	102.9
2007/08	100%	190.0
2008/09	100%	76.6
2009/10	100%	167.7
2010/11	100%	93.5

Tabla 17: Años hidrológicos completos de la estación hidrológica H272 en río Chico Manabí Unidades hm³

5.2.2. Modelo hidrológico Agregado de Témez

Para utilizar el modelo de Témez fue necesario calcular la ETP, para dicho cálculo se aplicaron 4 métodos diferentes (Holdridge, Penman Monteith, software CLIMWAT y Thornthwaite) para un año específico; esto con el fin de escoger el método más confiable, tomando siempre en consideración la disponibilidad de los datos. Los resultados obtenidos se muestran en la siguiente tabla:

Mes	Holdridge	Penman Monteith	CLIMWAT	Thornthwaite
enero	83	111	108	113
febrero	80	101	99	114
marzo	90	123	119	127
abril	88	119	115	134
mayo	74	98	91	140
junio	76	97	90	145
julio	80	100	97	141
agosto	75	110	106	136
septiembre	69	121	118	115
octubre	74	125	122	112
noviembre	76	113	108	110
diciembre	81	110	106	107

Tabla 18: Resultado del Cálculo de la ETP con diversos métodos. Unidades mm/mes

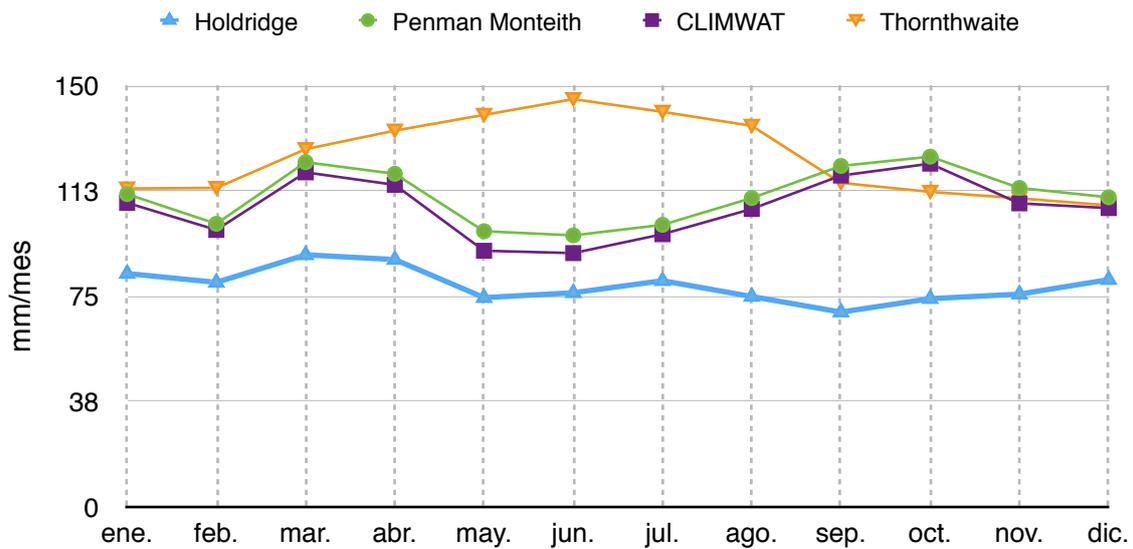


Figura 35: Contraste de los resultados de los diferentes métodos de cálculo de la ETP.

Una vez obtenido los resultados de los diversos métodos de cálculo, se decidió que el más idóneo debido a la escasez de datos que presentamos, es el método de Thornthwaite, ya que solo necesita la temperatura media mensual y datos de ubicación del ámbito de estudio.

Conocido el método de cálculo de la ETP, se realizó la calibración del Modelo de Témez para la subcuenca del río Carrizal (100101) con la estación de aforos H229 y para la subcuenca del río Chico (100201) con la estación H272, obteniendo así los siguientes valores de calibración:

Subcuenca	Hmáx (mm)	Imáx (mm)	Exced	Alfa
100101	96	90	30%	0.4
100201	272	160	30%	0.4

Tabla 19: Resultado de los parámetros de calibración del Modelo Hidrológico de Témez para la subcuenca del río Carrizal y para la subcuenca del río Chico

Posterior a la calibración se contrastaron los datos observados con los simulados en el modelo. El contraste de los datos de la subcuenca del río Carrizal a refleja a simple vista que la simulación realizada es muy similar a la observada. Basándose en los resultados indicativos del error se puede calificar (Calificación según Moriasi, et al., 2007) dicha simulación como muy buena En el contraste de la subcuenca del río Chico, se aprecia que la simulación también se adapta al periodo observado, en este caso se califica la simulación como satisfactoria. Con los parámetros de la tabla anterior los resultados de la aportación anual y de error fueron:

	100101	100201
A. aforado (hm³)	366.5	69.3
A. Simulado (hm³)	363.3	89.5
Superf (Km²)	519	449
<i>bias</i>	0	0
<i>bias relativo</i>	0%	0%
E	0.75	0.56
Rs	0.91	0.85
ISE	0.76	0.87
R	0.87	0.80

Tabla 20: Resultado de aportaciones y error de la simulación del Modelo Hidrológico de Témez para la subcuenca del río Carrizal y la subcuenca del río Chico.

Con las aportaciones mensuales simuladas se pudo adquirir las aportaciones anuales y obtener la aportación media anual, la misma que es de 376 hm³ para la subcuenca del río Carrizal y de 104 hm³ para la subcuenca del río Chico.

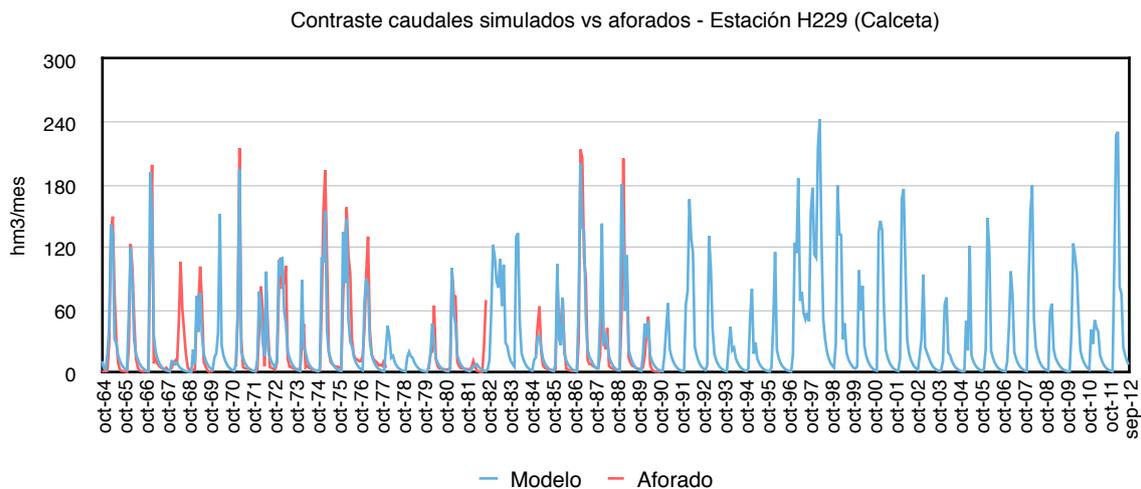


Figura 36: Contraste caudales simulados con caudales aforados subcuenca del río Carrizal. Unidades en hm³

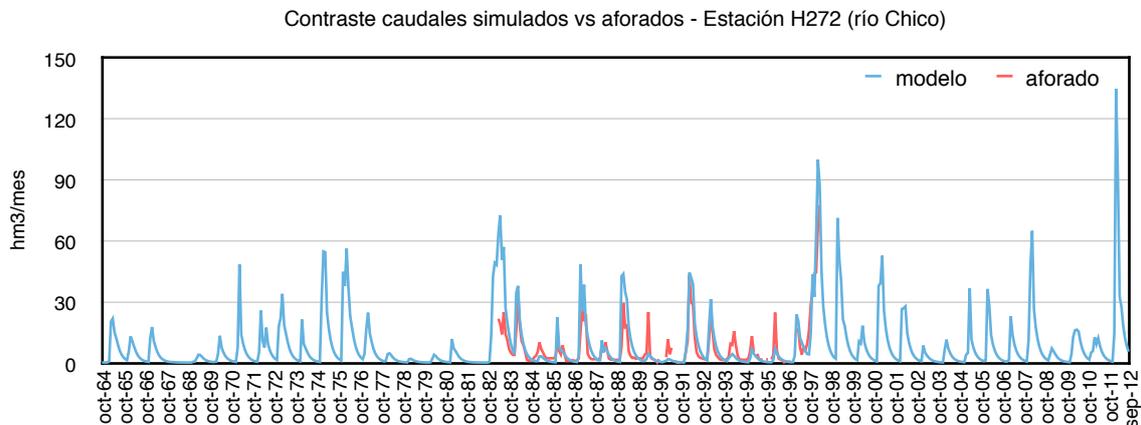


Figura 37: Contraste caudales simulados con caudales aforados subcuenca del río Chico. Unidades en hm³

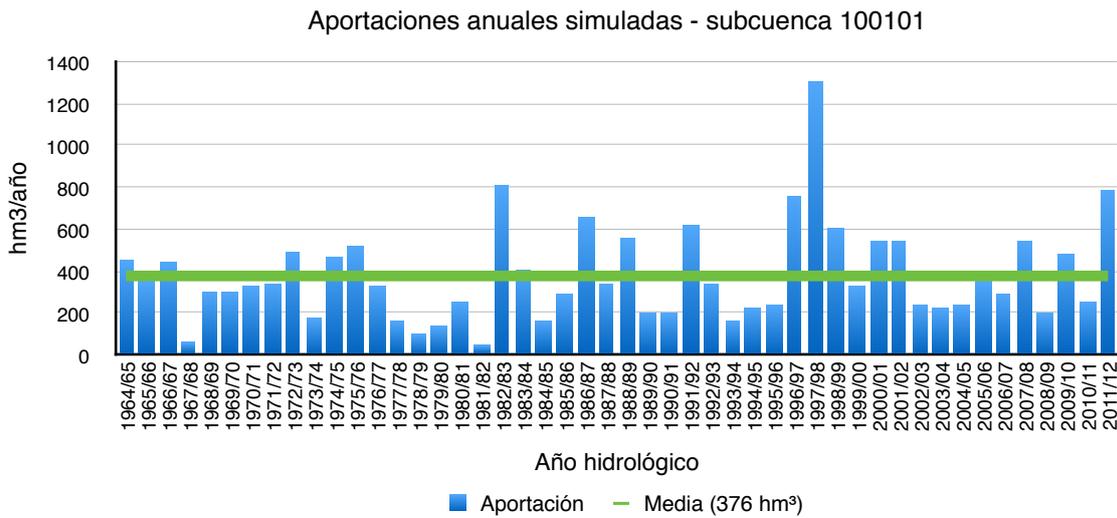


Figura 38: Aportaciones anuales simuladas para la subcuenca del río Carrizal.
Unidades en hm^3

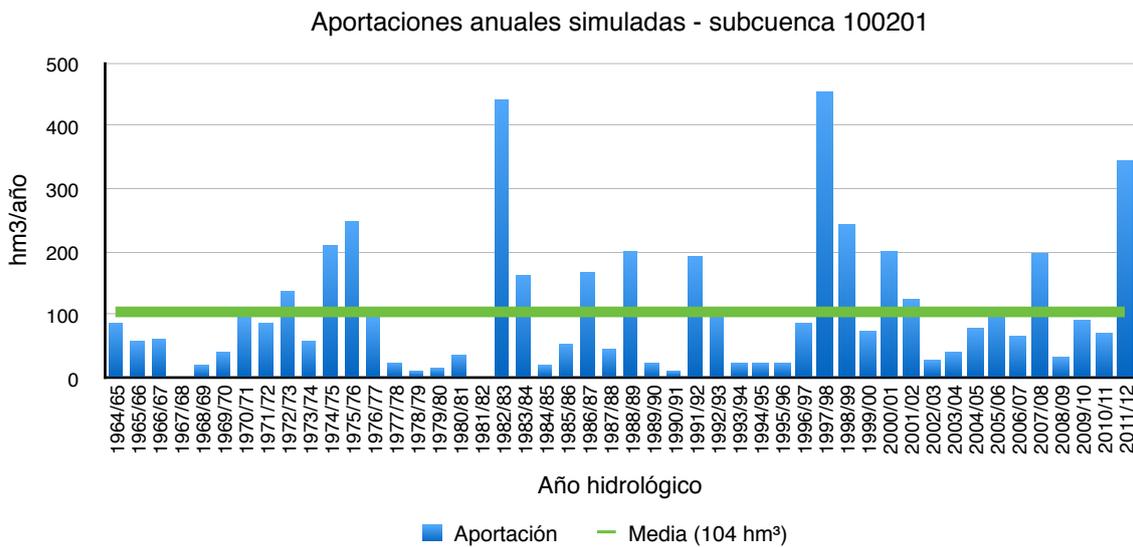


Figura 39: Aportaciones anuales simuladas para la subcuenca del río Chico.
Unidades en $hm^3/año$

Luego de haber realizado la calibración del modelo y al no disponer de datos aforados para la subcuenca cabecera del río Portoviejo se procedió a simular las aportaciones de esta subcuenca con los parámetros de calibración de la subcuenca del río Carrizal, esto bajo el criterio de similitud entre las subcuencas (condiciones geológicas y usos de suelo). Una vez realizada la simulación se estableció que la aportación media anual de la subcuenca es 227 hm^3 .

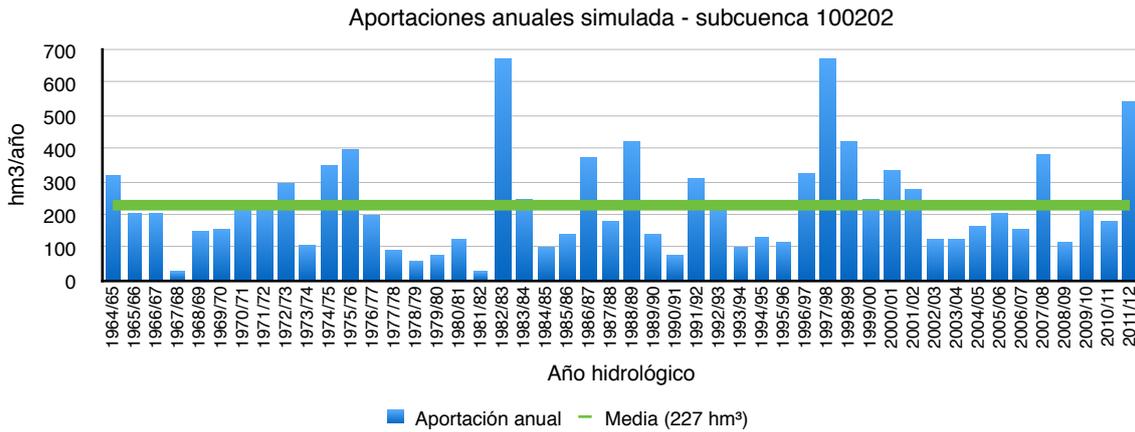


Figura 40: Aportaciones anuales simuladas para la subcuena cabecera del río Portoviejo.
Unidades en $hm^3/año$

También se establecieron las aportaciones medias mensuales. A continuación se muestra el régimen hidrológico simulado para cada subcuena.

