

# Trabajo Fin de Máster

## *ANÁLISIS INTEGRAL DE LA GESTIÓN Y LA ALTERACIÓN HIDROLÓGICA DEL RÍO LURÍN – PERÚ*

**Intensificación:**

**ANÁLISIS DE SISTEMAS DE RECURSOS HÍDRICOS**

**Autor:**

*WILIAN SALAZAR CORONEL*

**Tutor:**

*DR. JAVIER PAREDES ARQUIOLA*

**Cotutor/es:**

*DRA. LIA RAMOS FERNANDEZ*

**Julio, 2021**



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:** Análisis integral de la gestión y la alteración hidrológica del río Lurín – Perú

**Título del TFM en inglés:** Comprehensive analysis of the management and hydrological alteration of the Lurin River - Peru

**Título del TFM en Valenciano:** Anàlisi integral de la gestió i l'alteració hidrològica del riu Lurín – el Perú

**Alumno:** Wilian Salazar Coronel

**Tutor:** DR. Javier Paredes Arquiola

**Cotutor/es:** DRA. Lia Ramos Fernandez

**Fecha de Lectura:** Julio, 2021

## Resumen

### En español (máximo 5000 caracteres)

La implementación de caudales ecológicos y el abastecimiento de las demandas de agua en la parte baja de la cuenca del río Lurín, son problemas a solucionar para llegar a una gestión integral y sostenible del sistema. Un análisis integral de los recursos hídricos de la cuenca, permite satisfacer a los dos requerimientos de forma equilibrada. En el presente estudio se plantean diferentes trabajos para resolver estos problemas, como son: el cálculo del caudal ecológico en Antapucro y en la bocatoma Lurín, el análisis del balance hídrico y la satisfacción de las demandas mediante el desarrollo de un modelo de simulación. A partir de lo anterior, se obtuvieron los índices de alteración hidrológica y se propusieron diferentes alternativas para la mejora del sistema. Esta propuesta de alternativas se tradujo en cinco escenarios: la situación actual, que es el funcionamiento actual del sistema; propuesta 1, en esta solo se implementa los caudales ecológicos; propuesta 2, se utiliza como alternativa la reutilización de las aguas tratadas para abastecer las demandas agrícolas; propuesta 3, la construcción de un embalse de capacidad de 40 hm<sup>3</sup>/año en la sub cuenca de la quebrada Tinajas y la propuesta 4, en que se integra la reutilización de las aguas regeneradas y la construcción del embalse.

El cálculo del caudal ecológico se realizó por cuatro métodos: según la legislación peruana (15% del caudal medio mensual), el método de Tennant, el caudal básico (Qb) y 7Q10 y los resultados obtenidos en Antapucro fueron de 20.678, 32.166, 35.021 y 40.251 hm<sup>3</sup>/año respectivamente. Al comparar el método de la legislación peruana, el valor resulta inferior en 55.56, 69.36 y 94.25 % a los otros tres métodos. Los valores anuales de los caudales

ecológicos en la bocatoma Lurín fueron de 22.688 y 35.292 hm<sup>3</sup>/año con la Legislación Peruana y el método de Tennant, que representan un incremento de 10%, con respecto a los valores calculados en Antapucro, debido principalmente a la aportación de la quebrada Tinajas en la época de avenidas. Los valores más altos se presentan en el mes de marzo y los más bajos en los meses de setiembre y octubre en todos los métodos.

En la simulación del sistema en SIMGES, la demanda poblacional, pecuaria, industrial y recreativa en todos los casos tienen una satisfacción del 100%, porque es abastecida con el agua del acuífero Lurín, pero no así la demanda agrícola que se abastece de las aguas superficiales. Esta última, con la implementación del caudal ecológico según la legislación peruana (propuesta 1), aumenta en un 14.3% con respecto a la situación actual, siendo necesaria la utilización de aproximadamente 30 hm<sup>3</sup>/año de las aguas regeneradas y la construcción de la presa, para cumplir con la satisfacción de la demanda. Otra fuente importante es el acuífero Lurín que está conectado hidráulicamente con el río y que en el 2019 abasteció con 24.235 hm<sup>3</sup>/año a todas las demandas, el acuífero en la propuesta 1 tiene recarga neta negativa de 2.231 hm<sup>3</sup>/año, pero en la propuesta 4, la recarga es positiva de 9.074 hm<sup>3</sup>/año con un volumen bombeado de 22.520 hm<sup>3</sup>/año.

Los índices de alteración hidrológica (IAH) muestran un buen estado del río con un valor de 0.78 en la situación actual, debido a que el río descarga la mayor parte del caudal en los meses húmedos (enero, febrero y marzo). En un análisis de cada índice, los que evalúan los caudales mínimos extremos tienen valores cercanos a cero después de la bocatoma Lurín y demuestran que existen problemas ambientales, los índices son IAH 10, IAH 11 y el IAH 12, el primero y el último se mejoran con la implementación de caudales ecológicos, pero el IAH 11, siempre tiene valor de cero, en todas las propuestas. Los valores de los IAH globales obtenidos para las propuestas 1, 2, 3 y 4 fueron de 0.83, 0.80, 0.69, 0.70, como es de esperar en las dos últimas propuestas el valor es menor debido a la construcción del embalse.

La implementación de diferentes métodos para estimar el caudal ecológico en el sistema, afectó muy poco en los déficits de las demandas, pero sí incrementó el volumen bombeado o la disminución de la recarga neta. Con respecto a los índices de alteración hidrológica, se vieron poco influenciados por el método de caudal ecológico, porque los valores del volumen de agua para satisfacer las diferentes demandas son similares en los cuatro métodos evaluados. En la propuesta 4, en los cuatro métodos de caudal ecológico los valores de IAH fueron muy similares y variaron entre 0.70 a 0.73.

Los resultados muestran que es posible hacer una gestión del sistema teniendo en cuenta la satisfacción de las demandas y el cuidado del medio ambiente. Siempre y cuando se implemente la reutilización de las aguas que descargan las PTARs y la construcción de una presa con una capacidad de 40 hm<sup>3</sup>/año. Estas últimas alternativas son las que se evaluaron en la propuesta 4, del presente trabajo.

**En valenciano (máximo 5000 caracteres)**

La implementació de cabals ecològics i el proveïment de les demandes d'aigua en la part baixa de la conca del riu Lurín, són problemes a solucionar per a arribar a una gestió integral i sostenible del sistema. Una anàlisi integral dels recursos hídrics de la conca, permet satisfer als dos requeriments de forma equilibrada. En el present estudi es plantegen diferents treballs per a resoldre aquests problemes, com són: el càlcul del cabal ecològic en Antapucro i en la bocatoma Lurín, l'anàlisi del balanç hídric i la satisfacció de les demandes mitjançant el desenvolupament d'un model de simulació. A partir de l'anterior, es van obtindre els índexs d'alteració hidrològica i es van proposar diferents alternatives per a la millora del sistema. Aquesta proposta d'alternatives es va traduir en cinc escenaris: la situació actual, que és el funcionament actual del sistema; proposta 1, en aquesta només s'implementa els cabals ecològics; proposta 2, s'utilitza com a alternativa la reutilització de les aigües tractades per a proveir les demandes agrícoles; proposta 3, la construcció d'un embassament de capacitat de 40 hm<sup>3</sup>/any en la sub conca de la feta fallida Tinajas i la proposta 4, en què s'integra la reutilització de les aigües regenerades i la construcció de l'embassament.

El càlcul del cabal ecològic es va realitzar per quatre mètodes: segons la legislació peruana (15% del cabal mig mensual), el mètode de Tennant, el cabal bàsic (Q<sub>b</sub>) i 7Q<sub>10</sub> i els resultats obtinguts en Antapucro van ser de 20.678, 32.166, 35.021 i 40.251 hm<sup>3</sup>/any respectivament. En comparar el mètode de la legislació peruana, el valor resulta inferior en 55.56, 69.36 i 94.25% als altres tres mètodes. Els valors anuals dels cabals ecològics en la bocatoma Lurín van ser de 22.688 i 35.292 hm<sup>3</sup>/any amb la Legislació Peruana i el mètode de Tennant, que representen un increment de 10%, respecte als valors calculats en Antapucro, degut principalment a l'aportació de la feta fallida Tinajas en l'època d'avingudes. Els valors més alts es presenten el mes de març i els més baixos en els mesos de setembre i octubre en tots els mètodes.

En la simulació del sistema en SIMGES, la demanda poblacional, pecuària, industrial i recreativa en tots els casos tenen una satisfacció del 100%, perquè és proveïda amb l'aigua

de l'aquífer Lurín, però no així la demanda agrícola que es proveeix de les aigües superficials. Aquesta última, amb la implementació del cabal ecològic segons la legislació peruana (proposta 1), augmenta en un 14.3% respecte a la situació actual, sent necessària la utilització d'aproximadament 30 hm<sup>3</sup>/any de les aigües regenerades i la construcció de la presa, per a complir amb la satisfacció de la demanda. Una altra font important és l'aquífer Lurín que està connectat hidràulicament amb el riu i que en el 2019 va proveir amb 24.235 hm<sup>3</sup>/any a les demandes no agrícoles, l'aquífer en la proposta 1 té recàrrega neta negativa de 2.231 hm<sup>3</sup>/any, però en la proposta 4, la recàrrega és positiva de 9.074 hm<sup>3</sup>/any amb un volum bombat de 22.520 hm<sup>3</sup>/any.

Els índexs d'alteració hidrològica (IAH) mostren un bon estat del riu amb un valor de 0.78 en la situació actual, pel fet que el riu descarrega la major part del cabal en els mesos humits (gener, febrer i març). En una anàlisi de cada índex, els que avaluen els cabals mínims extrems tenen valors pròxims a zero després de la bocatoma Lurín i demostren que existeixen problemes ambientals, els índexs són IAH 10, IAH 11 i el IAH 12, el primer i l'últim es milloren amb la implementació de cabals ecològics, però el IAH 11, sempre té valor de zero, en totes les propostes. Els valors dels IAH globals obtinguts per a les propostes 1, 2, 3 i 4 van ser de 0.83, 0.80, 0.69, 0.70, com és d'esperar en les dues últimes propostes el valor és menor a causa de la construcció de l'embassament.

La implementació de diferents mètodes per a estimar el cabal ecològic en el sistema, va afectar molt poc en els dèficits de les demandes, però si incrementa el volum bombat o la disminució de la recàrrega neta. Respecte als índexs d'alteració hidrològica, es van veure poc influenciats pel mètode de cabal ecològic, perquè els valors del volum d'aigua per a satisfer les diferents demandes són similars en els quatre mètodes avaluats. En la proposta 4, en els quatre mètodes de cabal ecològic els valors de IAH van ser molt similars i van variar entre 0.70 a 0.73.

Els resultats mostren que és possible fer una gestió del sistema tenint en compte la satisfacció de les demandes i la cura del medi ambient. Sempre que s'implemente la reutilització de les aigües que descarreguen les PTARs i la construcció d'una presa amb una capacitat de 40 hm<sup>3</sup>/any. Aquestes últimes alternatives són les que es van avaluar en la proposta 4, del present treball.

**En inglés (máximo 5000 caracteres)**

The implementation of ecological flows and the supply of water demands in the lower part of the Lurín river basin are problems to be solved in order to achieve a comprehensive and sustainable management of the system. A comprehensive analysis of the water resources of the basin, allows satisfying the two requirements in a balanced way. In this study, different works are proposed to solve these problems, such as: the calculation of the ecological flow in Antapucro and in the Lurín intake, the analysis of the water balance and the satisfaction of the demands through the development of a simulation model. From the above, the hydrological alteration indices were obtained and different alternatives were proposed for the improvement of the system. This proposal of alternatives resulted in five scenarios: the current situation, which is the current operation of the system; proposal 1, in this only ecological flows are implemented; Proposal 2, the reuse of treated water is used as an alternative to supply agricultural demands; proposal 3, the construction of a reservoir with a capacity of 40 hm<sup>3</sup>/year in the sub-basin of the Tinajas stream and proposal 4, which integrates the reuse of reclaimed water and the construction of the reservoir.

