

Trabajo Fin de Máster

ANALISIS DE LA GESTION INTEGRADA DE LOS RECURSOS HIDRICOS EN CUENCA DEL RIO PATIVILCA – PERU, INCLUYENDO EL CAMBIO CLIMATICO

Intensificación:

ANALISIS DE SISTEMAS DE RECURSOS HIDRICOS

Autor:

TANIA IVETTE MENDEZ IZQUIERDO

Tutor:

MIGUEL ANGEL PEREZ MARTIN

JULIO, 2019



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

máster en ingeniería
hidráulica y medio ambiente
mihma

Resumen del Trabajo de Fin de Máster

Datos del proyecto

Título del TFM en español: ANALISIS DE LA GESTION INTEGRADA DE LOS RECURSOS HIDRICOS EN CUENCA DEL RIO PATIVILCA – PERU, INCLUYENDO EL CAMBIO CLIMATICO.

Título del TFM en inglés: ANALYSIS OF THE INTEGRATED MANAGEMENT OF WATER RESOURCES IN THE BASIN OF THE RIVER PATIVILCA - PERU, INCLUDING CLIMATE CHANGE.

Título del TFM en valenciano: ANÀLISI DE LA GESTIÓ INTEGRADA DELS RECURSOS HÍDRICS EN CONCA DEL VA RIURE PATIVILCA - PERÚ, INCLOENT EL CANVI CLIMÀTIC.

Alumno: TANIA IVETE MENDEZ IZQUIERDO

Director: MIGUEL ANGEL PEREZ MARTIN

Fecha de Lectura: Julio, 2019

Resumen

EN CASTELLANO

La disponibilidad de los recursos hídricos en el Perú varía de acuerdo con cada región hidrográfica, las mayores demandas se encuentran en la costa peruana quienes ejercen presión sobre los recursos hídricos, por lo tanto, es necesario cuantificar y evaluar los recursos disponibles de las cuencas hidrológicas.

El presente estudio se desarrolla en la Cuenca del río Pativilca ubicada en la zona centro del Perú y tiene por objetivo analizar la gestión actual y futura de los recursos hídricos con la intervención del cambio climático, a partir del conocimiento del comportamiento hidrológico de la cuenca.

Esta cuenca es de importancia económica, social y ambiental ya que abastece a las demandas consuntivas especialmente a la que se encuentra en la zona baja de la cuenca (costa), y además es una zona de conservación del camarón de río.

Para el alcance del objetivo se desarrolla un modelo hidrológico, modelo de gestión y la evaluación de dos escenarios de cambio climático.

Por la heterogeneidad de la cuenca se trabaja por zonas, el Alto, Medio y Bajo Pativilca. El

modelo hidrológico Temez se implementa para cada zona, usa pocos parámetros con datos de entrada de precipitación y ETP, la calibración del modelo proporciona aportaciones mensuales de la cuenca, siendo el Alto Pativilca la que más aporta a la cuenca. El modelo de gestión toma como base los últimos 20 años del registro de las aportaciones del del modelo hidrológico, los resultados muestran una gestión actual estable de acuerdo con los indicadores de garantía, la eficiencia de riego del sistema es el 51%.

Los escenarios de cambio climático evaluados son RCP 4.5 y RCP 8.5 a corto (2020 -2039) y largo plazo (2080 -2099), las anomalías fueron obtenidos del CCKP (Portal de conocimientos sobre el cambio climático) del Banco Mundial y corroborados con el quinto informe del IPCC. Los resultados de cada escenario señalan incrementos de temperatura y precipitación hasta fin de siglo para la zona de estudio. Como resultado se espera para ambos escenarios un aumento del 4% al 30% de las aportaciones anuales. La gestión se mantendrá en equilibrio porque todos de los escenarios muestran incrementos en las aportaciones mensuales. La dotación de la demanda agrícola presenta incrementos para ambos escenarios.

La simulación de la gestión de los recursos hídricos con la inclusión de nuevos proyectos de regadío (8 000 ha) indica un desequilibrio del sistema, lo mismo sucede bajo el contexto del cambio climático. Se analizó el volumen del embalse requerido con relación a la ampliación de superficie de regadío para la gestión actual y futura bajo el contexto del cambio climático, se visualiza que, para mantenerse dentro del rango de la confianza de los cambios esperados del cambio climático, se puede llegar a ampliar una superficie de regadío de 14 000 ha con 100 hm³. Para un cambio de precipitación nula los resultados muestran un volumen de embalse mayor para las mismas hectáreas de superficie de regadío de la gestión actual. Futuros estudios pueden enfocarse en el análisis económico, social y ambiental de la construcción de un embalse y la ampliación de la frontera agrícola.

EN VALENCIANO

a disponibilitat dels recursos hídrics al Perú varia d'acord amb cada regió hidrogràfica, les majors demandes es troben en la costa peruana els qui exerceixen pressió sobre els recursos hídrics, per tant, és necessari quantificar i avaluar els recursos disponibles de les conques hidrològiques.

El present estudi es desenvolupa a la Conca del riu Pativilca situada en la zona centre del Perú i té per objectiu analitzar la gestió actual i futura dels recursos hídrics amb la intervenció del canvi climàtic, a partir del coneixement del comportament hidrològic de la conca.

Aquesta conca és d'importància econòmica, social i ambiental ja que proveeix a les demandes consumptives especialment a la qual es troba en la zona baixa de la conca (costa), i a més és una zona de conservació de la gambeta de riu.

Per a l'abast de l'objectiu es desenvolupa un model hidrològic, model de gestió i l'avaluació de dos escenaris de canvi climàtic.

Per l'heterogeneïtat de la conca es treballa per zones, l'Alt, Mitjà i Baix Pativilca. El model hidrològic Temez s'implementa per a cada zona, usa pocs paràmetres amb dades d'entrada de precipitació i ETP, el calibratge del model proporciona aportacions mensuals de la conca, sent l'Alt Pativilca la que més aporta a la conca. El model de gestió pren com a base els últims 20 anys del registre de les aportacions determinades del model hidrològic, els resultats mostren una gestió actual estable d'acord amb els indicadors de garantia, l'eficiència de reg del sistema és el 51%.

Els escenaris de canvi climàtic avaluats són RCP 4.5 i RCP 8.5 a curt (2020 -2039) i llarg termini (2080 -2099), les anomalies van ser obtinguts del CCKP (Portal de coneixements sobre el canvi climàtic) del Banc Mundial i corroborats amb el cinqué informe de l'IPCC. Els resultats de cada escenari assenyalen increments de temperatura i precipitació fins a fi de segle per a la zona d'estudi. Com a resultat s'espera per a tots dos escenaris un augment del 4% al 30% de les aportacions anuals. La gestió es mantindrà en equilibri perquè tots dels escenaris mostren increments en les aportacions mensuals. La dotació de la demanda agrícola presenta increments.

La simulació de la gestió dels recursos hídrics amb la inclusió de nous projectes de regadiu (8 000 ha) indica un desequilibri del sistema, el mateix succeeix sota el context del canvi

climàtic. Es va analitzar el volum de l'embassament requerit en relació amb l'ampliació de superfície de regadiu per a la gestió actual i futura sota el context del canvi climàtic, es visualitza que, per a mantindre's dins del rang de la confiança dels canvis esperats del canvi climàtic, es pot arribar a ampliar una superfície de regadiu de 14 000 ha amb 100 hm³. Per a un canvi de precipitació nul·la els resultats mostren un volum d'embassament major per a les mateixes hectàrees de superfície de regadiu de la gestió actual. Futurs estudis poden enfocar-se en l'anàlisi econòmica, social i ambiental de la construcció d'un embassament i l'ampliació de la frontera agrícola.

EN INGLES

The disponibility the hydric resources in Peru, vary the according the hydrographic region, the biggest demands are on the Peruvian coast who put pressure on water resources, therefore, it is necessary to quantify and evaluate the available resources of the watersheds.

This study develops in the river Pativilca watershed, localited in the center zone of Peru, have objetive is analyze the gestion the current and future water resources, whit intervection the climate change, from analysis hidrologic the watershed.

This watershed is of economic, social, enviromental, importance, since it caters to consumptive demands, especially the low zone the watershed (coast), and in this zone is preserver the river shrimp.

To achieve the objectives It develops a hidrologic model, gestion and the evaluation of two scenarios the climate change. Due the heterogeneity watershed, it is established three zones, Hight, middle, Pativilca low. The Temez hidrologic model, it is implementend in each zone, use few inputs as precipitation, ETP. The calibration of model provides, montly contributions of watershed, being the high Pativilca the more cotribution. The gestion model take as register base the aportation the 20 years, determined trough hidrologic model, results show a stable current management according to warranty indicators, the irrigation efficiency of the system is 51%.

Climate change scenarios assessed are CPR 4.5 and CPR 8.5 a short (2020 -2039) and long-term (2080 -2099), anomalies were obtained from the World Bank's CCKP (Climate Change Knowledge Portal) and corroborated by the fifth IPCC report. The anomalies in each scenario show temperature and precipitation increases until the end of the century for the

study area. As a result, an increase of 4% to 30% of annual contributions is expected for both scenarios. Management will remain in balance because all of the scenarios show increases in monthly contributions and are offset by the increase in temperature. Agricultural demand is increasing. Agricultural demand is increasing.

Simulation of water resource management with the inclusion of new irrigation projects (8 000 ha) indicates an imbalance in the system, the same goes under the context of climate change.

The volume of the required reservoir was analyzed in relation to the expansion of irrigated area for the current management and future with the influence of climate change. It is visualized that, to stay within the confidence range of expected changes in climate change, you can expand an irrigation area of 14,000 ha with 100 hm³. For a zero precipitation change the results show a higher reservoir volume for the same hectares of irrigated area of current management. Future studies can focus on the economic, social and environmental analysis of the construction of a reservoir and the expansion of the agricultural frontier.

Palabras claves español: Cambio climático, recursos hídricos, RCP, Rio Pativilca, gestión

Palabras clave inglés: climate change, water resources, RCP, River Pativilca, management

Palabra clave valenciano: canvi climàtic, recursos hídrics, RCP, Riu Pativilca, gestió

Fecha: Julio del 2019

Fdo. (Alumno)

ÍNDICE

1.	INTRODUCCION Y OBJETIVOS	1
2.	ÁMBITO DE ESTUDIO E INFORMACIÓN DISPONIBLE	4
2.1.	DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA CUENCA	4
2.1.1.	Geología.....	5
2.1.2.	Geomorfología	6
2.1.3.	Usos de suelos.....	7
2.1.4.	Hidrogeología	8
2.1.5.	Áreas naturales protegidas	9
2.2.	INFORMACIÓN DISPONIBLE.....	10
2.2.1.	Datos Hidrometereológicos	10
2.2.2.	Demanda hídrica	12
3.	ESTADO DEL ARTE	17
3.1.	MODELOS HIDROLÓGICOS	17
3.1.1.	Modelo Hidrológico Temez	18
3.2.	MODELO DE GESTIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS	20
3.2.1.	Oferta y demanda de los recursos hídricos.....	21
3.2.2.	Caudal ecológico	22
3.3.	CAMBIO CLIMÁTICO	23
3.3.1.	Cambio climático global y regional	24
3.3.2.	Escenarios de cambio climático	25
3.3.3.	Cambio climático en el Perú.....	26
4.	METODOLOGÍA	28
4.1.	MODELO HIDROLÓGICO	29
4.2.	MODELO DE GESTIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS	32
4.3.	CAUDALES ECOLÓGICOS.....	34
4.4.	DEMANDAS FUTURAS.....	35
4.5.	SERIES DE CAMBIO CLIMÁTICO Y SU INFLUENCIA EN LA GESTIÓN DE LOS RECURSOS HÍDRICOS	35
5.	APLICACIÓN Y RESULTADOS	37
5.1.	SIMULACIÓN DEL MODELO HIDROLÓGICO	37

5.1.1.	Análisis histórico de la precipitación.....	38
5.1.2.	Puntos de calibración.....	44
5.2.	RESULTADOS DEL MODELO HIDROLÓGICO.....	45
5.2.1.	Alto Pativilca.....	45
5.2.2.	Medio Pativilca.....	48
5.2.3.	Bajo Pativilca.....	52
5.3.	COMPARACIÓN DE ESTUDIOS PREVIOS.....	56
5.4.	BALANCE DEL CICLO HIDROLÓGICO.....	57
5.5.	MODELO DE GESTIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS.....	58
5.5.1.	Demandas.....	58
5.5.2.	Eficiencia de riego.....	60
5.5.3.	Resultados del modelo de gestión.....	62
5.6.	INFLUENCIA DEL CAMBIO CLIMÁTICO.....	64
5.6.1.	Anomalías de cambio climático.....	64
5.6.2.	Influencia de cambio climático en los recursos hídricos.....	66
5.6.3.	Cambio en la dotación de la demanda agrícola.....	67
5.6.4.	Cambio climático en la gestión de los recursos hídricos.....	68
5.6.5.	Cambio climático en los nuevos proyectos.....	73
6.	CONCLUSIONES.....	78
7.	LINEAS FUTURAS DE INVESTIGACION.....	80
8.	REFERENCIAS.....	81

Lista de figuras

Figura 1. Mapa de ubicación de la cuenca del rio Pativilca	4
Figura 2. Mapa geológico de la cuenca del rio Pativilca	5
Figura 3. Morfología de la cuenca del rio Pativilca	6
Figura 4. Usos de suelo de la cuenca del rio Pativilca (Fuente: (ANA, 2015)).....	7
Figura 5. Mapa Hidrogeológico de la cuenca Pativilca	8
Figura 6. Mapa de las Áreas naturales Protegidas dentro de la jurisdicción de la cuenca.....	9
Figura 7. Estaciones Hidrométricas ubicados a lo largo de la cuenca	11
Figura 8. Mapa de distribución de la precipitación y temperatura	12
Figura 9. Mapa de distribución de las demandas consuntivas y no consuntivas	12
Figura 10. Cultivos instalados dentro de la jurisdicción de la Junta de Usuarios de Agua del sector hidráulico de la cuenca del rio Pativilca.	13
Figura 11. Esquema conceptual de la simulación del ciclo hidrológicos del modelo (fuente: Paredes et al, 2014).....	18
Figura 12. Cambio en la temperatura promedio de la superficie (a) y cambio en la precipitación promedio (b) (Fuente: IPCC 2013).	24
Figura 13. Forzamiento radiactivo de los 4 escenarios RCP (Fuente: IPCC 2013).....	25
Figura 14. Esquema metodológico del estudio.....	28
Figura 15. Esquema metodológico de la calibración del Modelo Hidrológico Temez.....	30
Figura 16. Esquema metodológico del modelo de gestión.....	32
Figura 17. Esquema para la determinación de la eficiencia de riego	33
Figura 18. Esquema metodológico de la influencia del cambio climático en el sistema hidrológico de la cuenca	36
Figura 19. División de la cuenca en 3 zonas: Alto, Medio y Bajo Pativilca.....	38
Figura 20. Ubicación de las Estaciones Pluviométricas.....	39
Figura 21. Periodo de registro de la precipitación de las estaciones pluviométricas.....	39
Figura 22. Listado de registro de datos de precipitación de las estaciones pluviométricas....	40
Figura 23. Precipitación anual de cada estación agrupada para los tres periodos.....	42
Figura 24. Precipitación registrada del año 2008 – 2018 en la cuenca del rio Pativilca.....	43
Figura 25. Punto de calibración en el Alto Pativilca	45
Figura 26. Contraste de caudales anuales aforados y simulados en el Alto Pativilca.....	46

Figura 27. Contraste de caudales mensuales aforados y simulados en el Alto Pativilca.....	47
Figura 28. Caudales simulados y observados del año medio del Alto Pativilca.....	47
Figura 29. Aportación anual del Alto Pativilca	48
Figura 30. Aportación media mensual del Alto Pativilca	48
Figura 31. Punto de calibración del Medio Pativilca	49
Figura 32. Contraste de caudales anuales aforados y simulados en el Medio Pativilca.....	50
Figura 33 . Contraste de caudales mensuales aforados y simulados en el Medio Pativilca ...	50
Figura 34. Caudales simulados y observados del año medio del Medio Pativilca.....	51
Figura 35. Aportación anual del modelo del Medio Pativilca.	51
Figura 36. Aportación media mensual del Medio Pativilca	51
Figura 37. Punto de calibración del Bajo Pativilca	52
Figura 38. Contraste de caudales anuales aforados y simulados en el Bajo Pativilca	54
Figura 39. Contraste de caudales mensuales aforados y simulados en el Bajo Pativilca	54
Figura 40. Caudales simulados y observados del año medio del Bajo Pativilca	54
Figura 41. Aportación anual del modelo del Bajo Pativilca.	55
Figura 42. Aportación media mensual del Bajo Pativilca.....	55
Figura 43. Comparación de las aportaciones del modelo WEAP, Temez y el caudal observado	56
Figura 44. Balance hídrico de la cuenca del rio Pativilca	57
Figura 45. Distribución mensual de la demanda urbana y agrícola.....	58
Figura 46. Distribución mensual del caudal ecológico.....	59
Figura 47. Sectores de la Junta de Usuarios de Agua del sector hidráulico de la cuenca del rio Pativilca	60
Figura 48. Déficit anual de la demanda urbana, industrial y agrícola.....	63
Figura 49. Anomalías mensuales de precipitación para corto y largo plazo.....	65
Figura 50. Anomalía de temperatura mensual a corto y largo plazo.....	65
Figura 51. Cambio en las aportaciones mensuales bajo el escenario RCP 4.5	66
Figura 52. Cambio en las aportaciones mensuales bajo el escenario RCP 8.5	66
Figura 53. Porcentaje de variación de la dotación para los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5.....	68
Figura 54. Déficit anual de la demanda urbana y agrícola para el escenario RCP 4.5 a corto plazo.	69

Figura 55. Déficit anual de la demanda urbana y agrícola para escenario RCP 4.5 a largo plazo	70
Figura 56. Déficit anual de la demanda urbana y agrícola para escenario RCP 8.5 a corto plazo	71
Figura 57. Déficit anual de la demanda urbana y agrícola para escenario RCP 8.5 a largo plazo	72
Figura 58. Déficit anual de la demanda urbana y agrícola para la gestión actual con nuevo proyecto de irrigación	74
Figura 59. Volumen del embalse vs la ampliación de la superficie agrícola	75
Figura 60. Volumen del embalse y ampliación de la superficie agrícola óptima para todos los escenarios.....	76
Figura 61. Volumen del embalse y la ampliación de la frontera agrícola sin variación de la precipitación.....	77

Lista de tablas

Tabla 1. Distribución mensual del volumen suministrado a las comunidades campesinas del Alto Pativilca(ANA, 2015)	14
Tabla 2. Distribución mensual del volumen suministrado a las comisiones de regantes del Bajo Pativilca	14
Tabla 3. Dotación anual del volumen suministrado demanda poblacional del Alto Pativilca (ANA, 2015)	15
Tabla 4. Dotación anual del volumen suministrado a la demanda Poblacional del Bajo Pativilca	15
Tabla 5. Dotación anual del volumen suministrado a la demanda Industrial (ANA, 2015)	16
Tabla 6. Dotación anual del volumen suministrado a las centrales hidroeléctricas (ANA, 2015)	16
Tabla 7. Variabilidad de la temperatura y precipitación para dos escenarios.....	26
Tabla 8. Cambio en las variables climáticas para la región hidrográfica 4 del pacifico.	27
Tabla 9. Cambio de temperatura y precipitación para dos escenarios de cambio climático .	27
Tabla 10. Calidad de ajuste de la eficiencia de Nash-Sutcliffe. (Fuente: Molnar, 2011)	31
Tabla 11. Metodología para el cálculo de los caudales ecológicos. Fuente: (ANA, 2015).....	34
Tabla 12. Característica de las tres zonas de la cuenca	37
Tabla 13. Grupo de las estaciones pluviométricas según ubicación, altitud y región climática. Fuente: (ANA, 2015).....	41
Tabla 14. Periodo de calibración	44
Tabla 15. Parámetros de calibración del Alto Pativilca	46
Tabla 16. Indicadores de bondad de ajuste en el Alto Pativilca	46
Tabla 17. Parámetros de calibración de Medio Pativilca	49
Tabla 18. Indicadores de bondad de ajuste Medio Pativilca	49
Tabla 19. Parámetros de calibración del modelo del Bajo Pativilca	52
Tabla 20. Indicadores de bondad de ajuste del Bajo Pativilca	53
Tabla 21. Dotación de la demanda urbana/industrial y agrícola, el caudal ecológico	59
Tabla 22. Eficiencia de riego por sector hidráulico	61
Tabla 23. Eficiencia de riego del sector hidráulico Paramonga	61
Tabla 24. Criterios de garantía de las demandas del PNGRH	62

Tabla 25. Indicadores de garantía de la demanda urbana/industrial y agrícola	63
Tabla 26. Resultados de la variación de las aportaciones para cada escenario	67
Tabla 27. Estimación de la variación de la dotación de la demanda agrícola para el escenario RCP 4.5 y RCP 8.5.....	67
Tabla 28. Garantía y déficit de las demandas bajo es escenario RCP 4.5 a corto plazo	69
Tabla 29. Garantía y déficit de las demandas bajo es escenario RCP 4.5 a largo plazo.....	70
Tabla 30. Garantía y déficit de las demandas bajo es escenario RCP 8.5 a corto plazo	71
Tabla 31. Garantía y déficit de las demandas bajo es escenario RCP 8.5 a largo plazo.....	72
Tabla 32. Garantía y déficit de las demandas de la gestión actual con nuevo proyecto de irrigación.....	73
Tabla 33. Indicadores de garantía del sistema para diferentes escenarios con ampliación de la frontera agrícola	74

1. INTRODUCCION Y OBJETIVOS

El agua es un recurso indispensable y a la vez escaso en algunas regiones del planeta, el aumento de la demanda por el incremento de las actividades económicas y el crecimiento poblacional, la protección ambiental y la incertidumbre de los efectos del cambio climático conllevan necesariamente a una adecuada gestión de los recursos hídricos. La gestión de los recursos hídricos implica la existencia de un equilibrio de la oferta y la demanda en base a la disponibilidad hídrica de la cuenca teniendo en cuenta todos los procesos que ocurren en ella.

Los efectos del cambio climático en los recursos hídricos causados por factores climáticos como los cambios en la temperatura y la precipitación, provoca una redistribución de los recursos hídricos en el espacio y el tiempo, así mismo tendrá un efecto directo en otros factores como la humedad del suelo, la evaporación, la escorrentía, etc. (Yang, Men, & Lin, 2011).

El quinto informe del IPCC (Panel Intergubernamental sobre el cambio climático) menciona un incremento de temperatura y cambios estacionales de la precipitación según el área geográfica en América del sur, estos cambios de temperatura tendrán repercusiones sobre los glaciares de la Cordillera de los Andes y el ciclo hidrológico. Las regiones costeras del Perú dependen principalmente del agua que se origina en las montañas (lluvias y deshielo de los glaciares), la mayor demanda consuntiva se sitúa en esta zona costera donde existen iniciativas de inversión pública y privada para una agricultura de regadío a gran escala y una industrialización, la influencia del cambio climático aumenta la incertidumbre de la disponibilidad y el balance hídrico de la zona.

La Cuenca del río Pativilca se encuentra ubicado en la zona centro del Perú, cuenta con un área de 4837 km², nace de la cordillera occidental de los andes y desemboca en el océano pacífico, presenta una variabilidad climática desde la zona altoandina hasta la costa peruana; la mayor parte de la población se encuentra ubicada en la zona costera depende de los recursos hídricos así mismo las actividades agrícolas y las hidroeléctricas.

El desarrollo de estudios sobre recursos hídricos de la cuenca es limitado, pero en los últimos años las autoridades competentes han empezado a elaborar diversos estudios sobre la planificación, evaluación y gestión de recursos hídricos. Para fortalecer los avances que se vienen desarrollando es necesario tener un conocimiento profundo del comportamiento de la cuenca, además incluir el cambio climático, de manera que se proporcione información, equilibrio entre la demanda y la oferta, y medidas de adaptación.

Para determinar el comportamiento de la cuenca y el fortalecer la gestión de los recursos hídricos frente a diversos escenarios es necesario la aplicación de modelos, aunque estos modelos vienen cargados con incertidumbre, los estudios que se realicen identifican aspectos que requieren mayor énfasis para la reducción de estas incertidumbres.

El objetivo general del presente estudio es analizar la gestión integrada de los recursos hídricos en la cuenca del río Pativilca incluyendo los escenarios de cambio climático. Para el cumplimiento de este objetivo se plantean otros objetivos específicos que se detallan a continuación:

- Determinar el comportamiento hidrológico de la cuenca a través de la aplicación del modelo hidrológico Temez, tomando como base datos históricos mensuales de precipitación y temperatura de 1965 – 2013.
- Simular el comportamiento de la gestión actual de los recursos hídricos de la cuenca con la inclusión de caudales ecológicos a través de la aplicación de un modelo de gestión.
- Obtener las anomalías de precipitación y temperatura de los modelos climáticos del quinto informe (AR5) del Panel Intergubernamental sobre el cambio climático (IPCC) para los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5 a corto (2020-2039) y largo plazo (2080-2099).
- Determinar la influencia del cambio climático sobre la oferta hídrica de la cuenca, determinar las necesidades hídricas de los cultivos tanto actual y futura a través del modelo hidrológico calibrado y así mismo determinar la eficiencia de riego.

- Simular el comportamiento de la gestión futura con la intervención de nuevos proyectos de irrigación y los escenarios de cambio climático.
- Determinar el comportamiento entre el crecimiento de la superficie agrícola regable y el volumen de un reservorio para diferentes escenarios de cambio climático.

2. ÁMBITO DE ESTUDIO E INFORMACIÓN DISPONIBLE

2.1. DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA CUENCA

El presente estudio se desarrolló en la Cuenca del río Pativilca - Perú, limita al norte con la cuenca del río Fortaleza, al noreste con la cuenca del río Santa y al Sur con la cuenca del río Supe. Geográficamente está comprendida entre 9°50' y 10°55' de Latitud Sur y los meridianos 76°45' y 77°50', de Longitud Oeste. Altitudinalmente, se extiende desde el nivel del mar hasta la línea de cumbres de la Cordillera Occidental de los Andes como se muestra en la Figura 1. Políticamente está comprendida entre dos departamentos (Lima y Ancash) y 5 provincias (ANA, 2015).

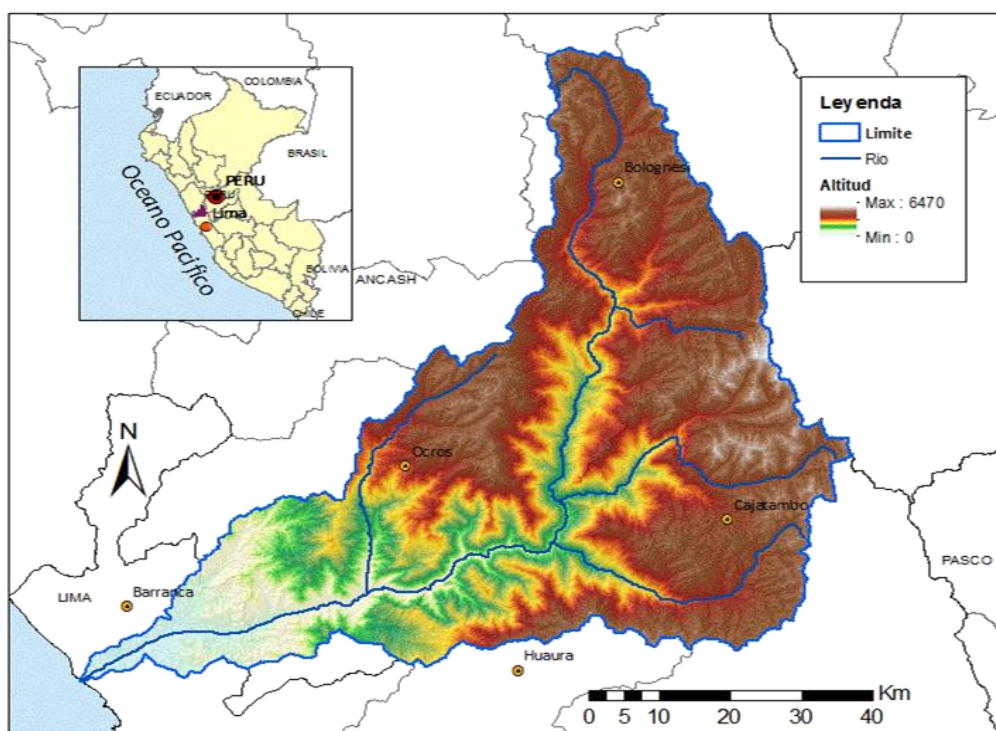


Figura 1. Mapa¹ de ubicación de la cuenca del río Pativilca

La cuenca del río Pativilca pertenece a la vertiente del Pacífico según la clasificación realizada por la Autoridad Nacional del Agua (ANA) y drena un área total de 4 837 Km². Durante su recorrido recibe números aportes de afluentes, por la margen derecha las quebradas de Pischaragra, Desagüe y Huanchay; el margen izquierdo recibe las aportaciones de la Quebrada de Mashcus los ríos LLamac, Rapay y Gorgor (Rivera & Chira, 2011).