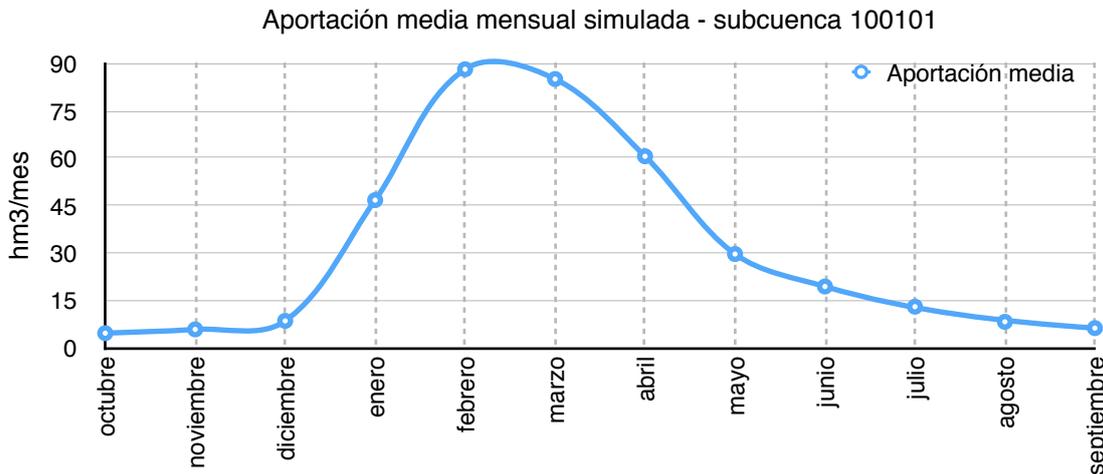


Figura 41: Aportación media mensual simulada subcuena del río Carrizal.
Unidades hm^3/mes

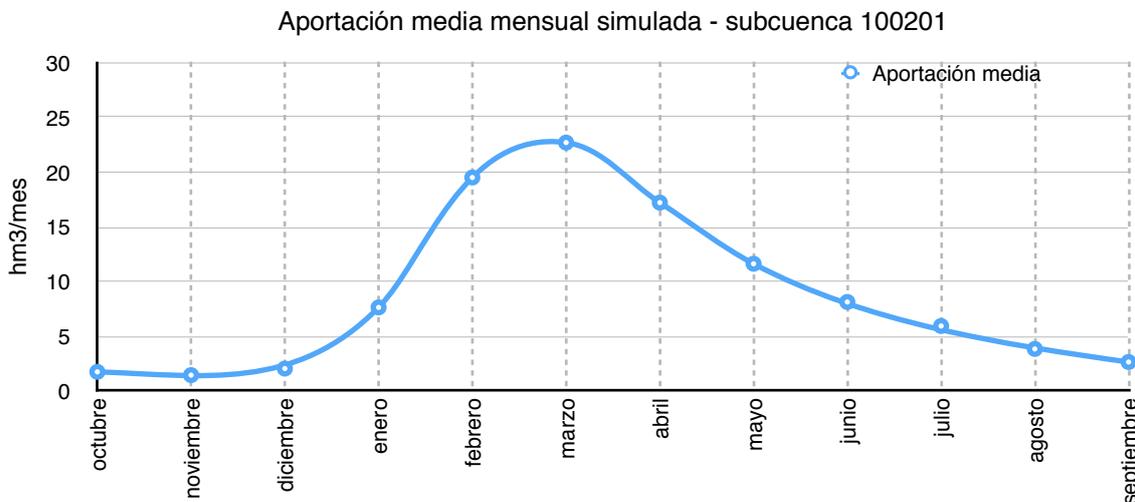


Figura 42: Aportación media mensual simulada subcuena del río Chico.
Unidades hm^3/mes

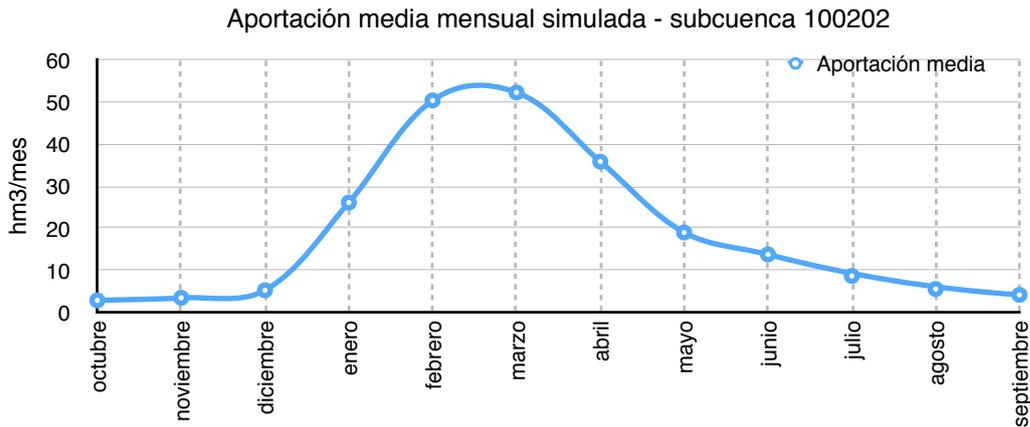


Figura 43: Aportación media mensual simulada subcuenca cabecera del río Portoviejo. Unidades hm^3/mes

El balance en el ciclo hidrológico es otro de los resultados obtenidos a partir de la simulación con el Modelo Agregado de Témez, El balance hídrico muestra como se distribuye la precipitación en el suelo, además estos balances reflejan que en la subcuenca cabecera del río Portoviejo y en la subcuenca del río Carrizal, la escorrentía superficial es mayor que la infiltración, todo lo contrario sucede en la subcuenca del río Chico, donde la infiltración es mayor que la escorrentía. Esto se debe a los valores de infiltración máxima con los que fue calibrado el Modelo Hidrológico Agregado de Témez.

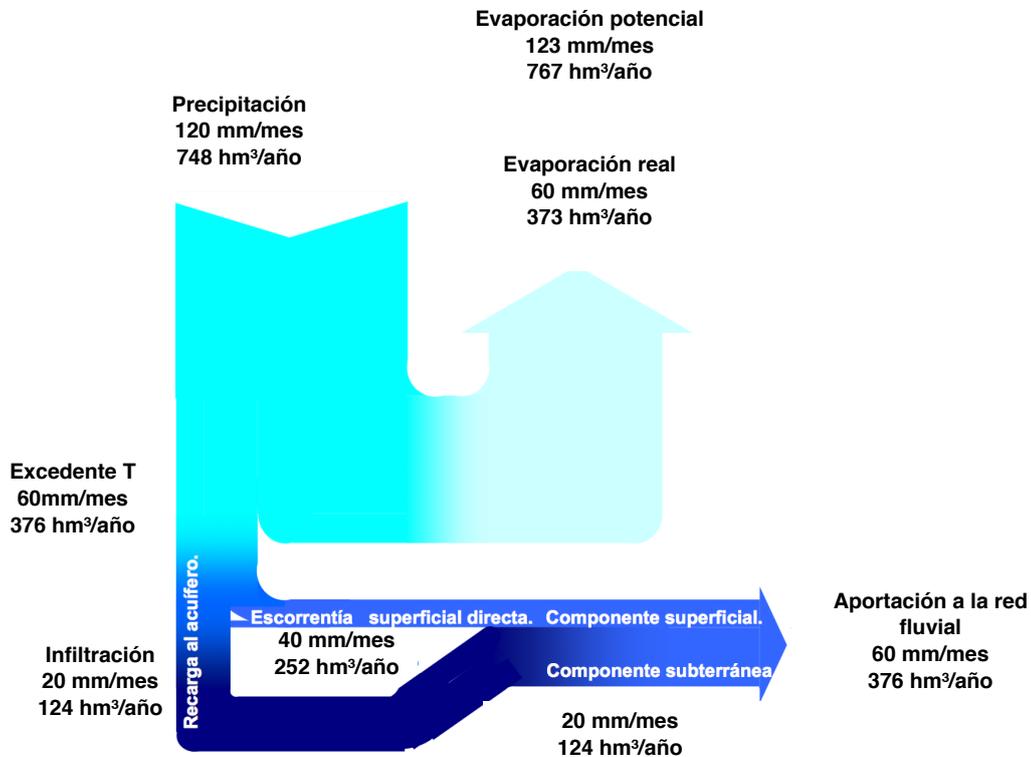


Figura 44: Balance hídrico en la subcuenca del río Carrizal.

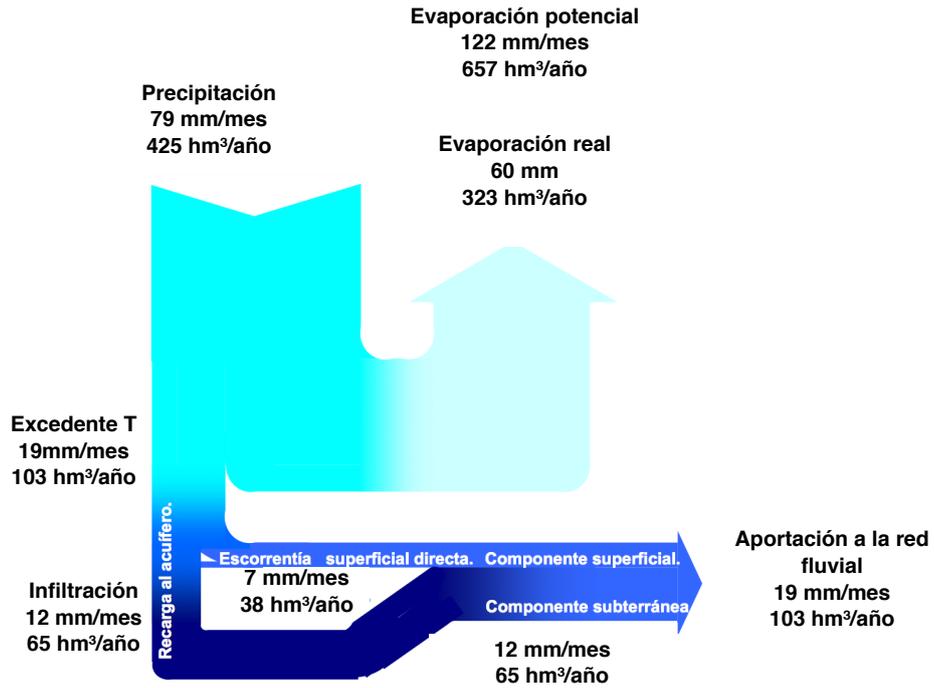


Figura 45: Balance hídrico en la subcuenca del río Chico.

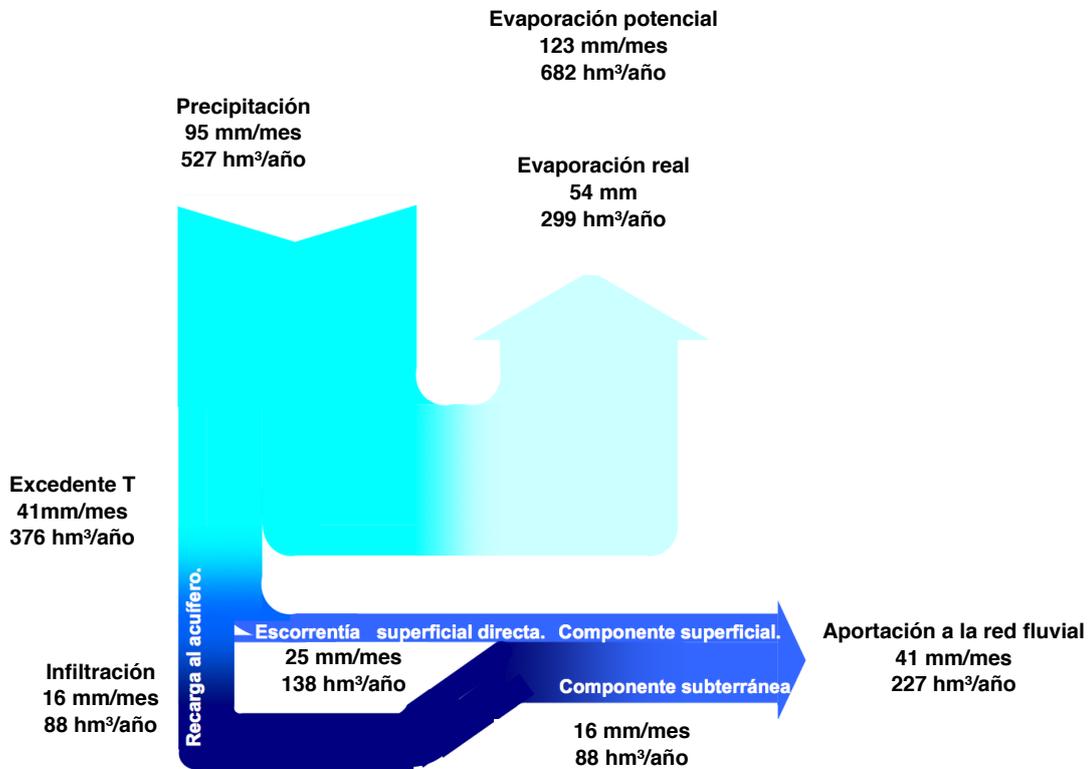


Figura 46: Balance hídrico en la subcuenca cabecera del río Portoviejo

5.2.3. Modelo Hidrológico Distribuido PATRICAL

El Modelo Distribuido PATRICAL fue utilizado para procesar las series mensuales de temperatura y precipitación. Como ya se ha mencionado, el modelo también genera series de aportaciones en cualquier punto de la red hídrica, pero para ello es necesario calibrar el modelo para poder obtener una serie con mejor relación a los datos observados. En esta investigación se generó una primera serie de aportaciones sin calibrar el modelo PATRICAL, para contrastarlas con las series simuladas en el Modelo Agregado de Témex, obteniendo resultados favorables.