The calculation of the ecological flow was carried out by four methods: according to Peruvian legislation (15% of the monthly average flow), the Tennant method, the basic flow (Qb) and 7Q10 and the results obtained in Antapucro were 20,678, 32,166, 35,021 and 40,251 hm<sup>3</sup>/year respectively. When comparing the method of the Peruvian legislation, the value is lower by 55.56, 69.36 and 94.25% than the other three methods. The annual values of the ecological flows in the Lurín intake were 22,688 and 35,292 hm<sup>3</sup>/year with the Peruvian Legislation and the Tennant method, which represent an increase of 10%, with respect to the values calculated in Antapucro, mainly due to the contribution of the Tinajas stream at the time of avenues. The highest values are presented in the month of March and the lowest in the months of September and October in all the methods.

In the simulation of the system in SIMGES, the population, livestock, industrial and recreational demand in all cases has a satisfaction of 100%, because it is supplied with the water from the Lurín aquifer, but not the agricultural demand that is supplied by the waters. superficial. The latter, with the implementation of the ecological flow according to Peruvian legislation (proposal 1), increases by 14.3% compared to the current situation, requiring the use of approximately 30 hm<sup>3</sup>/year of reclaimed water and the construction of the dam, to meet the satisfaction of the demand. Another important source is the Lurín aquifer that is

hydraulically connected to the river and that in 2019 supplied 24,235 hm<sup>3</sup>/year to non-agricultural demands, the aquifer in proposal 1 has a negative net recharge of 2,231 hm<sup>3</sup>/year, but in the Proposal 4, the recharge is positive of 9,074 hm<sup>3</sup>/year with a pumped volume of 22,520 hm<sup>3</sup>/year.

The hydrological alteration indices (AHI) show a good state of the river with a value of 0.78 in the current situation, due to the fact that the river discharges most of the flow in the wet months (January, February and March). In an analysis of each index, those that evaluate the extreme minimum flows have values close to zero after the Lurín intake and show that there are environmental problems, the indices are IAH 10, IAH 11 and IAH 12, the first and the last are they improve with the implementation of ecological flows, but the IAH 11, always has a value of zero, in all proposals. The global IAH values obtained for proposals 1, 2, 3 and 4 were 0.83, 0.80, 0.69, 0.70, as expected in the last two proposals the value is lower due to the construction of the reservoir.

The implementation of different methods to estimate the ecological flow in the system affected very little in the demand deficits, but it did increase the volume pumped or the decrease in the net recharge. Regarding the hydrological alteration indices, they were little influenced by the ecological flow method, because the values of the volume of water to satisfy the different demands are similar in the four evaluated methods. In proposal 4, in the four ecological flow methods, the AHI values were very similar and ranged between 0.70 and 0.73.

The results show that it is possible to manage the system taking into account the satisfaction of the demands and the care of the environment. As long as the reuse of the waters discharged by the WWTPs and the construction of a dam with a capacity of 40 hm<sup>3</sup>/year is implemented. These last alternatives are those that were evaluated in proposal 4 of this work.

**Palabras clave español (máximo 5):** Recursos hídricos; Río Lurín; Caudal ecológico; Alteración hidrológica; AQUATOOL - SIMGES

**Palabras clave valenciano (máximo 5):** Recursos hídrics; Riu Lurín; Cabal ecològic; Alteració hidrològica; AQUATOOL - SIMGES

**Palabras clave inglés (máximo 5):** Water resources; Lurín River; Ecological flow; Hydrological alteration; AQUATOOL - SIMGES

## **AGRADECIMIENTOS**

*A Dios por siempre darme fortaleza y guiarme por el buen camino.*

*A mi familia por el apoyo incondicional que siempre me brindan.*

*Al Dr. Javier Paredes, por compartir sus conocimientos y consejos que permitieron terminar esta investigación.*

*A la Dra. Lia Ramos por compartir sus conocimientos que permitieron terminar esta investigación y por el apoyo para postular a PRONABEC para seguir los estudios de Master.*

*Al Ing. Christiand Olortegui y al grupo de investigación DANI “Teledetección y cambio climático aplicado a los recursos hídricos y la agricultura” por facilitarme los datos para realizar el presente Trabajo de Fin de Master.*

*A mis amigos; gracias por su apoyo.*

*A PRONABEC por permitirme hacer mis estudios de Master a través de la beca “Presidente de la Republica”, que actualmente se llama “Beca Generación del Bicentenario”*

*Los autores agradecen a la Agencia Estatal de Investigación (AEI) del Ministerio de Ciencia e Innovación por financiar el proyecto RESPHIRA (PID2019-106322RB-100) / AEI/10.13039/501100011033*

## Tabla de contenido

I.	Introducción .....	13
1.1.	Objetivo general .....	15
1.2.	Objetivos específicos .....	15
II.	Marco teórico .....	16
2.1.	Caudal ecológico .....	16
2.2.	Modelos de gestión de los recursos hídricos .....	17
2.2.1.	AQUATOOL: SIMGES .....	17
2.2.2.	Evaluación de propuestas en la gestión de los recursos hídricos.....	18
2.3.	Alteración hidrológica .....	18
2.4.	Descripción de la zona de estudio y la cuenca del río Lurín .....	20
2.4.1.	Ubicación y problemática de la zona de estudio .....	20
2.4.2.	Hidrografía.....	22
2.4.3.	Hidrología de la cuenca .....	23
2.4.4.	Usos y presiones .....	25
2.4.5.	Demandas de agua .....	26
2.4.6.	Acuífero Lurín .....	28
2.4.7.	Calidad de agua.....	30
2.4.8.	Ecología del río Lurín.....	30
2.4.9.	Infraestructura hidráulica de la parte baja del río Lurín .....	31
2.5.	Gestión de los recursos hídricos en Perú y el mundo .....	31
III.	Metodología .....	35
3.1.	Cálculo del caudal ecológico .....	35
3.1.1.	Datos hidrológicos para el cálculo de los caudales ecológicos .....	36
3.1.2.	Según la legislación peruana .....	38
3.1.3.	Tennant .....	38
3.1.4.	7Q10 .....	39
3.1.5.	Caudal básico (Qb) .....	40
3.1.6.	Régimen de caudales .....	41
3.2.	Implementación del modelo de gestión en AQUATOOL – SIMGES. ....	41

3.2.1.	Elementos utilizados para la implementación de la topología del sistema.....	42
3.2.2.	Planteamiento de las propuestas de gestión.....	46
3.3.	Índices de alteración hidrológica (IAH).....	49
IV.	Resultados y discusiones.....	52
4.1.	Cálculo del caudal ecológico.....	52
4.2.	Análisis de los resultados del módulo SIMGES.....	56
4.2.1.	Satisfacción de las demandas.....	56
4.2.2.	Respuesta del acuífero.....	58
4.2.3.	Embalse y canal de derivación.....	60
4.2.4.	Cumplimiento de los caudales ecológicos en la bocatoma Lurín.....	60
4.2.5.	Respuesta del sistema a la implementación de los diferentes métodos de caudales ecológicos. ....	61
4.3.	Índices de alteración hidrológica (IAH).....	63
4.3.1.	Comportamiento de cada uno de los IAH según las propuestas a implementar. ....	64
4.3.2.	Índices de alteración hidrológica en la bocatoma Lurín.....	69
4.3.3.	Índice de alteración hidrológica global.....	69
4.3.4.	Influencia de los caudales ecológicos en el cálculo de los índices de alteración hidrológica. ....	70
4.4.	Resumen de los resultados obtenidos en la gestión de los recursos hídricos del río Lurín. ....	71
V.	Conclusiones.....	74
VI.	Recomendaciones.....	76
VII.	Bibliografía.....	77

## Índice de tablas

Tabla 1: Aportaciones de los manantiales por comisión de regantes.....	25
Tabla 2: Volumen de la demanda agrícola por comisión de regantes.....	27
Tabla 3: Volumen de agua subterránea utilizada según demanda. ....	28
Tabla 4: Los índices de bondad alcanzados en el modelo para caudales observados y simulados en la estación hidrométrica de Antapucro. ....	36
Tabla 5: Regímenes de flujo recomendados para implementar caudales ecológicos con el método de Tennant. ....	39
Tabla 6: Volumen de aguas tratadas vertidas por las PTARs al río Lurín .....	42
Tabla 7: Volumen de la demanda agrícola por meses y por comisión de regantes.....	43
Tabla 8: Clasificación del estado hidrológico de un río según los IAH.....	49
Tabla 9: Índices de alteración hidrológica utilizando caudales mensuales .....	51
Tabla 10: Cálculo del caudal ecológico por el método de Tennant .....	53
Tabla 11: Caudal ecológico en la estación hidrométrica de Antapucro .....	54
Tabla 12: Caudales ecológicos en la bocatoma Lurín (hm <sup>3</sup> /mes) .....	56
Tabla 13: Resumen de resultados de la gestión de los recursos hídricos en la parte baja del río Lurín. ....	73

## Índice de Figuras

Figura 1: Ubicación de la zona de estudio .....	20
Figura 2: Fotografías de puntos de interés en el cauce del río Lurín. ....	22
Figura 3: Hidrografía en la cuenca del río Lurín.....	23
Figura 4: Distribución de la precipitación anual en la cuenca del río Lurín .....	24
Figura 5: Mapa de uso Actual de la tierra en la cuenca del río Lurín .....	25
Figura 6: Volúmenes de agua bombeados del acuífero Lurín.....	28
Figura 7: Acuífero Lurín .....	29
Figura 8: Porcentaje de uso del agua subterránea según demanda .....	29
Figura 9: Sistema Nacional de Gestión de Recursos Hídricos (SNGRH) en el Perú.....	34
Figura 10: Esquema de los pasos seguidos para el análisis de los recursos hídricos de la parte baja de la cuenca del río Lurín. ....	35
Figura 11: Caudal observado y simulado para el periodo de calibración. ....	36
Figura 12: Caudal observado y simulado para el periodo de validación. ....	37
Figura 13: Caudal mensual modelado en la estación hidrométrica de Antapucro .....	37
Figura 14: Volumen anual en la estación hidrométrica de Antapucro .....	38
Figura 15: Matriz de medias móviles .....	40
Figura 16: Zonas de un embalse en el modelo SIMGES .....	44
Figura 17: Representación de los elementos del sistema en la situación actual .....	46
Figura 18: Esquemas de las propuestas 2 y 4, donde se integra la reutilización de aguas residuales y la construcción de un embalse.....	48
Figura 19: Caudal ecológico en m <sup>3</sup> /s en la estación hidrométrica de Antapucro.....	54
Figura 20: Caudales ecológicos acumulados en un año .....	55
Figura 21: Garantías de suministro para las demandas agrícolas por comisión de regantes ...	57
Figura 22: Garantías volumétricas para las demandas agrícolas por comisión de regantes ....	57
Figura 23: Déficit de las demandas agrícolas para 1 año, 2 años y 10 años.....	58
Figura 24: Volumen de la recarga neta y el volumen bombeado del acuífero Lurín.....	59
Figura 25: Variación del volumen embalsado para la propuesta 3 y 4 .....	60
Figura 26: Promedio mensual de los caudales que pasan por el tramo de la bocatoma Lurín. 61	
Figura 27: Promedio de las garantías de suministro y volumétricas de la demanda agrícola según el caudal ecológico.....	62

Figura 28: Promedio de los déficits para 1, 2 y 10 años de las demandas agrícolas según los caudales ecológicos .....	62
Figura 29: Volumen de la recarga neta y el volumen bombeado del acuífero Lurín .....	63
Figura 30: IAH en la situación actual en todos los tramos del río Lurín .....	64
Figura 31: Variación de cada uno de los IAH del 1 al 6 según las propuestas evaluadas en los tramos del río.....	66
Figura 32: Variación de cada uno de los IAH del 7 al 12 según las propuestas evaluadas en los tramos del río.....	68
Figura 33: IAH en el tramo de la bocatoma Lurín .....	69
Figura 34: Resultados del IAH global para las propuestas evaluadas.....	70
Figura 35: IAH global según el tipo de caudal ecológico para las propuestas evaluadas.....	71
Figura 36: Resultados generales de la implementación de medidas en la gestión del agua en la parte baja del río Lurín. ....	73

## **I. Introducción**

La demanda y la explotación de los recursos naturales ha ido creciendo en las últimas décadas debido al incremento de la población y sus necesidades, provocando escasez en algunos de ellos. Los recursos hídricos no están excluidos de esta realidad, a ello se suma la pérdida de la calidad y el cambio climático, este último puede aumentar la necesidad de agua de las plantas, así como modificar la cantidad y la estacionalidad de la precipitación (Le Page et al., 2020). Esta problemática genera incertidumbre entre los usuarios del agua, pero también desafíos para mejorar la gestión y su aprovechamiento que contribuya a cubrir necesidades y generar bienestar. Las actividades antropogénicas necesitan agua para su desarrollo y esta se extrae de fuentes naturales como ríos, lagos, lagunas, aguas subterráneas y otras, pero muchas veces no están donde se necesitan. Para ello se construyen derivaciones, bocatomas, canales que solucionan el problema de la localización, pero también hay un problema de variabilidad y de estacionalidad, que hay más agua cuando no se cultiva, construyéndose grandes presas. Estas afectaciones generan una variación del caudal circulante, cambiando el régimen natural de los ríos. La modificación del régimen hidrológico altera los entornos naturales del cuerpo de agua, si estas son graves generan un desequilibrio en las condiciones fisicoquímicas y en los organismos vivos que habitan dentro o en las riberas de los ríos (Fernandes et al., 2020).