¹ Fuente: Modelo de Elevación digital obtenida de la NASA.

2.1.1. Geología

La cuenca del río Pativilca como se observa en la Figura 2 está formada por rocas y suelos cuyas edades van desde el Jurásico superior al cuaternario, sobre el margen derecho de la cuenca se constituyen principalmente formaciones estratigráficas de rocas sedimentarias marinas como calizas, areniscas, lutitas y limolitas; el margen derecho del nacimiento de la cuenca se localizan rocas volcánicas estratificadas que consta de una extensa y variada formación volcánica conformada por piroclastos, con intercalaciones de lavas y brechas por piroclastos. En la cuenca media se presentan areniscas grises como lutitas, limolitas y calizas; también se observa la presencia de rocas ígneas intrusivas del Batolito Andino, así como stocks y otros plutones. En la cuenca baja se presentan depósitos cuaternarios, entre ellos están los depósitos aluviales, coluviales y eólicos; los depósitos aluviales incluyen las terrazas, los rellenos de quebrada y los valles, así mismo las terrazas están formadas por gravas, arenas y limos (INGEMMET, 1985) .

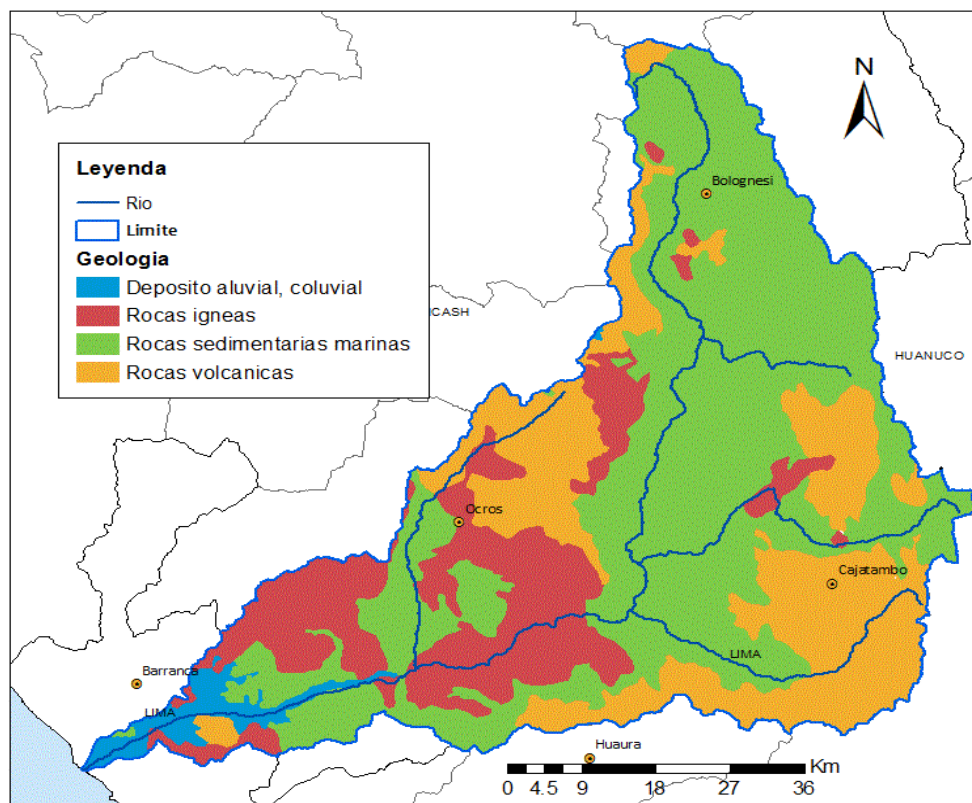


Figura 2. Mapa geológico de la cuenca del río Pativilca

2.1.2. Geomorfología

El relieve de la cuenca corresponde a una hoya hidrográfica de forma alargada, fondo profundo, fuertes pendientes, de forma alargada y en partes abrupta, cortada por quebradas de cauce profundo y estrechas gargantas. La cuenca se encuentra delimitada por montañas con cobertura glaciaria, continuando con valle glaciares característicos con forma de U (Figura 3).

La dirección al océano pacifico está limitada por montañas con laderas moderadas y fuertes con un alto proceso erosivo, así mismo está limitada por una forma de montaña estructural con relieve formada por fallas; sus cumbres muestran un sostenido y rápido descenso del nivel. En la parte baja se ha producido depósitos del material aluvionico dando forma a un cono deyectivo (INGEMMET, 1985).

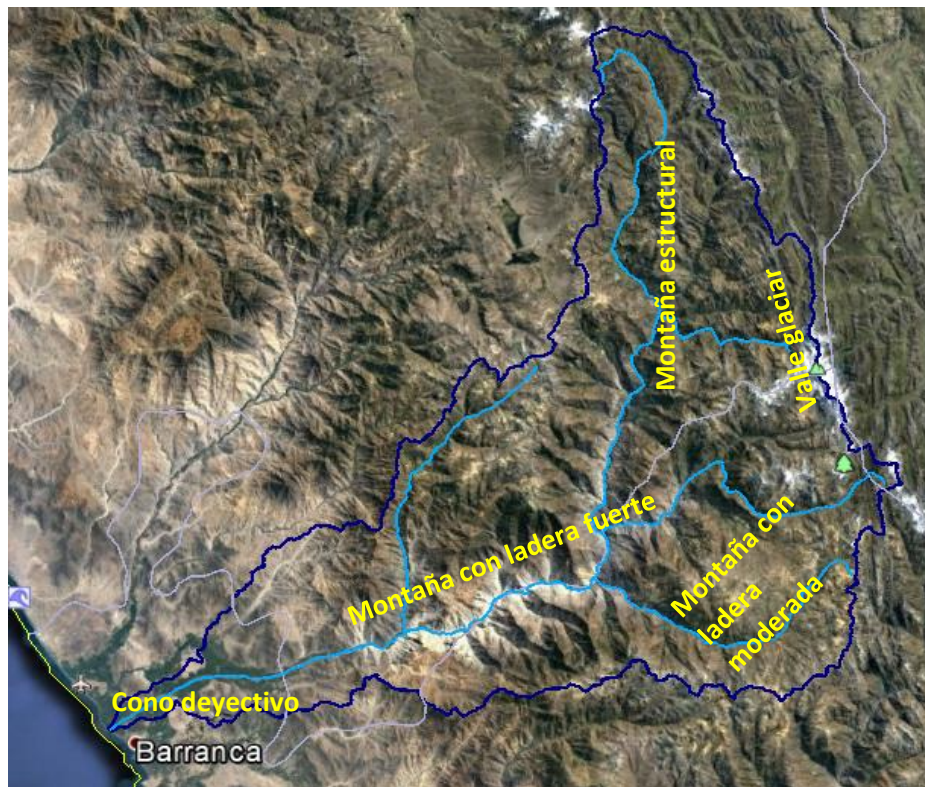


Figura 3. Morfología de la cuenca del río Pativilca. Fuente: Google Earth

2.1.3. Usos de suelos

El uso actual de suelo en la cuenca se divide en agrícolas, áreas de pradera/arbustos, zonas áridas, cuerpos de agua, zonas de nieve y áreas construidas, siendo la más significativa en cuanto a la mayor superficie de la cuenca alta y media es la zona de pradera y arbustos comprendida entre los 1500 msnm y los 4 500 msnm. La segunda más significativa por área ocupada es la zona árida ubicada en la cuenca baja y una parte en la cuenca media, finalmente con menor superficie es la zona agrícola, ubicadas en la cuenca baja (Figura 4).

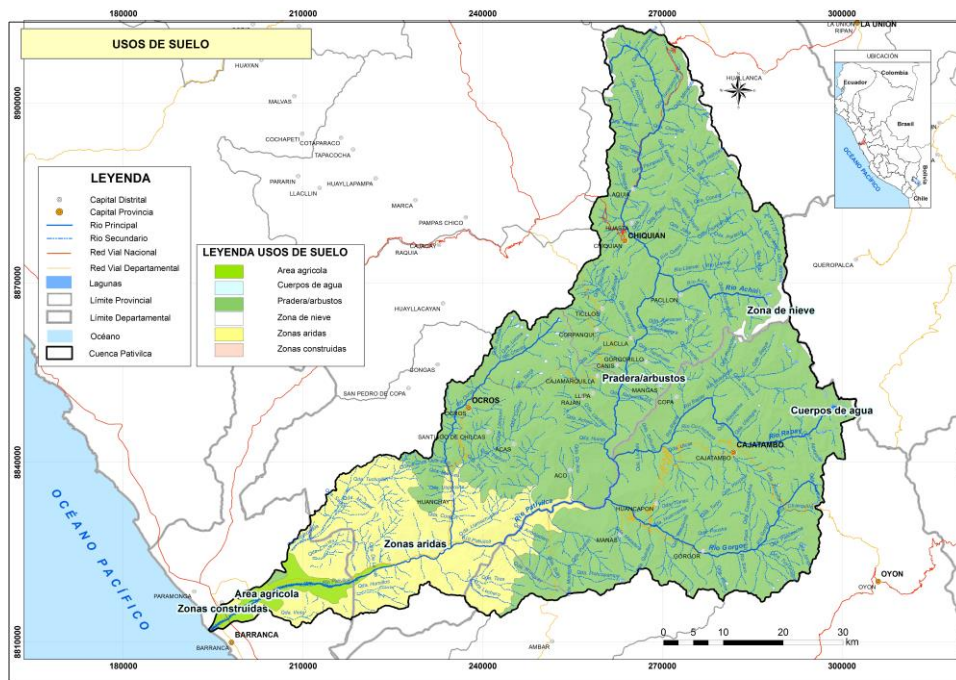


Figura 4. Usos de suelo de la cuenca del río Pativilca Fuente: (ANA, 2015)

2.1.4. Hidrogeología

Dentro de la cuenca la definición de la unidad hidrogeológica se realiza de acuerdo con la geología y geomorfología. La Figura 5 describe la zona nororiental de la cuenca ubicándose un acuífero fisurado kárstico y acuitardo sedimentario; en la zona sureste de la cuenca alta aflora un acuífero fisurado volcánico encontrándose fallada y diaclasada; siguiendo la cuenca media se denota la existencia de acuifugos y acuitardos. El único acuífero que es aprovechado y estudiado es el acuífero detrítico poroso no consolidado aluvial con porosidad y permeabilidad elevada ubicada en la cuenca baja (ANA, 2015).



Figura 5. Mapa² Hidrogeológico de la cuenca Pativilca

² Fuente: Mapa Hidrogeológico Nacional. INGEMMET.

2.1.5. Áreas naturales protegidas

En la cuenca se encuentra la Zona Reservada de la Cordillera de Huayhuash, alberga 4 áreas de conservación privadas: Huayllapa, Pacllán, Llamac y Microcuenca de Paria tal como se observa en la Figura 6. Es necesario mencionar que una parte del Parque Nacional de Huascarán se encuentra dentro de la cuenca Pativilca (ANA, 2015).

Las áreas naturales protegidas de la cuenca albergan ecosistemas andinos como las bofedales (humedales) y el bosque de polylepis, los mismo albergan diversidad de especies, además presentan nevados como el Yerupaja ubicado en la cordillera Huayhuash el segundo más alto del Perú ubicado a una altura de más de 6000 m.s.n.m.

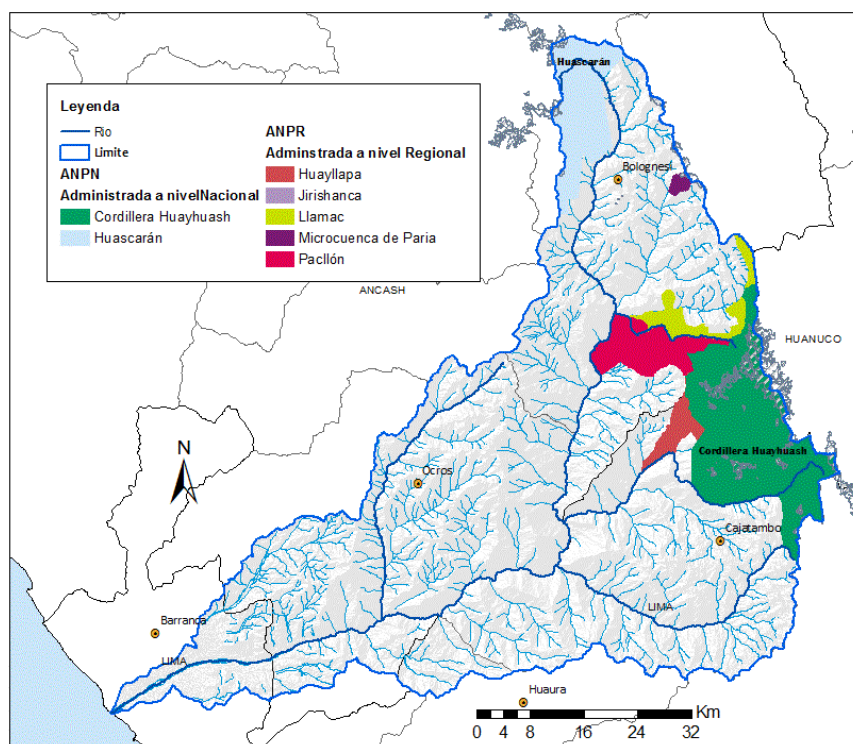


Figura 6. Mapa de las Áreas naturales Protegidas dentro de la jurisdicción de la cuenca

2.2. INFORMACIÓN DISPONIBLE

2.2.1. Datos Hidrometereológicos

Los datos de precipitación, temperatura y caudales se obtuvieron de la Autoridad Nacional del Agua (ANA), entidad adscrita al Ministerio de Agricultura y Riego (MINAGRI), cumple las funciones de dirigir y ejecutar el manejo de los recursos hídricos a nivel de gestión de cuencas. Las estaciones meteorológicas son operadas por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) tienen registros de precipitación y temperatura desde 1964, pero cabe mencionar que hay estaciones meteorológicas que no cuentan con registros completos dentro de la cuenca. La Autoridad Nacional de Agua realizó un estudio de evaluación de recursos hídricos de la Cuenca del Río Pativilca por el cual proporciona datos rellenados y extendidos de las series de precipitación y temperatura del año 1965 al 2013. Las series de temperatura se recogieron de 6 estaciones climáticas los cuales 3 se encuentran dentro de la cuenca y 3 se encuentran cerca de la cuenca. Las series de precipitación fueron tomadas de 14 estaciones pluviométricas ubicadas a lo largo de la cuenca de los cuales 8 se encuentran alrededor de la cuenca.

Dentro de la cuenca se identifican 5 estaciones hidrométricas ubicadas en la cuenca media y baja estos cuentan con datos incompletos, solo se tiene una estación (Estación Yanapampa) que cuenta con registros medios mensuales de más de 40 años. En la actualidad solo existe una estación hidrométrica en operación ubicado en la cuenca media (Estación Cahua) operada por una empresa privada (Figura 7), los registros de los caudales en esta estación permiten realizar la distribución de este recurso a toda la demanda aguas abajo.

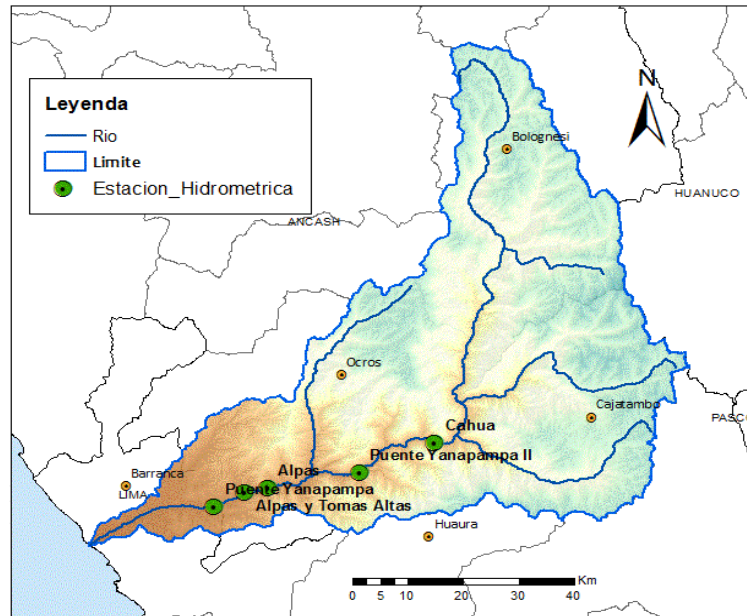


Figura 7. Estaciones Hidrométricas ubicados a lo largo de la cuenca

La precipitación es variable con respecto a la altitud, presentándose en la costa una precipitación media de 26 mm y en la zona altoandina una precipitación media de 900 mm, los periodos húmedos y secos son variables a lo largo en la cuenca ya que en la cuenca baja los periodos secos son de noviembre hasta marzo, caso contrario en la cuenca alta se presenta entre los meses de junio y setiembre. (Figura 8)

La temperatura presenta un gradiente que aumenta con respecto a la altitud, siendo las temperaturas más elevadas en la desembocadura con temperatura superior a los 20°C (costa) y las más bajas en las montañas (zona altoandina) con temperatura menos de 5°C (Figura 8), presenta una estacionalidad casi constante a lo largo del año.

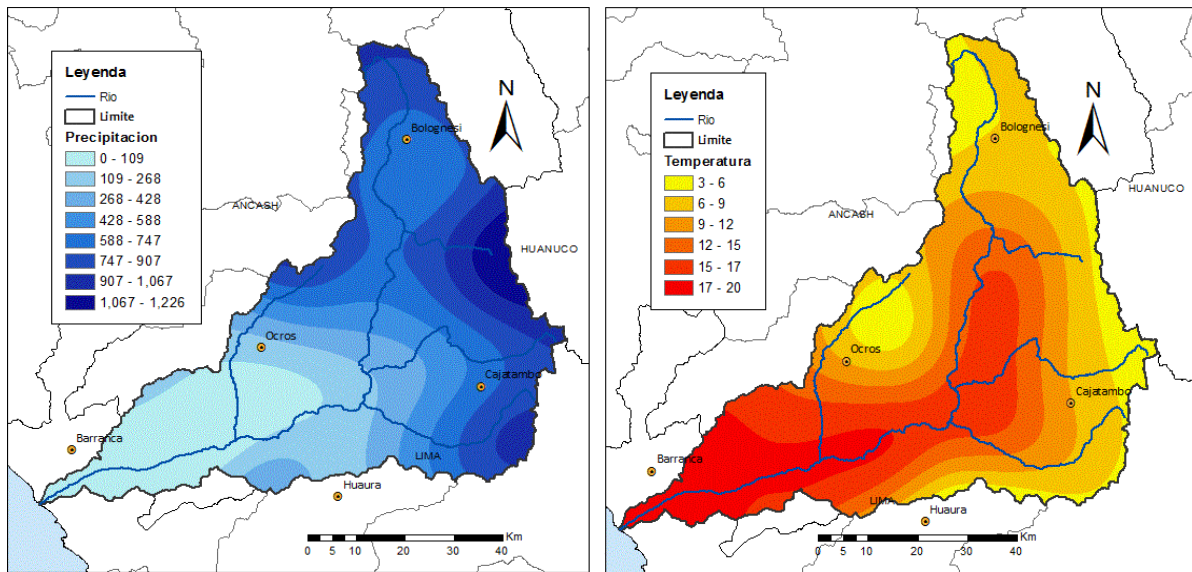


Figura 8. Mapa de distribución de la precipitación y temperatura

2.2.2. Demanda hídrica

Dentro de la cuenca se identifican 3 demandas consuntivas (agrícola, industrial y poblacional) y una demanda no consuntiva (hidroeléctrica) como se observa en la Figura 9.

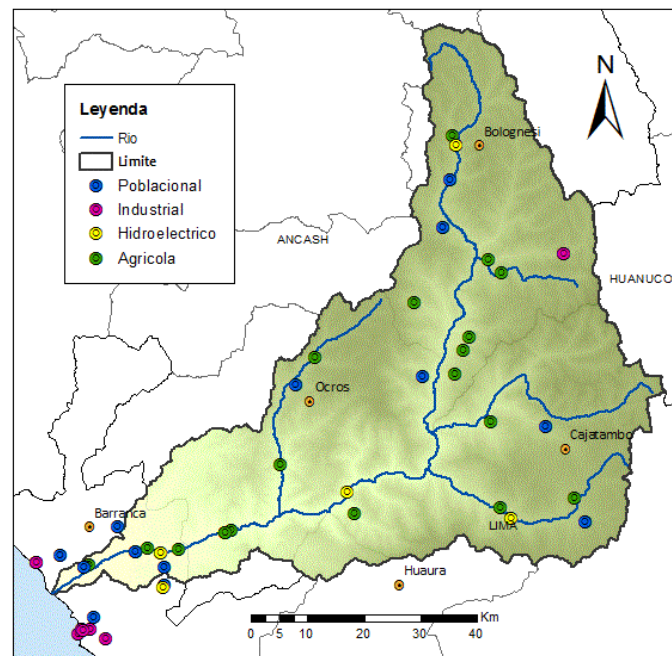


Figura 9. Mapa de distribución de las demandas consuntivas y no consuntivas

La demanda agrícola es la que tiene mayor consumo de agua con 458 hm³, siendo la cuenca baja y parte de la cuenca media la zona donde se ubica el 94% de la demanda agrícola, el resto se encuentra distribuido dentro de la cuenca alta, estas están organizadas en comunidades campesinas. Para una mejor distribución de la demanda agrícola se divide la cuenca en dos partes, Bajo Pativilca que es administrada por la la Junta de Usuarios de Agua del sector hidráulico de la cuenca del rio Pativilca, está a su vez administrada por la Autoridad Local de Agua Barranca; y Alto Pativilca a partir de 1000 msnm quienes están agrupadas en comunidades campesinas. En el alto Pativilca se desarrollan cultivos de autoconsumo como la papa, maíz, haba, cebada, trigo y pastos (Granados, 2017). En el bajo Pativilca se desarrollan cultivos como Caña de Azúcar, maíz amarillo, papa, esparrago, alfalfa, Aji papikra, frijol canario, entre otros tal como se muestra en el la Figura 1Figura 10.

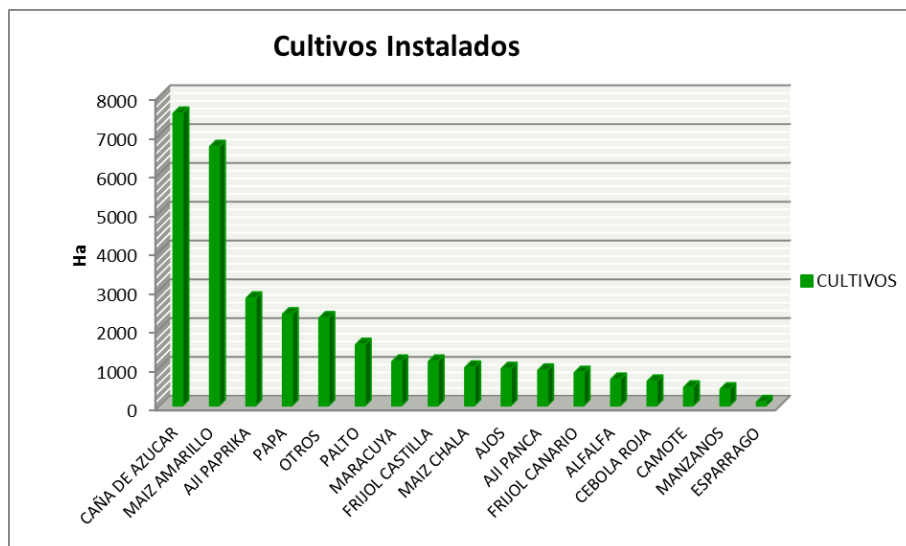


Figura 10. Cultivos instalados³ dentro de la jurisdicción de la Junta de Usuarios de Agua del sector hidráulico de la cuenca del rio Pativilca.

La Junta de Usuarios de Agua del sector hidráulico de la cuenca del rio Pativilca está organizada en 16 comisiones de regantes y 9 sectores hidráulicos. El área bajo riego a cargo de la junta de usuarios del valle Pativilca es 27 015 ha y el área del alto Pativilca de la cuenca es 3 041 ha.

³ Fuente: Plan de aprovechamiento de los recursos hídricos 2017 – 2018 de la Junta de Usuarios de usuarios de Agua del sector hidráulico de la cuenca del rio Pativilca.

La distribución mensual de agua a las comunidades campesinas se muestra en la Tabla 1.

La distribución mensual a la demanda agrícola (hm^3) a cada comisión de usuarios se muestra en la Tabla 2.