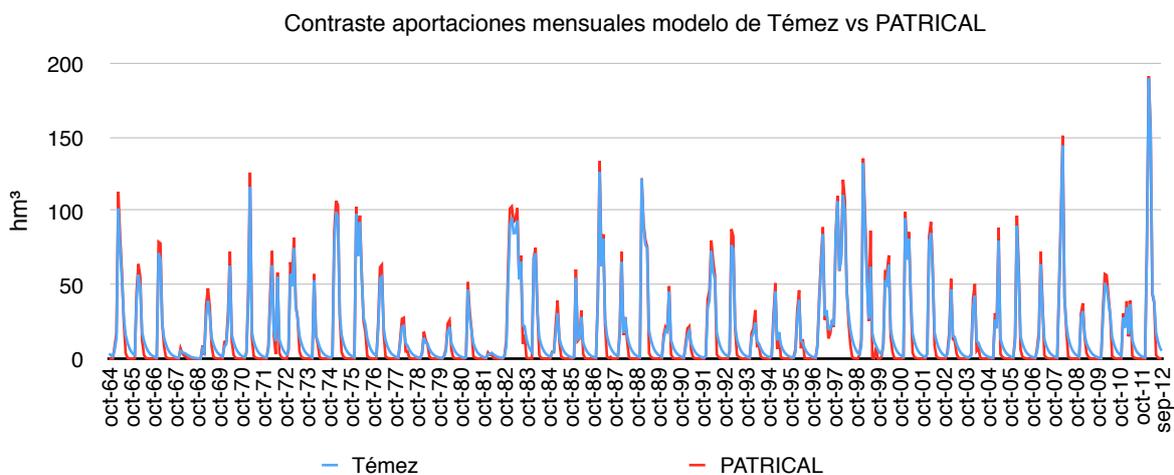


Figura 47: *Contraste aportaciones mensuales del Modelo Agregado de Témex con PATRICAL en la subcuenca del río Chico. Unidades en hm^3/mes .*

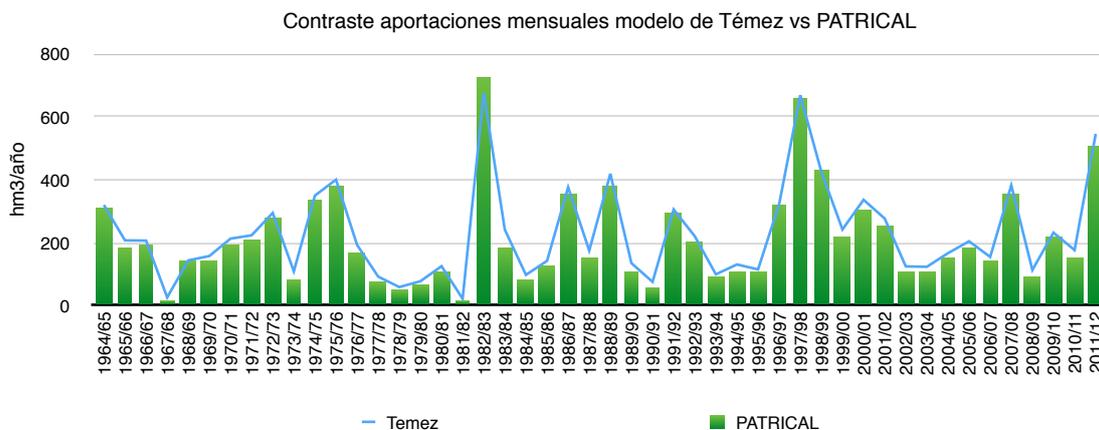


Figura 48: *Contraste aportaciones anuales del Modelo Agregado de Témex con PATRICAL en la subcuenca del río Chico. Unidades en $hm^3/año$.*

5.3. Evaluación del efecto del cambio climático en el ciclo hidrológico

Para la evaluación del efecto de cambio climático se introdujeron las anomalías de precipitación y temperatura en las simulaciones realizada con el Modelo de Témez, teniendo como resultado una nueva simulación por cada escenario y periodo para cada modelo.

5.3.1. Efecto en las aportaciones

Las aportaciones, fue lo primero que se observó después de realizar la simulación bajo el contexto de cambio climático. En las tablas y figuras siguientes se resumen los porcentajes de reducción o aumento de aportaciones para cada subcuenca.

Periodo	AR4 CCSM3			AR5 CCSM4			AR4 ECHAM5			AR5 ECHAM6		
	SRES A1B	SRES B1	SRES A2	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 8.5	SRES A1B	SRES B1	SRES A2	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 8.5
2010-2039	-18%	-15%	-17%	-8%	-8%	-7%	3%	0%	3%	2%	0%	-4%
2040-2069	-24%	-17%	-24%	-12%	-7%	-8%	7%	10%	0%	4%	1%	8%
2070-2099	-24%	-16%	-28%	-6%	-7%	8%	13%	5%	16%	6%	4%	11%

Tabla 21: Cambios en las aportaciones en la subcuenca del río Carrizal.

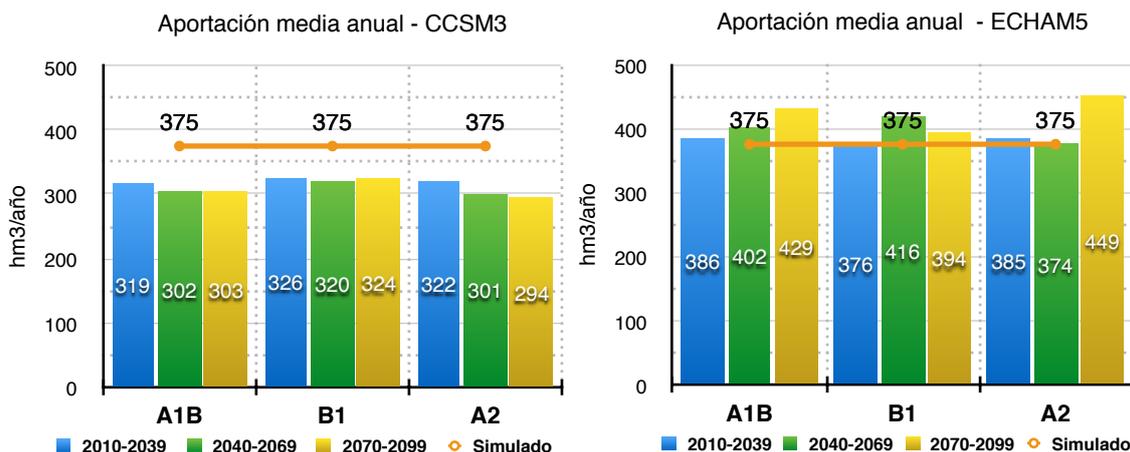


Figura 49: Cambios en las aportaciones en la subcuenca del río Carrizal bajo escenarios de cambio climático SRES.

Unidades en $hm^3/año$.

Las aportaciones en la subcuenca del río Carrizal en los escenarios SRES, con el modelo CCSM3 disminuyen gradualmente a corto, medio y largo plazo en todos los escenarios, teniendo un pequeño incremento en cada periodo pero ninguno

significativo que resaltar; con el modelo ECHAM5 ocurre lo opuesto, las aportaciones aumentan gradualmente en el escenario A1B; en el B1 también se incrementan, sin embargo en el último periodo se observa un descenso de estas, pero se mantienen por encima de las aportación media; en el escenario A2 a inicios de siglo se presenta un aumento en la aportación disminuyendo un poco a medio plazo, en tanto a finales de siglo se aprecia un aumento considerable en este escenario.

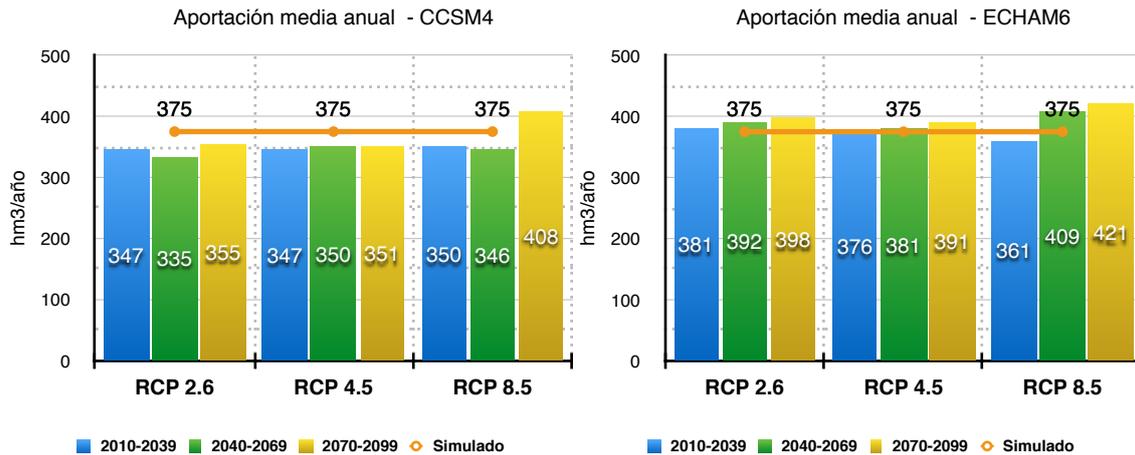


Figura 50: Cambios en las aportaciones en la subcuenca del río Carrizal bajo escenarios de cambio climático RCP.

Unidades en $hm^3/año$.

En los escenarios RCP, el modelo CCSM4 muestra una disminución en las aportaciones siendo estas menores al 12% variando su intensidad de un escenario a otro. El modelo ECHAM6 refleja un aumento de las aportaciones no mayores al 11%.

El efecto del cambio climático en la subcuenca del río Chico se presenta a continuación.

Periodo	AR4 CCSM3			AR5 CCSM4			AR4 ECHAM5			AR5 ECHAM6		
	SRES A1B	SRES B1	SRES A2	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 8.5	SRES A1B	SRES B1	SRES A2	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 8.5
2010-2039	-35%	-28%	-31%	-17%	-19%	-18%	4%	0%	6%	16%	17%	10%
2040-2069	-46%	-32%	-46%	-33%	-21%	-27%	12%	15%	-2%	22%	22%	27%
2070-2099	-41%	-27%	-48%	-20%	-22%	5%	0%	6%	24%	15%	34%	38%

Tabla 22: Cambios en las aportaciones en la subcuenca del río Chico.

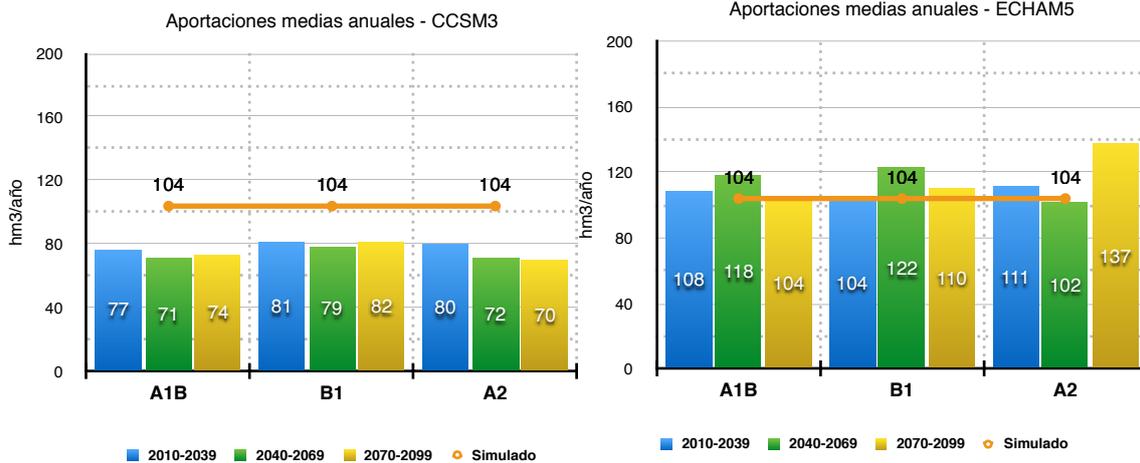


Figura 51: Cambios en las aportaciones en la subcuenca del río Chico bajo escenarios de cambio climático SRES.

Unidades en $hm^3/año$.

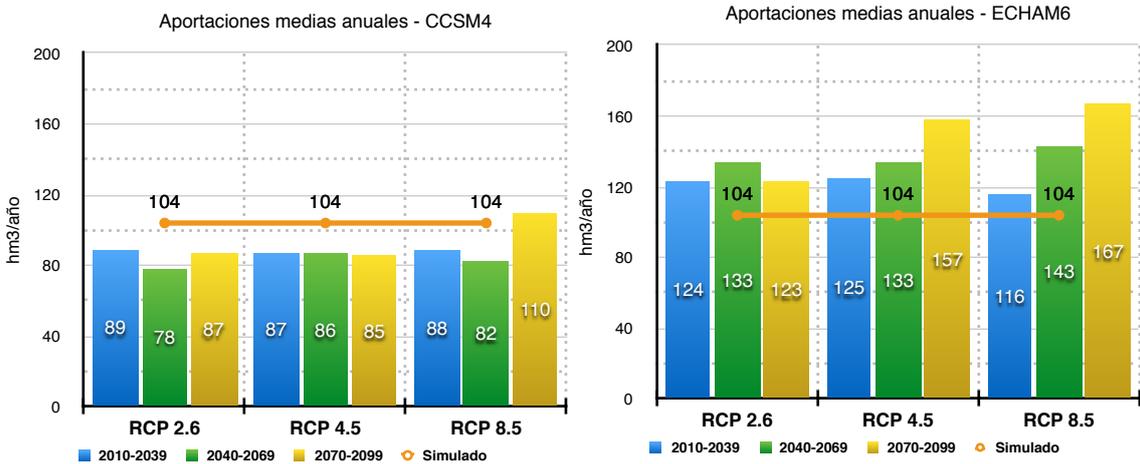


Figura 52: Cambios en las aportaciones en la subcuenca del río Chico bajo escenarios de cambio climático RCP.

Unidades en $hm^3/año$.

De las gráficas anteriores se observa que las aportaciones para la subcuenca del río Chico, con los modelos CCSM3 y el CCSM4 tienden a reducirse sin un patrón definido, puesto que todo depende de las variaciones existentes en las anomalías de precipitación y temperatura; para los modelos ECHAM5 y ECHAM6 las aportaciones se incrementarán, excepto en el periodo 2040 - 2069 en el escenario A2 (ECHAM5), donde se presenta una disminución. También se observa que en el escenario A1B (ECHAM5) en el periodo 2070 - 2099, las aportaciones se mantienen.

El incremento de las aportaciones en la subcuenca del río Chico, son más representativas en el modelo ECHAM6 que en el ECHAM5.

Periodo	AR4 CCSM3			AR5 CCSM4			AR4 ECHAM5			AR5 ECHAM6		
	SRES A1B	SRES B1	SRES A2	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 8.5	SRES A1B	SRES B1	SRES A2	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 8.5
2010-2039	-23%	-19%	-21%	-10%	-12%	-11%	4%	1%	4%	13%	13%	10%
2040-2069	-29%	-21%	-29%	-19%	-12%	-14%	11%	14%	2%	17%	19%	22%
2070-2099	-27%	-18%	-30%	-13%	-14%	11%	0%	9%	24%	12%	26%	32%

Tabla 23: Cambios en las aportaciones en la subcuenca cabecera del río Portoviejo.

Las aportaciones en la subcuenca cabecera del río Portoviejo, presentadas en el modelo CCSM3 y CCM4, tienden a disminuir en todos los escenarios y periodos planteados. Una situación opuesta reflejan los modelos ECHAM5 y ECHAM6 (incremento de las aportaciones), excepto en el periodo 2070 - 2099 (escenario A1B - ECHAM5) ya que las aportaciones se mantienen.