Un adecuado manejo de la infraestructura hídrica es indispensable para una buena gestión de los recursos hídricos, buscando generar el menor impacto posible en el medio tanto aguas arriba o aguas abajo de la zona de construcción. En los últimos años se habla de una gestión integral de los recursos hídricos (GIRH), que busca administrar los recursos hídricos de manera integral y holística, considerando una serie de perspectivas o dimensiones diferentes (Savenije y Van der Zaag, 2008). Una de estas dimensiones es el cuidado de la ecología del lugar, para ello las comunidades de científicos hablan de un caudal ecológico o caudal mínimo para preservar las especies y las condiciones morfológicas de los ríos y exigen a los estados la adopción de medidas y leyes para su cumplimiento e implementación. Otro aspecto a tener en cuenta es la medición de las alteraciones que se produce mediante los índices de alteración hidrológica, estos permiten conocer en que tramos hay una mayor afectación, desde un punto de vista de la cantidad de un volumen de agua que está circulando en el tramo o punto evaluado.

En el Perú la gestión integral de los recursos hídricos está estipulada en la ley de recursos hídricos N° 29338 publicada en el 2009, en la misma también se establece la necesidad de fijar los caudales ecológicos en los ríos. El cálculo de los caudales ecológicos fue reglamentado en el 2019 en la Resolución Jefatural N° 267-2019 por la Autoridad Nacional del Agua (ANA).

En esta resolución se propone que para el cálculo del caudal ecológico por el método hidrológico se debe utilizar el 15% del promedio mensual, para series de caudales históricos o calculados a través de modelamiento de 20 años.

La implementación del régimen de caudales ecológicos, puede generar desabastecimiento en las demandas, por ello es importante conocer la respuesta del sistema. En la actualidad existe modelos que se utilizan para ello y en la gestión de los recursos hídricos uno de ellos es AQUATOOL – SIMGES. El mismo también se utiliza para evaluar las diferentes propuestas de solución y con los resultados obtenidos poder elegir la mejor propuesta, que genera consensos de los actores de la gestión del agua.

La zona de estudio está ubicada en la parte baja de la cuenca del río Lurín, esta tiene una extensión aproximada de 1620 km<sup>2</sup>, está ubicada en la parte central del Perú, cercana a la capital Lima y se extiende en las regiones naturales de la costa y la sierra. La cuenca del río Lurín hidrográficamente se encuentra en la vertiente del Pacífico, con precipitaciones anuales de alrededor de 450 mm entre los 2500 - 5000 m.s.n.m. (parte alta) y menores a 150 mm por debajo de los 2500 m.s.n.m. (parte baja). También presentan una marcada estacionalidad, siendo más frecuente entre los meses de diciembre a abril y después un periodo seco de mayo a noviembre. En esos meses de poca precipitación, hay una reducción de los caudales, teniendo desabastecimiento para cubrir las demandas agrícolas. La falta de caudal en el río produce un incremento de los bombeos, haciendo que el río pase de ganador a perdedor y el caudal sea prácticamente cero (Felipe – Morales, 2012). Entre las demandas tenemos que diferenciar a la demanda agrícola que se abastece principalmente de aguas superficiales del río y las demandas poblacional, industrial, pecuaria y recreativa la mayor parte son abastecidas por aguas del acuífero Lurín, este último tiene como recargas principalmente a las aguas de infiltración del riego y del lecho del río.

El presente estudio desarrolla el análisis integral de la gestión y la alteración hidrológica del río Lurín, desde aguas abajo de la estación hidrométrica de Antapucro hasta el Océano Pacífico, con un recorrido aproximado de 45.4 km. Se evaluaron diferentes propuestas de gestión con la utilización de fuentes de aguas convencionales y no convencionales, así como la implementación de los caudales ecológicos. También para cada una de las propuestas se realizó el cálculo de los índices de alteración hidrológica que ayudaron a visualizar los posibles impactos de las medidas adoptadas en el régimen de caudales naturales del río. Para su desarrollo se planteó los siguientes objetivos:

### **1.1. Objetivo general**

Actualmente en la parte baja de la cuenca Lurín la gestión del agua está basada en satisfacer las demandas, presentándose problemas ambientales como tramos del río sin presencia de caudal circulando en los meses de estiaje. Ante esta situación se evalúa posibles mejoras en la gestión de los recursos hídricos, integrando los regímenes de caudales ecológicos y midiendo los posibles efectos de cada medida en las demandas y en el régimen de caudales del río con el cálculo de los índices de alteración hidrológica.

### **1.2. Objetivos específicos**

- Calcular los regímenes de caudales ecológicos por los métodos Tennant, 7Q10, caudal básico y según lo establecido en el reglamento de la legislación peruana para el método hidrológico.
- Definir propuestas de gestión integrando, diferentes fuentes de agua y los caudales ecológicos, para satisfacer la demanda agrícola.
- Determinar los índices de alteración hidrológica para los tramos comprendidos entre la estación hidrométrica Antapucro y la desembocadura del río en el Océano Pacífico en las diferentes propuestas evaluadas.

## **II. Marco teórico**

Tal y como se explica en el apartado de metodología en este TFM se utilizan tres herramientas básicas: la estimación de caudales ecológicos, el uso de modelos de gestión y el cálculo de indicadores de alteración hidrológica. A continuación, se realiza un breve resumen teórico de cada una de estos componentes.

### **2.1. Caudal ecológico**

Los cambios causados por la alteración hidrológica afectan directamente a las comunidades biológicas del río, para minimizar su impacto se busca determinar un caudal mínimo que debe discurrir por el cauce del río. Precisamente, el caudal ha sido identificado como una variable importante que controla los procesos físicos y ecológicos de los ríos (Uday Kumar y Jayakumar, 2020). El caudal ecológico o ambiental ha sido estudiado por diversas investigaciones científicas y reconocido por legislaciones de los países como la base para mantener la biota en los ríos. Este, debe comprender todas las variaciones del flujo natural, desde el flujo base hasta los flujos más altos e inundaciones (Mathews y Richter, 2007). Aparte del caudal, también intervienen, la geología local y la topografía que determinan el hábitat acuático dando forma y tamaño al canal, estabilizando el sustrato y distribuyendo las pozas y rápidas, factores que condicionan la distribución, abundancia y diversidad de los organismos en ríos y corrientes. (Gonzales y Banderas, 2015).

En la legislación peruana se define como caudal ecológico: a aquel volumen de agua que debe mantenerse en la fuente natural de agua, para la protección o conservación de los ecosistemas involucrados, la estética del paisaje u otros aspectos de interés científico (Resolución Jefatural N° 267-ANA, 2019). El cálculo de los caudales ecológicos se puede realizarse por diferentes metodologías, algunas son más accesibles y otras más complejas con estudios de las especies existentes en el tramo del río. Entre los métodos existentes se pueden agrupar en hidrológicos, hidráulicos, hidrobiológicos y holísticos. En el caso de los hidráulicos se establece una relación entre los parámetros hidráulicos, como el perímetro mojado, la profundidad y la velocidad del flujo con la frecuencia de la especie objetivo (Gholami et al., 2020). En los métodos hidrobiológicos el caudal se predice a partir de las características hidráulicas adaptativas de las especies (Endesa-Chile, 2011). Los métodos holísticos calculan el caudal ecológico teniendo en cuenta la totalidad del ecosistema fluvial considerando los componentes vivos y no vivos de los ríos e incluyendo los efectos sociales (Karakoyun, Yumuttaci, y Dönmez, 2018).

Los métodos hidrológicos son fáciles y rápidos de calcular e implementar. Su cálculo es mayormente un porcentaje del régimen de caudales naturales del río. Estos métodos consideran que los organismos de las comunidades ribereñas están adaptados a las variaciones estacionales propias del régimen hídrico (Endesa-Chile, 2011). En este tipo de metodología se puede encontrar el método de Tennant, caudal mínimo de siete días con periodo de retorno de 10 años (7Q10), el caudal básico y el método empleado en la legislación peruana en que se determina un porcentaje del caudal mensual, etc. Los cuatro métodos mencionados se utilizarán para calcular el caudal ecológico en el presente estudio.

## **2.2. Modelos de gestión de los recursos hídricos**

El avance tecnológico hace cada vez más factible la utilización de las herramientas computacionales en todos los sectores, incluido en la gestión de los recursos hídricos. Los modelos son conceptualización de un sistema o de la realidad, los más utilizados son los modelos matemáticos, teniendo en cuenta que estos son herramientas que sirven para la mejora de la gestión de los recursos hídricos. Entre los componentes de los modelos se tienen tres, que son: los parámetros, las variables y las restricciones. Los parámetros y las variables son valores numéricos, los primeros describen las propiedades que no cambian y supuestamente conocidas del sistema y las otras reflejan el comportamiento del sistema y sus prestaciones. Las restricciones muchas veces son expresiones matemáticas que describen la relación entre variables y de estas con los parámetros. En recursos hídricos existen muchos tipos de modelos entre ellos se puede mencionar a modelos de: lluvia- escorrentía, crecidas, flujo subterráneo, gestión de embalses, entre otros (Andreu, s.f.).

Los modelos cada vez son más complejos, por la mayor cantidad de elementos que les puede adherir y la capacidad de los ordenadores para resolverlos, pero muchas veces no siempre es la mejor opción. La complejidad de la gestión del agua a demandado que haya una integración de modelos o los llamados meta-modelos (WEAP, AQUATOOL, entre otros) (Ceballo et al., 2015). En ellos se trabaja desde generar caudales a partir del ingreso de precipitación, hasta evaluar las garantías que pueden tener los usuarios con dichos caudales, pasando por valorar la gestión de los embalses.

### **2.2.1. AQUATOOL: SIMGES**

AQUATOOL fue desarrollado por el Instituto de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente (iiama) de la Universidad Politécnica de Valencia (UPV) se trata de un entorno de trabajo para el desarrollo y análisis de sistemas de ayuda a la decisión en planificación y gestión de cuencas

(Solera, Paredez, & Andreu, 2015). Cuenta con diversos módulos como: SIMGES, GESCAL, OPTIGES, SIMRISK y EVALIHD. Estos ayudan en la simulación de la generación, gestión, calidad y la optimización del reparto del agua.

El módulo SIMGES se encarga de la simulación de los sistemas de recursos hidráulicos complejos a escala de tiempo mensual. Los sistemas pueden tener elementos de regulación o almacenamiento superficiales y subterráneos, de captación, de transporte, de demandas y dispositivos de recarga artificial (Andreu et al., s.f.). Para la utilización del modelo, primero se debe hacer la topología con todos los elementos del sistema, tratando de esquematizar lo más similar a la realidad, cada elemento se une a través de nudos.