Tabla 1. Distribución mensual del volumen suministrado a las comunidades campesinas del Alto Pativilca. Fuente: (ANA, 2015)

Comunidad Campesina	Area (Ha)	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
C.C. Aquia	178.7	0.06	0.03	0.07	0.17	0.23	0.22	0.10	0.19	0.21	0.12	0.03	0.03
C.C. de Gorgorillo	100	0.03	0.02	0.04	0.10	0.14	0.13	0.06	0.11	0.12	0.07	0.02	0.02
C.C. de Ticllos	78.01	0.01	0.01	0.02	0.04	0.06	0.06	0.03	0.05	0.05	0.03	0.01	0.01
C.C. Llamac	161.4	0.05	0.02	0.06	0.15	0.20	0.20	0.09	0.17	0.19	0.11	0.03	0.02
C.C. Mangas	45.4	0.01	0.01	0.01	0.04	0.05	0.05	0.02	0.04	0.04	0.03	0.01	0.01
C.C. Nanis	26.52	0.01	0.00	0.01	0.02	0.03	0.03	0.01	0.02	0.02	0.01	0.00	0.00
C.C. Ocros	1608.09	0.61	0.28	0.72	1.78	2.45	2.40	1.11	2.01	2.23	1.28	0.33	0.28
C.C. Paillon	131.5	0.06	0.03	0.07	0.16	0.23	0.22	0.10	0.18	0.20	0.12	0.03	0.03
Irrigación Cochas-Paca	261.94	0.08	0.04	0.10	0.24	0.33	0.32	0.15	0.27	0.30	0.17	0.05	0.04
Irrigación Poquián	103.73	0.03	0.01	0.04	0.10	0.13	0.13	0.06	0.11	0.12	0.07	0.02	0.01
Irrig. Pumarrinri-Cajatambo-Utcas	346.33	0.11	0.05	0.13	0.32	0.44	0.43	0.20	0.36	0.40	0.23	0.06	0.05

Tabla 2. Distribución mensual del volumen suministrado a las comisiones de regantes del Bajo Pativilca⁴

Comisión de Regantes	Area (Ha)	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
C.R. Araya	608.73	0.90	1.36	1.67	1.27	0.80	0.36	0.25	0.25	0.47	0.64	0.71	0.77
C.R. Chacarita Puerto	1365.94	1.72	2.75	2.68	2.04	1.44	0.78	0.72	0.30	0.75	1.27	1.45	1.36
C.R. Galpón	1997.98	3.95	4.61	4.31	3.75	3.37	2.42	2.25	2.56	3.39	6.45	4.71	4.88
C.R. Huanchay	387.77	0.43	0.50	0.47	0.42	0.35	0.26	0.23	0.22	0.26	0.32	0.38	0.43
C.R. Huarangal Antival	407.11	0.58	0.89	1.06	0.75	0.31	0.17	0.17	0.11	0.23	0.35	0.41	0.45
C.R. Huayto	2673.05	4.77	5.97	5.49	4.44	3.71	2.61	2.69	2.64	3.63	6.53	5.13	5.57
C.R. La Vega Otopongo	1696.92	2.39	3.16	2.98	2.44	1.81	1.15	1.12	1.14	1.85	3.03	2.61	2.71
C.R. Llamachupan	653.63	1.42	1.42	1.27	0.97	0.86	0.84	0.74	0.71	0.72	0.93	1.09	1.34
C.R. Paramonga	4407.59	8.12	9.93	9.26	7.96	6.96	4.87	4.59	5.14	6.71	12.68	9.24	9.76
C.R. Paycuan	764.08	0.87	1.42	1.31	0.96	0.65	0.41	0.35	0.10	0.28	0.44	0.45	0.51
C.R. Potao	1454.4	1.87	3.02	2.86	1.97	1.15	0.65	0.83	0.19	0.55	0.92	1.10	1.34
C.R. Purmacana	3212.3	5.35	6.75	5.71	3.92	2.42	1.87	2.14	1.48	2.30	3.74	4.13	4.85
C.R. San Nicolas	1778.89	3.24	3.78	3.45	2.63	1.84	1.19	1.20	1.17	1.72	3.36	3.03	3.43
C.R. Santa Elena	1031.99	1.57	2.12	1.86	1.30	0.82	0.49	0.51	0.24	0.49	0.82	0.95	1.19
C.R. Venado Muerto	2276.06	4.09	4.88	4.20	3.23	2.58	2.10	2.08	1.81	2.24	2.82	3.24	3.86
C.R. Vinto	2298.3	4.60	5.79	5.16	3.82	2.68	1.75	1.88	1.77	2.26	2.88	3.51	3.98

⁴ Datos obtenidos del Plan de aprovechamiento de los recursos hídricos 2017 – 2018

La cuenca del río Pativilca abastece a la demanda poblacional rural y urbana a través de bocatomas y canales. De la misma manera que la demanda agrícola, la demanda poblacional se divide en 2 zonas Bajo Pativilca donde se concentra la mayor demanda poblacional y la alto Pativilca con menor demanda como se muestra en la Tabla 3 y la Tabla 4. La fuente de agua para la demanda poblacional de la zona altoandina son manantiales y afluentes del río Pativilca. La fuente de agua para la demanda poblacional de la cuenca baja son las aportaciones del río Pativilca.

Tabla 3. Dotación anual del volumen suministrado demanda poblacional del Alto Pativilca. Fuente: (ANA, 2015)

Usuario	Dotación anual hm ³	Fuente
Compañía Minera Santa Luisa	0.0031	Río
ICM. Pachapaqui SAC.	0.0023	Río
Municipalidad Distrital de Gorgor	0.0491	Manantial
Poblacional Cajatambo	0.0935	Manantial
Poblacional Chiquian	0.1493	Manantial
Poblacional Ocros	0.0324	Manantial
Concejo Distrital de Llipa	0.0299	Río
E.M.S.R. Ltda. Halcon de Gorgor	0.0029	Río
Municipalidad Distrital de Aquia	0.0730	Río

Tabla 4. Dotación anual del volumen suministrado a la demanda Poblacional del Bajo Pativilca⁵

Usuario	Dotación anual hm ³	Fuente
C.P. Virgen de las Mercedes	0.045	Río
JASS Virgen del Rosario	0.011	Río
JASSBella Esperanza	0.064	Río
C.P. Menor Araya Grande	0.046	Río
Municipalidad de Supe Puerto	1.576	Río
SEMAPA	7.884	Río

Dentro de la demanda industrial se encuentran dos empresas mineras ubicadas en la cuenca alta del río Pativilca, tres pesqueras y 2 industrias fuera de la cuenca y una empresa tal como se muestra en la Tabla 5. Las tres pesqueras y las dos industrias son dotadas por el agua de la cuenca.

⁵ Datos obtenidos del Plan de aprovechamiento de los recursos hídricos 2017 – 2018

Tabla 5. Dotación anual del volumen suministrado a la demanda Industrial. Fuente: (ANA, 2015)

Usuario	Dotación anual hm³	Fuente
C.M. Santa Luisa S.A.	0.037	Río
ICM Pachapaqui S.A.C.	0.295	Río
AIPSA	4.433	Río
AGROKASA	0.032	Río
Negociaciones Pesquera del Sur S.A.	0.035	Río
Pesquera Conservera Garrido S.A.	0.005	Río
Pesquera Diamante S.A.	0.184	Río
Quimpac S.A.	10.619	Río

Se presencian centrales hidroeléctricas distribuidas a lo largo de la cuenca cada uno según la generación de energía y el caudal requerido como se muestra en la Tabla 6, siendo la Central Hidroeléctrica Cahua la que se encuentra en la cuenca media y es la encargada de la medición de los caudales (Estación limnimétrica) en este tramo, esta central hidroeléctrica recibe toda la aportación de la cabecera de la cuenca del río Pativilca y afluentes, actualmente es la única estación que mide los caudales de la cuenca hasta ese punto.

Tabla 6. Dotación anual del volumen suministrado a las centrales hidroeléctricas. Fuente: (ANA, 2015)

Usuario	Dotación anual hm³	Fuente
Central Hidroeléctrica Cahua	28.50	Río
Central Hidroeléctrica Santa Rosa S.A.C.	19.38	Río
Central Hidroeléctrica Roncador	162.08	Río
ICM Pachapaqui S.A.C.	157.68	Río
Empresa Administradora de Energía ADINELSA	24.03	Río

3. ESTADO DEL ARTE

3.1. MODELOS HIDROLÓGICOS

Los modelos hidrológicos intentan representar los diferentes procesos que ocurren en la distribución de la precipitación y la generación de la escorrentía de un sistema hidrológico (Weber, Dasso, & Jorquera, 2010).

La modelación hidrológica es útil como base para la gestión integral de los recursos hídricos, esto involucra una interacción de todos los procesos físico y químicos que opera en diferentes escalas espacio y tiempo (Ocampo & Vélez, 2013). La finalidad de los modelos hidrológicos es representar los procesos físicos que ocurren en una cuenca de la generación de la escorrentía superficial y subterránea a partir de la evapotranspiración y precipitación (Xu & Singh, 2004).

Los datos disponibles son determinantes en la selección de los modelos a usar y la capacidad predictiva de dicho modelo. Las limitaciones de un modelo hidrológico es la escasa información de la cuenca, si es homogénea la cuenca esta limitación es superada, siendo esta válida para cuencas muy pequeñas. A medida que la cuenca incrementa en tamaño es más probable que los tipos de suelo y sus características varíen se analiza por zonas de similar comportamiento hidrológico (Cabrera, 2012).

La calibración es uno de los procesos necesarios para medir la efectividad del modelo, este proceso identifica los parámetros del modelo que provean la mejor concordancia entre los datos observados y simulados, y el uso de datos de lluvia – escorrentía. Los parámetros se pueden identificar realizándose manualmente, por prueba y error, o automáticamente (Ramírez, 2012).

El grado de ajuste de los datos observados y simulados se realiza a través de indicadores de bondad de ajuste, tenemos a los indicadores como el Nash – Sutcliffe, Bias, coeficiente de Pearson, algunos más de los indicadores más que usa en hidrología.

Los valores de los parámetros determinados por la calibración solo son válidos dentro de la estructura del modelo utilizado. No es apropiado usar esos valores en diferentes modelos (aunque los parámetros pueden tener los mismos nombres) o en diferentes elementos (Beven, 2010).

3.1.1. Modelo Hidrológico Temez

El modelo de Temez es un modelo sencillo que con pocos parámetros reproduce el ciclo hidrológico de una cuenca de forma simplificada. Su sencillez lo hace ideal para cuencas donde no existe suficiente información (Temez, 1997). Es un modelo de dos taques que divide en dos zonas, en la primera la lluvia se almacena en forma de humedad y en ella, dependiendo de la humedad, la capacidad máxima de almacenamiento y evapotranspiración potencial se origina un excedente que a su vez produce dos componentes, la escorrentía superficial y la infiltración que se almacena en los acuíferos (Ocampo & Vélez, 2013).

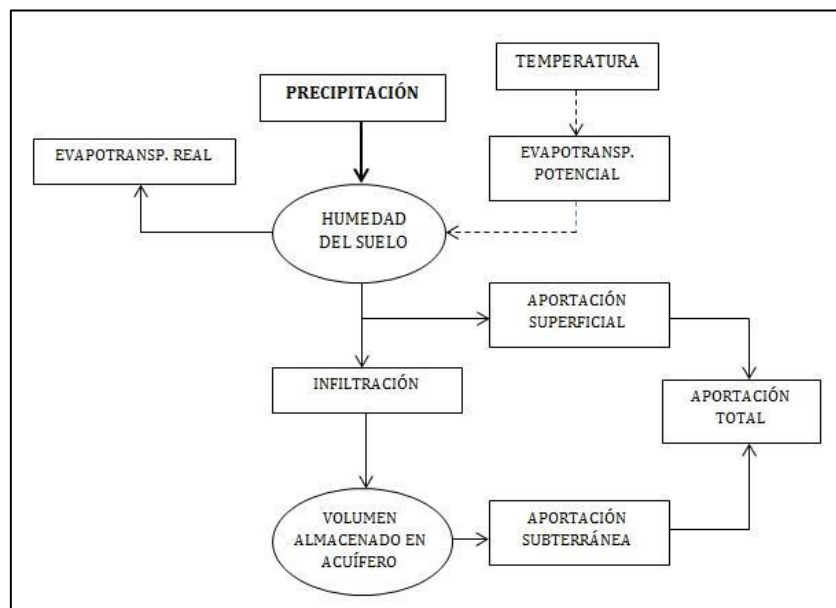


Figura 11. Esquema conceptual de la simulación del ciclo hidrológicos del modelo (fuente: Paredes et al, 2014)

La Figura 11 muestra de manera conceptual el funcionamiento del modelo hidrológico Temez en la simulación del ciclo hidrológico de una cuenca.

La aplicación del modelo se limita a cuencas pequeñas o de tamaño intermedio donde pueda existir cierta homogeneidad climática, geológica y edáfica, la aplicación en grandes cuencas implica realizar una subdivisión en otras mucho más pequeñas, de manera que verifiquen los condicionantes del modelo; el modelo trabaja en con valoración general(Murillo & Navarro, 2011).

El modelo se puede aplicar a cualquier periodo de tiempo (diario, mensual y anual), pero el más empleado es el mensual, además debe verificarse que los periodos temporales proporcionen una respuesta coherente con la realidad física del sistema hidrológico (Paredes, Solera, Andreu, & Lerma, 2017).

El modelo de Temez tiene como punto de partida la precipitación, esta se fracciona en dos componentes: la evapotranspiración y el excedente total, siendo esta la suma de la escorrentía superficial y la infiltración que se da lugar a través del suelo y de la zona no saturada (Murillo & Navarro, 2011).

3.2. MODELO DE GESTIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS

La gestión tradicional del agua siempre ha tratado de compensar la variabilidad estacional de caudal natural de los ríos con el fin de suministrar a las demandas urbanas, industriales, agrícolas e hidro energética, así mismo contener las condiciones extremas como inundaciones o sequías.

Ante perspectivas de un incremento de las actividades agrícolas, el aumento de la población, rápido desarrollo industrial y problemas de escasez hídrica se hace necesario mejorar la gestión de los recursos hídricos de tal manera cumpla con dos importantes objetivos:

- La satisfacción de la demanda de agua de los diferentes usuarios.
- El uso sostenible del agua contribuyendo a la conservación de su estado ecológico.

La gestión integral de los recursos hídricos ante este contexto adquiere una relevancia especial, cuyo objetivo básico es equilibrar la oferta y la demanda. Del lado de la oferta se incluyen principalmente las aguas superficiales y subterráneas, del lado de la demanda se diferencian tres grandes usuarios que son la agricultura, la industria y la población, sin dejar de lado los usos ambientales (Molinos, Mocholi, Hernandez, & Sala, 2013).

La seguridad del recurso hídrico en la actualidad tiene implicaciones de orden social, económico y seguridad ecológica, entre otros aspectos; dado a estos aspectos es muy importante encontrar un equilibrio del recurso, es decir un análisis de la oferta y la demanda. A través de un balance hídrico, se puede planificar con el fin de responder a la creciente demanda actual y futura del mismo. La información de la oferta hídrica de la cuenca proporciona una planificación y gestión de los recursos hídricos, de manera que todo proyecto de desarrollo socioeconómico tenga como base el uso sostenible de los recursos hídricos (López et al., 2016).

(Ochoa, 2004), menciona que la oferta hídrica de la cuenca del río Pativilca se origina de las aguas de lluvia en la parte media y alta de la misma, discurre como escorrentía superficial a través de su cauce natural y como flujo subterráneo, tiene dos periodos bien marcados el de las avenidas (dic – may) y de estiaje (jun – nov). Estos volúmenes determinan la asignación del agua.

3.2.1. Oferta y demanda de los recursos hídricos

La oferta hídrica corresponde al volumen total del agua que discurre por el cauce del río después de haber precipitado sobre la cuenca y ocurrido los procesos de evapotranspiración e infiltración. La demanda de agua es obtenida a partir de los volúmenes de consumo de agua por tipo de servicio o producto (Diaz & Alarcon, 2018).

Los recursos hídricos están distribuidos desigualmente en el ámbito regional. Se considera que América Latina tiene más del 35% de los recursos hídricos del planeta. Se usa más de un 70% del recurso hídrico mundial en la agricultura, seguidamente de la industria con un 20% y por último un 10% para el uso doméstico (Delgado, 2015).

La fuente de los recursos hídricos en el Perú son las aguas superficiales, aguas subterráneas y los glaciares; existen tres vertientes (Pacífico, Amazonas, y Titicaca) siendo la mayor fuente de los recursos hídricos la vertiente de Pacífico.

La demanda de agua estimada para Perú es de 49 717,97 hm³/año, de los cuales el 52% corresponden a usos consuntivo y el 48% a usos no consuntivos, la mayor demanda de agua en el Perú es la agrícola con un 89% de la demanda total consuntiva y el energético en el no consuntivo con 96% de la demanda total de uso no consuntivo (ANA, 2013).

(ANA, 2015) realizó un estudio sobre evaluación de los recursos hídricos de la cuenca Pativilca trabajando con una división de la cuenca en 21 subcuencas, los resultados mostraron un superávit de la oferta hídrica de la cuenca que abastece a las demandas en épocas de estiaje e incluso en periodos secos. La oferta hídrica de la cuenca es de 1628 hm³. Las demandas se encuentran distribuidas a lo largo de cuenca asentándose principalmente en la desembocadura (costa).

(Leon, 2017) menciona que la aportación anual de la subcuenca del río Pativilca ubicada en la parte alta de la cuenca en el distrito de Aquia es de 145 hm³ y tiene valores de caudales máximos en el mes de marzo y mínimos en el mes de agosto.

La estimación de la demanda de agua para cualquier sistema de riego depende del conocimiento de la cantidad de agua que consumen los cultivos, el tiempo de aplicación y el área de riego. El volumen requerido anual del cultivo para fines de riego permite determinar si el volumen requerido puede satisfacer la demanda de riego (Granados, 2017).

La Junta de Usuarios de Agua del sector hidráulico de la cuenca del río Pativilca cada año elabora un plan de aprovechamiento de los recursos hídricos de la cuenca en el cual se definen las dotaciones de agua para cada sector (agrícola, industrial y urbano). La información de la oferta hídrica disponible se obtiene de la estación hidrométrica Cahua, la empresa hidroeléctrica es la encargada de informar a la Autoridad Local de Agua (ALA) los caudales medidos, siendo la oferta hídrica disponible anual de la cuenca es de 1200 hm³.

3.2.2. Caudal ecológico

El caudal ecológico se refiere a un término para armonizar las formas de uso de los recursos hídricos, siendo necesaria para mantener los ecosistemas fluviales en un estado saludable y sean sostenible (Wang et al; 2013). Por lo tanto, el caudal ecológico debe ser idóneo para el mantenimiento de los ecosistemas y debe tener prevalencia sobre cualquier otra demanda y debe considerarse como una restricción a los sistemas de explotación (Cantera, carbajal, Castro. 2013).

En la actualidad la expansión creciente de las demandas provoca un desequilibrio en la gestión de los recursos hídricos involucrando la integridad ecológica de los ecosistemas fluviales. El desafío final de gestión ecológicamente sostenible de los recursos hídricos es diseñar e implementar un programa de la gestión del agua que abastece y dote el agua para los diferentes usos de tal manera que los ecosistemas no se degraden. La estimación de los caudales ecológicos se debe enfatizar la sostenibilidad es alcanzable a largo plazo (Richter et al., 2003).

3.3. CAMBIO CLIMÁTICO

El cambio climático hace referencia a un cambio en el estado del clima que se puede identificar mediante cambios en la media y/o variabilidad de sus propiedades que persiste durante un tiempo prolongado, generalmente de décadas a más. Se puede producir por cambios en los procesos naturales y actividades antropogénicas (IPCC, 2013).

Desde la década de 1950 mucho de los cambios observados no tiene precedentes durante décadas a milenios. La atmosfera y el océano se han calentado, las cantidades de hielo y nieve han ido desapareciendo, el nivel del agua de mar se ha elevado y la concentración de gases de efecto invernadero han aumentado (IPCC, 2013).

Se proyectan un aumento de la temperatura a lo largo del siglo XXI bajo todos los escenarios evaluados, las olas de calor lo más probable es que ocurran más a menudo y duren más tiempo, la precipitación en algunas regiones será más intensas y frecuentes, en comparación a otras (IPCC, 2013).

Existe un vínculo importante del cambio climático entre los recursos hídricos y el ciclo hidrológico. El cambio climático cambiara la situación actual del ciclo hidrológico y provocara una redistribución de los recursos hídricos en el espacio y tiempo, así mismo tendrá un efecto directo sobre la evaporación, la escorrentía, la humedad del suelo, entre otros factores, estos cambios afectaran al clima local (Yang et al., 2011).

La comprensión cuantitativa de la dinámica del clima y el cambio climático brindan los modelos de circulación general (GCM), estas poseen información sobre los cambios climáticos a escalas regionales, pero la mayoría se ejecuta a escala de cientos de kilómetros, lo que significa que un subcontinente puede estar representado por tan solo cinco o seis células del GCM, como resultado muchas de características de los procesos y fenómenos climáticos importantes no se resolverán (Lee, 2015).

Los modelos climáticos regionales (MCR) reducen la escala de las simulaciones climáticas globales a tamaños más pequeños la cuadrícula en el área de estudio o interés (Chou et al., 2014)

3.3.1. Cambio climático global y regional

Los cambios en la precipitación serán de manera uniforme en todo el planeta, es más probable que en las altas latitudes y el pacífico Ecuatorial experimente un aumento bajo el escenario RCP 8.5. Probablemente en muchas regiones latinas medias y subtropicales secas experimenten una disminución en la precipitación, mientras que en regiones húmedas de latitudes media la precipitación media aumente bajo el escenario RCP 8.5 (Figura 12). Es probable que los eventos extremos de precipitación en las regiones tropicales húmedas y masas terrestres de latitudes húmedas se vuelvan más frecuentes e intensas (IPCC 2013).

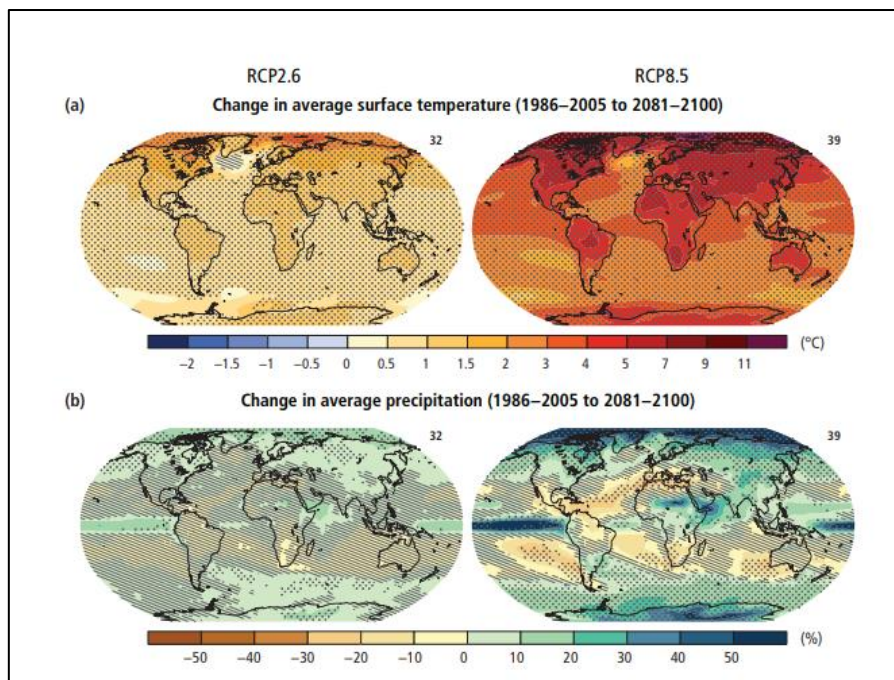


Figura 12. Cambio en la temperatura promedio de la superficie (a) y cambio en la precipitación promedio (b) (Fuente: IPCC 2013).

El Panel Intergubernamental sobre el cambio climático pronostica un aumento de la temperatura, derretimiento de los glaciares en la zona de la Cordillera de los Andes, aumento del nivel del Mar y un aumento en los fenómenos climáticos extremos, como a corto y largo plazo de la Niña, fuertes lluvias y sequias, olas de calor. Las precipitaciones disminuyen ligeramente cerca de la costa de caribe, así como en grandes partes de Brasil y Chile, existirá un aumento en las precipitaciones en Colombia, Ecuador y Perú (Junk, 2013).

3.3.2. Escenarios de cambio climático

Los escenarios de cambio climático son proyecciones de la evolución del clima para este siglo XXI. Los escenarios de concentración, obtenidas a partir de los escenarios de emisión, se ingresan a los modelos climáticos para obtener las proyecciones climáticas.

El quinto informe del IPCC ha seleccionado cuatro vías de concentración representativas (RCP, por si siglas en inglés) Figura 13, basado en diferentes emisiones de gases de efecto invernadero, emisiones de contaminantes del aire y uso de la tierra. Los RCP incluyen un escenario de mitigación estricto (RCP2.6), esto es 2.6 W/m^2 , busca mantener el calentamiento por debajo de los 2°C , dos escenarios intermedios (RCP4.5 y RCP6.0), esto es 4.5 y 6.5 W/m^2 y un escenario con muy altas emisiones de GEI (RCP8.5), esto es 8.5 W/m^2 , no busca ningún esfuerzo para restringir las emisiones.

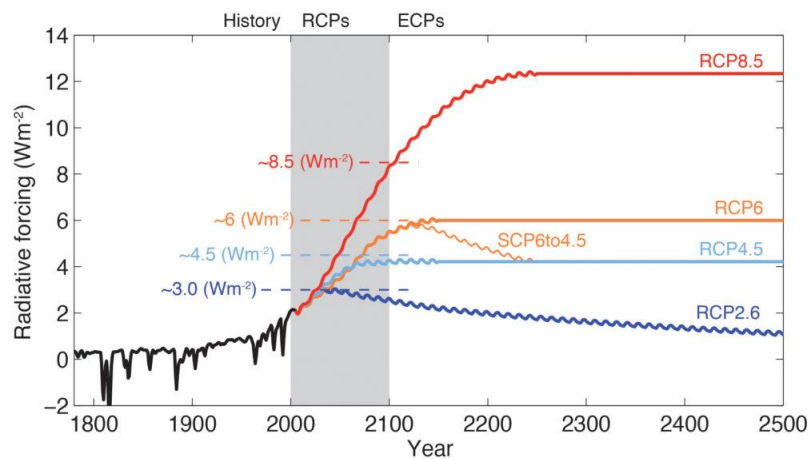


Figura 13. Forzamiento radiante de los 4 escenarios RCP (Fuente: IPCC 2013).

3.3.3. Cambio climático en el Perú

El Perú tiene un clima influenciado y marcado por la cordillera de los Andes, las masas de aire del atlántico, estas que son responsables del clima cálido y húmedo de la selva amazónica, el anticiclón del pacifico sur y la corriente fría de Humboldt que fluye paralela a la costa peruana originan un clima seco a medida que avanza al sur del Perú (Chevallier, Pouyaud, & Suarez, 2005).

Los estudios de variabilidad y escenarios de cambio climático en el Perú vienen siendo desarrollados desde el 2003 por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología, siendo realizados a nivel nacional, por cuencas, microcuencas priorizadas (SENAMHI, 2015).

La autoridad Nacional del Agua (ANA) en el año 2015 realizó un estudio sobre la evaluación de los recursos hídricos en la cuenca del rio Pativilca, incluyendo dos escenarios (RCP 2.6 y RCP 8.5), cuyos resultados de la variabilidad de la temperatura y precipitación se muestran en la Tabla 7. Se consideró un horizonte al 2035, tomando como periodo base 1986 – 2005.

Tabla 7. Variabilidad de la temperatura y precipitación para dos escenarios

Escenario	Incremento de temperatura (°C)	Incremento de precipitación (%)
RCP 2.6	0.7	0.3
RCP 8.5	1.1	2.0

Concluyendo según el escenario más desfavorable RCP 8.5 el efecto sobre los recursos hídricos no es significativo, ya que representa solo un 0.87% del cambio en las aportaciones.

(SENAMHI, 2015) realizo una actualización de la disponibilidad hídrica, en contexto de cambio climático, se caracterizó el clima y la disponibilidad de agua actual por lo cual se utilizó información histórica de las estaciones meteorológicas e hidrológicas, se tomó como referencia dos periodos de referencia de 30 años, un primer periodo de 1970 a 1999 y un segundo periodo de 1980 a 2009. Las proyecciones climáticas son en base a 2 modelos climáticos del CMIP5 y dos escenarios de emisión RCP 4.5 y RCP 8.5, el horizonte es el periodo 2035 a 2065 centrándose en el año 2050. Los resultados se muestran de acuerdo con cada región hidrográfica, la cuenca del rio Pativilca se encuentra en la región hidrográfica 4 y los resultados son los que se muestra en la Tabla 8.

Tabla 8. Cambio en las variables climáticas para la región hidrográfica 4 del pacífico.

variable	Escenario	
	RCP 4.5	RCP8.5
T máxima °C	1.7	1.9
T mínima °C	2.0	2.1
Precipitación %	-3.4	5.3
ETP %	3.7	6.6
Esorrentía %	-25.2	2.1

El banco Mundial a través de un Portal de Conocimiento sobre el Cambio Climático (CCKP, por sus siglas en inglés)⁶ proporciona datos globales, regionales y nacionales sobre el clima histórico y futuro, las vulnerabilidades y los impactos. El portal cuenta con datos de 2020 hasta fin de siglo XXI y los cuatro escenarios de cambio climático. La variabilidad de la temperatura y precipitación para el Perú se muestra en la siguiente Tabla 9 para cada escenario.

Tabla 9. Cambio de temperatura y precipitación para dos escenarios de cambio climático

variable	Escenario	
	RCP 4.5	RCP8.5
2040 - 2059		
Temperatura °C	1.48	1.98
Precipitación mm	2.87	3.56
2080 - 2099		
Temperatura °C	1.96	3.98
Precipitación mm	3.43	8.60

⁶ <https://climateknowledgeportal.worldbank.org/>

4. METODOLOGÍA

El análisis de la gestión de los recursos hídricos con la inclusión del cambio climático que desarrolla el presente estudio consta en dos etapas (Figura 14), el primero tiene lugar al análisis de la gestión actual y el segundo tiene lugar al análisis de la gestión actual y futura con la intervención de los escenarios de cambio climático.