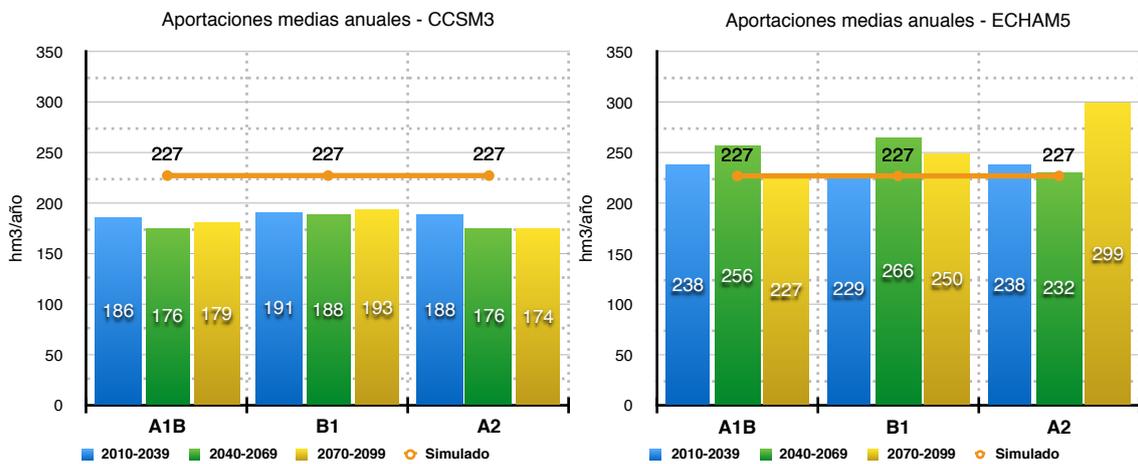


Figura 53: Cambios en las aportaciones en la subcuenca cabecera del río Portoviejo bajo escenarios de cambio climático SRES.

Unidades en $hm^3/año$

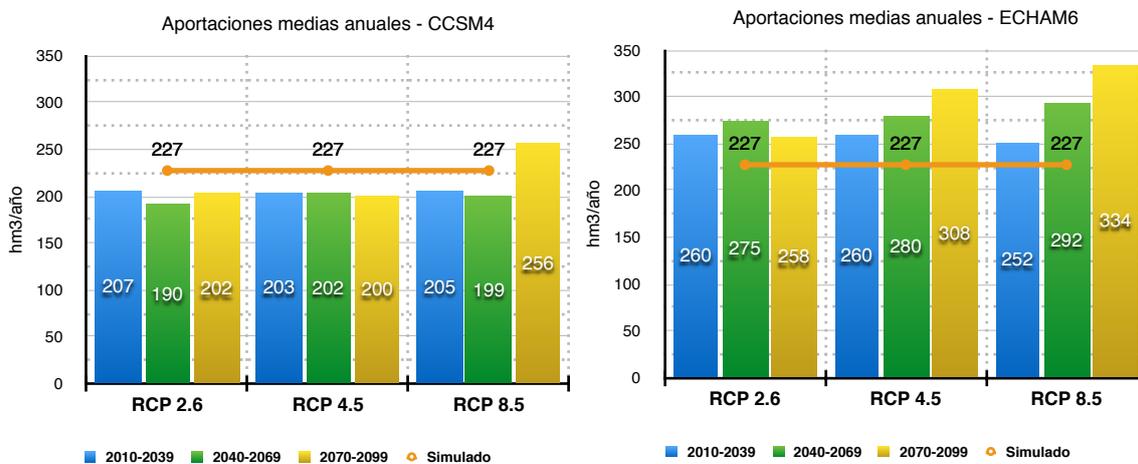


Figura 54: Cambios en las aportaciones en la subcuenca cabecera del río Portoviejo bajo escenarios de cambio climático RCP.

Unidades en $hm^3/año$

5.3.2. Efecto en el balance hidrológico

Para evaluar el efecto del cambio climático en el ciclo hidrológico se analizaron las variables del mismo (precipitación, ETP evaporación real). También se calcularon las necesidades hídricas para cada modelo con su respectivo escenario y periodo.

La precipitación es una de las variables directamente afectadas por el cambio climático. A continuación se detallan los cambios presentados en la misma, en una de las subcuencas del ámbito de estudio (subcuenca del río Carrizal).

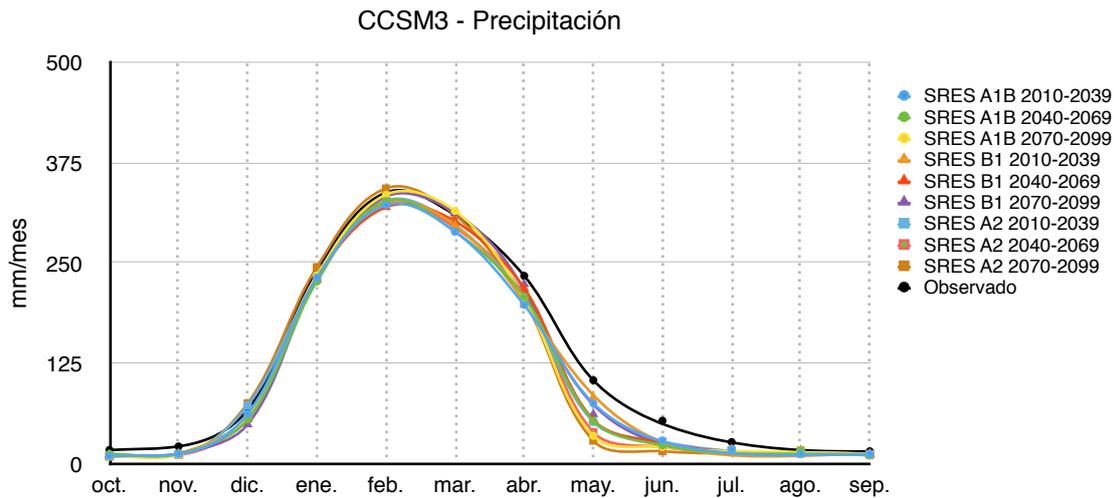


Figura 55: Cambios en el régimen de precipitaciones en la subcuenca del río Carrizal con el modelo CCSM3. Unidades en mm/mes

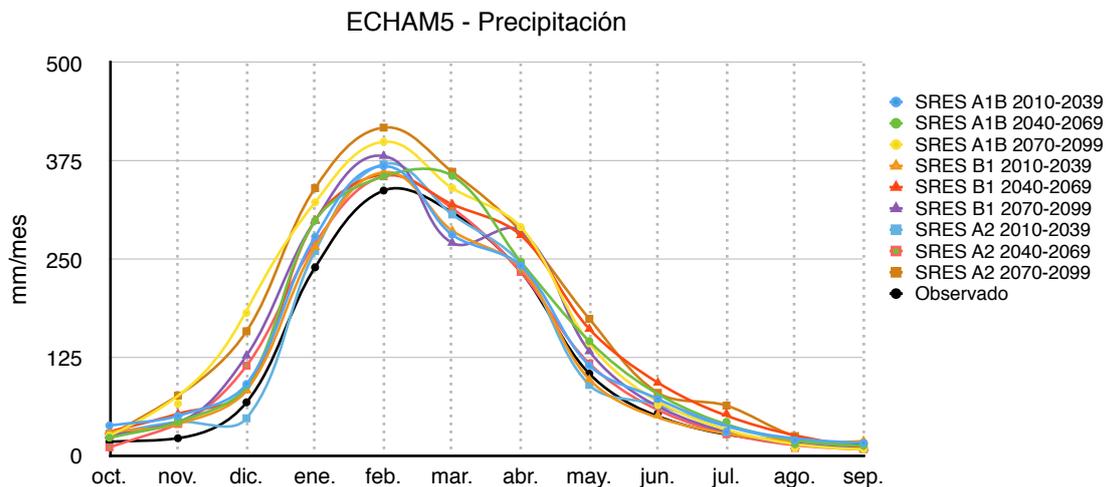


Figura 56: Cambios en el régimen de precipitaciones en la subcuenca del río Carrizal con el modelo ECHAM5. Unidades en mm/mes

En los escenarios SRES, según el modelo CCSM3 la precipitación disminuye con más intensidad de mayo a julio, esto se debe a que las anomalías de este modelo presenta una tendencia negativa más pronunciada en estos meses. El modelo ECHAM5, tiende

a incrementar la precipitación en la época húmeda 100 mm y en la época seca 50 mm, siendo este último favorable para la disponibilidad de agua.

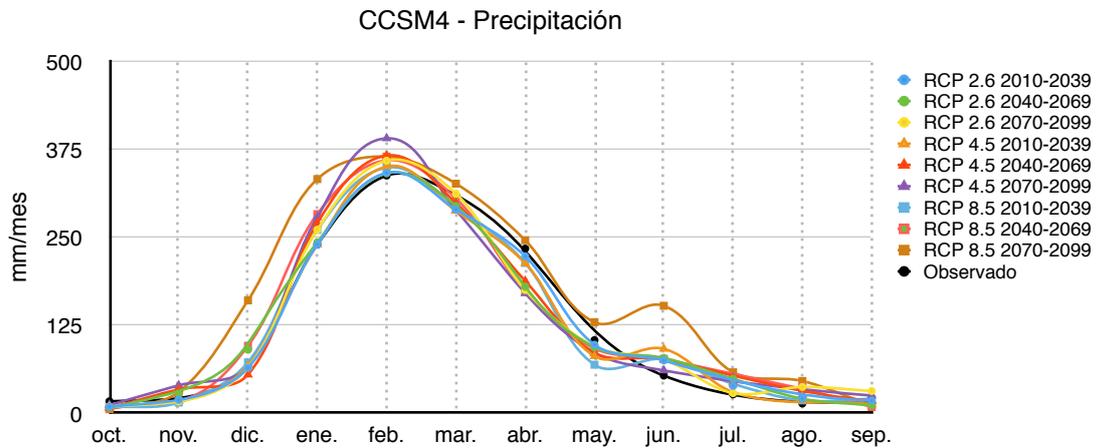


Figura 57: Cambios en el régimen de precipitaciones en la subcuenca del río Carrizal con el modelo CCSM4. Unidades en mm/mes

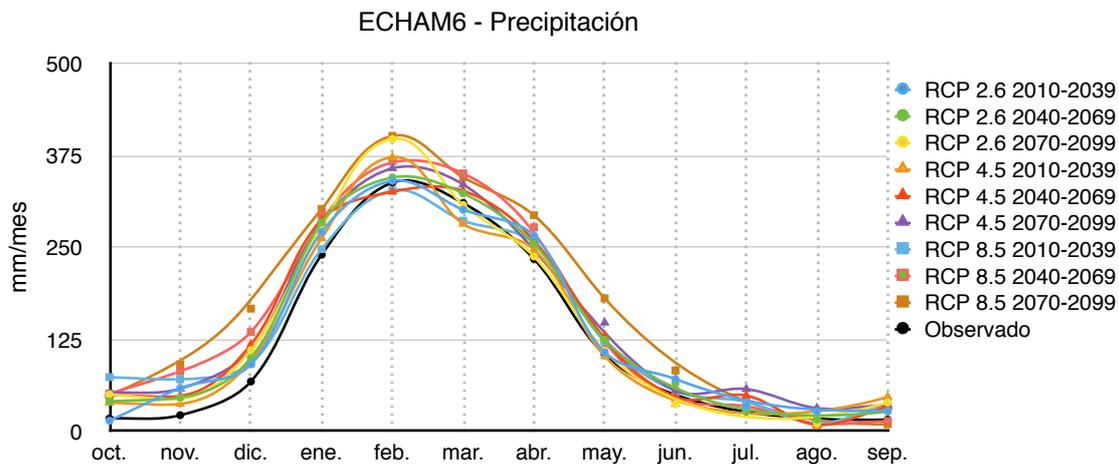


Figura 58: Cambios en el régimen de precipitaciones en la subcuenca del río Carrizal con el modelo ECHAM6. Unidades en mm/mes

En los escenarios RCP el modelo CCSM4, tiende a incrementar la precipitación de junio a febrero y a disminuirla de marzo a mayo. Por su parte el modelo ECHAM6 presenta tendencias de incremento de la variable en todos los meses del año, excepto el mes de marzo que muestra una disminución en el escenario RCP 8.5.

Todos los modelos indican que la temperatura tiende a aumentar. Por lo tanto considerando que la ETP depende directamente de la temperatura se establece que a medida que esta aumenta, también lo hace la ETP.

En contraste la evaporación depende tanto de la precipitación como de la temperatura, por ello los cambios se registrarán a estas dos variables.

La evaporación calculada, en los meses húmedos está por debajo de los escenarios del modelo CCSM3, debido a que aumenta la temperatura. En los meses mayo a noviembre los escenarios están por encima de la evaporación calculada debido a la disminución de precipitación, por tanto no existe agua para evaporar.

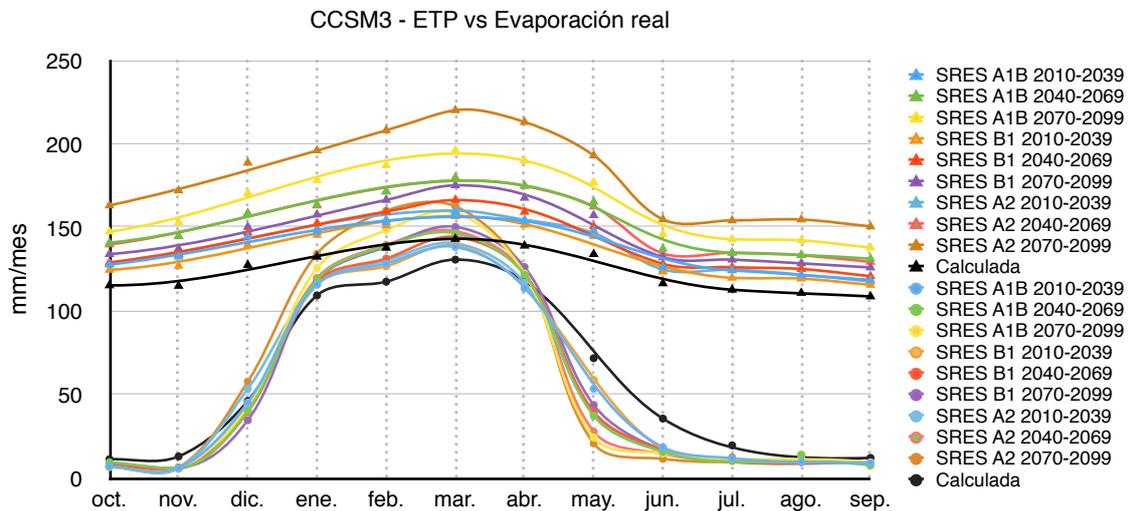


Figura 59: Contraste de la ETP y la evaporación real de la subcuenca del río Carrizal, a partir de simulaciones con los resultados del modelo CCSM3.

Unidades en mm/mes

En el modelo ECHAM5 La evaporación aumenta porque hay un incremento de precipitación y temperatura, exceptuando el escenario A2 en el periodo 2010-2070 en donde la evaporación está por debajo de la calculada.