### **2.2.2. Evaluación de propuestas en la gestión de los recursos hídricos**

Sirven para evaluar los supuestos que pueden ocurrir en el futuro o medidas que se puedan adoptar en la gestión de los recursos hídricos y sus posibles consecuencias. Siempre existe la duda de cómo sería la respuesta del sistema a la implementación de una medida, por ejemplo, la adopción de caudales ecológicos como afectaría a la demanda agrícola. Con la implementación de las propuestas de gestión en un sistema real que es evaluado mediante la simulación, se puede analizar los resultados y determinar las mejores medidas para su posterior aplicación en la gestión del sistema o de la cuenca. Se debe tener en cuenta que siempre existe un grado de incertidumbre y realizar una sensibilización de las medidas a la población involucrada para medir el grado de aceptación de cada una de ellas.

### **2.3. Alteración hidrológica**

El régimen hidrológico en los ríos es importante para los procesos naturales, por ejemplo, el flujo base permite la conectividad longitudinal facilitando la migración de especies o las áreas de remanso proporcionan un hábitat de baja velocidad para las mismas (Uday Kumar y Jayakumar, 2020). Los cambios que se producen por factores humanos y naturales provocan una alteración en el régimen de caudales (Pumo et al., 2018) . La alteración hidrológica sería como dice Fernandes et al. (2020) un reflejo de una larga historia de intervenciones humanas para controlar la dinámica espacial y temporal de la disponibilidad de agua y hacer frente a los peligros naturales como inundaciones y sequías, además de un aprovechamiento máximo de los recursos hídricos. Los mismos autores consideran que las consecuencias han sido una degradación generalizada de la morfología del río y de los procesos geoquímicos y ecológicos.

Otras actividades antropogénicas que alteran el balance hídrico en una cuenca son la urbanización y el aumento de la deforestación que generan un aumento de caudales en el mismo

momento de producida la precipitación por la disminución de la infiltración afectando al flujo base. La construcción de embalses y derivaciones dedicada a diferentes actividades como el regadío, la producción de energía o la mitigación de avenidas todas ellas afectan de forma directa en la magnitud, frecuencia, variabilidad temporal y espacial, teniendo muchas veces caudales altos en época de estiaje o variaciones bruscas en un solo día. A las ya mencionadas actividades que generan perturbaciones se suma a esa lista la extracción excesiva de las aguas subterráneas, llegando a causar que ríos ganadores se conviertan en perdedores en épocas de estiaje. Por último, mencionar la modificación de los sistemas de drenaje de aguas superficiales naturales, como la canalización y el drenaje de humedales (Stewardson et al., 2017; Arora et al., 2017; Zhang et al, 2015).

En los últimos años el cambio climático es un agente que está generando alteraciones, aunque de difícil cuantificación. Los cambios producidos por el calentamiento global en la precipitación y la temperatura generan variaciones en los caudales y la evapotranspiración de las plantas. En un estudio de la cuenca del río Aracthos en Grecia se determinó que el escenario RCP 8.5 produce mayor alteración que un RCP 4.5, pero que los patrones de alteración son similares en ambos escenarios. El cambio climático también puede generar el aumento de la duración de las sequías y la alteración de la estacionalidad de las precipitaciones (López-Ballesteros et al., 2020). La alteración hidrológica se puede medir, para ello se utiliza los índices de alteración hidrológica, que mayormente tratan de comparar el caudal en condiciones naturales con los caudales en condiciones alteradas.

La importancia de los IAH radica que se pueden convertir en una valiosa herramienta de planificación hidrológica para resaltar los tramos muy alterados que requieren una investigación más exhaustiva de las necesidades ambientales de caudal (Stewardson et al., 2017). Conociendo el nivel de alteración, así como las actividades que lo generan es decisivo para mejorar la gestión de los recursos hídricos (Gunawardana et al., 2021). Para hacer un uso completo de la IAH, debe usarse junto con modelos ecológicos conceptuales o cuantitativos para crear y probar hipótesis ecológicas, identificar objetivos de protección y restauración de flujo, enfocar las actividades de investigación, monitoreo y priorizar las acciones de gestión de tierras y aguas (Mathews y Richter, 2007). De manera que se maximice los beneficios ecológicos y minimice los costos económicos, o proporcione beneficios simultáneos para los resultados ambientales y económicos (Rolls y Bond, 2017).

## 2.4. Descripción de la zona de estudio y la cuenca del río Lurín

### 2.4.1. Ubicación y problemática de la zona de estudio

La cuenca del río Lurín, se ubica en la parte central de la costa peruana y es una de las 62 que vierten sus aguas en el Océano Pacífico. La zona de estudio está ubicada en la parte baja de la cuenca del río Lurín, iniciando en la estación hidrométrica de Antapucro, hasta la desembocadura del río en el Océano Pacífico. Esta zona es especialmente susceptible de problemas ambientales, debido a las presiones de las demandas de las aguas superficiales y subterráneas, también por los vertidos directos al cauce de aguas residuales no tratadas o con insuficiente tratamiento. Los distritos comprendidos son: Lurín, Pachacamac, Cieneguilla, Villa el Salvador y Punta Hermosa, por los tres primeros pasa el cauce del río y los otros dos son considerados por la utilización de aguas del acuífero, todos ellos pertenecen a la provincia de Lima y a la región del mismo nombre. A lo largo del recorrido del río hay 13 comisiones de regantes pertenecientes al distrito hidráulico de Lurín, con un área cultivada de aproximadamente 5300 ha. En la figura 1, se muestra la ubicación de la zona de estudio y algunos puntos de interés.

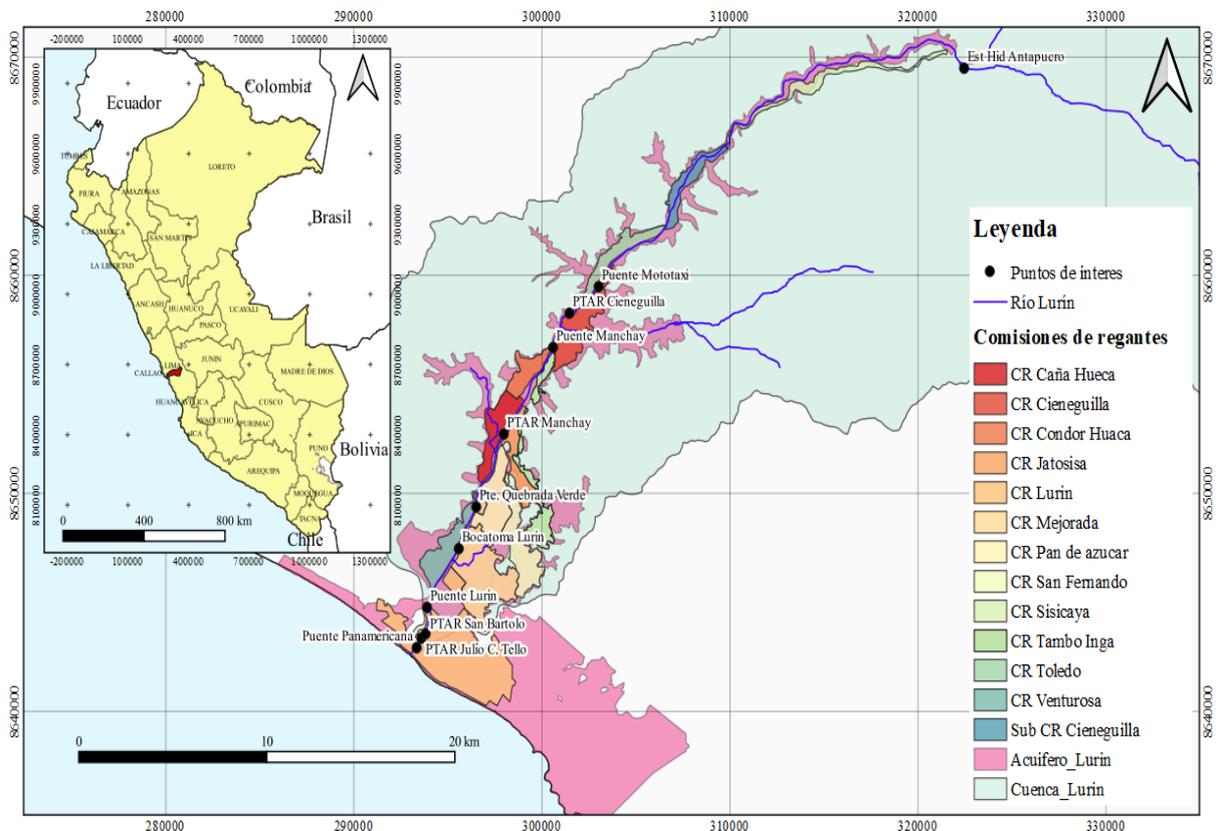


Figura 1: Ubicación de la zona de estudio

Fuente: Elaborado con datos de geogsperu.com

En la parte baja de la cuenca existen problemas de escasez de recursos hídricos para atender a las diferentes demandas, en el Plan Nacional de Recursos Hídricos del Perú, elaborado por la ANA en el año 2013, se estima un déficit de 97 hm<sup>3</sup>/año, que deben ser cubiertos con la implementación de un embalse y transvase de la vertiente del Atlántico. Siendo el transvase una de las formas de aumentar los recursos hídricos muy cuestionada por las poblaciones de las cuencas aportantes, generándose conflictos sociales, por lo que muchos de los proyectos no llegan a concluirse. Este déficit lleva a los usuarios a utilizar toda el agua superficial en los meses secos (mayo a noviembre), dejando tramos del río sin caudal circulante, y volviéndose el río perdedor, o con muy poco caudal generando que el agua se estanque, observándose proliferación de algas. Otra de las causas que el río se vuelva perdedor en la época seca es el descenso del nivel freático del acuífero Lurín, por la explotación del agua subterránea, esto también puede producir el fenómeno de intrusión marina. Los valores observados de la conductividad eléctrica en el año 2019 en algunas zonas del distrito de Lurín fueron de hasta 7.8 mmhos/cm (ANA, 2019).

Otro de los problemas identificados son los vertimientos de aguas residuales no autorizados y los efluentes de las PTARs, los primeros porque no reciben ningún tipo de tratamiento y en el segundo caso porque en época de estiaje el río no tiene el caudal suficiente para disminuir la concentración de los contaminantes, en ambos casos generan malos olores y un color ocre en las aguas, como se puede observar en la figura 2 (A y C). La situación se agrava cuando este tipo de agua tiene contacto directo con la población que lava su ropa o con animales que pastan en las orillas del río. Sumado a ello hay arrojado de basura y desmonte (restos de construcción) en las riberas que reduce el cauce, produciéndose en temporada de avenidas desborde del río. En la figura 2, se observan algunas fotografías de diversos tramos del río Lurín y diversas actividades antropogénicas realizadas.

En el manual para Gestores del agua de la cuenca del río Lurín, desarrollado en el 2012, en la parte del diagnóstico se destaca como problemas ambientales naturales, la ocurrencia de eventos extremos como las sequías y el Fenómeno del Niño, que afectan la gestión del agua en la zona de estudio. En problemas generados por actividades antrópicas, el mismo estudio apunta a un uso ineficiente del agua para riego y para uso poblacional, poca conciencia ambiental para el uso del agua y falta de institucionalidad para hacer cumplir las normas vigentes en la gestión de los recursos hídricos. En la parte de contaminación señala la pérdida de la calidad del agua por la actividad industrial y uso de pesticidas (Felipe – Morales, 2012).



Figura 2: Fotografías de puntos de interés en el cauce del río Lurín ( A-punto de descarga de la PTAR Manchay; B-Cauce sin caudal, Puente Mototaxi; C – Agua de color ocre y ganado pastando cerca; D – agua estancada por caudal muy bajo y E – Pobladores lavando ropa en las aguas del río).

Fuente: Proyecto "Sistema de gestión del recurso hídrico superficial y subterráneo para el uso seguro del agua ante escenarios de cambio climático en la cuenca del río Lurín"

#### 2.4.2. Hidrografía

Hidrográficamente la cuenca del río Lurín, pertenece a la vertiente del Pacífico y delimita con la cuenca del río Rímac, la cuenca del río Mala y la cuenca del río chilca por el norte, este y sur

respectivamente. El área de la cuenca es de aproximadamente 1658.2 km<sup>2</sup>, con una longitud máxima de recorrido del río de 257.53 km. El río Lurín nace en los deshielos del nevado Surococha a 5 300 m.s.n.m. denominado como río o quebrada Chalilla, que luego de juntarse con la quebrada Taquia toma el nombre de río Lurín. A lo largo del recorrido recibe el aporte de diversas quebradas entre ellas se tiene: Taquia, Lahuaytambo, Langa, Sunicancha y Tinajas por la margen izquierda y solo Chamacna por la margen derecha (INRENA, 2004). En la figura 3, se observa el recorrido del río Lurín y la zona de estudio de color verde, la cual es abastecida principalmente con aguas del río Lurín y la aportación intermedia lo constituye la quebrada Tinajas, que desemboca a la altura del puente Manchay.