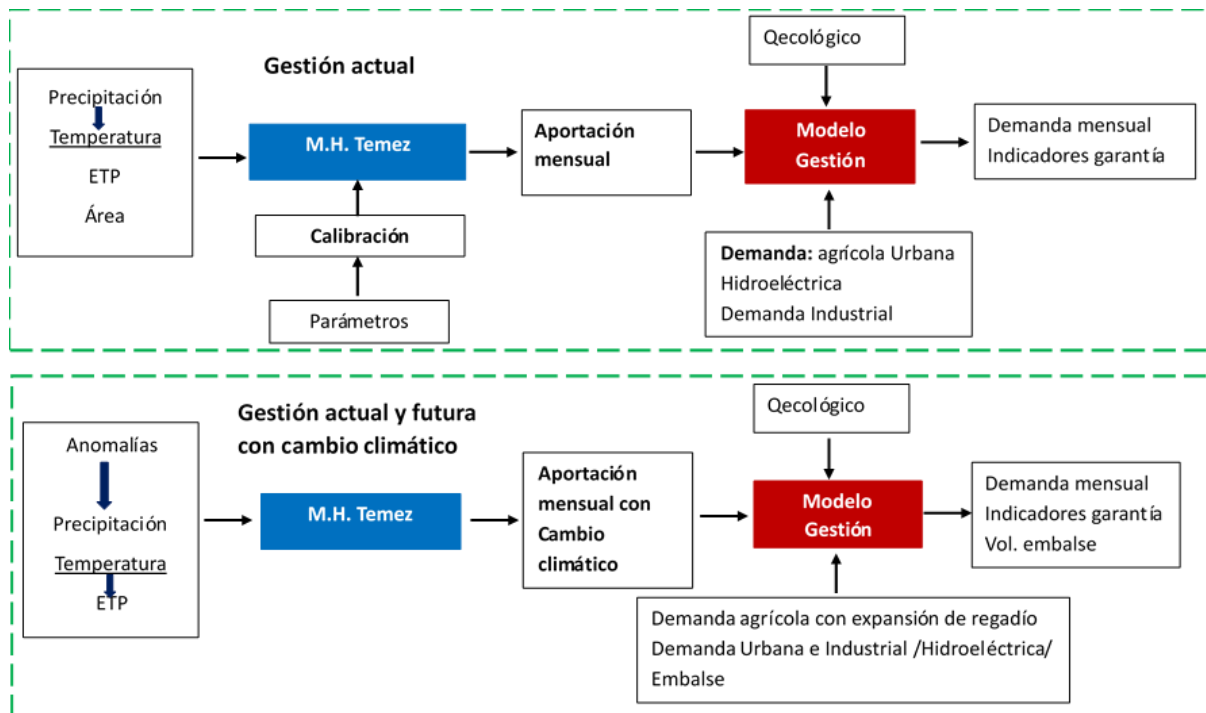


Figura 14. Esquema metodológico del estudio

La primera etapa (gestión actual) se prepara el modelo hidrológico para periodo 1965 al 2013, este periodo es la línea base y se usa para la calibración del modelo hidrológico. Las aportaciones obtenidas del modelo hidrológico son usadas en el modelo de gestión de la cuenca, este así mismo representa la distribución y suministro de los recursos hídricos a las demandas, teniendo como restricción el caudal ecológico.

La segunda etapa (gestión actual y futura con cambio climático) consta del ingreso de las anomalías de cambio climático de dos escenarios (RCP 4.5 y RCP 8.5) obtenidas del CCKP del banco Mundial para dos periodos a corto y largo plazo al modelo hidrológico y al modelo de gestión con futuras intervenciones (ampliación de superficie de regadío y embalse).

4.1. MODELO HIDROLÓGICO

Los datos de entrada al modelo hidrológico Temez son las series históricas (1965 – 2013) mensuales de temperatura y precipitación obtenidas del estudio realizado por la Autoridad Nacional del Agua (ANA) para 21 subcuencas de la cuenca del río Pativilca, para la calibración se ingresan al modelo las series históricas mensuales de caudales registradas de las estaciones hidrométricas (Figura 15).

La cuenca se divide en tres zonas (Alto, Medio y Bajo Pativilca) para un mejor resultado, cada zona de la cuenca se ubica en un punto de calibración.

Realizado la división de la cuenca se procede aplicar el modelo hidrológico Temez. Previa aplicación del modelo se determina la precipitación y la temperatura para cada zona de la cuenca aplicando la siguiente formula:

$$P_m = \frac{\sum P_i \cdot A_i}{A_T}$$

Donde:

Pm: Precipitación media

Pi: Precipitación contenida en una subcuenca

Ai: Áreas parciales de cada subcuenca

At: Área total de la cuenca

Obtenida la temperatura para cada zona se calcula la evapotranspiración potencial (ETP) a través del método Thornthwaite.

Los datos de entrada al modelo hidrológico es la precipitación y la evapotranspiración potencial (ETP). La ETo se obtendra a través del método Thornthwaite ajustada a una corrección de usos que proporcionen una ETo similar al del modelo WEAP (ANA, 2015), y al Atlas de evapotranspiración referencial (ETo) (MINAGRI, 2013). Se toma como referencia estos dos estudios porque usan el método Penman monteith para el cálculo de la ETo. La ETP se obtendrá multiplicando por el Kc referenciado en el estudio de la Autoridad Nacional del Agua del año 2015.

La calibración del modelo se realizará manualmente iterando los parámetros hasta obtener el mínimo error posible a partir de la información de las series históricas disponibles de las tres estaciones hidrométricas ubicadas en el Alto, Medio y Bajo Pativilca, cada estación hidrométrica tiene series históricas de diferentes años por razones que inicialmente estaban en operación y luego de algún tiempo dejaron de operar por problemas de avenidas. Es necesario mencionar que solo una estación sigue operando actualmente como es el caso de la estación hidrométrica Cahua, cabe mencionar que los datos de la estación hidrométrica Cahua se descargaron del portal de la Autoridad Nacional del Agua (ANA)⁷.

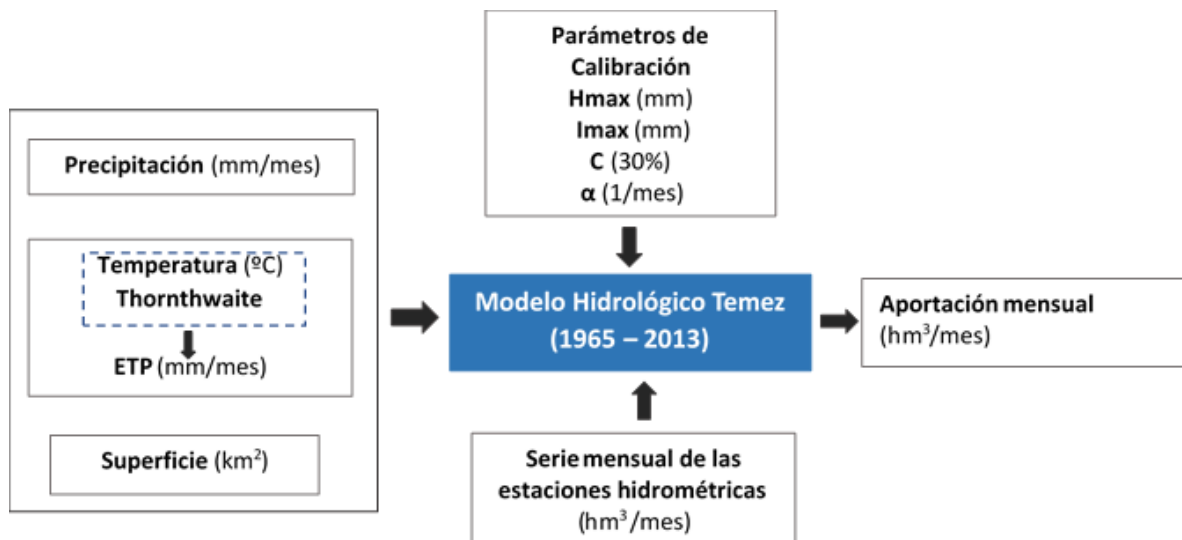


Figura 15. Esquema metodológico de la calibración del Modelo Hidrológico Temez

Para la calibración se usaron dos indicadores comúnmente usados en los modelos hidrológicos:

- Coeficiente de Nash-Sutcliffe, es un indicador más usados en hidrología que puede ser usado en cualquier escala de tiempo, el rango se encuentra entre 1.0 (ajuste perfecto y $-\infty$), siendo el 1.0 el valor óptimo (Krause, Boyle, & Bäse, 2005), clasificado según la calidad del resultado (Tabla 10).
- Sesgo Relativo BIAS, Indica la tendencia promedio de datos simulados de ser mayor o menor que los datos observados. Un BIAS positivo indica una sobrestimación y un BIAS negativo indica una subestimación.

⁷ <http://snirh.ana.gob.pe/consultassnirh/ConsHidrom.aspx>

Tabla 10. Calidad de ajuste de la eficiencia de Nash-Sutcliffe. (Fuente: Molnar, 2011)

E	Ajuste
<0.2	Insuficiente
0.2 – 0.4	Satisfactorio
0.4 – 0.6	Bueno
0.6 – 0.8	Muy bueno
>0.8	Excelente

La calibración se llevó a cabo en las 3 zonas que se ha dividido la cuenca (Figura 19), el Alto Pativilca se calibro con los caudales de la estación hidrométrica Cahua, el Medio Pativilca se calibro con los caudales de la estación hidrométrica Alpas y el Bajo Pativilca se calibro con los caudales de la estación hidrométrica Puente Yanapampa. El registro de caudales de las estaciones hidrométricas no se encuentra en régimen natural por lo por lo que en cada punto se le añade los caudales de las intervenciones antrópicas aguas arriba que son principalmente demandas, con ello obtenemos la aportación en régimen natural.

4.2. MODELO DE GESTIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS

La implementación del modelo de gestión de recursos hídricos se inicia con los datos resultantes de las aportaciones del modelo hidrológico, tiene en cuenta la infraestructura existente, las demandas existentes, el caudal ecológico y las normas de explotación (Figura 16), de tal manera hace posible un diagnóstico de la situación actual del sistema y la implementación de sistema de gestión futuro.

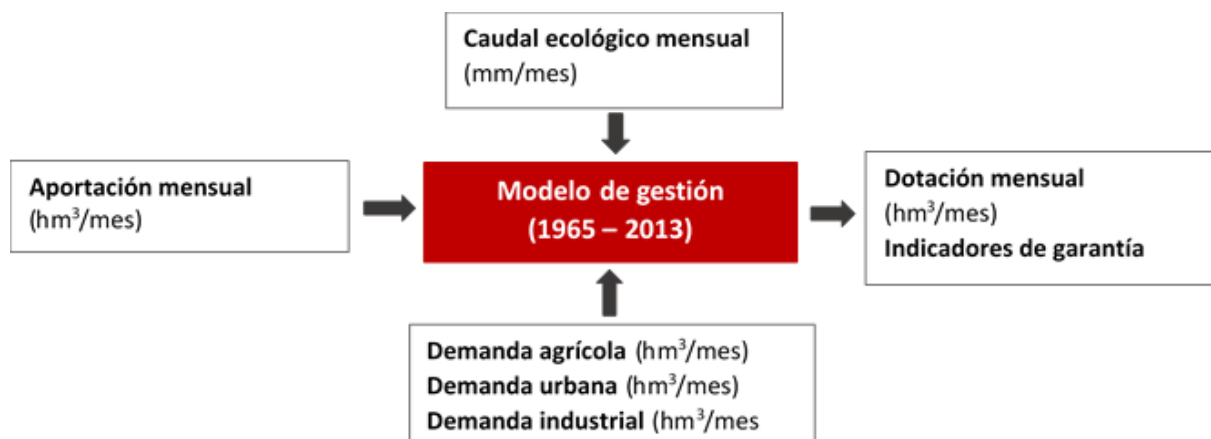


Figura 16. Esquema metodológico del modelo de gestión

Los elementos que ingresen al modelo formaran un esquema general de asignación de los recursos hídricos de la cuenca, la combinación adecuada de estos elementos puede generar un modelo representativo de la cuenca. Los elementos requeridos en el modelo son los siguientes:

- Las aportaciones, las series mensuales de entrada a cada sistema designado. Estos datos se obtienen del modelo hidrológico Temez una vez calibrado.
- Embalses, puntos de almacenamiento con una cierta capacidad de almacenamiento.
- Demandas consuntivas, elementos de demanda que consumen agua (agrícola, doméstico e industrial). Estas son agrupadas en el Bajo Pativilca y de acuerdo con el tipo de demanda, simulando adecuadamente la disponibilidad del agua en esa zona, esta demanda se considera constante a lo largo de los 49 años. Los datos de la demanda agraria, poblacional e industrial se obtienen de la ANA y la Junta de Usuarios de Agua del sector hidráulico de la cuenca del río Pativilca

- Demanda no consuntiva, elementos que no consumen agua, está pensado principalmente para las centrales hidroeléctricas.

No es necesaria la calibración del modelo, ya que para su construcción todos los elementos de entrada son conocidos.

Dentro de la gestión de los recursos hídricos se considera la eficiencia de riego, determinada para cada sector hidráulico, se inicia con la ETo multiplicado por el Kc del sector de riego (Ochoa, 20014) obteniendo así la ETP, se ingresa al modelo hidrológico y se obtiene la ETr (Evapotranspiración real). La diferencia entre la ETP y la ETr es la necesidad de riego del cultivo. La eficiencia de riego se obtiene del cociente de la dotación neta entre la dotación bruta como se muestra en la en la siguiente Figura 17.

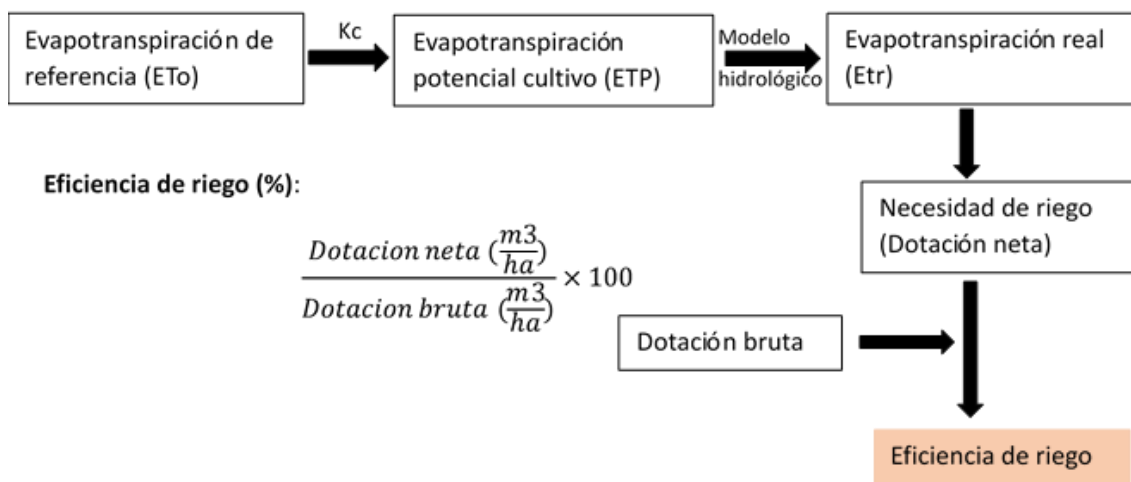


Figura 17. Esquema para la determinación de la eficiencia de riego

4.3. CAUDALES ECOLÓGICOS

De acuerdo con la ley Recursos hídricos de Perú de 2009 (Ley 29338) y su reglamento (Decreto supremo N° 001-2010-AG), mencionan la necesidad de establecer caudales ecológicos para asegurar la conservación, preservación y mantenimiento de los ecosistemas; estos así mismo pueden presentar variaciones a lo largo del año en cuanto a su cantidad.

Según el estudio realizado por la Autoridad Nacional del agua en el 2015, plantea rangos de caudales comprendidos: $0 < 20 \text{ m}^3/\text{s}$, $20 \text{ m}^3/\text{s} \leq Q < 50 \text{ m}^3/\text{s}$ y $Q \geq 50 \text{ m}^3/\text{s}$, dando como resultado lo que se muestra en la siguiente Tabla 11.

Tabla 11. Metodología para el cálculo de los caudales ecológicos. Fuente: (ANA, 2015)

Caudal medio anual	Época de avenida	Época de estiaje
Menor que 20 m ³ /s	10% caudal medio mensual	15% caudal medio mensual
20m ³ /s – 50 m ³ /s	10% caudal medio mensual	12% caudal medio mensual
Mayor que 50 m ³ /s	10% caudal medio mensual	10% caudal medio mensual

Para el presente estudio se identificó un solo tramo de caudal ecológico, ubicado en la parte baja de la cuenca por la presencia de los camarones de río (*Cryphiops caementarius*), propios de esta zona, esta especie se puede desplazar hasta los 1400 m.s.n.m; es una especie de conservación y de importancia económica y cultural para la zona.

4.4. DEMANDAS FUTURAS

El crecimiento económico y poblacional de la cuenca provoca un aumento en las demandas, en el presente estudio se consideran solo el aumento de la demanda agrícola, las otras demandas se consideran constantes incluida el caudal ecológico. Para determinar la demanda agrícola futura consideramos fuentes de información relacionados a ampliaciones de fronteras agrícolas en las irrigaciones existentes o nuevos proyectos de regadío previsto a futuro.

Existe dos proyectos propuestos a cargo de la Junta de Usuarios de Agua del sector hidráulico de la cuenca del río Pativilca, “Represamiento de la laguna Jurau en el distrito de Copa provincia de Cajatambo - Lima” y “Construcción de la Represa de Pishcapaccha en la Cuenca del Río Pativilca”; tienen la finalidad de mejorar las 27 000 Ha de terreno de cultivo y la ampliación de zona regable con 8000 Ha de las 16 Comisiones de Riego; el represamiento de la laguna Jurau tiene como objetivo represar 3.8 Hm³ y la construcción de la represa Pishcapaccha tiene como objetivo represar 45 Hm³.

4.5. SERIES DE CAMBIO CLIMÁTICO Y SU INFLUENCIA EN LA GESTIÓN DE LOS RECURSOS HÍDRICOS

La influencia del cambio climático se determinará a través de la obtención de las anomalías de precipitación y temperatura de la cuenca del río Pativilca para dos periodos para corto (2020 -2039) y largo plazo (2080 – 2099). Se realizará para dos escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5 siendo una optimista y la otra la más desfavorable. Las anomalías serán obtenidas del CCKP del banco Mundial y serán ingresadas al modelo Hidrológico Temez y al modelo de gestión.

En este punto consta de dos etapas; la primera etapa es el ingreso Las anomalías de precipitación y temperatura modelo hidrológico Temez (Figura 12), el resultado permite analizar la variación de las aportaciones de la cuenca por efecto del cambio climático.

La segunda etapa consta del ingreso de las aportaciones generadas en la etapa anterior al modelo de gestión, esto permitirá realizar un análisis de la influencia del cambio climático en la gestión actual (demandas y garantías). Adicionalmente al modelo de gestión influenciado por el cambio climático se le añade nuevos proyectos que se quieren desarrollar en la cuenca como ampliación y mejora de regadío y un embalse que pueda cubrir la nueva demanda (Figura 18).

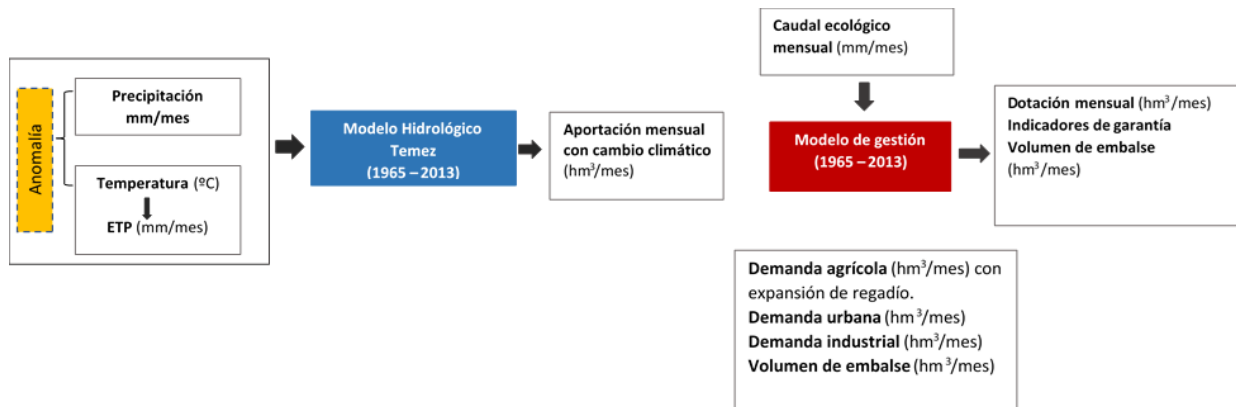


Figura 18. Esquema metodológico de la influencia del cambio climático en el sistema hidrológico de la cuenca

5. APLICACIÓN Y RESULTADOS

Este apartado consta la presentación de los resultados aplicados a cada etapa descrita en la metodología; los puntos siguientes de este apartado están separados por lo siguiente: modelo hidrológico, el modelo de gestión y la influencia del cambio climático, los mismos descritos a continuación.

5.1. SIMULACIÓN DEL MODELO HIDROLÓGICO

La cuenca del río Pativilca no es homogénea en los usos de usos, geología y climatología, al no ser homogénea la aplicación de modelo hidrológico en toda la cuenca no hace una buena representación del sistema, por lo tanto se ha realizado una división de la cuenca en tres zonas: Alto Pativilca, Medio Pativilca y Bajo Pativilca como se muestra en la Figura 19, esta división se realiza tomando como referencia la ubicación de las estaciones hidrométricas y la división de la cuenca en 21 subcuencas realizada por la ANA en su estudio “Evaluación de los recursos hídricos de la cuenca del río Pativilca”. El Alto Pativilca recibe las aportaciones de la quebrada Pischaragra, el río Rapay y el río Gorgor, Medio Pativilca recibe las aportaciones de la quebrada Huanchay y las aportaciones del Alto Pativilca; El Bajo Pativilca recibe las aportaciones del Medio y Alto Pativilca; la zona de mayor área en la cuenca es el Alto Pativilca (65%) como se muestra en la Tabla 12.

Tabla 12. Característica de las tres zonas de la cuenca

Zona	Área (km ²)	Porcentaje (%)	Estación hidrométrica	Periodo
Alto Pativilca	2979	65%	cahua	2001 – 2013
Medio Pativilca	1118	24%	Alpas	---
Bajo Pativilca	510	11%	Puente Yanapampa	1965 -2009

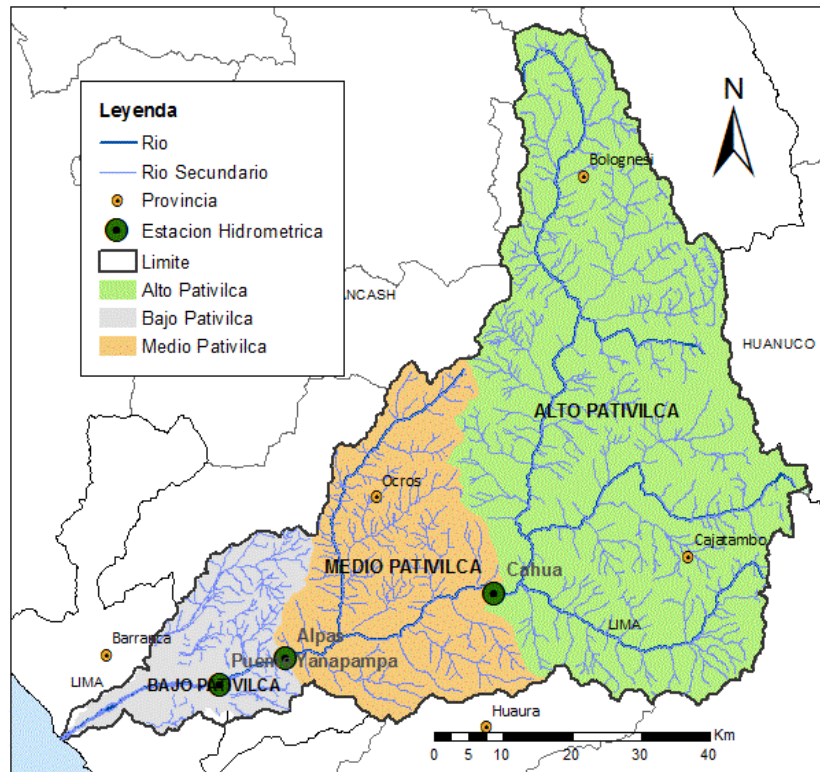


Figura 19. División de la cuenca en 3 zonas: Alto, Medio y Bajo Pativilca

5.1.1. Análisis histórico de la precipitación

Uno de los puntos a tomar en cuenta en el presente estudio es el análisis histórico de la precipitación registrada en las estaciones pluviométricas, este análisis permitió verificar la consistencia y la variabilidad de los datos. Como se detalló anteriormente las series de precipitación se obtuvieron del estudio realizado por la Autoridad nacional del Agua.

Dentro de la cuenca existen 6 estaciones pluviométricas y fuera de la cuenca 7 estaciones como se detalla en la Figura 20, esta usada para determinar la precipitación areal de la cuenca (Figura 8).

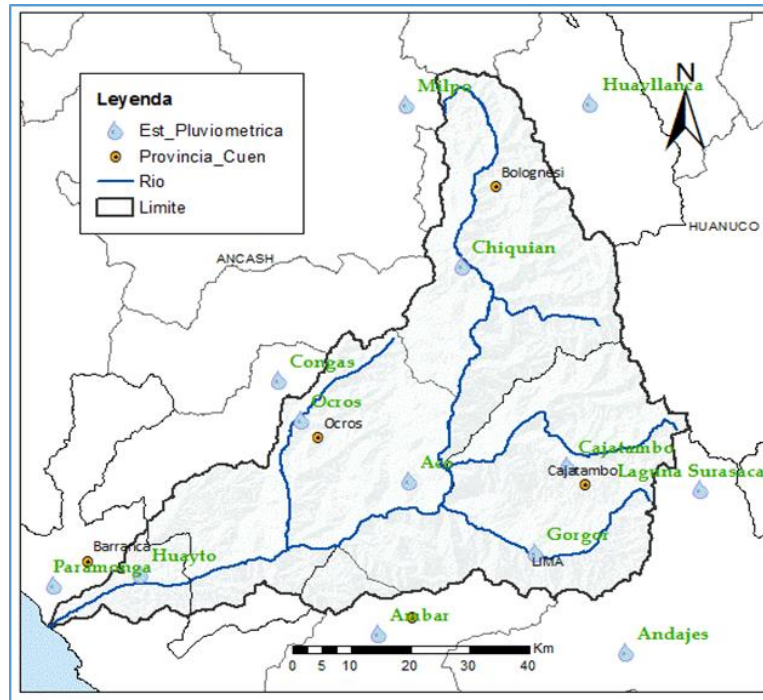


Figura 20. Ubicación de las Estaciones Pluviométricas

Para determinar la precipitación caída sobre la cuenca se analizaron los años de registro de cada estación pluviométrica. Los años de registro de cada estación se muestra en la Figura 21, van desde 4 a 45 años, la estación pluviométrica Huayto es la que tiene menor registro de años y se considera por ser la única que se encuentra en la zona baja de la cuenca, la que tiene mayor registro de años es la estación pluviométrica Ocos con 45 años de registro.