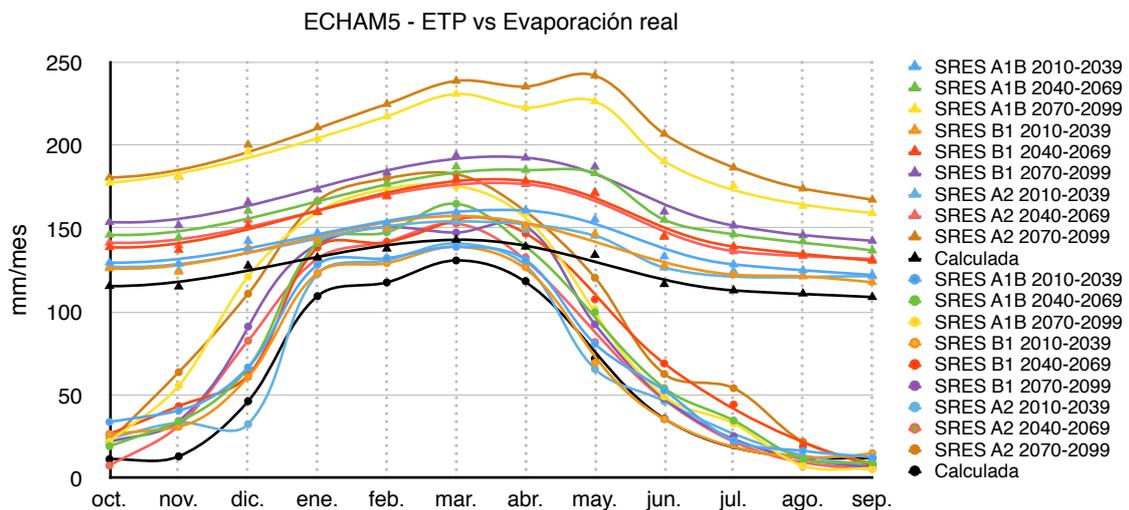


Figura 60: Contraste de la ETP y la Evaporación real de la subcuenca del río Carrizal, a partir de simulaciones con los resultados del modelo ECHAM5.

Unidades en mm/mes.

La evaporación aumenta debido al incremento de precipitación y temperatura. En los meses de estación seca este aumento de evaporación será mayor.

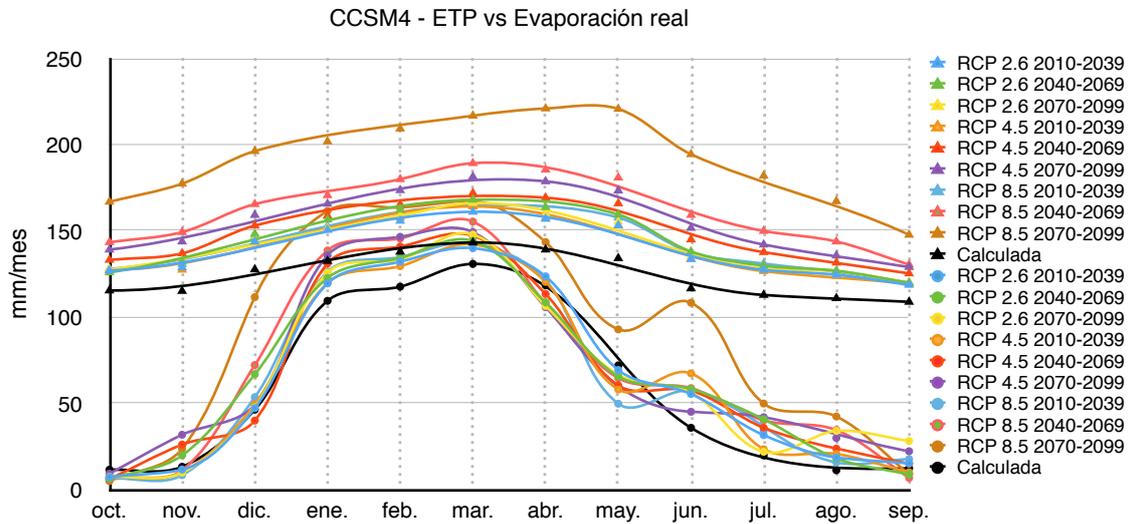


Figura 61: Contraste de la ETP y la evaporación real de la subcuenca del río Carrizal, a partir de simulaciones con los resultados del modelo CCSM4.

Unidades en mm/mes.

La evaporación en el modelo ECHAM6 presenta las mismas características que el modelo CCSM4, es decir aumento de la variable, por el incremento de precipitación y temperatura. Por lo tanto si las anomalías de precipitación y temperatura, presentan un aumento o disminución, se reflejan en la evaporación.

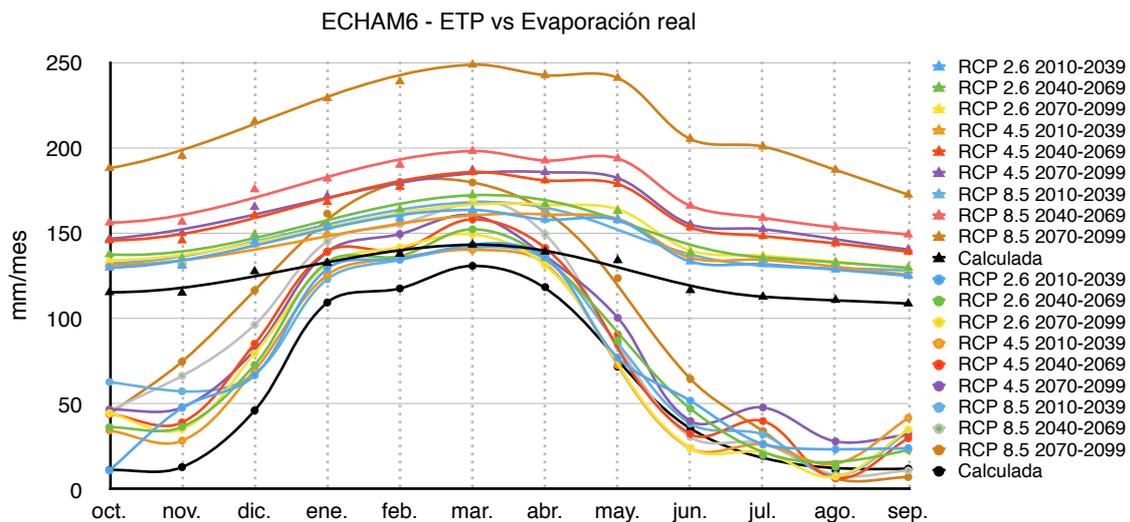


Figura 62: Contraste de la ETP y la evaporación real de la subcuenca del río Carrizal, a partir de simulaciones con los resultados del modelo ECHAM6.

Unidades en mm/mes.

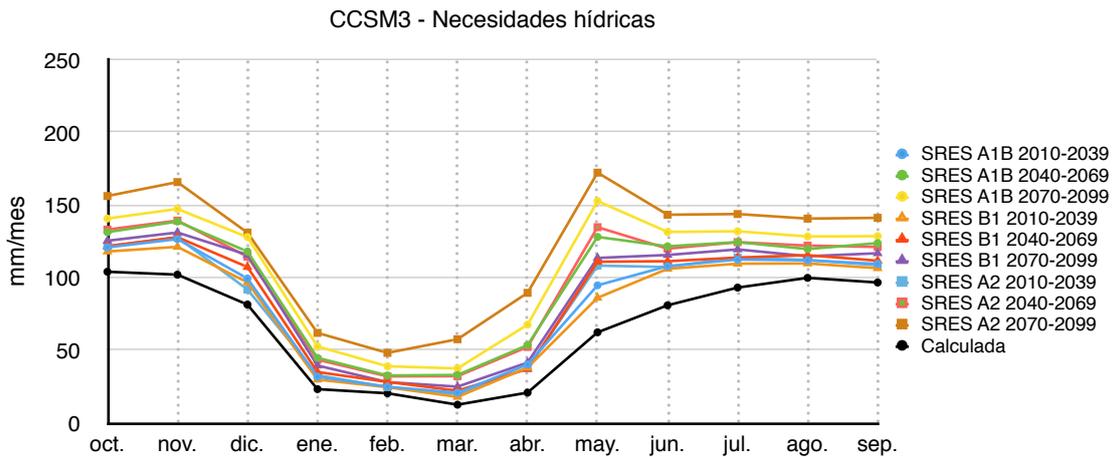


Figura 63: Necesidades hídricas de la subcuenca del río Carrizal, a partir de simulaciones con los resultados del modelo CCSM3.

Unidades en mm/mes.

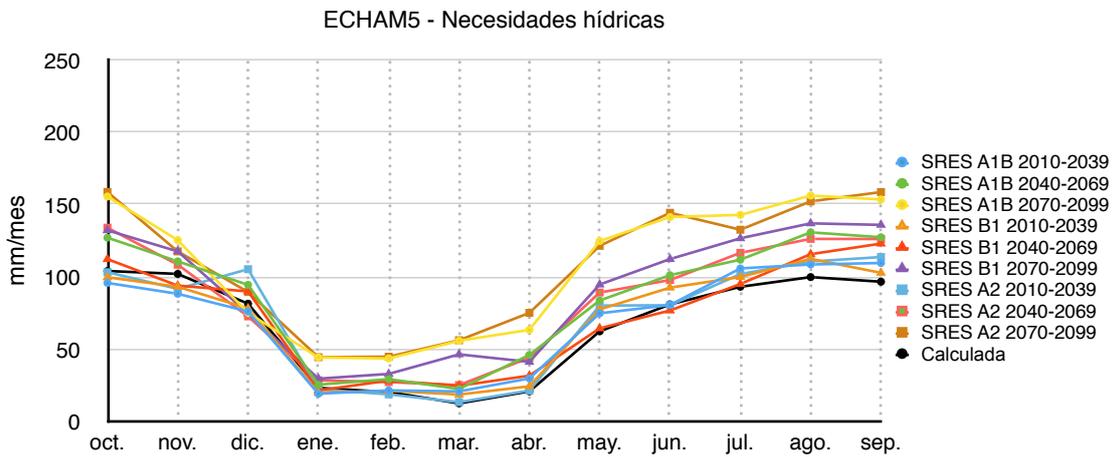


Figura 64: Necesidades hídricas de la subcuenca del río Carrizal, a partir de simulaciones con los resultados del modelo ECHAM5.

Unidades en mm/mes.

A medida que aumenta la temperatura, incrementa la ETP y a su vez aumenta la evaporación, es decir se presenta un incremento gradual de las variables. Esto se traduce en las necesidades hídricas de los cultivos, cuando no se dispone de agua en el suelo. Razón por la cual se dependerá también de las precipitaciones.

Las necesidades hídricas serán mayores cuando la evaporación calculada esté por debajo de los escenarios, ya que se reflejará la falta de agua, necesaria para los cultivos.

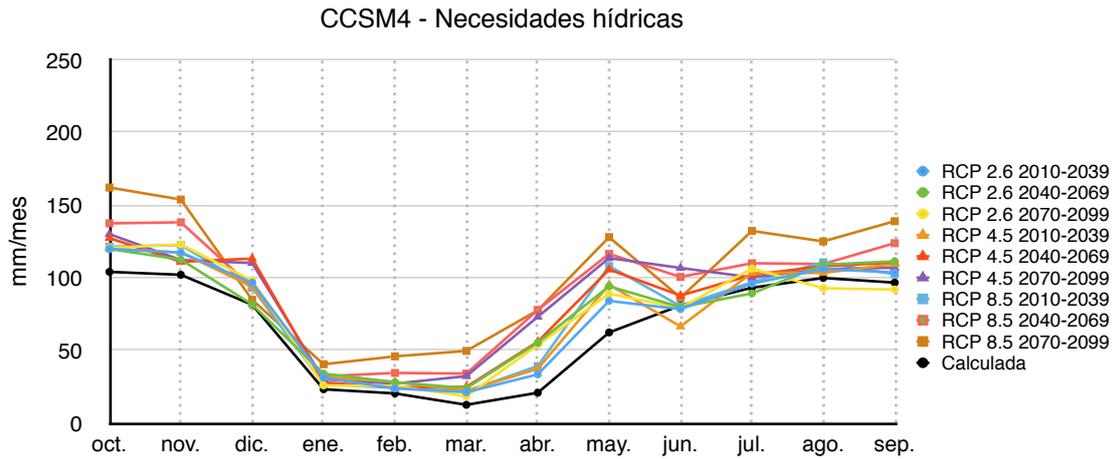


Figura 65: Necesidades hídricas de la subcuenca del río Carrizal, a partir de simulaciones con los resultados del modelo CCSM4.

Unidades en mm/mes.

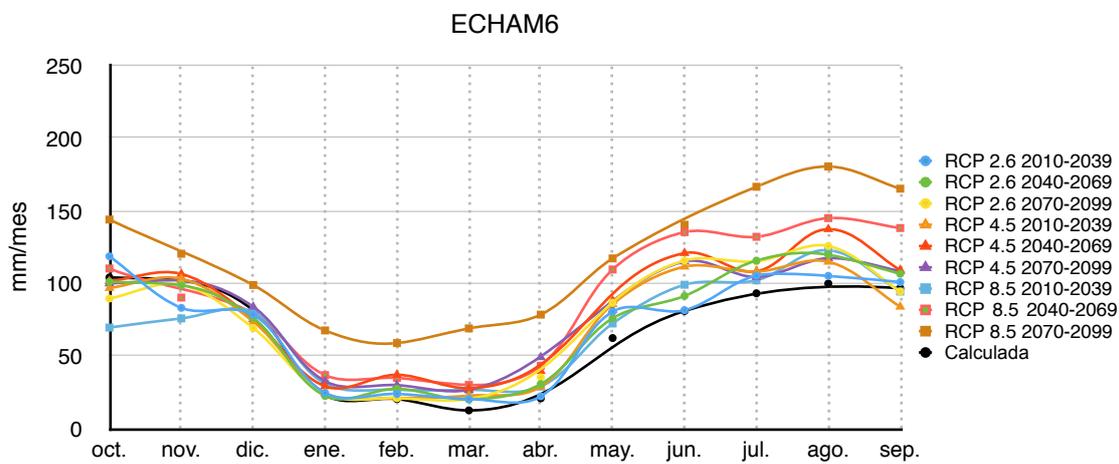


Figura 66: Necesidades hídricas de la subcuenca del río Carrizal, a partir de simulaciones con los resultados del modelo CCSM6.

Unidades en mm/mes.

A continuación se resumen los cambios presentados en las variables del ciclo hidrológico, destacando el aumento de las necesidades hídricas en todos los modelos. Las figuras reflejan el incremento de la ETP y evaporación, y la disminución de la precipitación en algunos de los modelos.

La reducción de la precipitación va acompañada de la disminución de infiltración, evaporación y escorrentía superficial.