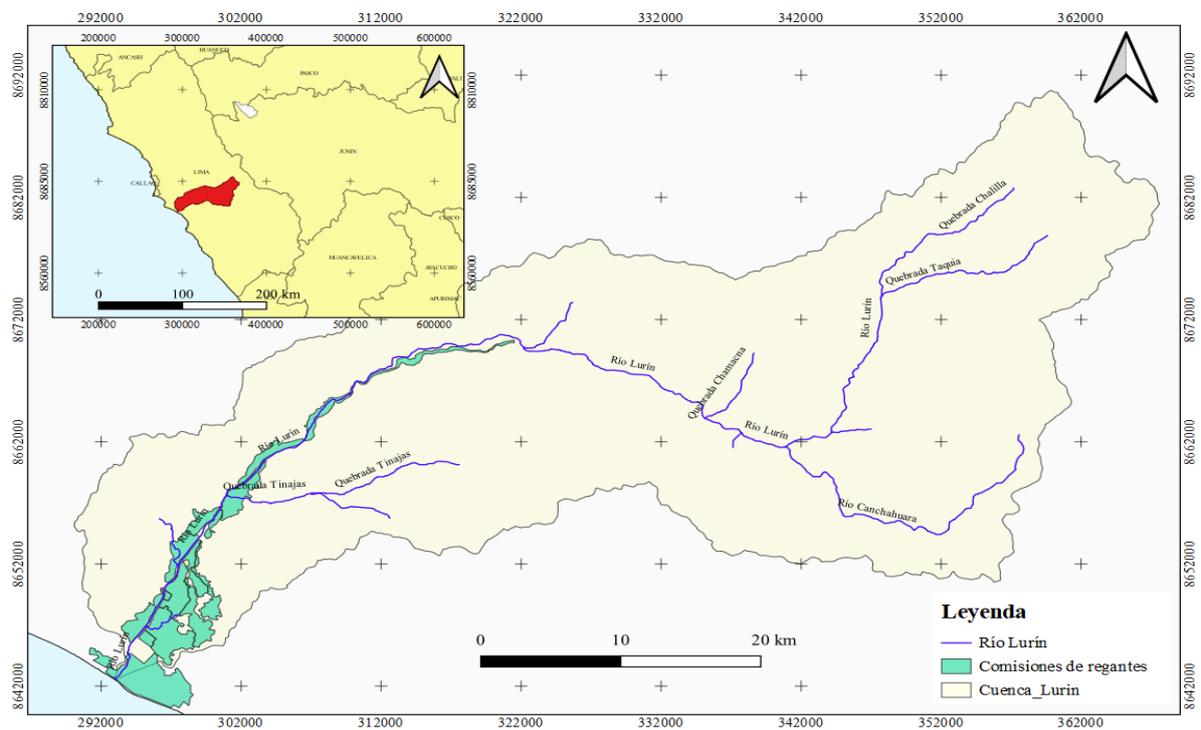


Figura 3: Hidrografía en la cuenca del río Lurín

Fuente: Elaborado con datos de geogpsperu.com

### 2.4.3. Hidrología de la cuenca

Existe una des-uniformidad en la precipitación diferenciándose dos zonas por el volumen de la precipitación, la parte baja desde el litoral hasta los 2000 a 2500 m.s.n.m. se distingue por ser una zona árida y desértica con baja precipitación cerca de los 100 mm/año en la zona costera hasta los 250 mm/año en la parte cercana a los 2500 m.s.n.m. La parte alta o zona húmeda a partir de los 2500 m.s.n.m. representa un 47.76% del área total con 791.89 km<sup>2</sup>, donde se puede tener hasta 500 mm de precipitación por año constituyéndose como la zona que aporta la escorrentía superficial y el flujo base que forman el caudal del río Lurín. En la figura 4, se distingue la variación de la precipitación anual, en la zona de estudio la precipitación llega hasta

los 150 mm/año. Los meses en que hay más precipitaciones son a partir de octubre hasta abril y el periodo seco es de mayo hasta septiembre (INRENA, 2004).

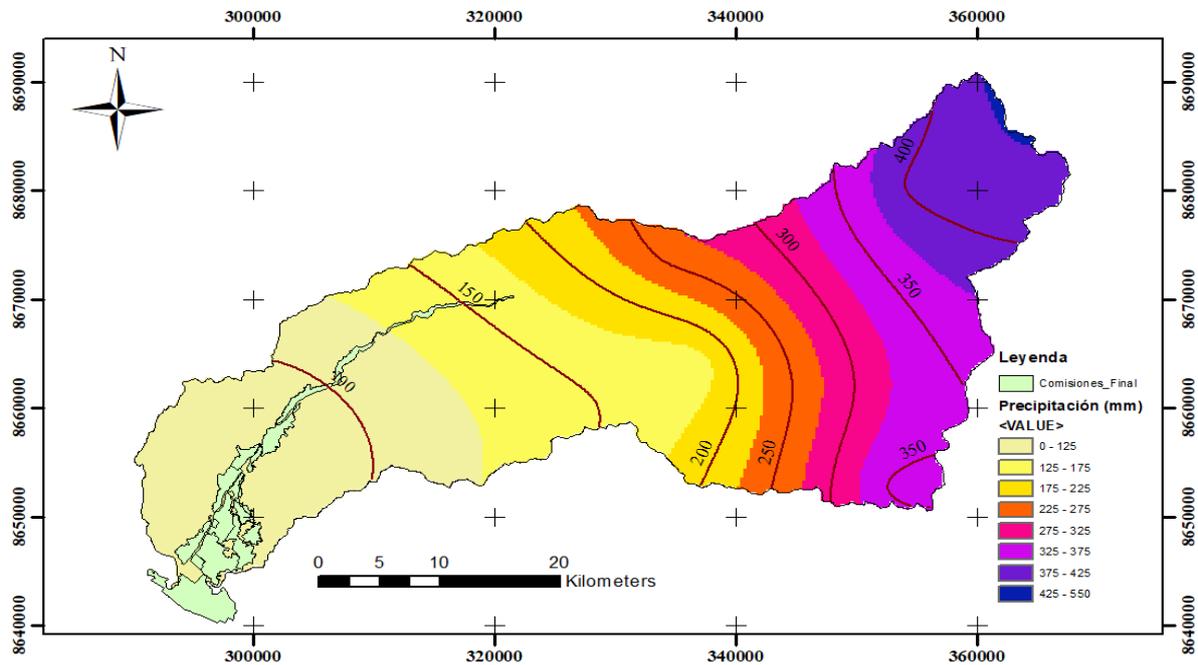


Figura 4: Distribución de la precipitación anual en la cuenca del río Lurín

Fuente: Elaborado con datos de INRENA (2004)

Al igual que la precipitación la temperatura también varía según la altura y la estación del año, pero en promedio puede alcanzar los 18.6°C en la costa y los 0°C en la parte más alta de los nevados. La temperatura en la parte baja de la cuenca varía de 24.6°C en el mes de febrero que es verano a 14.9°C en agosto, en el invierno, contrario a la precipitación en la parte alta, por ello el río tiene mayor caudal en la época de verano. Por otro lado, la evaporación es de alrededor de 750 mm por año en la parte baja de la cuenca (zona de estudio), siendo el periodo de noviembre a mayo el de mayor evaporación con valores que llegan hasta los 70 mm/mes y el periodo de valores más bajos de junio a octubre con aproximadamente 40 mm/mes (INRENA, 2004).

Los caudales del río Lurín tienen un régimen de descargas irregulares y de carácter torrencioso, presentan una gran diferencia entre los valores en avenidas y en periodo de estiaje. Esto, es una consecuencia del comportamiento de las precipitaciones en la parte alta de la cuenca. Los valores registrados en la estación hidrométrica de Manchay, tienen una media diaria anual de 4.49 m<sup>3</sup>/s, para hacer un volumen medio anual de 139.640 hm<sup>3</sup>/año. Junto al cauce del río existe varios manantiales que entregan sus aguas directamente a las comisiones de regantes para abastecer la demanda agrícola. En la tabla 1, se observan los volúmenes de los manantiales según el caudal recibido por cada comisión de regantes. Se estima que al año los manantiales

aportan un volumen de 14.049 hm<sup>3</sup>, siendo la comisión de regantes de Lurín la que más recibe con un caudal de 136 l/s, que hace un volumen anual de 4.289 hm<sup>3</sup> al año (INRENA, 2004).

**Tabla 1: Aportaciones de los mananciales por comisión de regantes**

Comisión de Regantes	Caudal (l/s)	Total (hm <sup>3</sup> /año)
Sub Sector Cieneguilla	71	2.239
Cóndor Huaca - Molino	42	1.325
Jatosisa - Sotelo	45	1.419
Caña Hueca	89	2.807
San Fernando	32.5	1.025
Mejorada	30	0.946
Lurín	136	4.289
<b>Total</b>	<b>445.5</b>	<b>14.049</b>

Fuente: INRENA (2004)

#### 2.4.4. Usos y presiones

El uso actual de la tierra se observa en la figura 5, destacando tres zonas que ocupan un 86% de la cuenca, estas son: planicies costeras y estribaciones andinas con 42.54%, matorrales y cultivos andinos con un 31.69%, y el pajonal y césped de la puna con un 12%. Los cultivos andinos mayormente dependen de las precipitaciones, por ello son sembrados en la época lluviosa. La parte baja de la cuenca que es la zona de estudio está clasificada como uso de cultivos agrícolas que representan el 3.17% de la superficie de la cuenca y dependen del regadío para su cultivo.

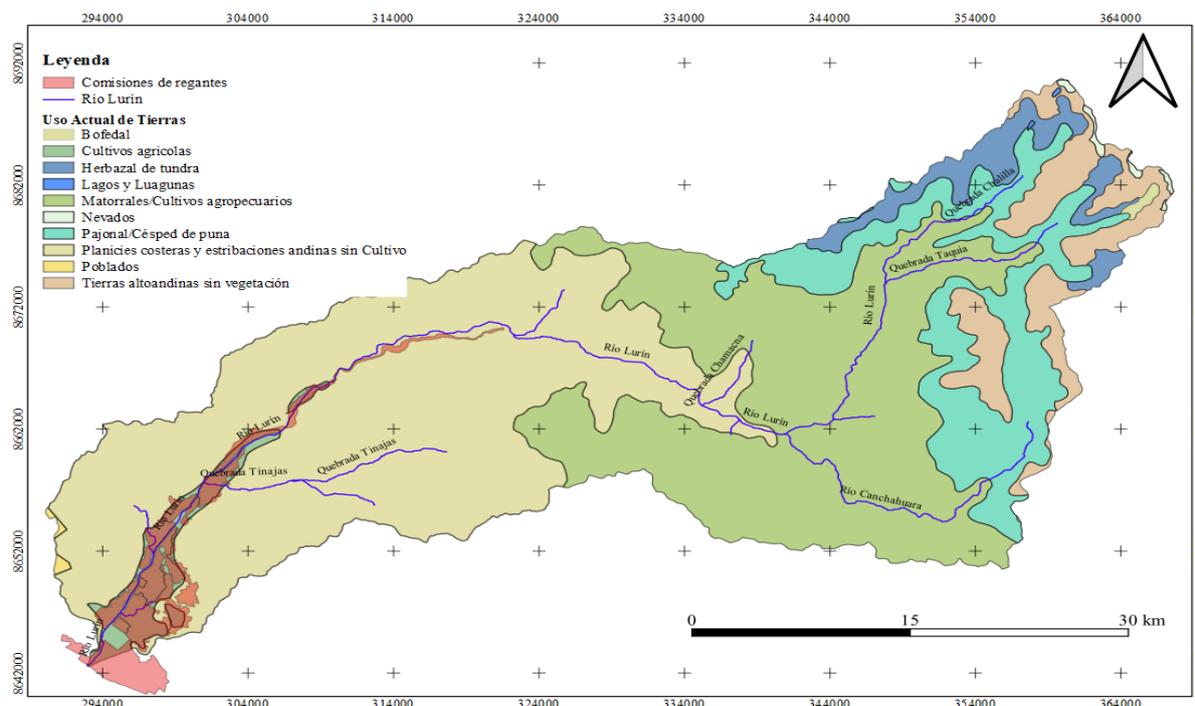


Figura 5: Mapa de uso Actual de la tierra en la cuenca del río Lurín

Fuente: Elaborado con datos de geogpsperu.com

Las principales actividades en la cuenca son la agricultura y la ganadería, en la parte alta los cultivos son principalmente andinos como la papa, leguminosas, maíz y pasturas para el ganado vacuno. En la parte baja (zona de estudio) se cultiva para abastecer al mercado de Lima por su cercanía, destacando los cultivos de frutales, camote, cebolla, fresa, tomate, maíz para forraje, entre otros y en la ganadería destaca la porcicultura. La urbanización cada día aumenta su zona de influencia, la población en los tres principales distritos (Lurín, Pachacamac y Cieneguilla) en el 2017 fue de 233 950 habitantes, con una tasa de crecimiento promedio de 3.67 %, debido principalmente a la migración del campo a la ciudad (INEI, 2018).