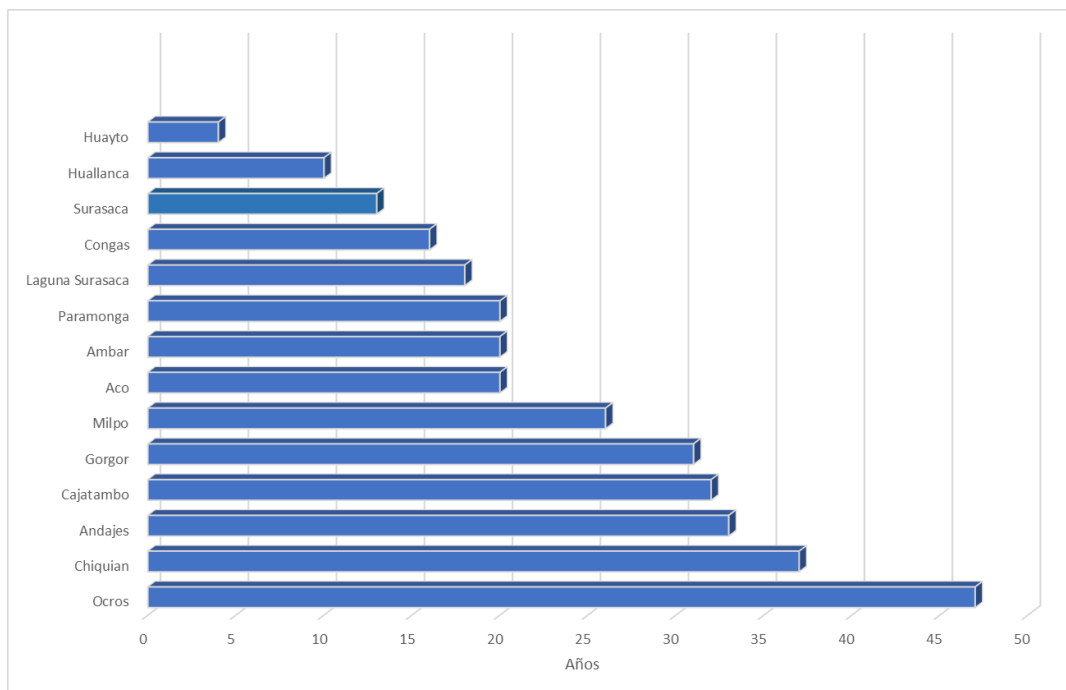


Figura 21. Periodo de registro de la precipitación de las estaciones pluviométricas.

La Figura 22 muestra los años de registro de cada estación pluviométrica tanto completa, incompleta y vacía, se puede visualizar los primeros 11 años y los últimos 20 años con más registro de datos completos en comparación del año 1977 al 1992. En base a esta observación separamos la serie histórica de precipitación en tres periodos 1965 - 1976, 1977 – 1992 y 1993 – 2013 para hacer un análisis más detallado.



Figura 22. Listado de registro de datos de precipitación de las estaciones pluviométricas

Es necesario mencionar que las series de precipitación completadas y rellenadas lo realizó la Autoridad Nacional del Agua mediante un análisis pluviométrico. Como primer paso calculo la precipitación mensual acumulada a partir de los datos diarios completados. Se realizó el análisis de consistencia agrupando las estaciones según su cercanía, altitud y región climática en conjunto máximo de 6 estaciones a las estaciones de acuerdo con criterios de homogeneidad y proximidad. Como primer paso se realiza el análisis doble de masa, luego un análisis estadístico de los datos confiables a través del “t” de Student y “F” Fisher, como paso último la corrección de la información. Luego del análisis de consistencia se realiza su completado y extensión mediante un software HEC – 4 o MOSS (ANA, 2015).

Para este relleno y completado de las series de precipitación se hizo un grupo de 4 que comprende a las estaciones de acuerdo con la altitud y ubicación, cada estación agrupada se visualiza en la Tabla 13.

Tabla 13. Grupo de las estaciones pluviométricas según ubicación, altitud y región climática. Fuente: (ANA, 2015)

Nombre del grupo	Estación Pluviométrica
Costa	Paramonga Huayto
Cuenca Media del Pativilca	Ocros Congas Aco Ambar
Cuenca de cabecera Norte	Chiquian Huallanca Milpo
Cuenca de cabecera Este	Cajatambo Gorgor Surasaca Andajes Laguna Surasaca

De acuerdo con la agrupación realizada por la ANA, se hizo en el presente estudio un primer análisis de la precipitación para los tres periodos (1965 - 1976, 1977 – 1992 y 1993 – 2013) y es la que se muestra en la Figura 23. Según los resultados se puede visualizar que la estación Gorgor y la estación Cajatambo tienen una similitud del promedio anual de lluvia de los tres periodos, una disminución notable de la precipitación anual promedio del periodo 1977 a 1992, esta disminución se presenta también para la estación Milpo y Ocros. Las otras estaciones no presentan notables reducciones de la precipitación para el periodo 1977 a 1992. Se tomará a este periodo como observado. Esta disminución en este periodo observado tendrá influencia en la obtención de los caudales del modelo hidrológico que se verá más adelante.

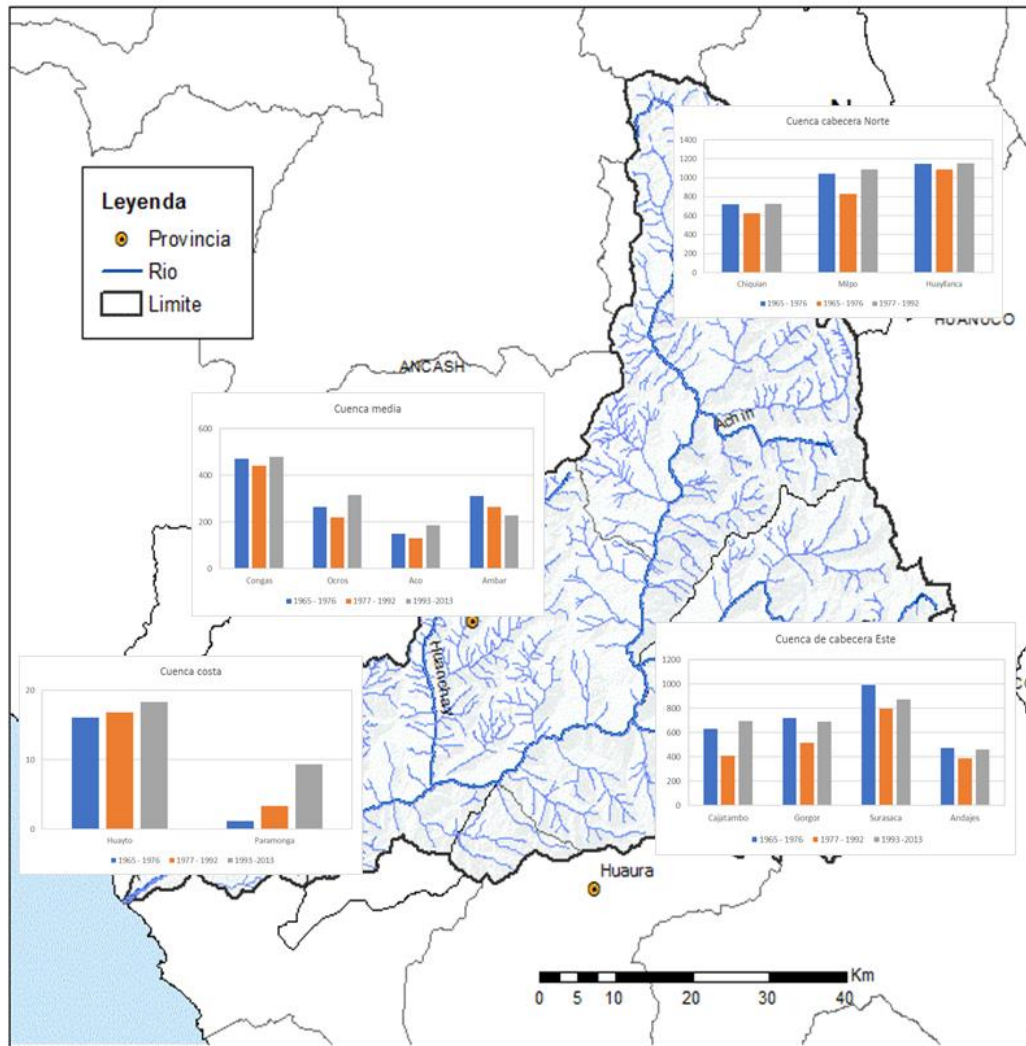


Figura 23. Precipitación anual de cada estación agrupada para los tres periodos

La precipitación registrada en las estaciones pluviométricas de la cabecera de la cuenca Norte y Este son las mayores aportantes de la cuenca, por lo tanto, es importante la evaluación de su comportamiento.

Se hizo un segundo análisis de la precipitación caída en los últimos 20 años (1998 -2008) como se muestra en la Figura 23; en la cabecera de la cuenca se inicia con una tendencia ascendente a partir de 2002 hasta el 2007 luego parece interrumpirse el comportamiento y toma una tendencia descendente hasta el 2014, nuevamente se interrumpe con una disminución de la precipitación hasta el 20018, excepto Gorgor experimenta una drástica disminución. La estación Paramonga, Ocos y Cajatambo se mantienen constante con pequeñas aumentos y disminuciones. Esta visualización permite determinar a groso modo que la precipitación se mantiene constante en estos últimos años.

Es recomendable hacer un análisis más exhaustivo de la precipitación que permita eliminar la incertidumbre de año 1987 – 1992, por ser uno de los años donde la precipitación anual es muy baja, además verificar si la precipitación presenta incrementos y poder contrastar con los informes sobre cambio climático para esta zona.

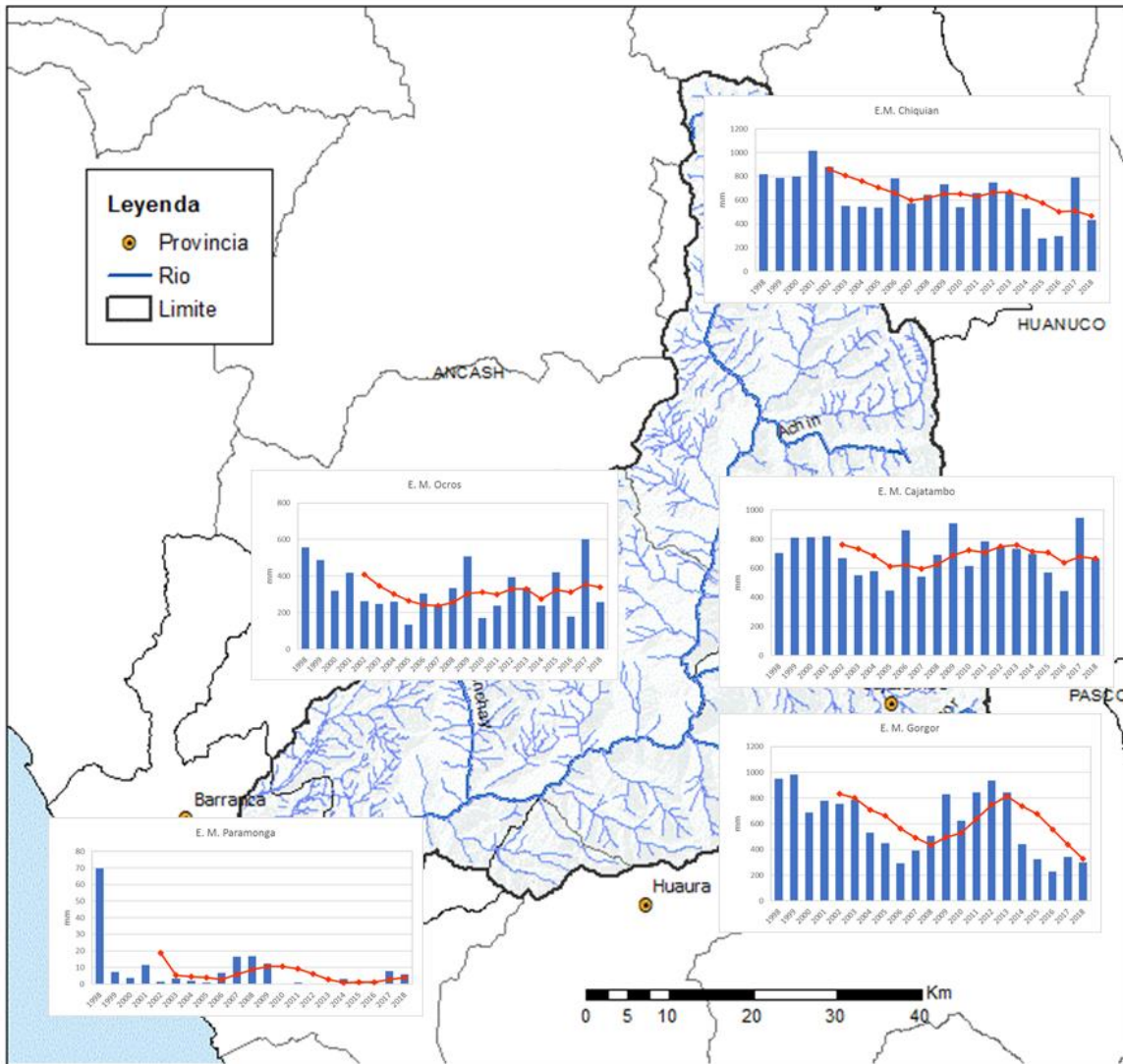


Figura 24. Precipitación registrada del año 2008 – 2018 en la cuenca del río Pativilca

5.1.2. Puntos de calibración

Los puntos de calibración considerados en la cuenca del río Pativilca se determinó en función de la información disponible de las estaciones hidrométricas, las mismas que están ubicadas en el punto de desagüe de cada subcuenca o zona, excepto la estación hidrométrica Puente Yanapampa que se encuentra en el tramo medio del Bajo Pativilca como se muestra en la Figura 19 .

Para la calibración se considera todos los años de registro, siendo algunas estaciones con pocos años y otra con más años como la estación hidrométrica Puente Yanapampa que tiene más años de registro como se describe en la Tabla 14.

Tabla 14. Periodo de calibración

Zona	Estación hidrométrica	Periodo de registro	Años de registro	Periodo de calibración
Alto Pativilca	cahua	2000 – 2013	13 años	2000 – 2013
Medio Pativilca	Alpas	1965 - 1970	5 años	1965 - 1970
Bajo Pativilca	Puente Yanapampa	1965 -2009	44 años	1965 -2009

5.2. RESULTADOS DEL MODELO HIDROLÓGICO

Los resultados del modelo hidrológico Temez se muestran en función de la división previa de la cuenca; previo al uso del modelo se determinó la evapotranspiración potencial. La ETP determinada se obtuvo por el método de Thorwaite ajustada y multiplicada por el Kc (ANA, 2015) el mismo que para el cálculo de la ETo usa el método de Penman Monteith (Tena, Mwaanga, & Nguvulu, 2019), siendo este método el más recomendado por los expertos ya que usa muchos datos climáticos (FAO, 2006). Para determinar el uso de los valores de ETo se realizó una comparación de los resultados del modelo WEAP usado por el ANA con los resultados de un estudio realizado por el Ministerio de Agricultura (MINAGRI) y un estudio agronómico de la zona de estudio, los resultados muestran valores elevados de la ETo por lo tanto se hizo una reducción de la ETo. Obtenida la ETo se multiplico por el kc referenciada por la ANA para determinar la ETP.

5.2.1. Alto Pativilca

El Alto Pativilca toma como punto de calibración la estación hidrométrica Cahua como lo muestra en la Figura 25. Se tiene los últimos 13 años de registro de las aportaciones, el régimen es alterado por lo tanto se hizo una restitución a régimen natural sumando las aportaciones las demandas aguas arriba.



Figura 25. Punto de calibración en el Alto Pativilca

Los resultados de la calibración iterada manualmente obtuvieron los parámetros mostrados en la Tabla 15.

Tabla 15. Parámetros de calibración del Alto Pativilca

Parámetros	Hmax(mm)	Excedente	Imax(mm)	Alfa
Alto Pativilca	13	30	240	0.26

En el proceso de calibración se buscó un buen ajuste con respecto al Nash y esto se refleja en los resultados de la Tabla 16. Este índice de Nash es muy bueno (Molnar, 2011) por lo tanto el modelo representa muy bien la hidrología en los últimos años. Con respecto al Bias muestra una buena similitud entre los datos observados y simulados.

Tabla 16. Indicadores de bondad de ajuste en el Alto Pativilca

Indicador	Periodo completo
Bias	-0.0 %
Nash	0.80

La comparación entre los datos observados - simulados anuales y mensuales se muestra en la Figura 26 y la Figura 27. Estos resultados muestran una buena representación de los caudales simulados y una coincidencia en casi todos los periodos y una buena representación de los caudales picos. Se tiene un $Q_{simulado}$ de 1193.1 hm^3 $Q_{observado}$ de 1193.3 hm^3 . Se observa un caudal base constante aproximadamente de 40 hm^3 .

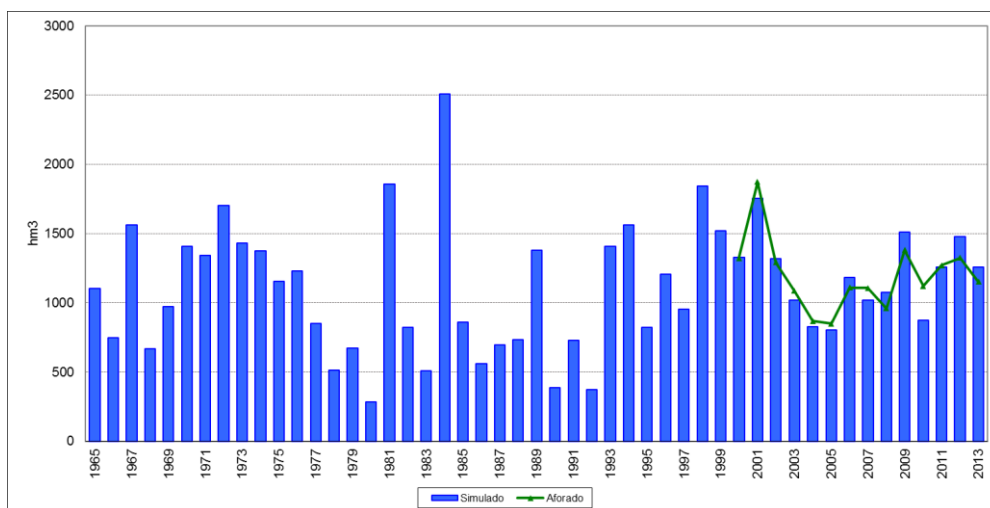


Figura 26. Contraste de caudales anuales aforados y simulados en el Alto Pativilca

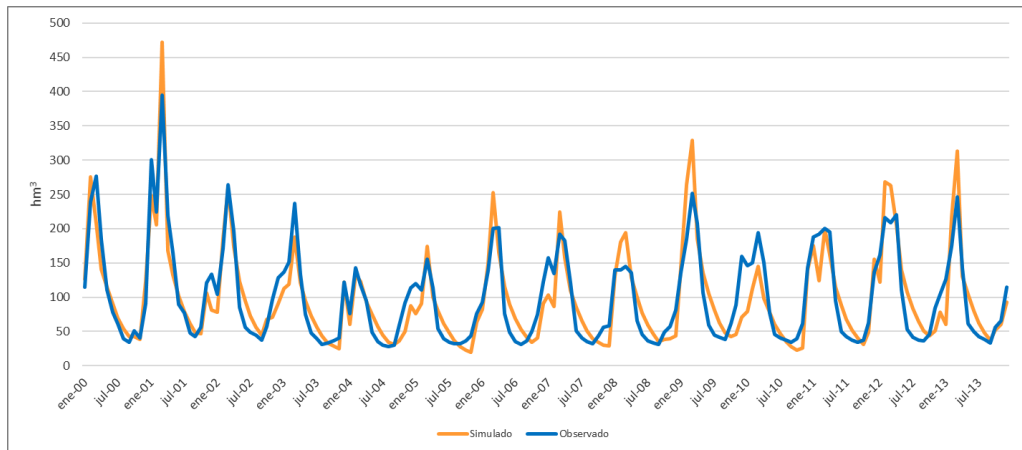


Figura 27. Contraste de caudales mensuales aforados y simulados en el Alto Pativilca

El Figura 28 se hace una comparación de los caudales simulados y aforados del año medio. Los meses de junio a agosto y marzo se identifican una sobreestimación en la generación de agua del modelo, y los meses de noviembre a enero subestima la generación de agua.

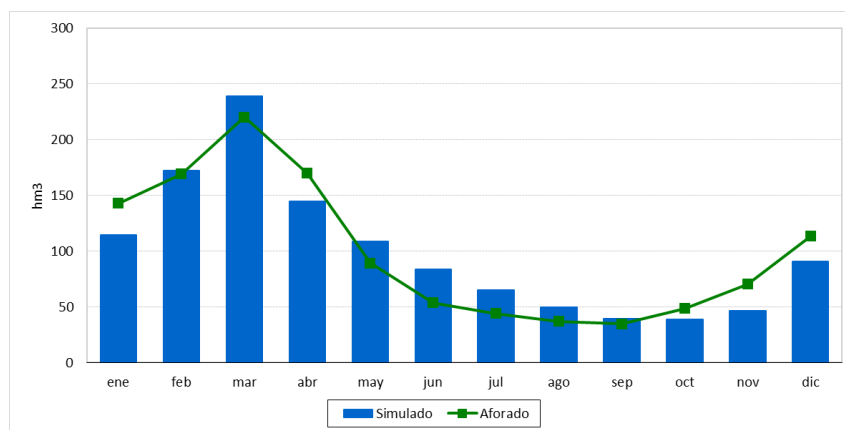


Figura 28. Caudales simulados y observados del año medio del Alto Pativilca

Luego de la calibración se obtuvo la aportación anual del Alto Pativilca de 1111 hm³ como lo muestra la Figura 29; de igual forma se representó la distribución mensual de la aportación del Alto Pativilca, de manera que los meses de enero a marzo con los de mayor producción de agua Figura 30.

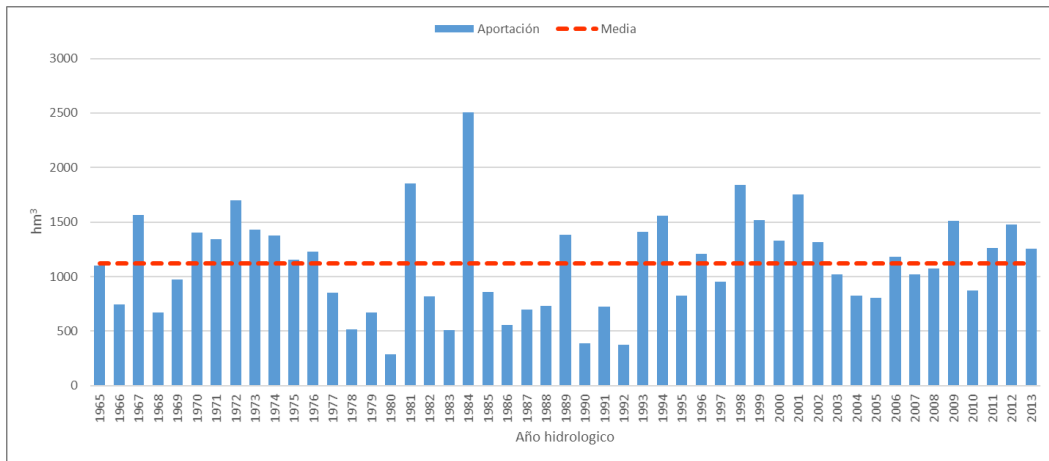


Figura 29. Aportación anual del Alto Pativilca

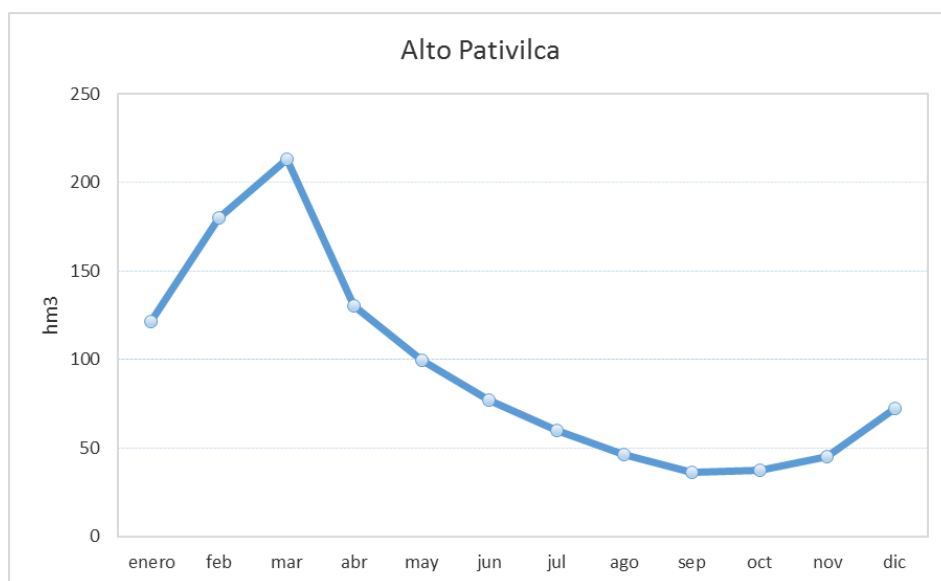


Figura 30. Aportación media mensual del Alto Pativilca

5.2.2. Medio Pativilca

El Medio Pativilca toma como punto de calibración la estación hidrométrica Alpas como lo muestra en la Figura 31. En este punto se tiene registro de caudales de los primeros 5 años (1965 – 1970), al igual que la estación hidrométrica Cahua el régimen es alterado por lo tanto se hizo una restitución a régimen natural sumando a caudales consumidos de las demandas aguas arriba de este punto. Este punto recibe la aportación del Alto Pativilca, por lo tanto, a los resultados del modelo en este tramo se le añade la aportación del Alto Pativilca.



Figura 31. Punto de calibración del Medio Pativilca

Como se mencionó anteriormente los resultados de los parámetros de la calibración iterada manualmente son los que se muestran en la Tabla 17

Tabla 17. Parámetros de calibración de Medio Pativilca

Parámetros	Hmax(mm)	Excedente	Imax(mm)	Alfa
Medio Pativilca	5	30	110	0.25

En este punto de calibración también el índice de Nash es considerado excelente, representa una buena hidrología en los primeros años de la serie. Por otro lado, con respecto al Bias muestra una buena similitud entre los datos observados y simulados, esto se refleja en la Tabla 18.

Tabla 18. Indicadores de bondad de ajuste Medio Pativilca

Indicador	Periodo completo
Bias	-5.8 %
Nash	0.81

Se realizó una comparación gráfica de los caudales observados - simulados anuales y mensuales como se representa en la Figura 32 y Figura 33, se puede observar una buena representación de los caudales pico en la mayoría del periodo de estudio y por otro lado los caudales base tienen un pequeño desfase y no coinciden en partes del periodo del estudio. Este periodo, aunque tiene pocos años de registro da buena robustez al modelo en los primeros años.

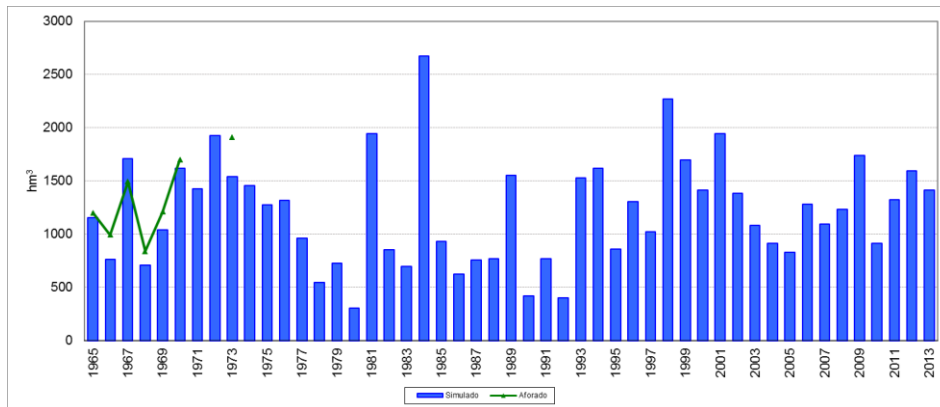


Figura 32. Contraste de caudales anuales aforados y simulados en el Medio Pativilca

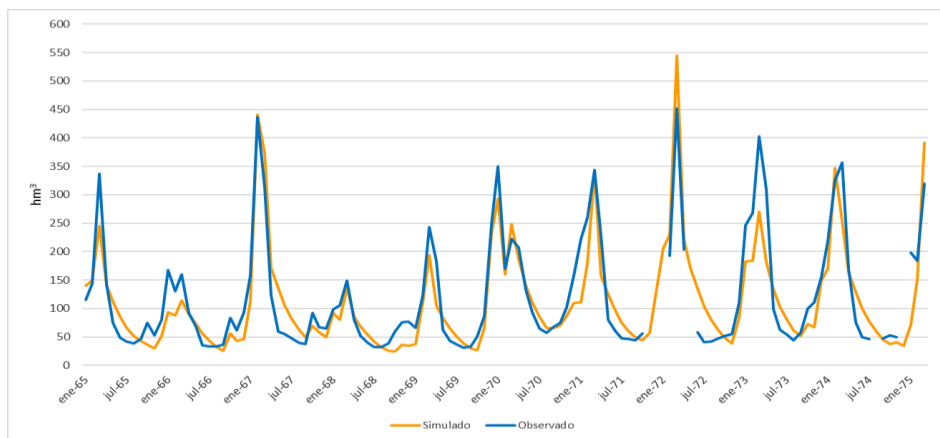


Figura 33 . Contraste de caudales mensuales aforados y simulados en el Medio Pativilca

La Figura 34 muestra la comparación de los caudales simulados y aforados del año medio. Los meses de mayo a julio se identifican a simple vista una sobreestimación en la generación de agua del modelo.