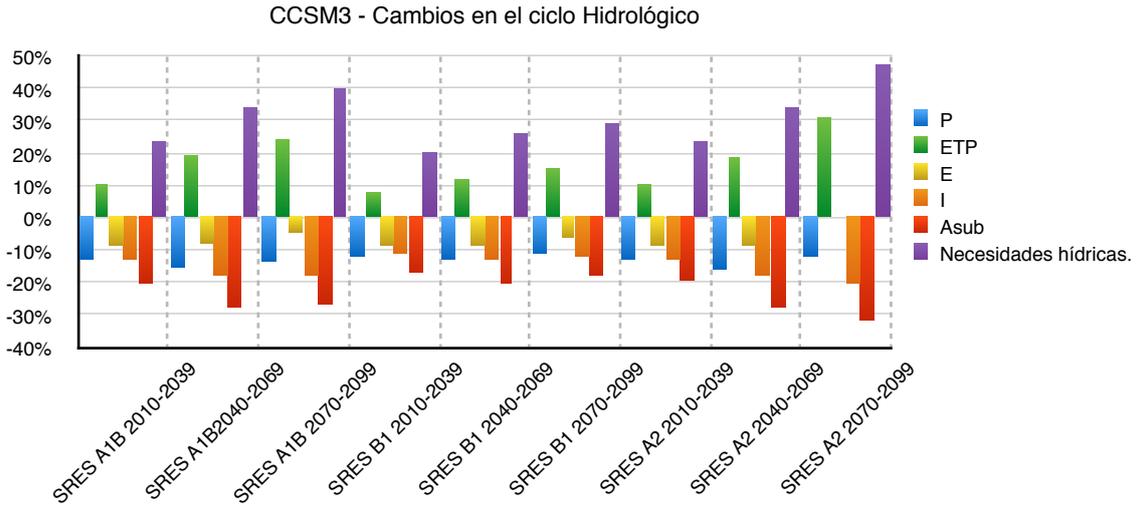


Figura 67: Resumen de los cambios en el ciclo hidrológico en la subcuenca del río Carrizal con el modelo CCSM3.

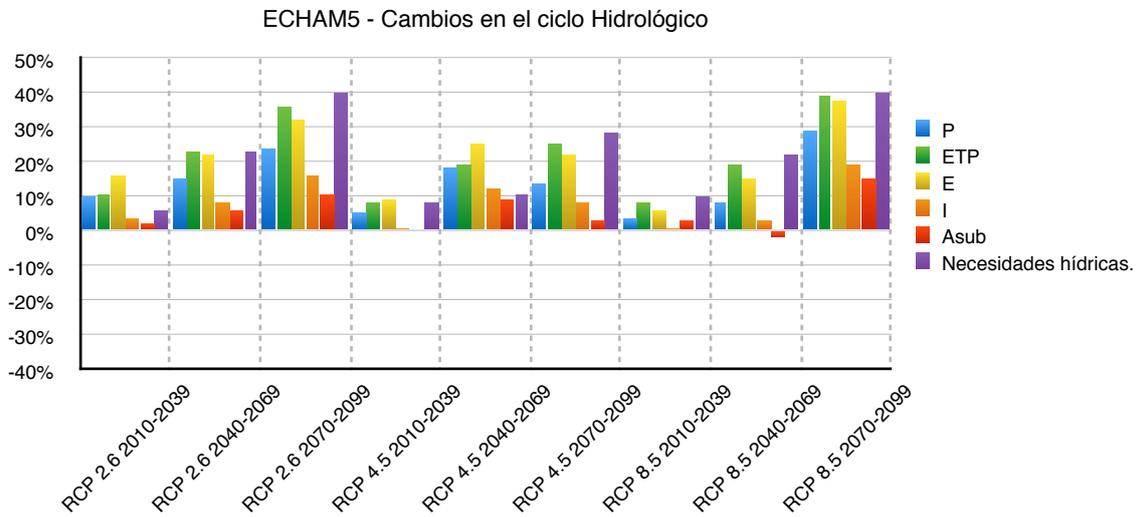


Figura 68: Resumen de los cambios en el ciclo hidrológico en la subcuenca del río Carrizal con el modelo ECHAM5.

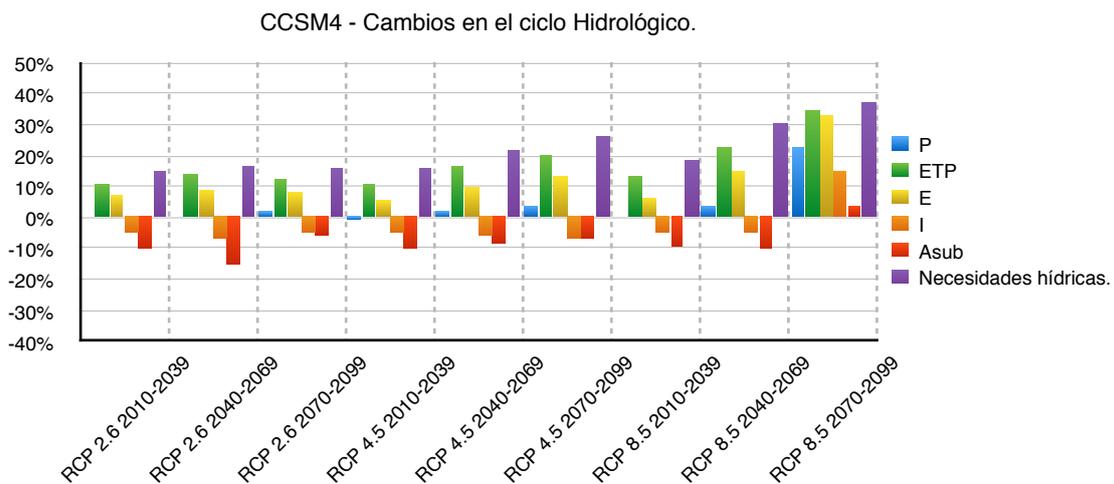


Figura 69: Resumen de los cambios en el ciclo hidrológico en la subcuenca del río Carrizal con el modelo CCSM4.

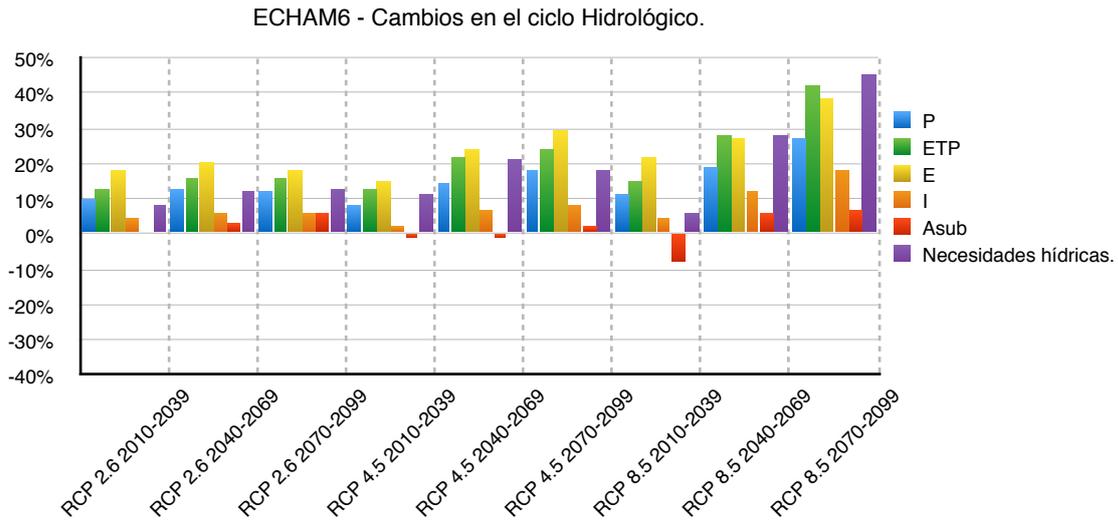


Figura 70: Resumen de los cambios en el ciclo hidrológico en la subcuenca del río Carrizal con el modelo ECHAM6.

Una vez identificado los efectos que puede generar el cambio climático en el ámbito de estudio, es necesario tomar medidas de adaptación al mismo. Una de estas medidas es la gestión adecuada de los embalses, para ello es necesario simular su comportamiento y analizar si se cumplirían las demandas con el aumento de las necesidades hídricas producto del cambio climático.

5.4. Gestión de los embalses como medida de adaptación

5.4.1. Simulación del comportamiento del embalse

Mediante la simulación de gestión de los embalses, se estableció el comportamiento histórico de los niveles del embalse “La Esperanza” ubicado en la subcuenca del río Carrizal. Las demandas usadas para la simulación fueron la urbana y agrícola¹, además se definió un caudal ecológico de 1 m³/s. Una vez conocidas las demandas se identificó que estas (teóricas) no se cumplían en su totalidad, razón por la cual se definieron nuevas demandas a las que se denominó actuales.

Tipo de demanda	Demanda teórica	Demanda actual	% de la aportación total
Ecológico	32	32	8%
Urbana	20	20	5%
Agrícola	240	150	40%

Tabla 24: Demandas teóricas y reales establecidas para el embalse “La Esperanza” de la subcuenca del río Carrizal.

Unidades en hm³/año

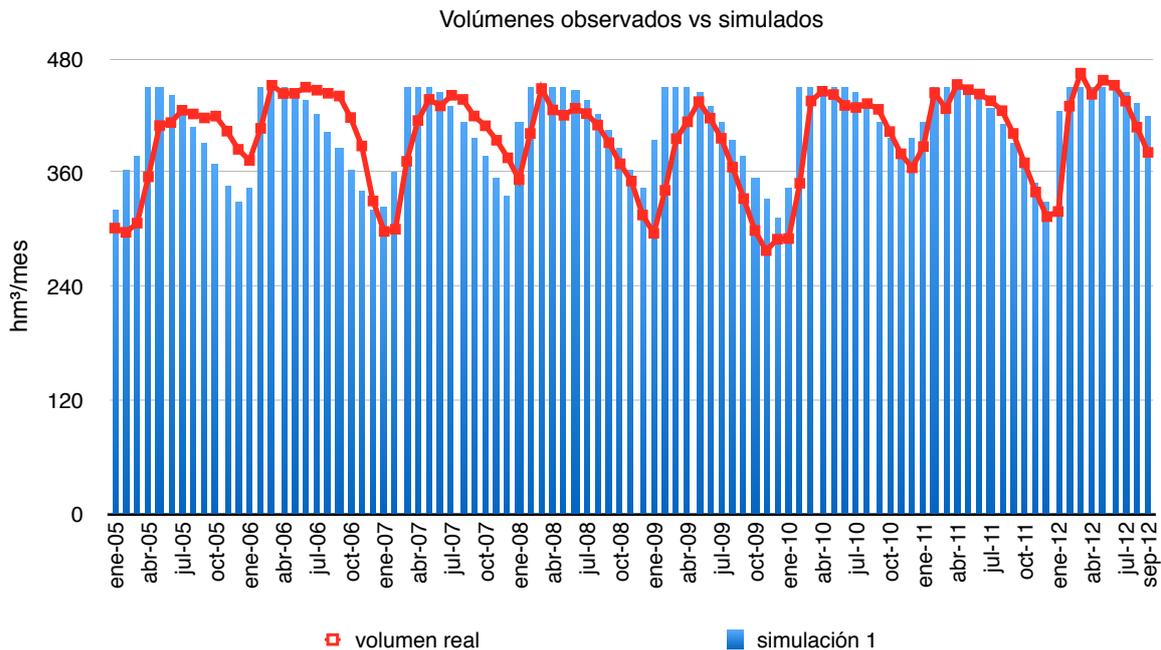


Figura 71: Contraste de volúmenes observados con simulados para el embalse “La Esperanza” de la subcuenca del río carrizal.

Unidades en hm³

Luego de comprobar que la simulación del embalse se asemejaba a la realidad (volúmenes observados), se realizó una simulación histórica con las demandas

¹ Tomado de: Zambrano, Y. (2014) “Posibilidades de implementación de un sistema de indicadores para la gestión de sequías en la Demarcación Hidrográfica de Manabí - Ecuador”

actuales y las demandas teóricas para observar que pasaría si se utiliza el embalse en su totalidad.

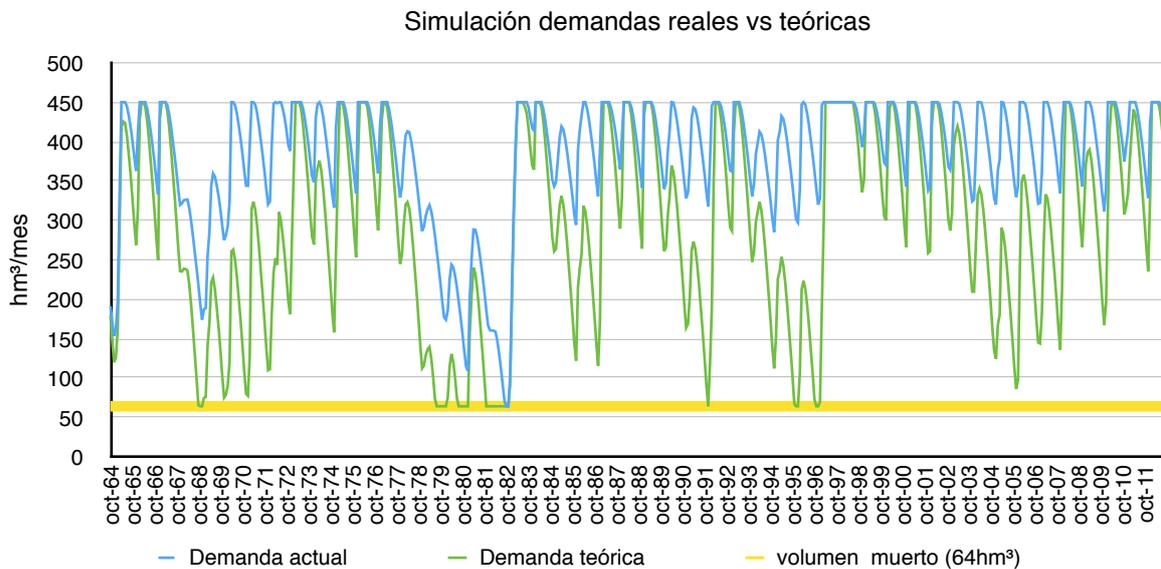


Figura 72: Simulación histórica con demandas teóricas y actuales del embalse “La Esperanza” de la subcuenca del río Carrizal. Unidades en hm^3/mes .

CRITERIOS	DEMANDA ACTUAL			DEMANDA TEÓRICA		
	Ambiental	Urbana	Agrícola	Ambiental	Urbana	Agrícola
Garantía mensual	100.0%	100.0%	99.7%	98.4%	96.9%	94.8%
Garantía anual		100.0%	97.9%		85.4%	83.3%
Garantía volumétrica		100.0%	99.6%		97.6%	94.2%
UTAH 1		0%	17%		40%	72%
UTAH 2		0%	17%		64%	112%
UTAH 10		0%	17%		88%	218%
Max. déficit	0.00	0.00	13.59	2.78	1.60	32.16

Tabla 25: Resultados de los criterios de garantías de la demanda actual y teórica.