#### **2.4.5. Demandas de agua**

En la parte baja de la cuenca, hay un uso intensivo de los recursos hídricos para cubrir las diferentes demandas. La fuente de la cual se abastece cada una de ellas depende de su ubicación y el tipo de demanda. Así, las demandas de la población, la industria, la recreacional casi en su totalidad son atendidas por aguas provenientes del acuífero y la demanda agrícola mayormente por aguas superficiales del río. A continuación, se detalla cada una de ellas:

**a) Demanda agrícola:** es la demanda que requiere mayor volumen de agua, en la parte baja existe 13 comisiones de regantes que pertenecen al distrito hidráulico de Lurín, siendo la extensión de tierras de cultivo de aproximadamente 5300 ha, con una demanda de agua 92.771 hm<sup>3</sup>/año (INRENA, 2004). La mayor parte de estas áreas se riegan con las aportaciones provenientes del río o de los manantiales y otra parte se riega con agua del bombeo subterráneo. En la tabla 2, se detalla las comisiones de regantes, el área bajo riego, el volumen de la demanda de agua y el número de usuarios. Cada una de ellas extrae agua del río, según su ubicación partiendo desde la estación hidrométrica de Antapucro hasta el Océano Pacífico. Las comisiones que tienen mayor demanda son Lurín, La Mejorada y Cieneguilla con 18.983, 11.942 y 10.167 hm<sup>3</sup>/año respectivamente.

Un importante porcentaje de la demanda es cubierta por bombeos del acuífero Lurín, especialmente en comisiones de regantes que se encuentran más cerca al litoral costero. Con un total en extracciones del acuífero de 2.815 hm<sup>3</sup>/año. Si las extracciones lo repartiéramos por distritos, el distrito de Pachacamac consume un 53.5%, seguido de Lurín con un 42.6% y en menor medida el distrito de Cieneguilla con un 3.8%, como se puede observar en la tabla 3 (ANA, 2019).

**Tabla 2: Volumen de la demanda agrícola por comisión de regantes**

N°	Comisión de Regantes	Área bajo riego (has)	Total (hm <sup>3</sup> )	N° de Usuarios*
1	Sisicaya	289.56	6.872	12
2	Sub Sector Cieneguilla	259.75	4.976	180
3	Toledo	157.78	2.692	180
4	Cieneguilla	480.25	10.167	70
5	Cóndor Huaca - Molino	218.26	3.313	54
6	Tambo Inga	274.48	4.892	76
7	Jatosisa - Sotelo	235.55	4.041	93
8	Caña Hueca	311.64	4.843	117
9	San Fernando	458.86	8.328	168
10	Pan de Azúcar	417.18	5.919	200
11	Mejorada	772.83	11.942	170
12	Venturosa	338.94	5.803	81
13	Lurín	1055.45	18.983	238
<b>Total</b>		<b>5270.53</b>	<b>92.771</b>	<b>1639</b>

Fuente: INRENA (2004).

\* Según: El Padrón Electoral de la Junta de Usuarios del Sector Hidráulico Lurín, 2017.

- b. Demanda poblacional:** la demanda poblacional es abastecida principalmente por la explotación de las aguas subterráneas. el mayor volumen de consumo corresponde al distrito de Lurín con 8.023 hm<sup>3</sup>/año, seguido del distrito de Pachacamac con 4.864 hm<sup>3</sup>/año. Además, de la demanda cubierta por el agua subterránea también hay una pequeña parte que es abastecida por agua superficial con un volumen de 0.01 hm<sup>3</sup>/mes en el distrito de Cieneguilla, haciendo un total de 1.097 hm<sup>3</sup>/año (ANA, 2019).
- c. Demanda pecuaria:** la demanda pecuaria es cubierta casi en su totalidad por bombeos, debido a la alta variabilidad del agua que pasa por el cauce del río que, en los meses de menor precipitación en las zonas altas, no tiene caudal. En la tabla 3, se observa el volumen de agua utilizada para cubrir el consumo pecuario por distritos, siendo un total de 1.664 hm<sup>3</sup>/año (ANA, 2019).
- d. Demanda industrial:** la demanda industrial es de 4.829 hm<sup>3</sup>/año, con un 85 % en el distrito de Lurín, generada mayormente por la industria alimentaria y de bebidas (ANA, 2019).
- e. Demanda recreacional:** es la que de menor consumo de agua con 0.522 hm<sup>3</sup>/año en los tres distritos (ANA, 2019).

**Tabla 3: Volumen de agua subterránea utilizada según demanda.**

Distrito	Volumen de Explotación (hm <sup>3</sup> /año)					Total (hm <sup>3</sup> /año)
	Agrícola	Poblacional	Pecuaría	Industrial	Recreacional	
<b>Lurín</b>	1.199	8.023	0.317	4.106	0.233	<b>13.877</b>
<b>Pachacamac</b>	1.507	4.864	0.009	0.342	0.109	<b>6.832</b>
<b>Cieneguilla</b>	0.105	0.977	1.325	-	0.124	<b>2.532</b>
<b>Villa el Salvador</b>	0.005	0.041	-	0.049	0.055	<b>0.149</b>
<b>Punta Hermosa</b>	-	0.501	0.012	0.332	-	<b>0.845</b>
<b>TOTAL</b>	<b>2.815</b>	<b>14.406</b>	<b>1.664</b>	<b>4.829</b>	<b>0.522</b>	<b>24.236</b>

Fuente: ANA (2019)

#### 2.4.6. Acuífero Lurín

El acuífero de Lurín es una fuente de agua importante, porque garantiza el suministro de las demandas en épocas de estiaje y/o sequía. Es de tipo libre, conformado por material de origen aluvial, la mayor parte de las recargas se producen por la infiltración del riego de las zonas de cultivo y del cauce del río en todo su recorrido. Los volúmenes explotados desde el año 1977 a la actualidad se observa en la figura 6, hay un incremento de 52.1% al pasar de 16 hm<sup>3</sup>/año a 24.343 hm<sup>3</sup>/año en el año 2019. Según el informe final del estudio hidrogeológico del acuífero Lurín desarrollado por la ANA en el 2019, el acuífero tiene forma cónica, observándose en la parte de Antapucro un ancho reducido de 800 a 1500 m, que al aproximarse al océano se va ampliando hasta una extensión de 13 km. Se estima que el volumen de agua almacenada es de 330.07 hm<sup>3</sup> (ANA, 2019).

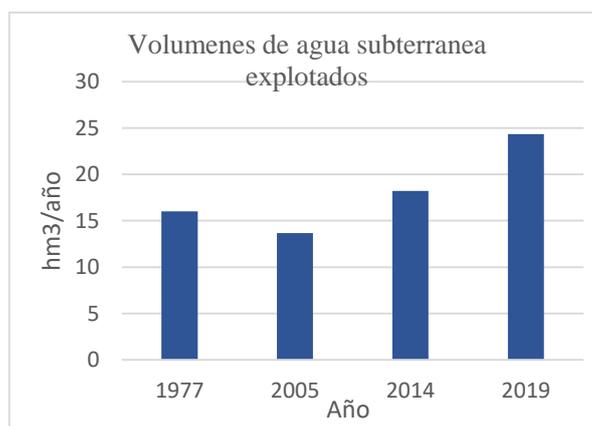


Figura 6: Volúmenes de agua bombeados del acuífero Lurín

Fuente: ANA (2019)

En la figura 7, se observa que el acuífero se extiende por cuatro distritos de la provincia de Lima, como son: Villa el Salvador, Lurín, Cieneguilla, Pachacamac y Punta Hermosa. Una de las preocupaciones en la actualidad es la sobreexplotación que puede causar intrusión salina, siendo prioritario su uso sostenible. Porque para algunas demandas es la única fuente de agua.

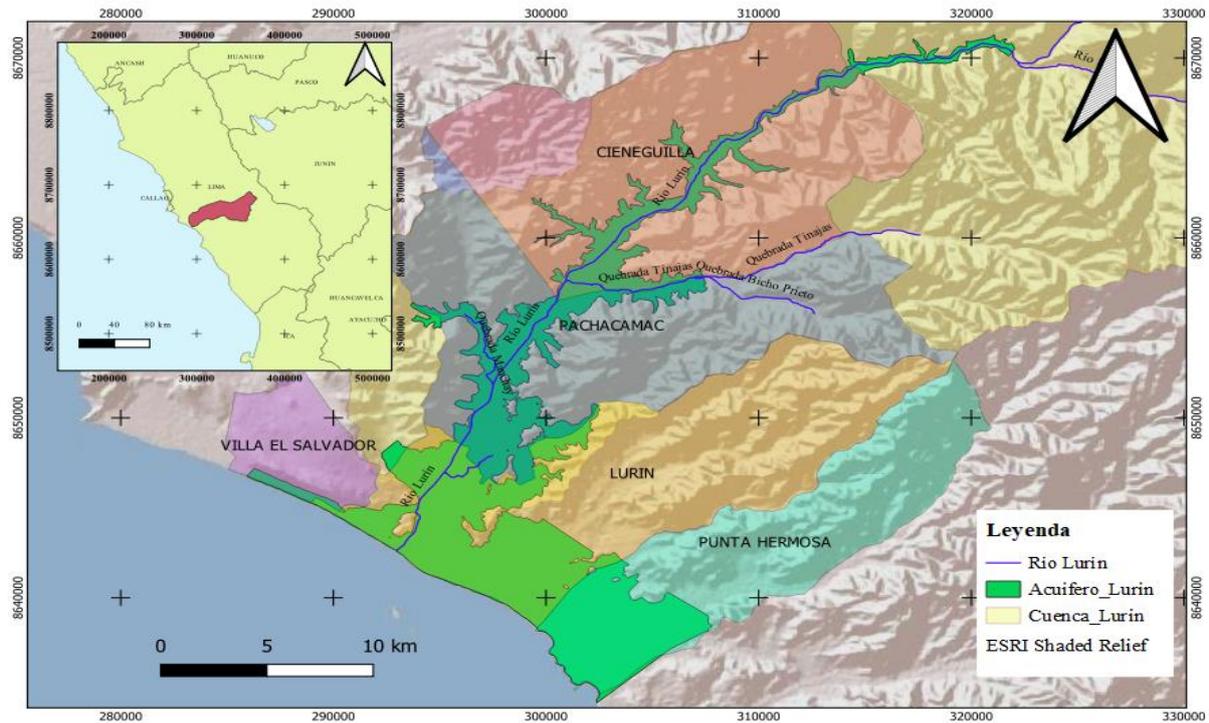


Figura 7: Acuífero Lurín

Fuente: Elaborado con datos de geogpsperu.com

En el año 2019 la explotación del acuífero fue de 14.507, 4.829, 2.815, 1.670 y 0.522 hm<sup>3</sup> para la demanda poblacional, industrial, agrícola, pecuaria y recreacional respectivamente (ANA, 2019). La demanda para uso poblacional representa un 59.6% del total y la demandas agrícolas y pecuarias 11.6 y 6.86 % respectivamente, ver figura 8. La demanda industrial está alrededor de un 20 % y en menor medida el uso recreacional de un 2.14 % con 0.522 hm<sup>3</sup>/año. Una de las dificultades es la estimación exacta del volumen de agua extraído, porque las mediciones se basan por la información que brindan cada beneficiario.