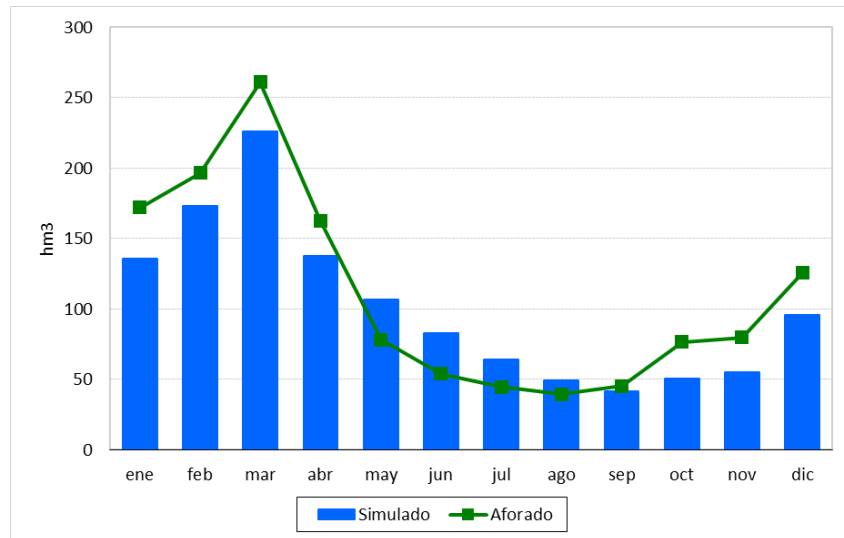


Figura 34. Caudales simulados y observados del año medio del Medio Pativilca

Como resultado final de la calibración se obtuvo la aportación anual del Medio Pativilca de 1211 hm³ como lo muestra la Figura 35 y una aportación mensual Figura 36, siendo de igual forma que el Alto Pativilca los meses de mayor producción de agua es de enero a marzo.

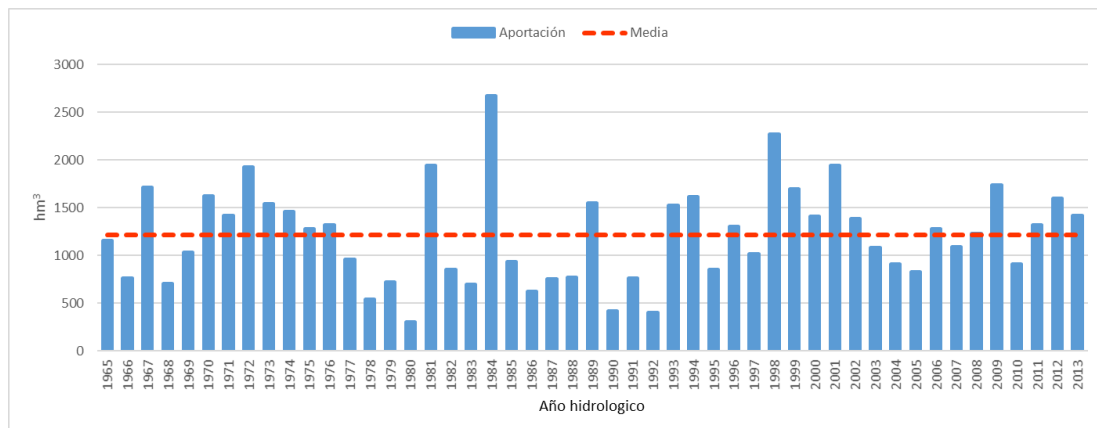


Figura 35. Aportación anual del modelo del Medio Pativilca.

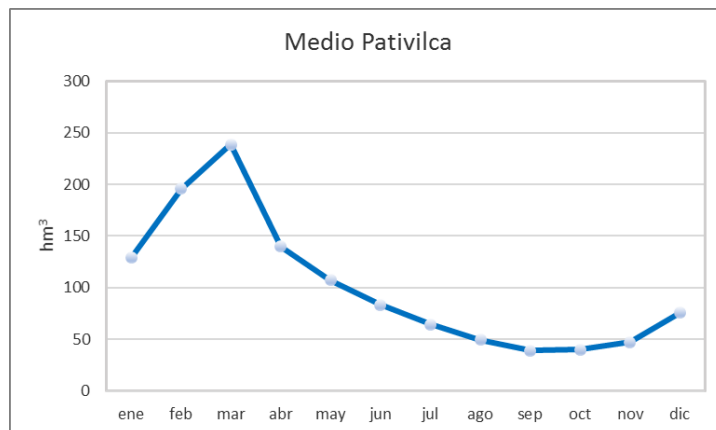


Figura 36. Aportación media mensual del Medio Pativilca

5.2.3. Bajo Pativilca

El Bajo Pativilca toma como punto de calibración la estación hidrométrica Puente Yanapampa como lo muestra en la Figura 37. En este punto se tiene registro histórico de aportaciones más largo en comparación a las otras estaciones, tiene un periodo de 44 años (1965 – 2009); al igual que las otras dos estaciones mencionadas el régimen es alterado por lo tanto se hizo una restitución a régimen natural añadiendo los caudales consumidos de las demandas aguas arriba de este punto. Este punto recibe la aportación del Alto y Medio Pativilca, por lo tanto, a los resultados del modelo en este tramo se le añade la aportación del Alto Pativilca.



Figura 37. Punto de calibración del Bajo Pativilca

Como se mencionó anteriormente los resultados de los parámetros de la calibración iterada manualmente son los que se muestran en la Tabla 19.

Tabla 19. Parámetros de calibración del modelo del Bajo Pativilca

Parámetros	Hmax(mm)	Excedente	I _{max} (mm)	Alfa
Medio Pativilca	5	30	110	0.21

En este tramo de calibración el índice de Nash es considerado satisfactorio, representa una buena hidrología en los primeros y últimos años de la serie. Por otro lado, con respecto al Bias muestra una buena similitud entre los datos observados y simulados, esto se refleja en la Tabla 20.

Tabla 20. Indicadores de bondad de ajuste del Bajo Pativilca

Indicador	Periodo completo
Bias	-14.9 %
Nash	0.43

La comparación grafica de los caudales anuales observados y simulados (Figura 38) muestra una buena representación en los primeros y últimos años, caso contrario sucede en los años de 1977 al 1993 que existe una gran diferencia, excepto en los años picos que tienen una gran similitud. Según (Curi, 2017) menciona que existen cambios en la serie por la intervención antrópica como el represamiento y el trasvases a la cuenca vecina (Cuenca del rio Supe) alterando la oferta hídrica en determinados años. La grafica mensual de las aportaciones (Figura 39) muestra igualmente que los caudales anuales una buena representación en los primeros y últimos años del periodo de estudio, representa muy bien los caudales picos excepto en los últimos años que existe un desfase entre lo observado y simulado, existe una buena representación en el caudal base excepto el año 1975 que muestra el caudal observado nulo. Existe una incertidumbre en los datos observados ya que la estación hidrométrica es una regla de medición del nivel de agua junto al tramo de rio, la ubicación es buena, sin embargo, el Puente Yanapampa donde está ubicado hubo una reducción del cauce, provocando flujos de mayor turbulencia que distorsionan el flujo natural del cauce, por lo tanto, es más recomendable tomar la información de la estación hidrométrica Cahua (Ochoa, 2004).

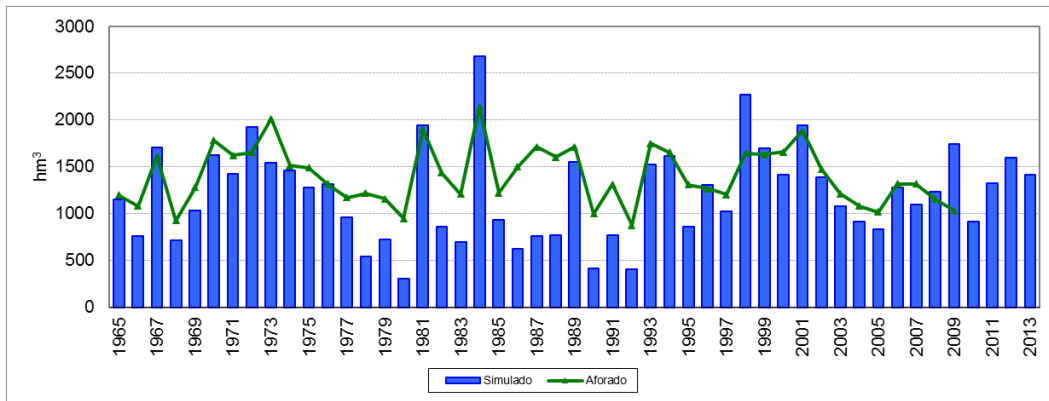


Figura 38. Contraste de caudales anuales aforados y simulados en el Bajo Pativilca

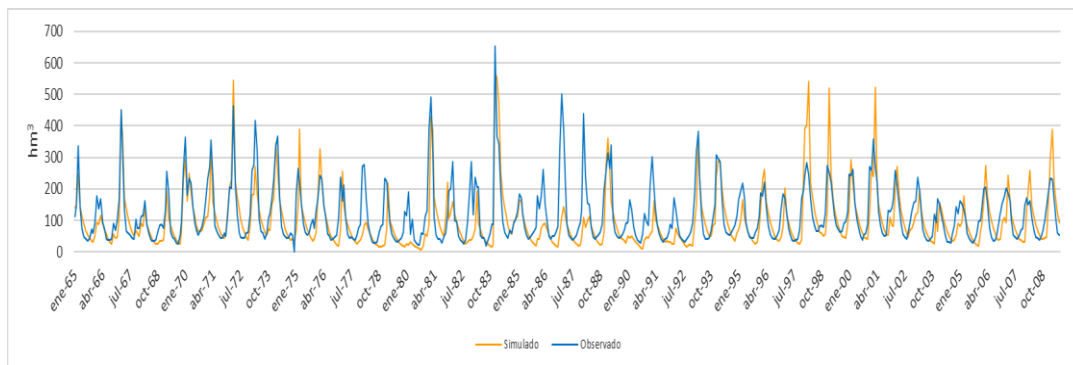


Figura 39. Contraste de caudales mensuales aforados y simulados en el Bajo Pativilca

La Figura 40 muestra la comparación entre los caudales simulados y aforados del año medio. Los meses de noviembre a febrero se observa una subestimación de los caudales obtenidos del modelo, una de las razones es la precipitación observada en el periodo de 1987 – 1992, presenta una incertidumbre por ser una de las más bajas registradas en el periodo histórico, excepto los años donde ocurren el fenómeno del niño.

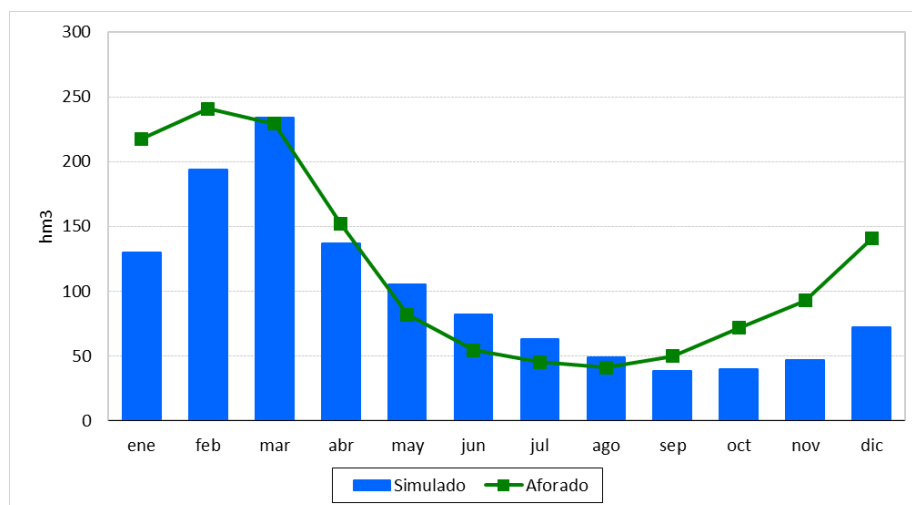


Figura 40. Caudales simulados y observados del año medio del Bajo Pativilca

Como esta zona es árida y la precipitación es escasa toda la aportación proviene del Alto y Medio Pativilca, por lo que tiene la misma aportación determinada en el Medio Pativilca, 1211 hm³ como lo muestra la Figura 41, además la aportación mensual viene representada por la Figura 42.

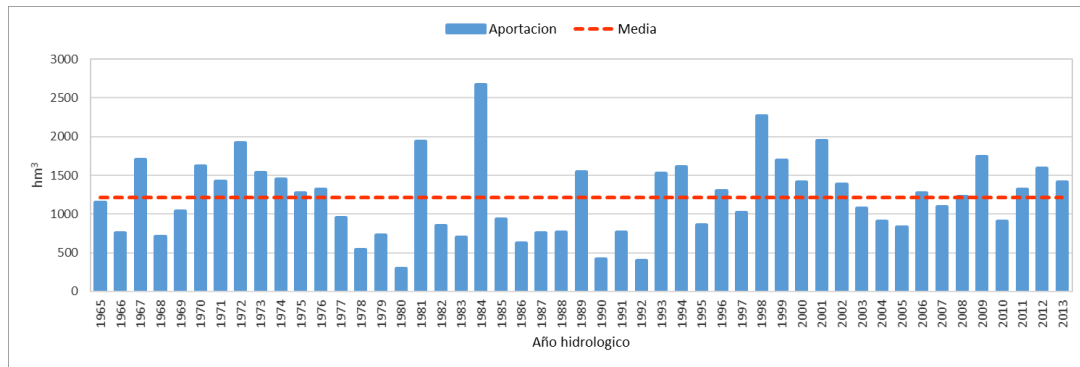


Figura 41. Aportación anual del modelo del Bajo Pativilca.

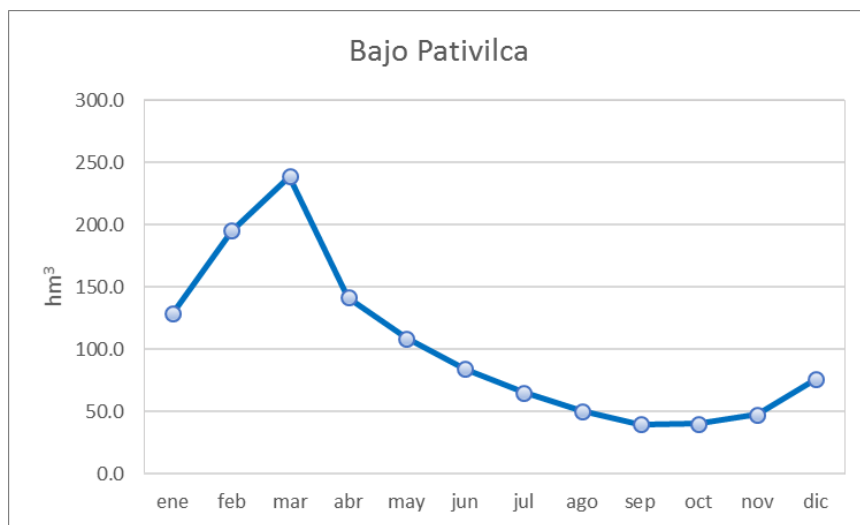


Figura 42. Aportación media mensual del Bajo Pativilca

5.3. COMPARACIÓN DE ESTUDIOS PREVIOS

Existen pocos registros de estudios realizados en cuenca del río Pativilca por lo que hay una limitada información, el último estudio fue realizado por Autoridad nacional del Agua tal como se detalló anteriormente usa el Modelo WEAP (Water Evaluation and Planning) para la evaluación de los recursos hídricos.

En el presente estudio se realiza una comparación de la aportación de la cuenca obtenidas por el Modelo WEAP y el Modelo Hidrológico Temez; el modelo WEAP usa el método lluvia – escorrentía y considera la escorrentía superficial, subterránea y subsuperficial (Interflujo). La Figura 43 muestra para el Alto Pativilca una aportación superior a un 24 % del modelo WEAP con respecto al modelo Temez, el Bajo Pativilca muestra algo similar con un 25% más de la aportación del modelo Temez. Se resalta que para este estudio se considera un punto de calibración (Estación hidrométrica Cahua) ubicada en el Alto Pativilca el cual no considerada en el modelo WEAP. Se visualiza que el modelo hidrológico Temez tiene más similitud a los caudales observados en el Alto Pativilca (Figura 43).

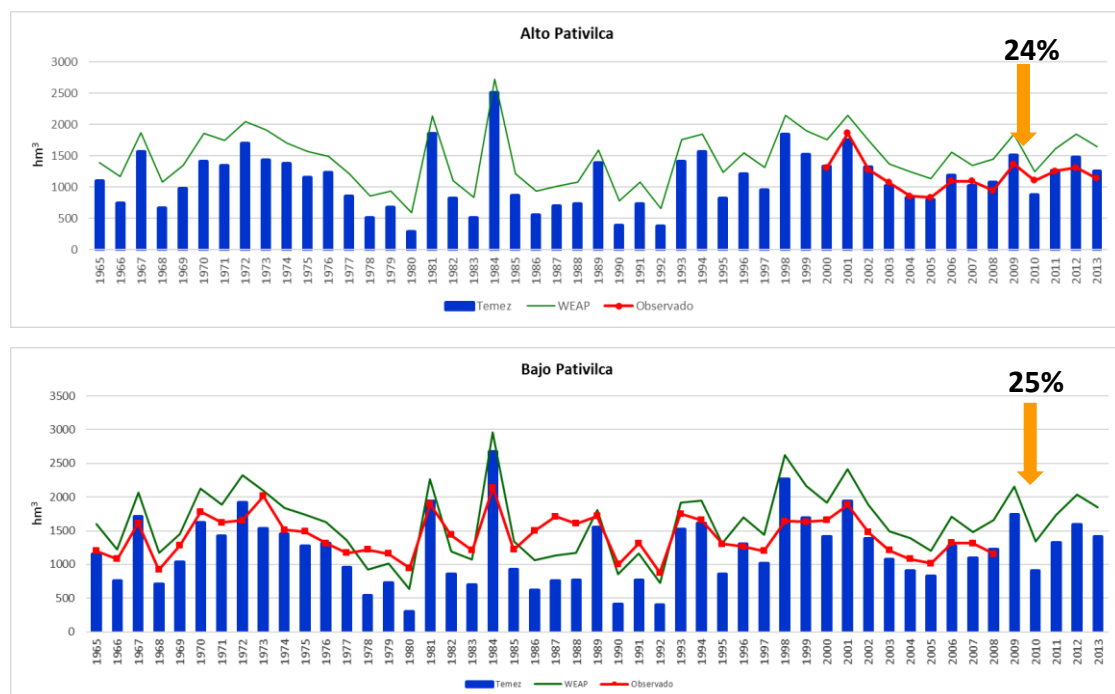


Figura 43. Comparación de las aportaciones del modelo WEAP, Temez y el caudal observado

Se identifica que los resultados del modelo WEAP sigue la tendencia de la incertidumbre de los datos del año 1978 – 1992.

5.4. BALANCE DEL CICLO HIDROLÓGICO

El balance hídrico de la cuenca del río Pativilca (Figura 44) muestra la distribución de la precipitación y la evapotranspiración en las tres zonas de la cuenca y la aportación de cada una.

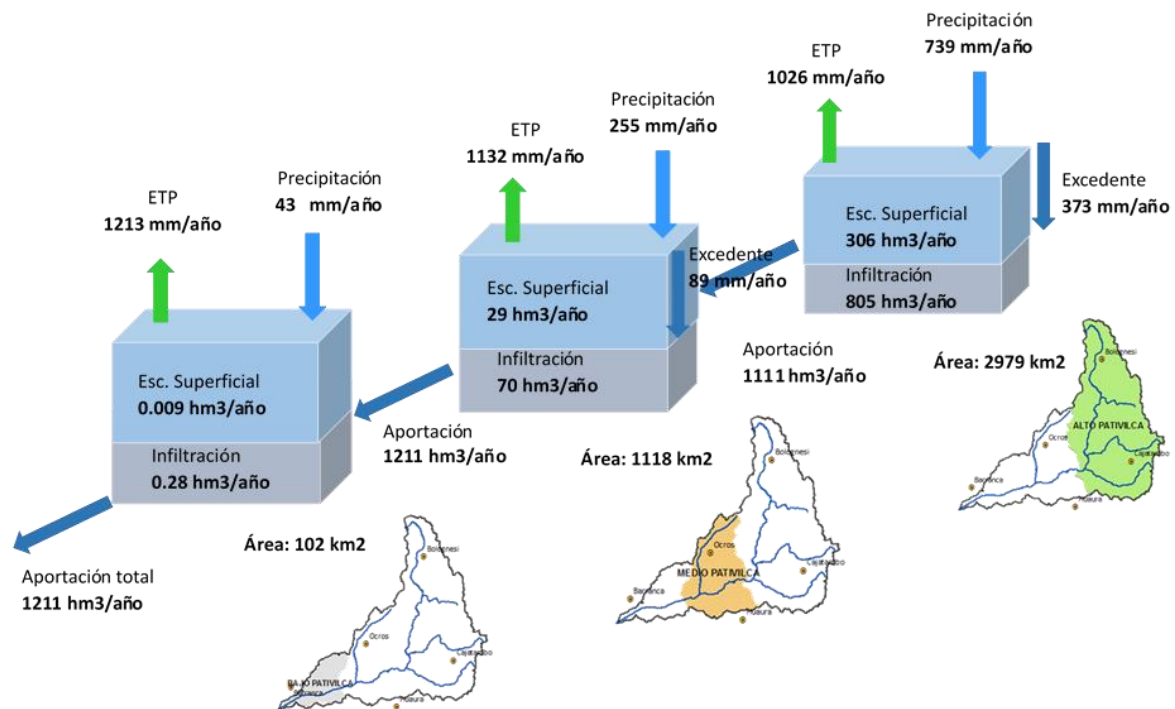


Figura 44. Balance hídrico de la cuenca del río Pativilca

En las tres zonas se observa que el mayor aporte de agua a la cuenca es la escorrentía subterránea y la mayor generación de agua se origina en la cuenca Alta con 1111 hm³, el Medio Pativilca genera 100 hm³ y el bajo Pativilca no genera nada por la precipitación escasa; siendo la aportación total de la cuenca 1218 hm³. El Alto Pativilca tiene una gran importancia para la cuenca ya que es la que aporta más del 90 % de los recursos hídricos.

5.5. MODELO DE GESTIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS

En este apartado se mencionará todos los aspectos fundamentales del modelo de gestión, este modelo simula el sistema de explotación de la cuenca. La información de partida del modelo de gestión es la aportación mensual del modelo hidrológico, la infraestructura existente y la norma de explotación, permitiendo de esta manera realizar un análisis de la gestión actual.

5.5.1. Demandas

Las demandas que ingresan al modelo de gestión es la urbana, industrial y agrícola, además el caudal ecológico definido en el tramo bajo. Se considera para el presente estudio las demandas situadas en el Bajo Pativilca, estas son la mayor demanda consuntiva de la cuenca, una de ellas es la agrícola. La agricultura a gran escala ocurre en la costa esto conlleva a un elevado uso del recurso hídrico en una zona árida generando presión sobre los recursos hídricos (Aste, 2018).

La Figura 45 muestra la distribución mensual de la demanda agrícola y la urbana, se agrupó la demanda industrial y la demanda urbana. La Tabla 21 muestra la dotación mensual (hm^3) de las demandas.

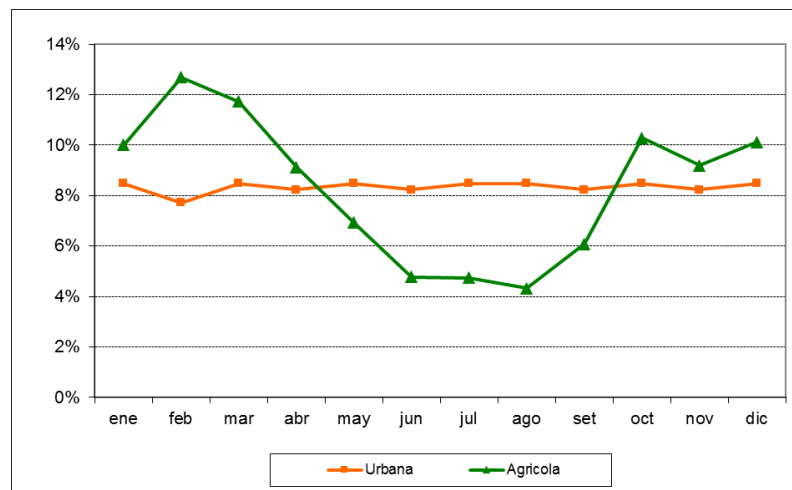


Figura 45. Distribución mensual de la demanda urbana y agrícola

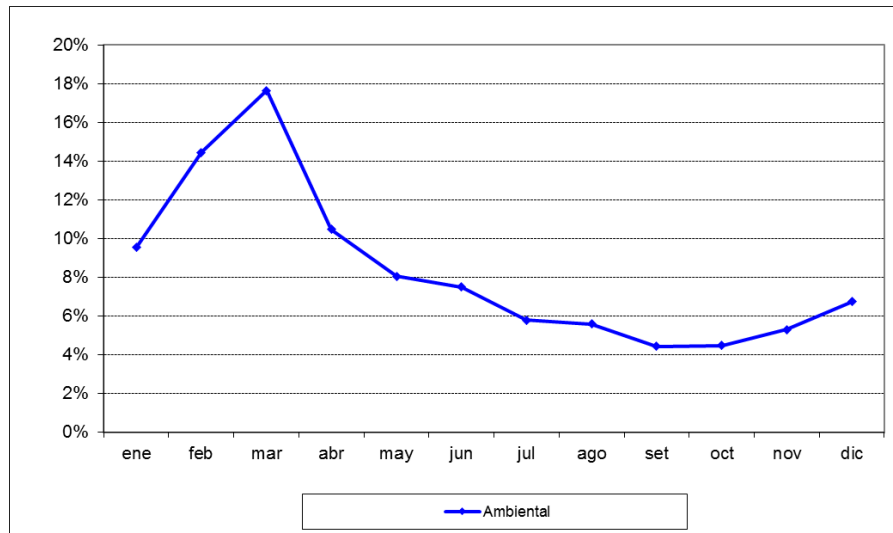


Figura 46. Distribución mensual del caudal ecológico

La Figura 46 muestra la distribución mensual del caudal ecológico calculada de acuerdo con los criterios establecidos en el estudio realizado por del ANA, se ubica un tramo prioritario en la cuenca baja por la existencia del camarón de río (*Cryphiops caementarius*) una especie que se desplaza hasta los 1400 m.s.n.m; es de importancia ecológica y económica (gastronomía y actividades turísticas). La Tabla 21 muestra los caudales ecológicos, siendo mayores en época de estiaje y menores en épocas de avenida.