Los resultados de las garantías reflejan que el embalse para la demanda actual es sostenible y cumple todas las garantías y criterios, sin embargo si se aplica la demanda teórica bajo el criterio UTAH solo se cumplirían las garantías de la demanda urbana en un año, ya que en dos presentaría déficit y por ende la agrícola no cumpliría ninguno de los criterios. Para evitar aquello se recomienda una curva de reserva de 110 hm^3 en el embalse que permitirá cumplir las demandas urbanas teóricas en su totalidad en épocas críticas.

5.4.2. Simulación del comportamiento del embalse futuro

Una vez simuladas las demandas actuales, se planteó la simulación futura, incrementando la demanda agrícola con el porcentaje de cambio de las necesidades hídricas, esto se realizó en los dos modelos del AR5, con el escenario RCP4.5, a corto plazo (2010-2039). Sabiendo que la demanda agrícola actual son 150 hm³/año y la teórica 240 hm³/año, se le incrementaron a cada una el 16% del aumento de las necesidades hídricas en el modelo CCSM4 y el 11% del incremento de las necesidades hídricas en el modelo ECHAM6 en el escenario y plazo anteriormente mencionado. Teniendo así nuevas demandas para simular la gestión del embalse.

Tipo de demanda	Demanda teórica		Demanda actual	
	ECHAM6	CCSM4	ECHAM6	CCSM4
Ecológico	32	32	32	32
Urbana	20	20	20	20
Agrícola	266	278	166	174

Tabla 26: Demandas teóricas y reales con el incremento de las necesidades hídricas por el efecto del cambio climático, para el embalse “La Esperanza” de la subcuenca del río Carrizal. Unidades en hm³/año.

Estas simulaciones se han contrastado de dos formas, la primera que incluye la demanda actual y esta modificada con el cambio climático; la segunda involucra contrastar la demanda teórica y las demandas teóricas modificadas con el efecto del cambio climático.

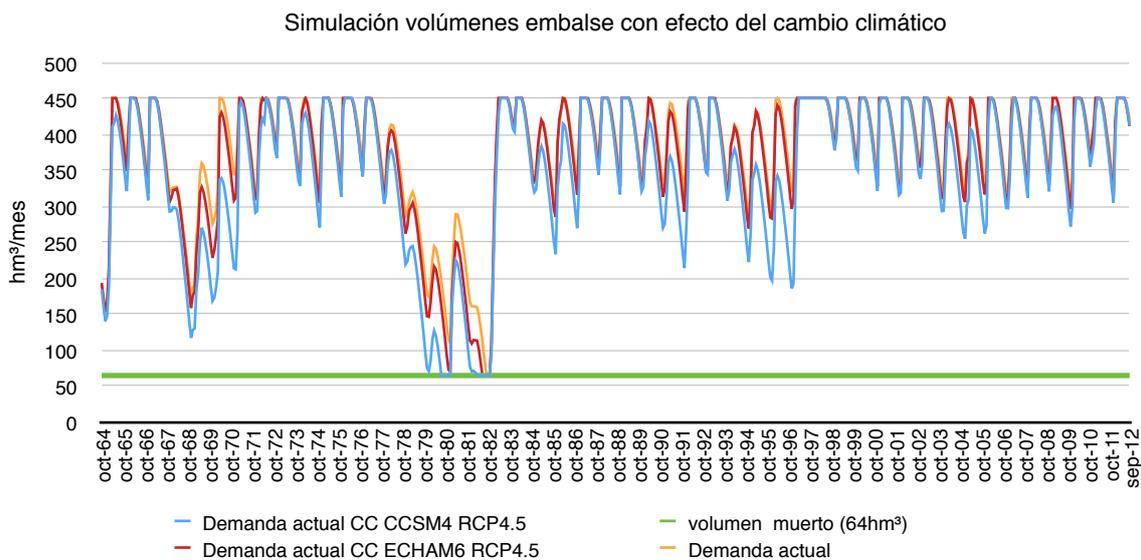


Figura 73: Simulación de volúmenes del embalse “La Esperanza”, con las demandas reales y las modificadas por el efecto del cambio climático. Unidades en hm³/mes

CRITERIOS	DEMANDA ACTUAL CCSM4			DEMANDA ACTUAL ECHAM6		
	Ambiental	Urbana	Agrícola	Ambiental	Urbana	Agrícola
Garantía mensual	99.5%	98.3%	97.9%	100.0%	99.7%	99.1%
Garantía anual		93.8%	91.7%		97.9%	95.8%
Garantía volumétrica		98.6%	97.2%		99.7%	99.0%
UTAH 1		39%	56%		13%	28%
UTAH 2		65%	96%		13%	46%
UTAH 10		69%	133%		13%	46%
Max. deficit	2.21	1.80	23.32	0.00	1.29	21.81

Tabla 27: Resultados de los criterios de garantías de la demandas futuras.

Después de haber simulado el comportamiento del embalse futuro, los criterios de garantías indican que si mantenemos la demanda actual cumpliremos la garantías de la demanda urbana, sin embargo tendremos un mayor déficit en la demanda urbana con los resultados del modelo CCSM4, disminuyendo por ende la garantía anual respecto al modelo ECHAM6. Con lo que respecta a la demanda agrícola actual con incremento por efecto del cambio climático no se cumplirían los criterios de garantía, lo que conlleva a una reevaluación de la demanda, para evitar el incremento de déficit.

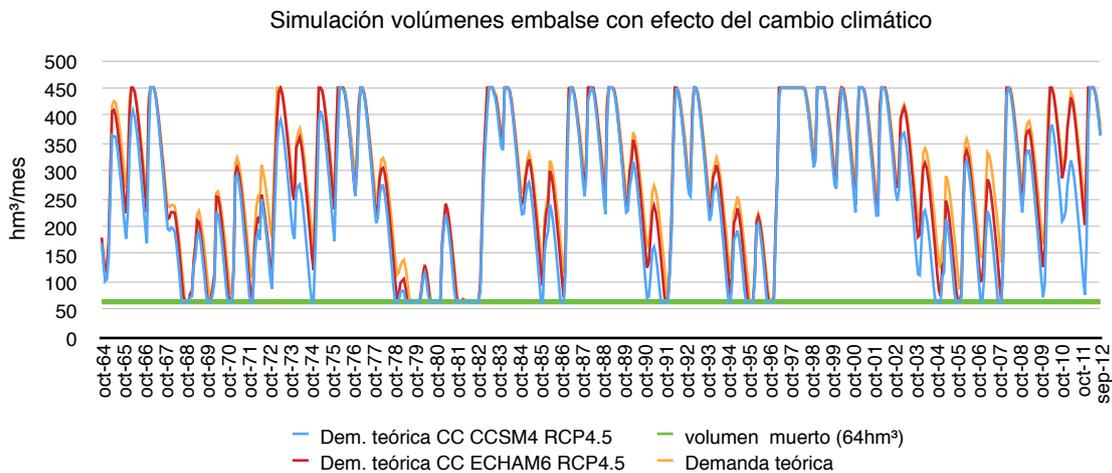


Figura 74: Simulación de volúmenes del embalse “La Esperanza”, con las demandas reales y las modificadas por el efecto del cambio climático.

Unidades en hm^3/mes

Si se aplicara la demanda teórica con el incremento por el efecto del cambio climático, no cumpliríamos los criterios de garantía lo que se traduce en aumento de déficit. Como se pudo observar anteriormente, si mantenemos la demanda actual se presentarán déficit en la demanda urbana y por lo tanto en la agrícola estos serían mucho mayor.

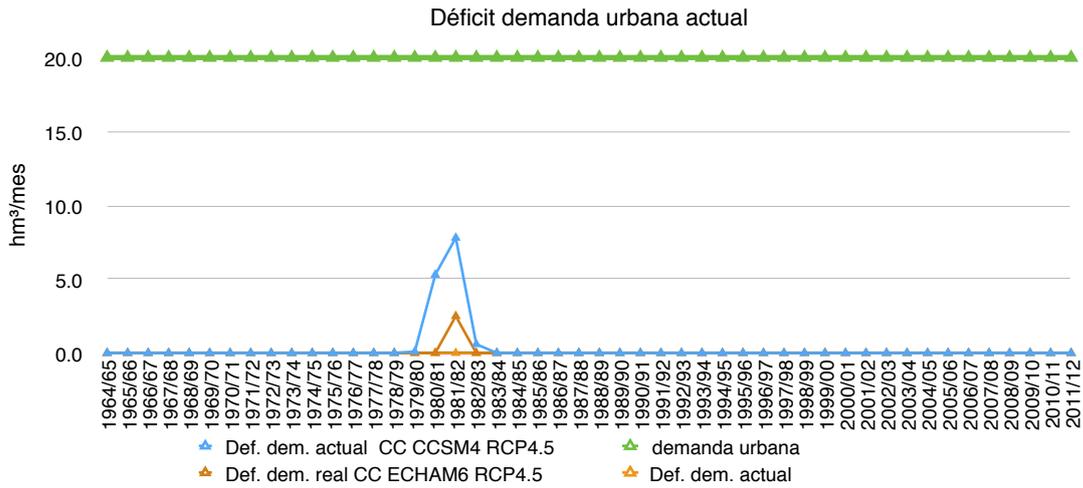


Figura 75: Déficit de la demanda urbana real con efecto del cambio climático.

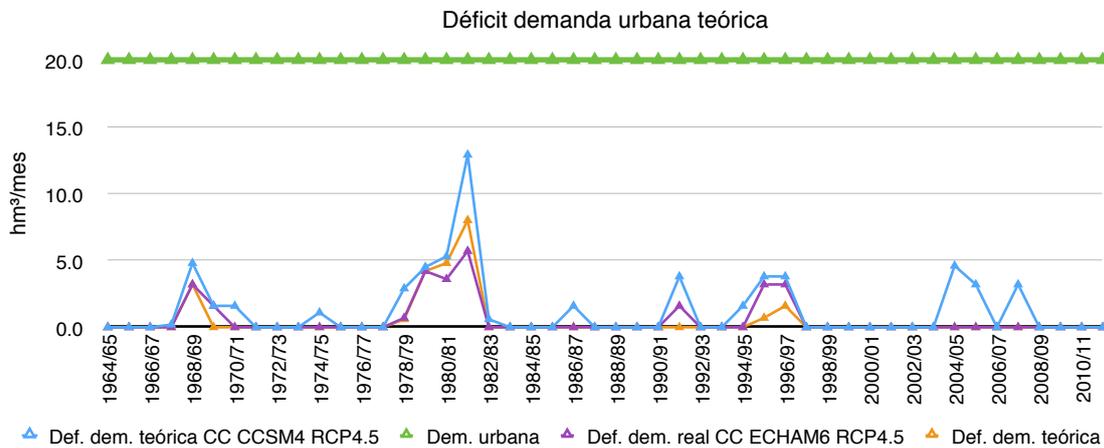


Figura 76: Déficit de la demanda urbana teórica con efecto del cambio climático.

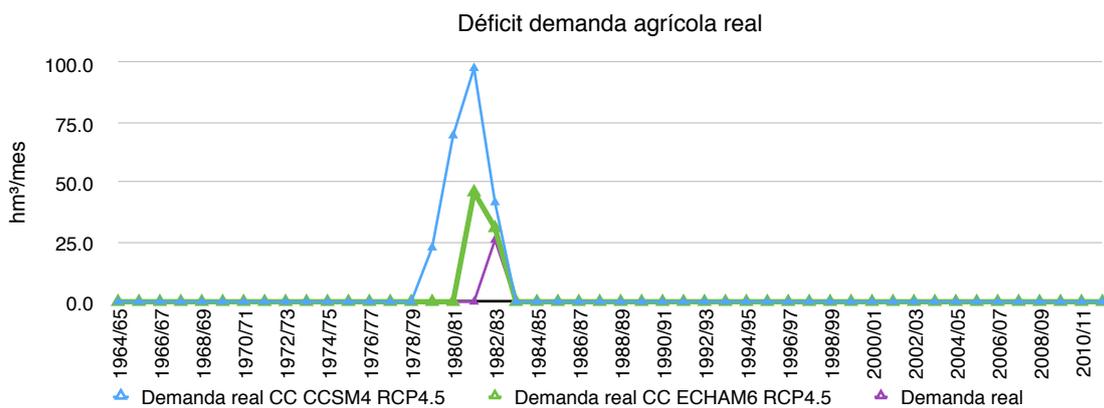


Figura 77: Déficit de la demanda agrícola real con efecto del cambio climático.

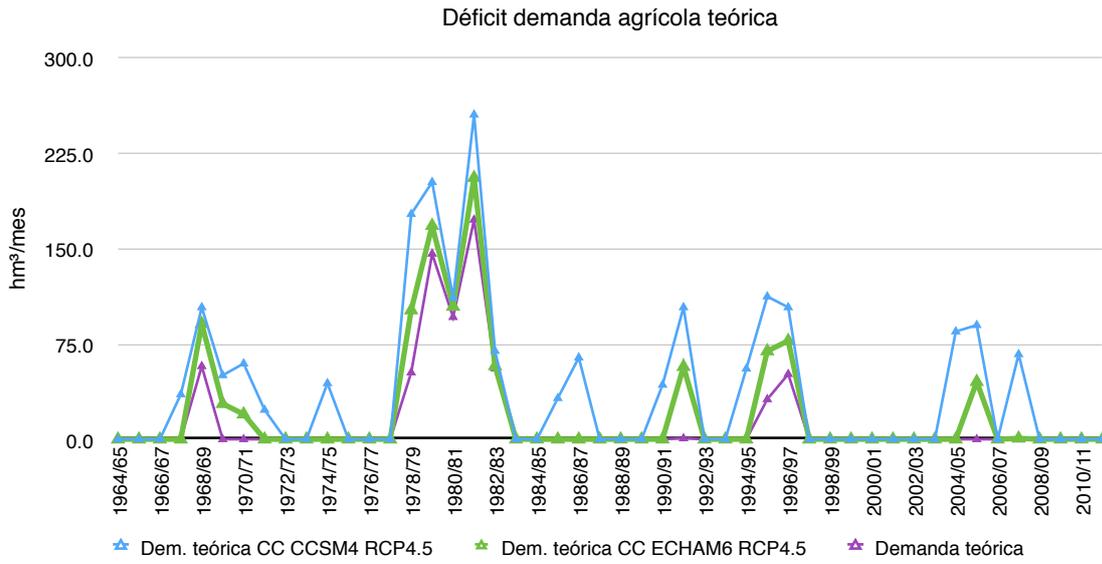


Figura 78: Déficit de la demanda agrícola teórica con efecto del cambio climático.

6. CONCLUSIONES

El objetivo general de la presente investigación, es evaluar el efecto del cambio climático bajo escenarios de emisiones SRES y RCP en la Demarcación Hidrográfica de Manabí. Para alcanzar el mismo se desarrollaron cuatro etapas metodológicas de las que se obtuvieron resultados que permiten establecer las siguientes conclusiones:

Los modelos que mejor correlación presentan con el periodo observado de precipitación media, son el ECHAM5 y ECHAM6. El modelo que mejor representa la temperatura media del área de estudio es el ECHAM5 con un 89% de correlación, seguido del CCSM4 con un coeficiente muy bajo 29%. El escenario más favorable es el SRES B1, seguido del SRES A1B y el escenario menos optimista SRES A2; incrementando la temperatura uno más que otro.