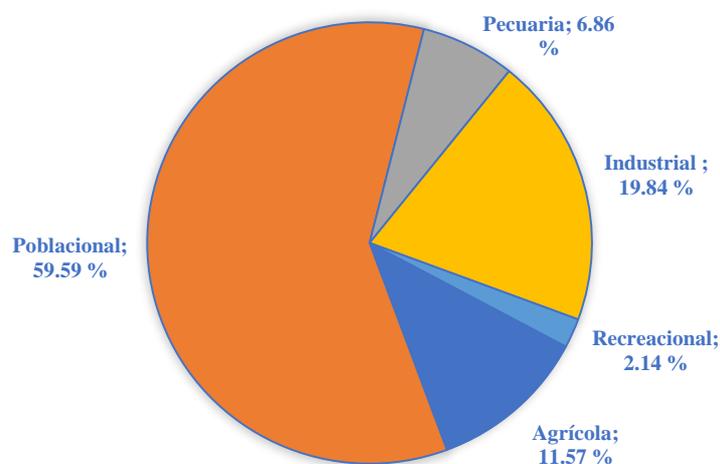


Figura 8: Porcentaje de uso del agua subterránea según demanda

Fuente: ANA (2019)

#### **2.4.7. Calidad de agua**

En las mediciones realizadas por la Dirección de Gestión de la Calidad de los Recursos Hídricos de la ANA, en los meses de noviembre 2013 y marzo 2014, se identificaron 48 vertimientos de aguas residuales domésticas e industriales sin tratamiento alguno a lo largo del río. En la parte baja del río se pueden identificar contaminación por coliformes en vertimientos de aguas residuales sin tratar y escurrimientos de usos ganaderos en el distrito de Pachacámac. En varios puntos del río se ha constatado el incumplimiento de los estándares de calidad ambiental (ECA) para la categoría 3 (Riego de vegetales y bebida de animales) y para la utilización como uso recreacional, porque es muy habitual ver personas en el río y la desembocadura del mismo está cerca de playas muy concurridas. Como medidas de mejora recomiendan garantizar caudales mínimos para la dilución del río, garantizar el adecuado funcionamiento de las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTARs), hacer control de vertidos y la ordenación de las zonas ganaderas en torno al río Lurín (Momblanch et al., 2015).

La calidad del agua en el acuífero es variable dependiendo de la cercanía a la zona costera, y el contacto con las aguas del mar. Los valores de la conductividad eléctrica varían desde 0.14 a 4.90 mmhos/cm, con algunos valores puntuales de hasta 7.8 mmhos/cm en las zonas bajas del distrito de Lurín y Punta Hermosa. En los otros distritos los valores no pasan de 3 mmhos/cm, siendo aguas más aptas para el riego de los cultivos. La variación del pH es de 6.25 a 8.74 en todos los distritos se observa similar variación, siendo moderadamente ácida a medianamente alcalina, pero no se observa problemas de acidez o basicidad. Por lo general el agua es adecuada para los cultivos, solo en algunas zonas cerca del litoral que no permitiría ciertos cultivos por los elevados valores de salinidad y alcalinidad. En los análisis microbiológicos se detectó que hay presencia de coliformes termotolerantes, Enterococos fecales y Escherichia Coli por encima de los valores recomendados para utilizarse como agua potable, en más de un 59 % de las muestras analizadas, haciéndose indispensable su tratamiento adecuado para el consumo humano (ANA, 2019).

#### **2.4.8. Ecología del río Lurín**

En el río Lurín hay especies de crustáceos y peces, los camarones de río (gambas) se considera una especie protegida y en peligro de desaparición, también hay tilapias, guppys (peces de 3cm) bagres, truchas y pejerreyes de río estos dos últimos en la parte alta del río. En flora silvestre podemos resaltar a poáceas y gramíneas como caña brava, carrizo y gramalote (Municipalidad de Cieneguilla, 2017; ANDINA, 2018).

#### **2.4.9. Infraestructura hidráulica de la parte baja del río Lurín**

La infraestructura hidráulica de la parte baja principalmente lo compone una red de canales, que trasladan el agua desde el río hasta las parcelas de los agricultores. La mayoría de las estructuras de captación son provisionales o rudimentarias, construidas por los propios agricultores, que en los meses de avenidas son arrastradas por la corriente del río. Una de las principales construcciones es la bocatoma Lurín, ubicada aproximadamente en el km 40 desde la estación hidrométrica de Antapucro.

Una integración de todos los aspectos que afectan la gestión de los recursos hídricos en la parte baja de la cuenca Lurín, demandan una gestión integrada de los mismos. Debido que la implementación de caudales ecológicos eleva los déficits de las demandas agrícolas creando descontento en los agricultores. Por otro lado, la propuesta de construcción de la presa puede generar mayor alteración hidrológica de la que actualmente existe.

#### **2.5. Gestión de los recursos hídricos en Perú y el mundo**

Los recursos hídricos han sido, son y serán esenciales para la subsistencia del hombre. Hoy en día los principales impulsores que aumentan la presión de los recursos hídricos son: el crecimiento de la población, el desarrollo humano y el cambio climático, tanto en cantidad como en calidad (Le Page et al., 2020). Por ello es fundamental la construcción de infraestructura (presas, extracciones y canales), pero estas deben complementarse con inversiones no estructurales como: gestión de cuencas, planificación del uso de la tierra y gestión de sistemas hídricos (Gourbesville, 2008). La infraestructura por sí sola no garantiza un uso eficiente y un adecuado reparto del recurso hídrico, tampoco la solución de conflictos, muchas veces estos se agudizan por la existencia de la misma, siendo necesario implementar medidas que ayuden a solventar la problemática en cada cuenca. Desde la década del 90 se habla de una Gestión Integrada de los Recursos Hídricos (GIRH), debatiéndose sus conceptos en Conferencia de las Naciones Unidas sobre Medio Ambiente y Desarrollo (CNUMAD) en Río de Janeiro de 1992 (Savenije y Van der Zaag, 2008).

Le Page et al. (2020) sostiene que el primer aspecto de la GIRH es una evaluación hidrológica, que caracteriza las propiedades e interacciones de los recursos hídricos dentro de la cuenca, esta evaluación debe incluir el uso de la tierra, la precipitación, la escorrentía de los ríos y las aguas subterráneas. La búsqueda de la sostenibilidad invita a cambios profundos en la concepción de la naturaleza, actitudes y formas de vida; requiere una nueva cultura basada en el agua, reconociendo sus múltiples valores emocionales, culturales, ambientales y económicos,

incluyendo enfoques éticos basados en principios de equidad y sostenibilidad (Carvajal-Escobar, 2008). Debido a que la asignación del recurso puede causar enfrentamiento entre usuarios, la gestión del agua debe considerarse como un problema social, económico, político y no solo técnico (Momblanch et al., 2018).

A nivel mundial la población se triplicó en el siglo pasado, pero el consumo de agua se multiplicó por seis, siendo el sector del riego el que más agua consume con un 70%, seguido por la industria con un 20% y el uso municipal un 10% (Gourbesville, 2008). En el mismo estudio se estima que cerca de 4 mil millones de personas vivirán en déficit hídrico severo en el año 2025, en esa misma línea el Banco Mundial calculó que el 40% de la población es afectada por la escasez de agua en la actualidad. El aumento de la población seguirá en los siguientes años, estimándose para el 2050 la cantidad de 9000 millones de personas, siendo necesario el aumento de la producción de alimentos en un 60% y la extracción de agua en un 15% Banco Mundial (2017), siendo imprescindible la mejora en la gestión y la búsqueda de fuentes alternativas, como pueden ser la reutilización de aguas tratadas y la desalinización.

Las fuentes alternativas como la reutilización son cada vez más usadas, siendo importantes en climas áridos y semiáridos porque puede aumentar significativamente la producción agrícola. Se estima que con un flujo de 140 L per cápita por día, en una población de 100,000 personas generarían aproximadamente 5 millones de metros cúbicos de aguas residuales por año, suficiente para regar alrededor de 1000 ha, utilizando métodos de riego eficientes (Gourbesville, 2008). En un análisis del estado de la reutilización de las aguas residuales a escala mundial realizado por Prats-Rico (2016), cita a Jiménez y Asano (2008) que el caudal reutilizado es 50 Mm<sup>3</sup>/día siendo los países de China y México los que más utilizan, muchas veces sin contar con ningún tipo de tratamiento.

Otro elemento para tener en cuenta es la utilización de aguas subterráneas, entendiendo que tienen una relación muy estrecha con las aguas superficiales. En este caso se debe hacer un uso conjunto de las aguas superficiales y subterráneas. Andreu et al. (2010) definen el uso conjunto como la utilización de forma consciente y coordinada de ambas fuentes de recursos con el objetivo de obtener mejoras sobre el uso inconexo o descoordinado de las mismas. La sobreexplotación o mal manejo de alguna de ellas suele traer consecuencias en la otra, por ejemplo, si hay demasiado uso de las aguas del acuífero se produce un descenso del nivel freático, que puede producir que el río se vuelva perdedor o haya subsidencia. Por otro lado, si hay un uso demasiado de las aguas superficiales puede haber problemas con los drenajes, o

limitar la recarga del acuífero. En cuanto a la forma de obtención, las aguas superficiales necesitan mayor inversión inicial pero poca energía para su movilización, lo contrario ocurre en las aguas subterráneas que necesitan una menor inversión inicial, pero bastante energía para su extracción (Andreu et al., 2010).

En el Perú la GIRH está establecida en la Ley de Recursos hídricos y en su artículo 6 del reglamento lo define de la siguiente manera: *"La gestión integrada de los recursos hídricos es un proceso que promueve, en el ámbito de la cuenca hidrográfica, el manejo y desarrollo coordinado del uso y aprovechamiento multisectorial del agua con los recursos naturales vinculados a esta, orientado a lograr el desarrollo sostenible del país sin comprometer la sostenibilidad de los ecosistemas"*. En la misma ley se crea el Sistema Nacional de Gestión de Recursos Hídricos (SNGRH) con el objetivo de articular el accionar del estado para conducir la GIRH y la conservación de los mismos. Las instituciones creadas como encargadas de implementar esos principios son la Autoridad Nacional del Agua (ANA) que es el ente rector y la máxima autoridad técnico-normativa del SNGRH. Luego se tiene a los órganos desconcentrados del ANA que son las Autoridades Administrativas del Agua (AAA) que serán de un nivel de alcance regional y a nivel más de cuenca las Administraciones Locales de Agua (ALA) (Ley de General de Recursos Hídricos, 2009).

A nivel de beneficiarios se tiene a las organizaciones de usuarios, que están conformadas por las juntas de usuarios como ente máximo de una determinada cuenca, luego las comisiones de regantes que se agrupan en distritos hidráulicos que son las encargadas de la gestión de las infraestructuras y los turnos de riego. A nivel local se tiene los comités de usuarios como el nivel mínimo de organización. En cada cuenca debe existir un consejo de cuenca que tiene la finalidad la planificación, coordinación y concertación del aprovechamiento sostenible de los recursos hídricos y está conformado por los diferentes actores involucrados en la gestión de la misma, en la actualidad hay 13 consejo de cuencas creados en todo el Perú. Las diferentes organizaciones que forman el Sistema Nacional de Recursos Hídricos se muestran en la figura 9.