Tabla 21. Dotación de la demanda urbana/industrial y agrícola, el caudal ecológico

Demanda	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
Urbana e industrial	2.25	2.04	2.25	2.18	2.25	2.18	2.25	2.25	2.18	2.25	2.25	2.04
Agrícola	45.87	58.16	53.72	41.87	31.74	21.90	21.74	19.84	27.84	47.18	42.12	46.43
Ecológico	12.90	19.55	23.88	14.17	10.88	10.14	7.83	6.05	4.79	4.87	5.73	9.13

La Figura 47 muestra la distribución de la demanda agrícola a lo largo de la cuenca baja, la bocatoma por el cual se capta el agua del río para distribuirla a la demanda agrícola es la misma por el cual se capta para las otras demandas como la poblacional y la industrial.



Figura 47. Sectores de la Junta de Usuarios de Agua del sector hidráulico de la cuenca del río Pativilca

5.5.2. Eficiencia de riego

La eficiencia de riego para la zona agrícola se determinó para cada sector de la Junta de Usuarios de Agua del sector hidráulico de la cuenca del río Pativilca, esta se divide en 9 sectores hidráulicos (Figura 47). La eficiencia se obtuvo como se mencionó en la metodología, el cociente entre la demanda neta (hm^3/ha) que es la que se calcula a través de la ETo y el Kc del sector, y la demanda bruta un dato conocido⁸.

⁸ Dato obtenido de la Junta de Usuarios del sector hidráulico de la cuenca del valle Pativilca

Tabla 22. Eficiencia de riego por sector hidráulico

Sector hidráulico	Eficiencia de riego
Huanchay	0.64
Llamachupan	0.39
Otopongo	0.54
Irrigación Pativilca	0.55
Huayto	0.60
Vinto	0.39
Paramonga	0.50
Canal Matriz Supe-Barranca	0.53
Galpón	0.47
Total	0.51

La Tabla 22 muestra la eficiencia total de riego en el valle Pativilca de 51% que es una eficiencia mucho mejor a la que se recomienda en el Perú de acuerdo con el Plan Nacional de Recursos Hídricos de 45%. Una de las razones por el cual esta eficiencia es mucho mayor es el trabajo con datos obtenidos de la misma entidad quien se encarga de la distribución del recurso hídrico, que muchas veces es mucho menor de lo que dicen los estudios agronómicos.

Tabla 23. Eficiencia de riego del sector hidráulico Paramonga

	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	set	oct	nov	dic
ETP mm	127	119	129	114	97	77	79	72	72	89	104	125
EV mm	6.9	8.9	10.6	2.2	0.5	0.2	0.2	2.4	0.9	2.2	2.3	4.5
Déficit mm	121	111	118	112	97	79	79	69	71	87	101	119
Neta (m3/ha)	1205	1109	1179	1115	967	785	784	697	711	868	1012	1199
Bruta (m3/ha)	1888	2411	2297	2000	1758	1231	1142	1266	1631	3055	2205	2299
Eficiencia	0.64	0.46	0.51	0.56	0.55	0.64	0.69	0.55	0.44	0.28	0.46	0.52

De acuerdo con los resultados de cada sector hidráulico se puede decir que la eficiencia de riego es muy diferente unos más elevados que otros, se identifica la menor eficiencia el sector hidráulico Llamachupan a la cual es necesario prestarle más atención y revisión para posteriores estudios. Un ejemplo de cálculo de la eficiencia de riego aplicado al sector hidráulico Paramonga se muestra en la Tabla 23.

5.5.3. Resultados del modelo de gestión

El análisis de la precipitación realizado en los primeros apartados muestra una alta fiabilidad de la serie en los últimos 20 años, así como también el modelo hidrológico representa muy bien este periodo, razón por el cual el presente modelo de gestión trabajo con este periodo. No se considera ninguna infraestructura hidráulica (embalse) ya que la cuenca no cuenca con ningún sistema de regulación.

Los indicadores de garantía son tomados según el Plan Nacional de recursos hídricos del ANA quien ha establecido criterios generales que se pueden tomar dentro del marco de la gestión de cuenca, esto criterios se muestran en la .

Tabla 24.

Tabla 24. Criterios de garantía de las demandas del PNGRH

Criterio	
Gm	El deficit en un mes no sea superior al 10% de la correspondiente demanda
Ga	
Gv	90 – 95%
Deficit 1	Demanda poblacional: el maximo deficit en un año se encuentra entre 5 -10% de la demnada. Demanda agricola: el maximo deficit en un año se ecuentra entre el 20 – 40 % de la demanda.
Deficit 2	Demanda poblacional: la maxima deficit de dos años consecutivos se encuentra entre 10 -15% de la demnada. Demanda agricola: el maximo deficit en dos años se ecuentra entre el 30 – 60 % de la demanda.
Deficit 10	Demanda poblacional: la maxima deficit de diez años consecutivos se encuentra entre 15 -30% de la demanda. Demanda agricola: el maximo deficit en diez años se ecuentra entre el 40 – 80 % de la demanda.

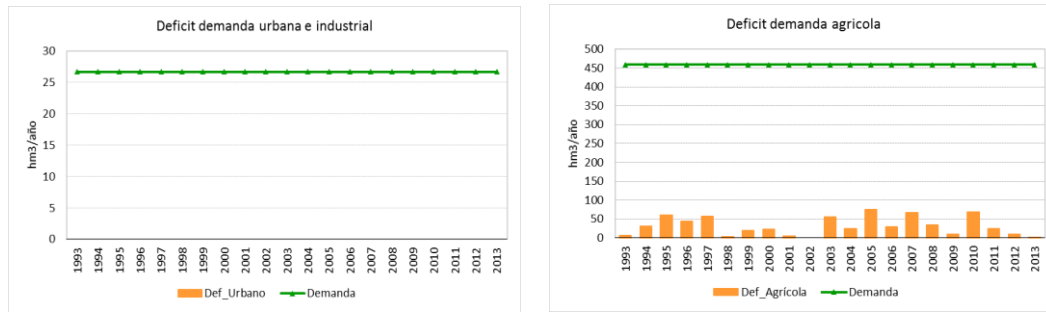


Figura 48. Déficit anual de la demanda urbana, industrial y agrícola.

Según los resultados mostrados en la Figura 48 se observa el cumplimiento total de la demanda urbana, caso contrario la demanda agrícola presenta déficit en casi todos los años. La Tabla 25 señala que la demanda agrícola no cumple con las garantías mensuales y anuales, los criterios de déficit de uno y dos años consecutivos están dentro del rango establecido. Caso contrario del déficit de 10 años consecutivos se encuentra fuera del criterio establecido por el PNRH. Finalmente, se concluye que el sistema de gestión actual se encuentra estable.

Tabla 25. Indicadores de garantía de la demanda urbana/industrial y agrícola

	Ambiental	Urbana	Agrícola
Gm	100%	100%	84.5%
Ga		100%	42.9%
Gv		100%	93.0%
Déficit 1		0%	16%
Déficit 2		0%	22%
Déficit 10		0%	83%

El fallo de la demanda agrícola se da principalmente en los meses de octubre a diciembre, fecha donde se requiere mayor cantidad de agua porque hay zonas donde las plantaciones se encuentran en pleno desarrollo.

5.6. INFLUENCIA DEL CAMBIO CLIMÁTICO

Los dos escenarios de cambio climático RCP 4.5 y RCP 8.5 evaluados en el presente estudio muestran cambios en las condiciones climáticas. Se presenta un incremento de la temperatura en toda la cuenca variando solo la intensidad para cada escenario. La precipitación del mismo modo como la temperatura muestra incrementos, pero con comportamientos variados para cada escenario e intensidad.

5.6.1. Anomalías de cambio climático

Un paso importante para determinar la influencia del cambio climático es obtener las anomalías de cambio climático, estas se obtienen de la CCKP del Banco Mundial quien tiene una amplia información, datos e informes sobre la situación del cambio climático. Dentro de su base de datos tiene un registro de un conjunto de 35 modelos de circulación global del quinto informe (AR5) para cada región, país y cuenca. Se ubico dos pixeles ($1^{\circ} \times 1^{\circ}$) en el área de estudio y el promedio de ellos se obtuvo las anomalías de precipitación y temperatura.

La temperatura a corto plazo para el escenario RCP 4.5 muestra un aumento anual de 0.99°C y para largo plazo un aumento de 1.12°C . El escenario RCP 8.5 prevé un aumento anual de 1.12°C para corto plazo y para largo plazo se ve aumento significativo de 3.72°C (Figura 50). La temperatura se incrementa para ambos escenarios.

La precipitación para el escenario RCP 4.5 a corto plazo muestra un aumento de 5.42 mm anual y a largo plazo una ligera disminución a 4.80 mm , mientras el escenario RCP 8.5 a corto plazo estima un aumento de 2.08 mm y para largo plazo un drástico aumento de 18.39 mm anual (Figura 49).

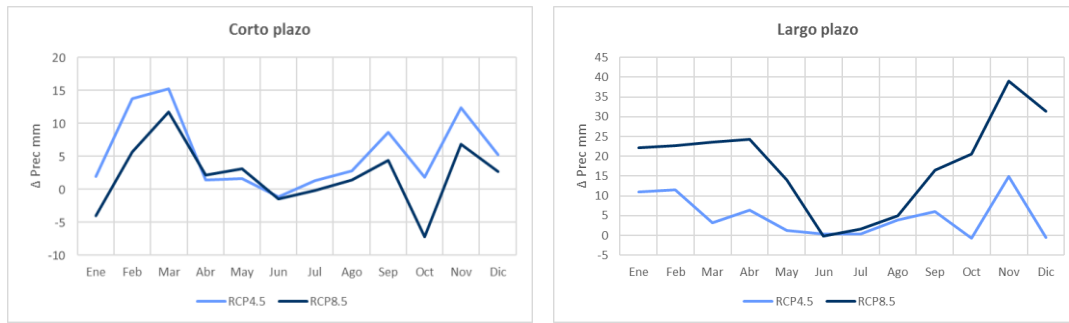


Figura 49. Anomalías mensuales de precipitación para corto y largo plazo

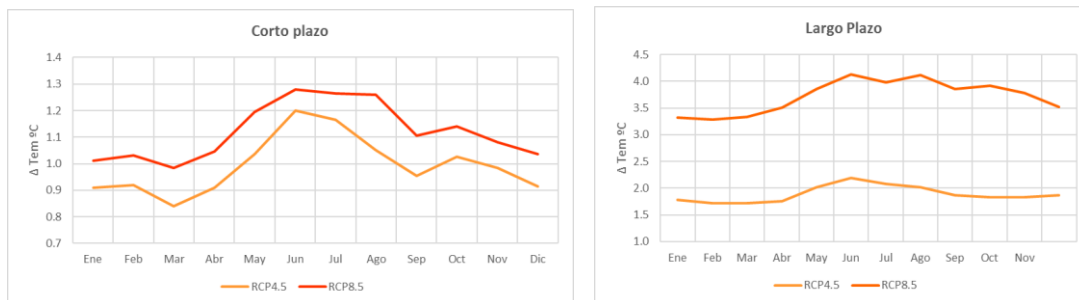


Figura 50. Anomalía de temperatura mensual a corto y largo plazo

El mayor incremento de temperatura es en invierno durante el trimestre (junio – agosto) y el periodo de menor cambio se produce en verano (diciembre – marzo), estos cambios estacionales se producen de la misma forma para ambos escenarios.

La precipitación a diferencia de la temperatura no muestra un patrón homogéneo de cambio estacional. Una de las razones es la distribución de la precipitación muy variada a lo largo de la cuenca (0mm hasta los 1200mm), las condiciones orográficas y el complejo sistema climático.

El comportamiento de las anomalías es bastante dispar especialmente para el periodo largo (2080 -2099). Para el corto plazo muestra una distribución estacional similar con disminuciones pronunciadas en el mes de octubre y enero, y en invierno no existe mucha variabilidad. Para el periodo a largo plazo el escenario RCP 8.5 muestra mayores incrementos en el mes de noviembre y la no variabilidad en invierno.

5.6.2. Influencia de cambio climático en los recursos hídricos

Los resultados de la simulación bajo la influencia del cambio climático sobre las aportaciones para cada escenario es la que se muestran en los Figura 51 y la Figura 52.

Para el escenario climático RCP 4.5 no muestra mucha diferencia en la variabilidad en las aportaciones, los meses de estiaje son casi prácticamente iguales y en los meses de avenida se ve un ligero aumento más pronunciado. El incremento de la aportación para corto plazo es en un 9.4% y para largo plazo hay una pequeña disminución en 6.5% (. Tabla 26).

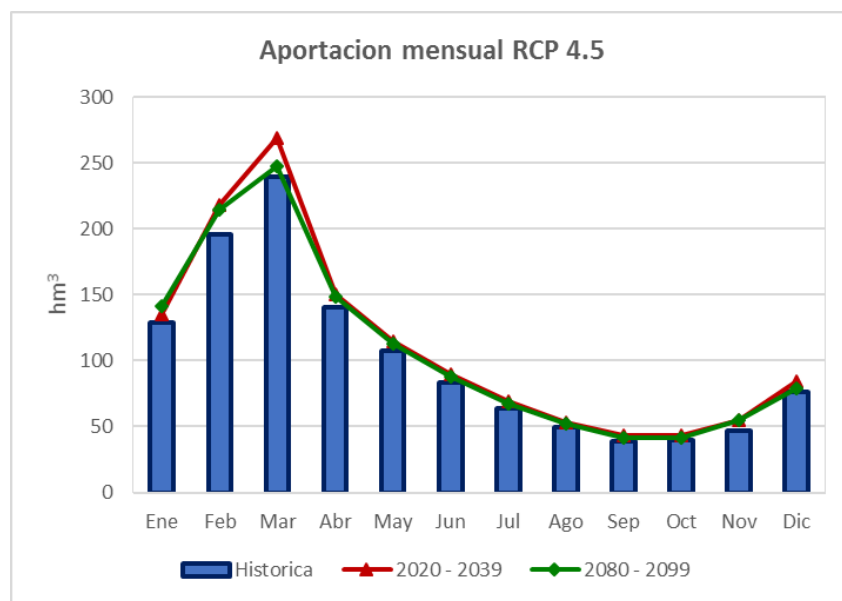


Figura 51. Cambio en las aportaciones mensuales bajo el escenario RCP 4.5

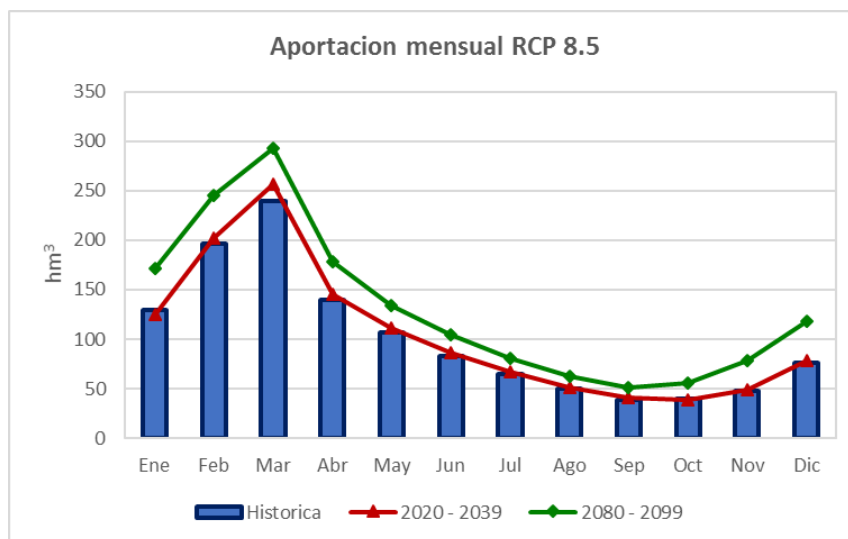


Figura 52. Cambio en las aportaciones mensuales bajo el escenario RCP 8.5

Según los resultados mostrados en la Tabla 26, el escenario RCP 8.5 para fin de siglo muestra un cambio pronunciado en las aportaciones de un 29% con respecto al periodo histórico, a corto plazo presenta un ligero aumento de 3.4% de la aportación, pero en ambos casos el máximo incremento de la aportación se da en los meses de avenida, en los meses de estiaje se mantiene casi constante excepto a largo plazo que presenta un ligero incremento. Por lo tanto, para la cuenca en estudio la influencia del cambio climático no tendrá efectos negativos sobre los recursos hídricos.

Tabla 26. Resultados de la variación de las aportaciones para cada escenario

Escenario	Año 2020 - 2039		Año 2080 - 2099	
RCP4.5	1325.18 hm ³	9.4% incremento	1290.45 hm ³	6.5% incremento
RCP8.5	1252.32 hm ³	3.4% incremento	1571.15 hm ³	29.8% incremento

5.6.3. Cambio en la dotación de la demanda agrícola

Se ha estimado los porcentajes de incrementos en la dotación anual con respecto al periodo de control para ambos escenarios a corto y largo plazo. Estos escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5 muestran incrementos en la temperatura de 1 °C a 4°C y precipitación variable, la primera tendrá más influencia en las necesidades hídricas de riego ya que con el aumento de la temperatura se incrementaría la ETP provocando un mayor consumo de agua. En este punto se va a analizar la variación de la dotación de la zona regable de la Junta de Usuarios de Agua del sector hidráulico de la cuenca del río Pativilca con la influencia del cambio climático.

Tabla 27. Estimación de la variación de la dotación de la demanda agrícola para el escenario RCP 4.5 y RCP 8.5

Escenario	Año 2020 - 2039		Año 2080 - 2099	
RCP 4.5	481.54 hm ³	5.0% incremento	507.61 hm ³	10.7% incremento
RCP 8.5	486.01 hm ³	6.0% incremento	570.61 hm ³	24.5% incremento

La Tabla 27 muestra para toda la zona de regadío y ambos escenarios tanto como a corto y a largo plazo se prevé un incremento de la dotación de la demanda agrícola. Para el escenario más desfavorable RCP 8.5 para fin de siglo muestra un incremento de un 25% de la demanda en comparación para corto plazo que solo se prevé un aumento de un 6%. El escenario RCP 4.5 muestra un incremento moderado de 5 a 10% de la demanda.

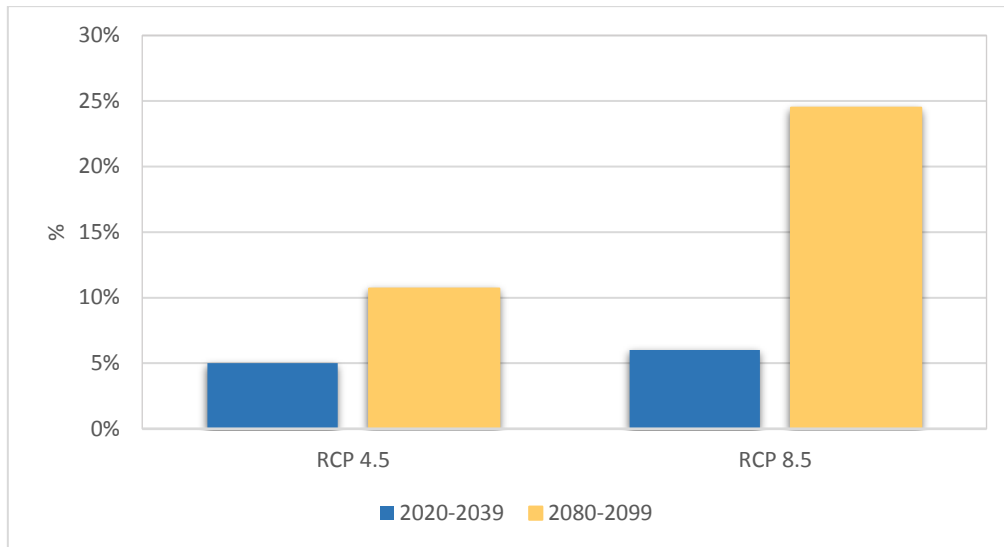


Figura 53. Porcentaje de variación de la dotación para los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5

Las variaciones porcentuales de la dotación (Figura 53) se traducen en un aumento de las necesidades hídricas de los cultivos y por lo tanto una mayor demanda agrícola. El aumento en las necesidades hídricas provoca estrés hídrico que puede alterar al crecimiento y el rendimiento de los cultivos, además la estabilidad de los recursos hídricos.

5.6.4. Cambio climático en la gestión de los recursos hídricos

La influencia del cambio climático sobre gestión de los recursos hídricos en la cuenca de estudio se analiza a través de los cambios de la de la escorrentía y la demanda agrícola resultados de dos escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5. Se prevé un aumento de la escorrentía y la demanda agrícola para ambos escenarios.

Los indicadores de garantía del escenario RCP 4.5 a corto plazo (Tabla 28) muestra una similitud al escenario actual en el cumplimiento de las garantías y déficit de la demanda urbana/industrial y ecológico, mientras que la demanda agrícola presenta un aumento de las garantías y déficit. El aumento de la demanda agrícola por influencia del cambio climático es compensado por el aumento en la escorrentía.

Tabla 28. Garantía y déficit de las demandas bajo es escenario RCP 4.5 a corto plazo

	Escenario actual			2020 -2039	
	Ambiental	Urbana	Agrícola	Urbana	Agrícola
Gm	100%	100%	85.3%	100%	87.7%
Ga		100%	42.9%	100%	52.4%
Gv		100%	90.0%	100%	94.5%
Déficit 1		0%	16%	0%	14%
Déficit 2		0%	22%	0%	18%
Déficit 10		0%	83%	0%	68%

En relación con el cumplimiento de los criterios de garantía para el primer año se encuentra dentro del cumplimiento (20 -40%) y lo mismo para los periodos de 2 y 10 años consecutivos.

En la Figura 54 se observa que todos los años del periodo de referencia tienen déficit en la demanda agrícola, el año con mayor déficit es el 2005. Los déficits se producen principalmente en los meses de setiembre a diciembre, como se detalló anteriormente son los meses que los cultivos necesitan más agua.

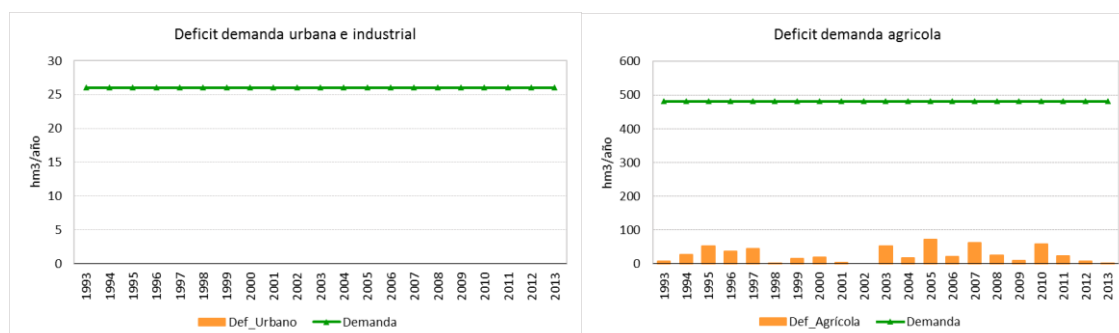


Figura 54. Déficit anual de la demanda urbana y agrícola para el escenario RCP 4.5 a corto plazo.

Para este escenario se ven mejores indicadores de garantía en comparación con el periodo de referencia, por lo tanto, la fuente agua del rio Pativilca abastece a la demanda agrícola y no es necesario buscar otra fuente de alternativa como las aguas subterráneas.

Para finales de siglo XXI para el escenario RCP 4.5 ante una disminución de la escorrentía en comparación al corto plazo y a un aumento de la demanda agrícola se observa que los indicadores de garantía del cumplimiento de gestión tienen parecido al periodo de referencia.

La Tabla 29 los indicadores de garantía se mantienen para la demanda urbana y el caudal ecológico (100%), la demanda agrícola sufre una disminución de la garantía mensual en relación al corto plazo (84.9%), esta disminución es similar al periodo de referencia, en relación al déficit en un año, dos años y diez consecutivos se encuentran dentro de los rangos que menciona la autoridad competente.

Tabla 29. Garantía y déficit de las demandas bajo es escenario RCP 4.5 a largo plazo

	Escenario actual			2080 -2099	
	Ambiental	Urbana	Agrícola	Urbana	Agrícola
Gm	100%	100%	84.5%	100%	84.9%
Ga		100%	42.9%	100%	42.9%
Gv		100%	93.0%	100%	93.8%
Déficit 1		0%	17%	0%	15%
Déficit 2		0%	24%	0%	21%
Déficit 10		0%	89%	0%	79%

La Figura 55 muestra para todos los años déficit en la demanda agrícola, siendo el año con mayor déficit 2005. Para este escenario la gestión vuelve a equilibrarse, a pesar del aumento en la dotación de la demanda agrícola. Por lo tanto, existe una compensación entre el aumento de la escorrentía y el aumento de las necesidades hídricas de riego.

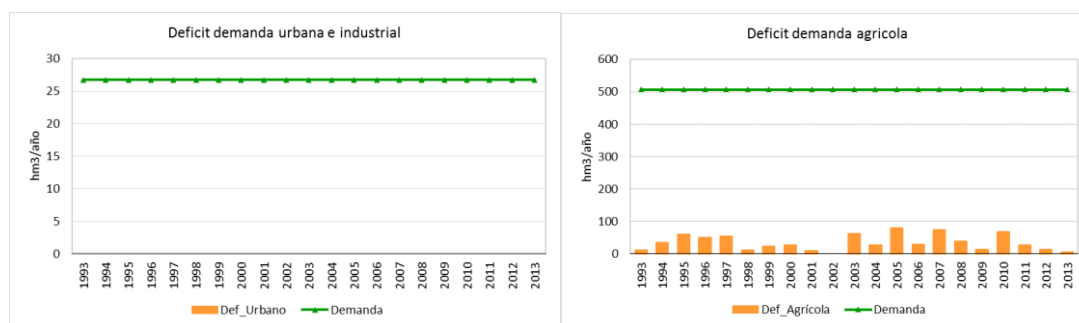


Figura 55. Déficit anual de la demanda urbana y agrícola para escenario RCP 4.5 a largo plazo

El escenario RCP 8.5 a corto plazo representa un escenario con incrementos de la dotación para la demanda agrícola y aumentos en la escorrentía (oferta hídrica), esto tendrá repercusiones sobre las demandas. En el anterior escenario a corto plazo las garantías eran más elevadas y se cumplían todos los déficits, en este escenario a corto plazo no cumple el déficit de 10 años consecutivos, los déficits a un año y dos años consecutivos están dentro del rango (10 – 60%). La demanda urbana se mantiene constante en el cumplimiento de todos los indicadores de gestión (Tabla 30).

Tabla 30. Garantía y déficit de las demandas bajo es escenario RCP 8.5 a corto plazo

	Escenario actual			2020 -2039	
	Ambiental	Urbana	Agrícola	Urbana	Agrícola
Gm	100%	100%	84.5%	100%	84.5%
Ga		100%	42.9%	100%	38.1%
Gv		100%	93.0%	100%	93.1%
Déficit 1		0%	17%	0%	16%
Déficit 2		0%	24%	0%	24%
Déficit 10		0%	89%	0%	91%

La Figura 56 muestra para todos los años déficits en la demanda agrícola unos más que otros, pero ninguno que aun año que no se haya cumplido. Para este escenario a corto plazo la gestión se vuelve un poco critica con respecto al periodo de estudio.