Las anomalías de la precipitación y temperatura son iguales para las dos cuencas (cuenca del río Chone y cuenca del río Portoviejo) debido a la resolución de los modelos. Las anomalías de precipitación son distintas para cada modelo, mientras que el modelo CCSM3 refleja una disminución de la precipitación, el modelo ECHAM5 indica lo contrario. Las anomalías de temperatura resultantes de los escenarios RCP tienen similitud con los escenarios SRES. Ambos escenarios concuerdan en que la temperatura se incrementará gradualmente de un periodo a otro. Las anomalías de precipitación, en los escenarios RCP al igual que en los escenarios SRES presentan incertidumbre, ya que si bien el modelo CCSM4 demuestra que la precipitación de febrero a mayo disminuye y el resto de meses se incrementa.

La aportación media anual de la subcuenca del río Carrizal es de 376 hm³, mientras que para la subcuenca del río Chico es 104 hm³. Por su parte la aportación media anual de la subcuenca cabecera del río Portoviejo es 227 hm³. Los balances hídricos reflejan que en la subcuenca cabecera del río Portoviejo y en la subcuenca del río Carrizal, la escorrentía superficial es mayor que la infiltración, todo lo contrario sucede en la subcuenca del río Chico, donde la infiltración es mayor que la escorrentía.

El contraste entre la serie de aportaciones obtenidas del modelo PATRICAL sin previa calibración y las series simuladas en el Modelo Agregado de Témez, reflejó resultados favorables. En general, las aportaciones en la subcuenca del río Carrizal en los escenarios SRES, con el modelo CCSM3 disminuyen gradualmente a corto, mediano y largo plazo, mientras que en el modelo ECHAM5 ocurre lo opuesto. Las aportaciones en la subcuenca del río Carrizal en los escenarios RCP, el modelo CCSM4 muestra una disminución en las aportaciones siendo estas menores al 12% variando su

intensidad de un escenario a otro. El modelo ECHAM6 refleja un aumento de las aportaciones no mayores al 11%. Las aportaciones para la subcuenca del río Chico, con los modelos CCSM3 y el CCSM4 tienden a reducirse sin un patrón definido. Para los modelos ECHAM5 y ECHAM6 las aportaciones se incrementarán, excepto en el periodo 2040-2069 en el escenario A2 (ECHAM5), donde se presenta una disminución. El incremento de las aportaciones en la subcuenca del río Chico, son más representativas en el modelo ECHAM6 que en el ECHAM5. Las aportaciones en la subcuenca cabecera del río Portoviejo, presentadas en el modelo CCSM3 y CCM4, tienden a disminuir en todos los escenarios y periodos planteados. Una situación opuesta refleja los modelos ECHAM5 y ECHAM6 (incremento de las aportaciones).

A medida que aumenta la temperatura, incrementa la ETP y a su vez aumenta la evaporación, es decir se presenta un incremento gradual de las variables. Las necesidades hídricas serán mayores cuando la evaporación calculada esté por debajo de los escenarios, ya que se reflejará la falta de agua, necesaria para los cultivos.

Mediante la simulación de gestión de los embalses, se estableció el comportamiento de los niveles del embalse “La Esperanza” ubicado en la subcuenca del río Carrizal y se identificaron los criterios de garantía para la demanda actual y la demanda teórica, siendo esta última no favorable para el cumplimiento de las garantías.

La simulación de los embalses bajo el contexto de cambio climático (CCSM4 y ECHAM6), indica que si la demanda real del embalse se mantiene, probablemente no se cumplan las garantías debido al aumento de las necesidades hídricas, por ende la demanda más afectada sería la agrícola aumentando el déficit en estas periódicamente, debido a la prioridad de satisfacción que posee respecto a la urbana.

En tanto si se aplicara la demanda teóricas futuras las garantías urbanas y agrícolas no se cumplirían, estas aumentarían su déficit. Lo ideal sería reevaluar las demandas teóricas previo a su aplicación.

7. LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN

En el transcurso de la investigación se presentaron diversas limitaciones, debido a la falta de información que permite obtener resultados más específicos, para evitar esta situación en futuras investigaciones se recomienda seguir en la Demarcación Hidrográfica de Manabí las siguientes líneas de investigación:

- Evaluar el efecto del cambio climático en la Demarcación Hidrográfica de Manabí, con la utilización de modelos climáticos regionales a nivel de cuencas hidrográficas.
- La calibración del modelo PATRICAL para la simulación hidrológica de la Demarcación Hidrográfica de Manabí, incluyendo la cuantificación y monitoreo del recurso subterráneo.
- Establecer las demandas agrícolas futuras, basados en el cálculo de las necesidades hídricas por cultivos, bajo escenarios de cambio climático. Establecer demandas urbanas actuales reales y proyecciones futuras, basados en el crecimiento de la población para diversos horizontes.

8. REFERENCIAS

- Álvarez, J. S., A. y Quintas, L., (2005). "SIMPA, a GRASS based tool for Hydrological Studies." International journal of geoinformatics 1(1): 13-20.
- Arnell, N. W., D. P. van Vuuren and M. Isaac (2011). "The implications of climate policy for the impacts of climate change on global water resources." Global Environmental Change 21(2): 592-603.
- Barron, O., R. Silberstein, R. Ali, R. Donohue, D. McFarlane, P. Davies, G. Hodgson, N. Smart and M. Donn (2012). "Climate change effects on water-dependent ecosystems in south-western Australia." Journal of Hydrology 434: 95-109.
- Block, P. J., F. A. Souza Filho, L. Sun and H. H. Kwon (2008). "A Streamflow Forecasting Framework using Multiple Climate and Hydrological Models1." JAWRA Journal of the American Water Resources Association 45(4): 828-843.
- Boyer, C., D. Chaumont, I. Chartier and A. G. Roy (2010). "Impact of climate change on the hydrology of St. Lawrence tributaries." Journal of hydrology 384(1): 65-83.
- Cabezas Calvo-Rubio, F., F. Estrada Lorenzo and T. Estrela Montreal (1999). "Algunas contribuciones técnicas del Libro Blanco del Agua en España." Ingeniería civil(115): 79-96.
- Cáceres, L. e. (2001). "Primera Comunicación Nacional ante la Convención Marco de Naciones Unidas sobre Cambio Climático, República del Ecuador."
- Collins, W. D., C. M. Bitz, M. L. Blackmon, G. B. Bonan, C. S. Bretherton, J. A. Carton, P. Chang, S. C. Doney, J. J. Hack and T. B. Henderson (2006). "The Community Climate System Model version 3 (CCSM3)." Journal of Climate 19(11).
- Cudennec, C., C. Leduc and D. Koutsoyiannis (2007). "Dryland hydrology in Mediterranean regions—a review." Hydrological Sciences Journal/Journal des Sciences Hydrologiques 52(6): 1077-1087.
- Dibike, Y. B. and P. Coulibaly (2005). "Hydrologic impact of climate change in the Saguenay watershed: comparison of downscaling methods and hydrologic models." Journal of hydrology 307(1): 145-163.
- Elsner, M. M., L. Cuo, N. Voisin, J. S. Deems, A. F. Hamlet, J. A. Vano, K. E. Mickelson, S.-Y. Lee and D. P. Lettenmaier (2010). "Implications of 21st century climate change for the hydrology of Washington State." Climatic Change 102(1-2): 225-260.
- Estrela, T. (1992b). Modelos matemáticos para la evaluación de recursos hídricos, CEDEX.
- Estrela, T. and L. Quintas (1996). "El sistema integrado de modelización precipitación-aportación SIMPA." Ingeniería civil(104): 43-52.
- Folland, C., T. Karl, N. Nicholls, B. Nyenzi, D. Parker and K. Y. Vinnikov (2001). "Observed climate variability and change." Cambridge Univ. Press: 99-181.
- Forbes, K., S. Kienzle, C. Coburn, J. Byrne and J. Rasmussen (2011). "Modelling the impacts of selected GCM derived climate scenarios on the future hydrology of a hybrid watershed in the Oldman River watershed, Alberta, Canada." Climatic Change.
- Fowler, H., S. Blenkinsop and C. Tebaldi (2007). "Linking climate change modelling to impacts studies: recent advances in downscaling techniques for hydrological modelling." International Journal of Climatology 27(12): 1547-1578.
- Fujihara, Y., K. Tanaka, T. Watanabe, T. Nagano and T. Kojiri (2008). "Assessing the impacts of climate change on the water resources of the Seyhan River Basin in

- Turkey: Use of dynamically downscaled data for hydrologic simulations." Journal of Hydrology **353**(1): 33-48.
- García-Ruiz, J. M., J. I. López-Moreno, S. M. Vicente-Serrano, T. Lasanta-Martínez and S. Beguería (2011). "Mediterranean water resources in a global change scenario." Earth-Science Reviews **105**(3): 121-139.
- Gent, P. R., G. Danabasoglu, L. J. Donner, M. M. Holland, E. C. Hunke, S. R. Jayne, D. M. Lawrence, R. B. Neale, P. J. Rasch and M. Vertenstein (2011). "The Community Climate System Model Version 4." Journal of Climate **24**(19).
- Harding, R., M. Best, E. Blyth, S. Hagemann, P. Kabat, L. M. Tallaksen, T. Warnaars, D. Wiberg, G. P. Weedon and H. v. Lanen (2011). "Preface to the Water and Global Change (WATCH) special collection: current knowledge of the terrestrial global water cycle." Journal of Hydrometeorology **12**(6).
- Houghton, J. T., Y. Ding, D. J. Griggs, M. Noguer, P. J. van der LINDEN, X. Dai, K. Maskell and C. Johnson (2001). Climate change 2001: the scientific basis, Cambridge university press Cambridge.
- Huntington, T. G. (2010). "1 Climate Warming-Induced Intensification of the Hydrologic Cycle: An Assessment of the Published Record and Potential Impacts on Agriculture." Advances in agronomy **109**: 1.
- IPCC (2000). Special report on emissions scenarios, working group III, Intergovernmental Panel on Climate Change., Cambridge University Press.
- IPCC (2007). "Climate Change 2007: The Physical Science Basis: Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climates " Cambridge Univ. Press, New York: 966.
- IPCC (2007). "The Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change." Geneva, Switzerland.
- IPCC (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 (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, Reino Unido y Nueva York, NY, Estados Unidos de América.
- Kilsby, C., S. Tellier, H. Fowler and T. Howels (2007). "Hydrological impacts of climate change on the Tejo and Guadiana Rivers." Hydrology and Earth System Sciences **11**(3): 1175-1189.
- Kusangaya, S., M. L. Warburton, E. Archer van Garderen and G. P. Jewitt (2014). "Impacts of climate change on water resources in southern Africa: A review." Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C **67-69**: 47-54.
- Kyselý, J. and M. Dubrovský (2005). "Simulation of extreme temperature events by a stochastic weather generator: effects of interdiurnal and interannual variability reproduction." International journal of climatology **25**(2): 251-269.
- MAE and PNUD (2009). "Proyecto Adaptación al Cambio Climático a través de una Efectiva Gobernabilidad del Agua en el Ecuador (PACC)."

- Manabe, S., R. T. Wetherald, P. Milly, T. L. Delworth and R. J. Stouffer (2004). "Century-scale change in water availability: CO₂-quadrupling experiment." Climatic Change **64**(1-2): 59-76.
- Moradkhani, H., R. G. Baird and S. A. Wherry (2010). "Assessment of climate change impact on floodplain and hydrologic ecotones." Journal of hydrology **395**(3): 264-278.
- Mosquera-Machado, S. and S. Ahmad (2007). "Flood hazard assessment of Atrato River in Colombia." Water resources management **21**(3): 591-609.
- Parry, M., O. Canziani, J. Palutikof, P. van der Linden and C. Hanson (2007). Contribution of working group II to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change, Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York.
- Perez Martin, M. A. (2005). Hydrologic and quality distributed model integrated in geographic information system of large watershed hydrology. Contribution to the pressure and impact analyses of Water Framework Directive WFD, ProQuest.
- Puri, S., H. Stephen and S. Ahmad (2011). "Relating TRMM precipitation radar land surface backscatter response to soil moisture in the Southern United States." Journal of Hydrology **402**(1): 115-125.
- Randall, D. A., C. A. DeMott and M. Khairoutdinov (2007). "Convective precipitation variability as a tool for general circulation model analysis." Journal of climate **20**(1).
- Reclamation, B. o. (2011a). West-wide climate risk assessments: bias-corrected and spatially downscaled surface water projections, Technical Service Center U.S. Dep. of the Inter., Denver, Colo. March.
- Reclamation, B. o. (2011b). "SECURE WaterAct Section 9503(c) - Reclamation Climate Change and Water 2011." U.S. Dep. of the Inter., Denver, Colo. April.: 226.
- Roeckner, E. (2003). The atmospheric general circulation model ECHAM5: Model description, Max-Planck-Institut für Meteorologie.
- Roeckner, E., K. Arpe and L. Bengtsson (1996). "The atmospheric general circulation model ECHAM-4: Model description and simulation of present-day climate." Max-Planck-Institut für Meteorologie Report **218**: 90.
- Ruiz, J. M. (1999). Modelo distribuido para la evaluación de recursos hídricos, Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX), Centro de Estudios Hidrográficos.
- Shrestha, R. R., Y. B. Dibike and T. D. Prowse (2012). "Modelling of climate-induced hydrologic changes in the Lake Winnipeg watershed." Journal of Great Lakes Research **38**: 83-94.
- Stevens, B., M. Giorgetta, M. Esch, T. Mauritsen, T. Crueger, S. Rast, M. Salzmann, H. Schmidt, J. Bader and K. Block (2013). "Atmospheric component of the MPI-M Earth System Model: ECHAM6." Journal of Advances in Modeling Earth Systems **5**(2): 146-172.
- Témez, J. (1977). Modelo Matemático de transformación "precipitación- escorrentía", Asociación de Investigación Industrial Eléctrica. ASINEL. Madrid: 39.
- Toth, B., A. Pietroniro, F. M. Conly and N. Kouwen (2006). "Modelling climate change impacts in the Peace and Athabasca catchment and delta: I—hydrological model application." Hydrological Processes **20**(19): 4197-4214.



- Trigo, R. M. and J. P. Palutikof (2001). "Precipitation scenarios over Iberia: A comparison between direct GCM output and different downscaling techniques." Journal of Climate **14**(23).
- Tsanis, I. K., A. G. Koutroulis, I. N. Daliakopoulos and D. Jacob (2011). "Severe climate-induced water shortage and extremes in Crete." Climatic Change **106**(4): 667-677.
- UNDP (2007). Human development report 2007/2008: Fighting climate change: human solidarity in a divided world, Oxford University Press for UNDP.
- Vicuna, S. and J. Dracup (2007). "The evolution of climate change impact studies on hydrology and water resources in California." Climatic Change **82**(3-4): 327-350.