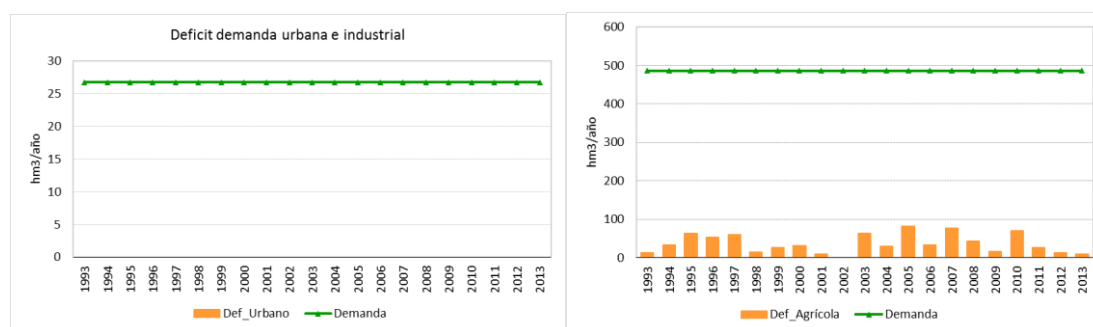


Figura 56. Déficit anual de la demanda urbana y agrícola para escenario RCP 8.5 a corto plazo

Para finales de siglo XXI para el escenario RCP 8.5 se prevé un aumento de la escorrentía y un aumento en la dotación de la demanda agrícola, el aumento de la escorrentía favorecerá al cumplimiento de todos los indicadores de garantías tanto para la urbana como a la agrícola.

La Tabla 31 muestra los indicadores de garantía para este escenario a largo plazo y se observa que cumplen las garantías la demanda urbana y el caudal ecológico (100%), la demanda agrícola sufre una mejora de la garantía mensual (91.2%) en relación al corto plazo (84.5%), en relación al déficit en un año, dos y 10 años consecutivos se encuentran dentro de los rangos que menciona y son mucho mejor en comparación al otro escenario.

Tabla 31 Garantía y déficit de las demandas bajo es escenario RCP 8.5 a largo plazo

	Escenario actual			2080 - 2099	
	Ambiental	Urbana	Agrícola	Urbana	Agrícola
Gm	100%	100%	84.5%	100%	91.2%
Ga		100%	42.9%	100%	71.4%
Gv		100%	93.0%	100%	97.0%
Déficit 1		0%	17%	0%	10%
Déficit 2		0%	24%	0%	13%
Déficit 10		0%	89%	0%	43%

La Figura 57 muestra déficit para unos años y no el periodo completo, este escenario es mucho mejor y una de las razones es por el incremento de la escorrentía (oferta hídrica) de la cuenca.

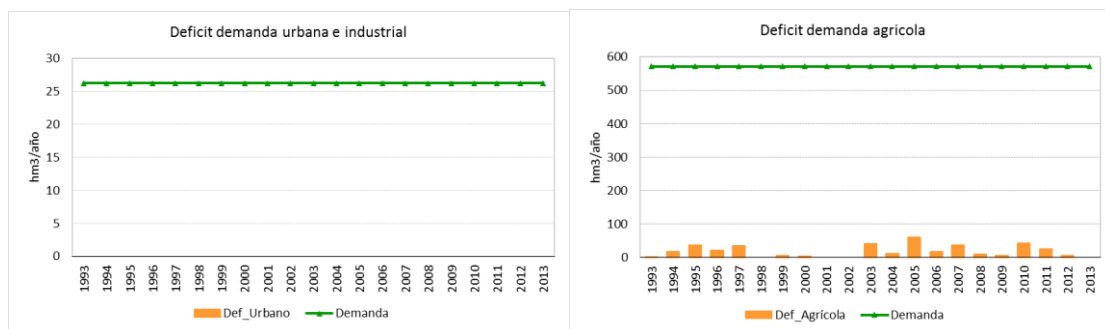


Figura 57. Déficit anual de la demanda urbana y agrícola para escenario RCP 8.5 a largo plazo

5.6.5. Cambio climático en los nuevos proyectos

Como parte del crecimiento económico de la provincia de Barranca se plantea un nuevo proyecto de irrigación de 8 000 hectáreas ubicadas en el Valle Pativilca y la construcción de una presa para abastecer esta nueva demanda y beneficiar a los agricultores de la cuenca del río Pativilca con más 27 000 ha de terreno de cultivo de las 16 comisiones de riego agrupadas en 9 sectores hidráulicos. La construcción de la presa busca almacenar el agua proveniente de la lluvia en época de avenidas y utilizarla en época de estiaje, época donde existe una mayor demanda agrícola.

La ampliación de la frontera agrícola involucra un desequilibrio en la gestión de los recursos hídricos de la cuenca de estudio. En este apartado se va a evaluar la gestión actual con el nuevo proyecto de irrigación y la construcción de la presa, además se analizará la influencia de cambio climático para diferentes escenarios.

Ante un primer análisis de la gestión de los recursos hídricos con la implementación del proyecto de irrigación de 8 000 ha, nuestro sistema actual se vuelve deficiente, los indicadores de garantía (Tabla 32) disminuyen y el déficit de diez años consecutivos no cumple (40 -80%), ante esta situación es necesario la implementación de una presa que pueda satisfacer todas las demandas.

Tabla 32. Garantía y déficit de las demandas de la gestión actual con nuevo proyecto de irrigación

	Escenario actual			Gestión actual con proyecto	
	Ambiental	Urbana	Agrícola	Urbana	Agrícola
Gm	100%	100%	84.5%	100%	77.4%
Ga		100%	42.9%	100%	14.3%
Gv		100%	93.0%	100%	89.1%
Déficit 1		0%	17%	0%	20%
Déficit 2		0%	24%	0%	34%
Déficit 10		0%	89%	0%	132%

Los déficits anuales mostrados en la Figura 58 muestran un aumento para todos los años, se encuentran por encima de los 100hm³/año.

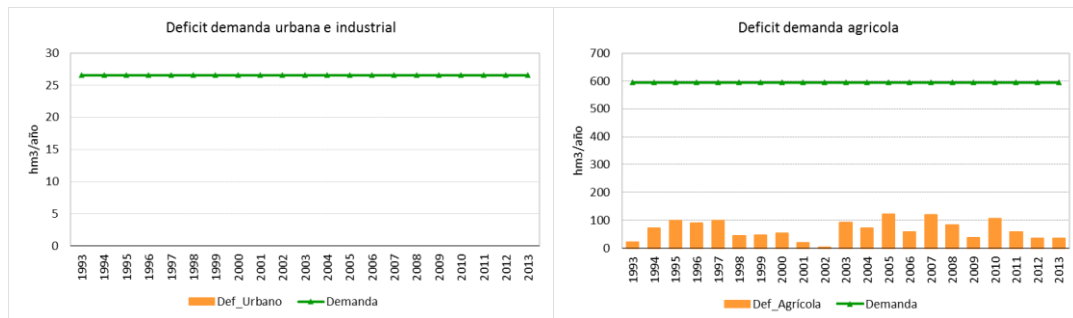


Figura 58. Déficit anual de la demanda urbana y agrícola para la gestión actual con nuevo proyecto de irrigación

Para los escenarios de cambio climático con la intervención del nuevo proyecto de irrigación y sin una construcción de un embalse tendrá un efecto negativo sobre el sistema, todos los indicadores de garantía estarían por debajo de lo establecido, excepto para el escenario RCP 8.5 que presenta mejores resultados en relación con los otros escenarios como se muestra en la Tabla 33.

Tabla 33. Indicadores de garantía del sistema para diferentes escenarios con ampliación de la frontera agrícola

	Ambiental	Urbana	Agrícola gestión actual con proyecto	Agrícola RCP4.5 (corto plazo)	Agrícola RCP4.5 (largo plazo)	Agrícola RCP8.5 (corto plazo)	Agrícola RCP8.5 (largo plazo)
Gm	100%	100%	77.4%	79.0%	76.2%	75.0%	83.3%
Ga		100%	14.3%	14.3%	4.8%	4.8%	19.0%
Gv		100%	89.1%	90.2%	88.8%	87.9%	93.1%
Déficit 1		0%	20%	18%	21%	23%	15%
Déficit 2		0%	34%	31%	35%	38%	21%
Déficit 10		0%	132%	116%	131%	142%	85%

Ante la probabilidad de la implementación del nuevo proyecto de irrigación y la incertidumbre de la influencia del cambio climático en la cuenca hidrográfica se plantea para la gestión actual y los escenarios de cambio climático una relación entre los distintos volúmenes de embalse con la ampliación de la superficie de regadío (Figura 59). Si se desea implementar más superficie agrícola es necesario la construcción de una presa de mayor volumen, la ampliación de la frontera agrícola para todos los escenarios puede llegar a un máximo del 20 000 ha, a partir de allí a volúmenes mayores se incrementarían los costos de obra sin aumentar significativamente la superficie agrícola. Para los escenarios RCP 4.5 a largo plazo y RCP 8.5 a corto plazo ante un aumento de la frontera agrícola requiere más volumen de embalse de comparación a la gestión actual y el RCP 4.5 corto plazo y RCP 8.5 largo plazo.

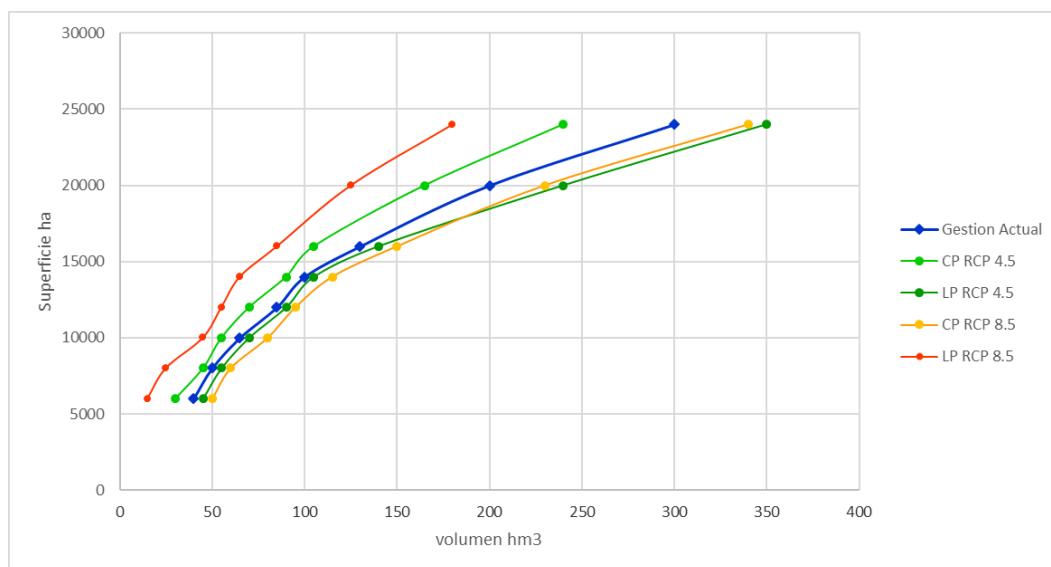


Figura 59. Volumen del embalse vs la ampliación de la superficie agrícola

Para la implementación de las 8000 ha nuevas la construcción óptima de una presa cuyo volumen debe ser de 50hm³, este un volumen óptimo para la gestión actual y los escenarios de cambio climático, manteniendo en equilibrio la incertidumbre del cambio climático (Figura 60). Si se desea ampliar la frontera agrícola y mantenerse dentro del rango de confianza con respecto a los efectos del cambio climático se recomienda un embalse de 100 hm³ de volumen.

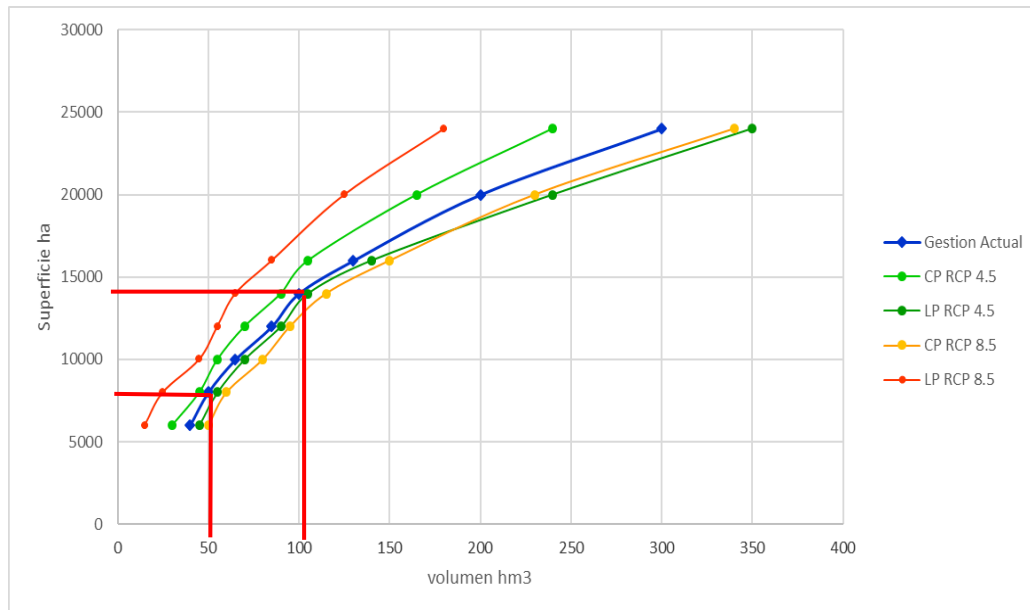


Figura 60. Volumen del embalse y ampliación de la superficie agrícola óptima para todos los escenarios

Desde el punto de vista económica es importante verificar si la ampliación de esta frontera agrícola compensa la inversión que conlleva la construcción del embalse.

Según los resultados mostrados anteriormente sobre el registro histórico de la precipitación en los 20 últimos años de las estaciones meteorológicas se puede observar de manera visual que la precipitación no presenta cambios importantes, por lo tanto ante la incertidumbre sobre el aumento de la precipitación como mencionan los modelos climático, se planteó un escenario para los futuros proyectos de irrigación un cambio de precipitación nula, los resultados muestran según la Figura 61 para RCP 4.5 y RCP 8.5 a corto plazo (2020 – 2039) para una mayor superficie de regadío requiere mayor volumen de embalse, para la implementación de una superficie de 8000 hectáreas requiere para ambos escenarios 70 hm³ un volumen mayor a lo requerido por la gestión actual (50 hm³). Conforme la curva crece el volumen del embalse aumenta y la superficie de regadío se va haciendo menor, por lo tanto, para este escenario los proyectos de expansión de regadío involucran un mayor volumen del embalse.

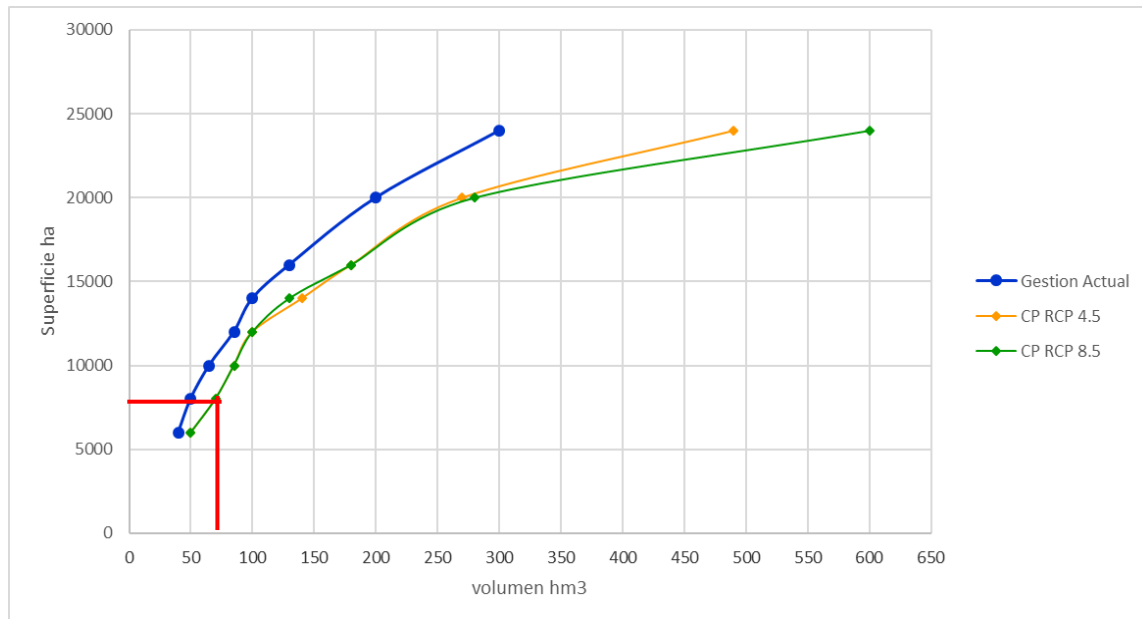


Figura 61. Volumen del embalse y la ampliación de la frontera agrícola sin variación de la precipitación.

Para estudios futuros se pueden enfocar en la realización de modelos hidro económicos, con la finalidad de evaluar los impactos económicos de la construcción de un embalse y la ampliación de regadío en los recursos hídricos. Estos estudios pueden ayudar a una planificación y diseño de medidas en la gestión de los recursos hídricos (planes de regadío) y la adaptación al cambio climático.

6. CONCLUSIONES

El presente estudio ha desarrollado un análisis de la gestión de los recursos hídricos de la cuenca del río Pativilca con la intervención del cambio climático, para el logro de este objetivo se hace uso del modelo hidrológico Temez, un modelo gestión y los escenarios de cambio climático a corto y largo plazo.

La cuenca del río Pativilca presenta características climatológicas, geológicas y usos de suelo muy diferente por lo que la implementación del modelo hidrológico Temez en toda la cuenca no es posible. Se hizo una división de la cuenca en tres zonas el Alto, Medio y bajo Pativilca según la ubicación de las estaciones hidrométricas, la primera recibe la aportación del 65% de la cuenca, la segunda el 24% y la tercera el 11%. Esta división permitió representar mejor la hidrología de la cuenca. Frente a los datos de precipitación se realizó un análisis previo del periodo histórico, como resultado muestra un periodo (1978 - 1992) de incertidumbre que tendrá influencia en el modelo hidrológico y de gestión.

La calibración del modelo hidrológico presenta un buen ajuste en el Alto y Medio Pativilca reflejando buenos resultados hasta este punto (0.80), el Bajo Pativilca presenta un ajuste moderado (0.43). Los resultados del modelo hidrológico muestran una aportación anual de la cuenca de 1211 hm³; la zona de mayor aportación de la cuenca es el Alto Pativilca (1111 hm³), seguida del medio Pativilca (100 hm³) y el Bajo Pativilca genera una aportación casi nula debido a ser una zona árida.

El balance de la oferta y la demanda hídrica a través del modelo de gestión de la cuenca se realiza en el bajo Pativilca por ser la zona donde se encuentra la mayor demanda hídrica. La aplicación del modelo de gestión se realizó en los últimos 20 años del periodo histórico por la mayor fiabilidad de los datos, tuvo como inclusión la demanda urbana, industrial, agrícola y caudal ecológico por la presencia del camarón de río una especie de conservación, los resultados indican que la gestión actual funciona adecuadamente de acuerdo con los indicadores de garantía. La eficiencia de riego se determinó por cada sector hidráulico de la Junta de Usuarios de Agua del sector hidráulico de la cuenca del río Pativilca, obteniendo un promedio de 51%

Las anomalías de precipitación y temperatura muestran incrementos anuales tanto para corto como para largo plazo, la influencia sobre los recursos hídricos muestra un aumento en la aportación anual, para el escenario RCP 4.5 a corto plazo se incrementa en un 9% y para largo plazo presenta una disminución al 6%, con relación al escenario RCP 8.5 a corto plazo se incrementa en un 3% y para fin de siglo un aumento sustancial del 30%. Las épocas de avenidas experimentarán un incremento del caudal y la época de estiaje experimentara cambios mínimos. Otro punto importante es la influencia del cambio climático en la dotación de la demanda agrícola, al incrementarse la temperatura provoca un aumento en la ETP y por tanto una mayor necesidad hídrica de los cultivos, el escenario más desfavorable a largo plazo muestra un incremento del 24% de la dotación de la demanda agrícola.

Ante un aumento de la precipitación de acuerdo con el escenario de cambio climático la gestión actual se mantendrá en equilibrio, el aumento de la temperatura compensa al aumento de la precipitación. Por lo tanto, la cuenca se verá equilibrada ante el cambio climático.

La intervención de nuevos proyectos agrícolas en la cuenca, especialmente en la cuenca baja provocara un desequilibrio entre la demanda y oferta hídrica, por lo tanto, es necesario la construcción de un reservorio. La simulación de la nueva demanda (8000 ha) y la construcción de un reservorio de 50 hm³ mantendrá en equilibrio el sistema.

El comportamiento del sistema ante un crecimiento gradual de la superficie agrícola provocara un aumento en el volumen del reservorio. Hasta un crecimiento de 16 000 ha existe un aumento no significativo del volumen del reservorio, a partir de las 16 000 ha para mantener el sistema es necesario la construcción de una presa de mayor volumen cuyo resultado puede significar un alto costo. Para mantenerse dentro del rango de la certidumbre sobre la influencia del cambio climático se podrá ampliar 14 000 ha con un volumen de 100 hm³. Ante la probabilidad que la lluvia no cambie los escenarios de cambio climático muestran una curva con mayor volumen de reservorio para las mismas hectáreas que se implemente en la gestión actual.

7. LINEAS FUTURAS DE INVESTIGACION

En el desarrollo del presente trabajo surgieron limitaciones por la falta de información y la incertidumbre de algunos datos, por lo tanto, se recomienda para la cuenca del río Pativilca las siguientes líneas de investigación:

- Un análisis exhaustivo del periodo histórico de la precipitación para determinar el comportamiento de la lluvia en la cuenca.
- Evaluación futura del comportamiento de la lluvia y la influencia en cada zona de la cuenca.
- La influencia de la variabilidad de la lluvia en la costa y su influencia en la zona agrícola.
- Estudio del aporte de los glaciares a los recursos hídricos de la cuenca.
- Evaluación económica, social y ambiental de la construcción de un reservorio en la cuenca.

8. REFERENCIAS

- ANA. (2013). *Plan Nacional de Recursos Hídricos del Perú*.
- ANA. (2015). *Evaluación de Recursos Hídricos en la cuenca Pativilca Informe Final*. Perú
- Aste, N. (2018). *Evaluación de la demanda hídrica agrícola actual y futuros riesgos en la costa peruana mediante el caso del proyecto especial Chavimochic , la libertad*. Perú.
- Beven, K. J. (2010). Rainfall-Runoff Modelling. In *Neural Networks for Hydrological Modeling*.
<https://doi.org/10.1201/9780203024119.ch9>
- Cabrera, J. (2012). *Modelos Hidrológicos*. Perú.
- Chevallier, P., Pouyaud, B., & Suarez, W. (2005). *Climate Change on the water resources from the mountains in Perú*. (November 2004), 11–12.
- Chou, S. C., Lyra, A., Mourão, C., Dereczynski, C., Pilotto, I., Gomes, J., ... Marengo, J. (2014). Assessment of Climate Change over South America under RCP 4.5 and 8.5 Downscaling Scenarios. *American Journal of Climate Change*, 03(05), 512–527.
<https://doi.org/10.4236/ajcc.2014.35043>
- Curi, S. (2017). *Caracterización de las sequías hidrológicas en la Vertiente Peruana del Oceano Pacífico*. Perú.
- Delgado, W. (2015). *Gestión y valor económico del recurso hídrico*. 1–18.
- Diaz, L., & Alarcon, J. (2018). *Estudio hidrológico y balance hídrico para determinar la oferta y la demanda de agua de la cuenca de la quebrada niscota para un acueducto interveredal en nunchía, casanare*.
- FAO. (2006). *Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de agua de los cultivos*.
- Granados, Y. (2017). *Demanda Hidrica con fines de riego y fertilidad de suelos en el Centro Poblado de Carcas, Distrito Chiquian, Provincia Bolognesi - 2016*. Perú.
- INGEMMET. (1985). *Estudio geodinamico de la cuenca Pativilca*. Perú.
- IPCC. (2013). *Cambio Climatico 2013 Bases fisicas resumen para responsables de politicas, resumen tecnico y preguntas frecuentes*. Editado por Thomas F. tocker, Dahe Quin, Gian-Kasper Plattner, Melinda Tignor y Alexander Nauels. OMM PNUMA. Recuperado de:
<https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/>

- Junk, W. J. (2013). *Current state of knowledge regarding South America wetlands and their future under global climate change*. *Aquatic Sciences*, 75(1), 113–131.
<https://doi.org/10.1007/s00027-012-0253-8>
- Krause, P., Boyle, D. P., & Bäse, F. (2005). *Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment*. *Advances in Geosciences*, 5, 89–97.
<https://doi.org/10.5194/adgeo-5-89-2005>
- Lee, H. (2015). *The Climate System and Climate Change*. *Climate Change Biology*, 13–53.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-420218-4.00002-0>
- Leon, W. (2017). *Estudio de balance hídrico con modelamiento WEAP en la cuenca Alta del río Pativilca, Distrito de Aquia - Bolognesi - Ancash*.
- López, Á. R., Acosta, L. M., Jairo, J., Díaz, F., Enrique, J., & Benedetti, C. (2016). *Planificación del recurso hídrico en la quebrada Aguas Blancas , zona rural de Montería , Córdoba*
Planning of water resource in Aguas Blancas creek , rural area of Montería , Córdoba. 14(2).
- MINAGRI. (2013). *Atlas de evapotranspiración referencial*. Perú.
- Molinos, M., Mocholi, M., Hernandez, F., & Sala, R. (2013). *Gestión y planificación de recursos hídricos: Un enfoque basado en la optimización*. *Revista Electronica de Comunicaciones y Trabajos de ASEPUMA*, 14, 159–167.
- Molnar, P. (2011). *Calibraton*. Zurich: Institute of environmental Engineering, Chair of Hydrology and Water Resources Management, ETH Zurich. Switzerland.
- Murillo, J. M., & Navarro, J. A. (2011). *Aplicación del modelo de temez a la determinación de la aportación superficial y subterránea del sistema hidrológico Cornisa-Vega de granada para su implementación en un modelo de uso conjunto*. *Boletín Geológico y Minero*, 122(3), 363–388.
- Ocampo, O. L., & Vélez, J. J. (2013). *Análisis comparativo de modelos hidrológicos de simulación continua en cuencas de alta montaña : caso del Río Chinchiná*
Comparative analysis of continuous simulation hydrological models in high-mountain watersheds : Chinchiná River case. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 13(24).
- Paredes, J., Solera, A., Andreu, J., & Lerma, N. (2017). *Herramienta EvalHid para la evaluación de recursos hídricos*. *Manual Técnico v1.1*. 1–53.
Recuperado de:
https://aquatool.webs.upv.es/files/manuales/aquatool/Manual_Tecnico_EvalHid.pdf

- Ramirez, M. (2012). *Análisis de la implementación de un modelo hidrológico distribuido con información estándar en españa.*
- Richter, B. D., Mathews, R., Harrison, D. L., Wigington, R., Applications, S. E., & Feb, N. (2003). *Ecologically sustainable water management: Managing River Flows for Ecological Integrity* ECOLOGICALLY SUSTAINABLE WATER MANAGEMENT: *America*, 13(1), 206–224.
- Rivera, H., & Chira, J. (2011). *Geodisponibilidad de metales pesados en sedimentos de los ríos Supe y Pativilca, departamento de Lima.* 14, 29–36.
- SENAMHI. (2015). *Actualización de los Escenarios de Disponibilidad Hídrica en el Perú en Contexto de Cambio Climático.* 79.
- Tena, T. M., Mwaanga, P., & Nguvulu, A. (2019). *Hydrological modelling and water resources assessment of Chongwe River Catchment using WEAP model.* *Water (Switzerland)*, 11(4). <https://doi.org/10.3390/w11040839>
- Weber, J., Dasso, C., & Jorquera, E. (2010). *Desarrollo y Calibración de un Modelo Hidrológico de Simulación Mixta.* *Mecánica Computacional Vol XXIX*, 29(1), 3–10.
- Xu, C. Y., & Singh, V. P. (2004). *Review on regional water resources assessment models under stationary and changing climate.* *Water Resources Management*, 18(6), 591–612. <https://doi.org/10.1007/s11269-004-9130-0>
- Yang, N., Men, B. H., & Lin, C. K. (2011). *Impact analysis of climate change on water resources.* *Procedia Engineering*, 24, 643–648. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.11.2710>