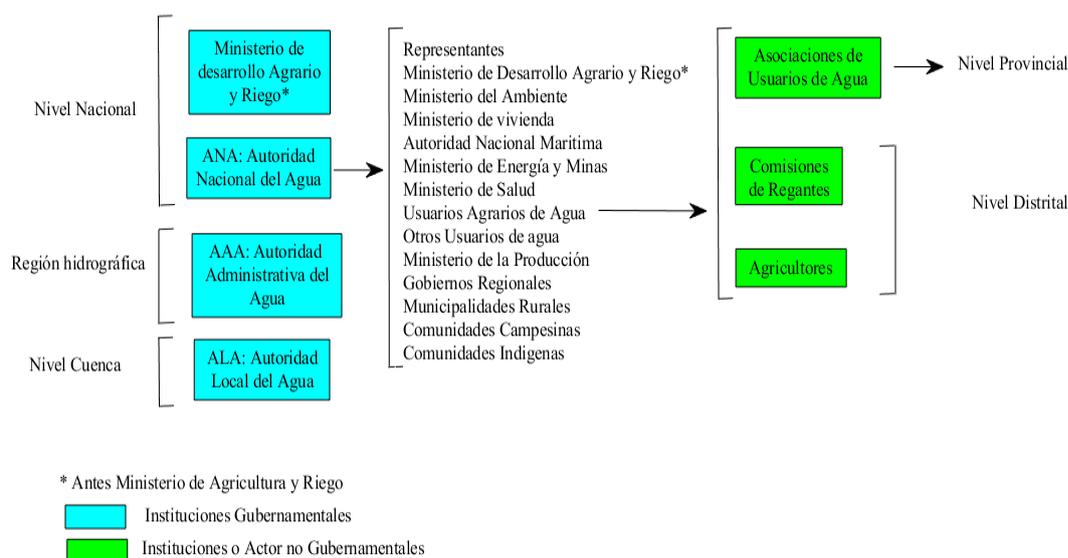


Figura 9: Sistema Nacional de Gestión de Recursos Hídricos (SNGRH) en el Perú

Fuente: Tomado de Popovici et al. (2020)

Según la ANA (2013), la demanda total de agua en el Perú es de 49 717.97 hm<sup>3</sup>/año, de los cuales el 52% (26 080.71 hm<sup>3</sup>/año) son demanda consuntiva y el 48% restante es demanda no consuntiva (23 637.26 hm<sup>3</sup>/año). De las demandas consuntivas el 89% corresponde al uso del agua para riego agrícola y en la demanda no consuntiva el sector energético ocupa el 96% del recurso. Si se tiene en cuenta la distribución espacial de la demanda agraria, el mayor volumen demandado se ubica en la costa con un 82.2 %, debido a la insuficiente o nula presencia de precipitación y la existencia de grandes proyectos de irrigación. Esta desigual localización de la oferta de agua, requiere de infraestructura, por ello se han creado algunos proyectos de transvase de la vertiente del Amazonas a la vertiente del Pacífico (ANA, 2013).

En la actualidad se han sumado dos problemas más a la gestión del agua, que son el cambio climático y el deterioro de la calidad de las aguas. Esto hace que la labor de los gestores sea cada vez más laboriosa, aumentando la incertidumbre debido a que se debe tener en cuenta la cantidad del agua, de donde se va a suministrar a quienes y en qué momento. El manejo de la información es cada vez más abundante y necesaria para la toma de decisiones, haciendo imprescindible la utilización de herramientas computacionales. Los modelos de gestión ahorran tiempo y con ellos se pueden evaluar muchos posibles escenarios, brindando la mejor alternativa de solución para los tomadores de decisiones.

### III. Metodología

En la figura 10, se describen el procedimiento realizado para la evaluación de los recursos hídricos en la parte baja de la cuenca del río Lurín. En primer lugar, se realiza el cálculo de los caudales ecológicos con los métodos propuestos en Antapucro y la bocatoma Lurín, siendo los datos de entrada los caudales diarios o mensuales. Después se realiza la creación de la topología del sistema en el módulo de SIMGES, teniendo en cuenta las demandas, las fuentes de agua y las características del sistema. Se han planteado cinco escenarios, siendo la situación actual y cuatro propuestas para la mejora de la gestión, de las condiciones ambientales y el abastecimiento de las demandas haciendo un uso sostenible de los recursos. Por último, con los caudales resultantes de la simulación en cada tramo del río, que será el caudal alterado, se compara con los caudales naturalizados, calculándose los índices de alteración hidrológica (IAH).

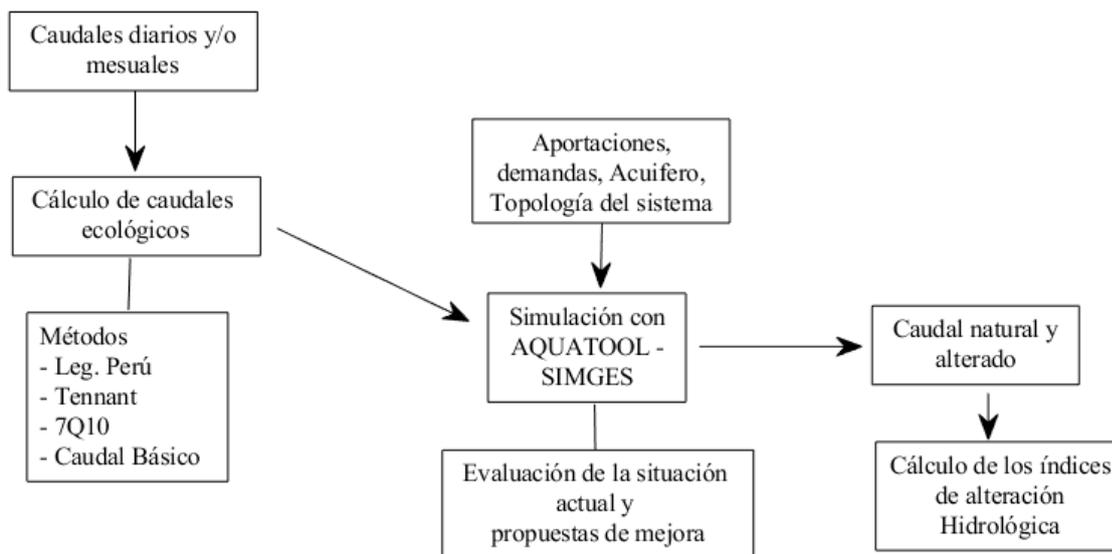


Figura 10: Esquema de los pasos seguidos para el análisis de los recursos hídricos de la parte baja de la cuenca del río Lurín.

#### 3.1. Cálculo del caudal ecológico

Los métodos utilizados para el cálculo de los caudales ecológicos se basan en la hidrología del río y son, según la legislación peruana, Tennant, 7Q10 y caudal básico. Los puntos evaluados son, la estación hidrométrica de Antapucro y la bocatoma Lurín, en la primera se calculó para los cuatro métodos y en la segunda solo para los dos primeros al disponerse solo de datos mensuales en dicho punto. Los caudales diarios y mensuales utilizados fueron obtenidos mediante el modelo EVALHID, en la estación hidrométrica de Antapucro, en la bocatoma de Lurín los datos mensuales se obtuvieron mediante la naturalización de los caudales en el módulo de SIMGES.

### 3.1.1. Datos hidrológicos para el cálculo de los caudales ecológicos

Las series de datos diarias, mensuales y anuales se tomaron del estudio “Simulación Hidrológica de la Oferta y Demanda de la Cuenca del Río Lurín con Fines de Establecer Indicadores de Garantía de la Demanda”, realizado por Olortegui (2021). Estos fueron generados por el modelo EVALHID (Programa de Evaluación de los Recursos Hídricos) en la estación hidrométrica de Antapucro, para un periodo de 50 años comprendido entre los años 1969 al 2019. Los índices estadísticos de ajuste obtenidos entre el caudal simulado y observado en la estación hidrométrica de Antapucro se detallan en la tabla 4, los periodos de calibración y validación están comprendidos de enero de 1969 a diciembre de 1972 y de setiembre del 2014 a diciembre del 2019 respectivamente. El valor del índice de bondad Nash Sutcliffe (NSE) es de 0.72 y 0.60 para calibración y validación siendo este resultado bueno y satisfactorio respectivamente (Moriassi et al., 2007). También se evalúan el logaritmo de Nash Sutcliffe ( $\ln$  NSE), Coeficiente de Pearson (R) y Simetría de Medias (SM) obteniendo valores de 0.90 en los dos primeros y 0.78 del tercero en el periodo de calibración. En las figuras 11 y 12, se presentan el periodo de calibración y validación observándose un buen ajuste entre el caudal observado y simulado.

**Tabla 4: Los índices de bondad alcanzados en el modelo para caudales observados y simulados en la estación hidrométrica de Antapucro.**

Periodo	Índice de bondad			
	NSE	$\ln$ NSE	R	SM
Calibración (1969-1972)	0,72	0,90	0,90	0,78
Validación (2014-2019)	0,60	0,82	0,79	0,78

Fuente: Olortegui (2021)

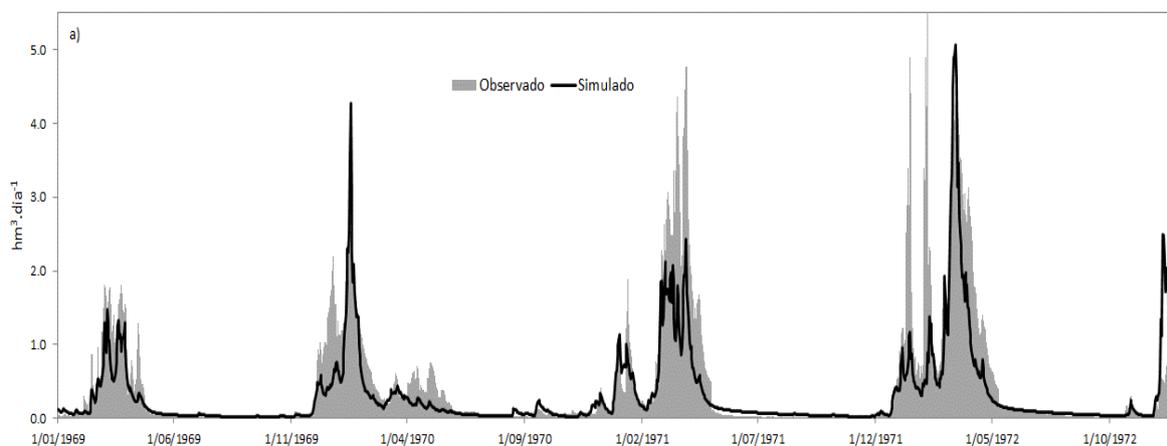


Figura 11: Caudal observado y simulado para el periodo de calibración.

Fuente: Olortegui (2021)

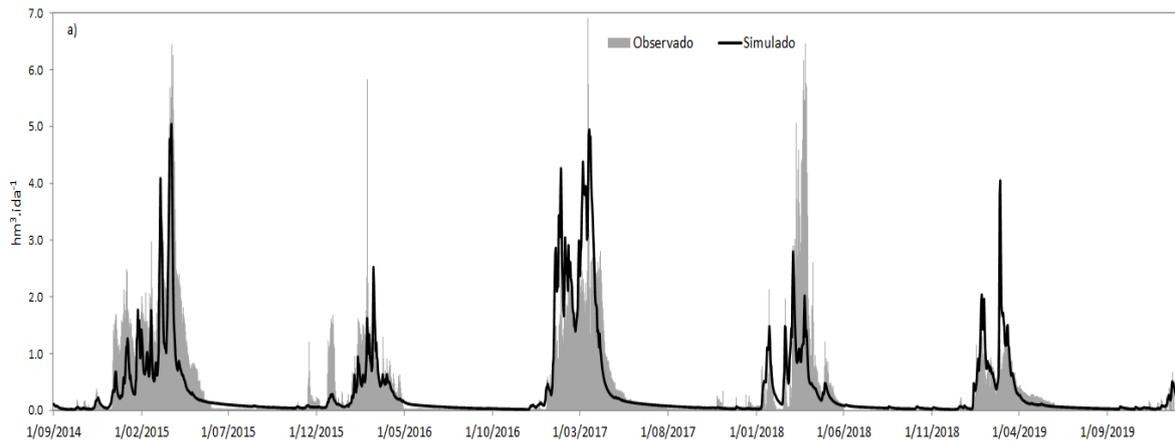


Figura 12: Caudal observado y simulado para el periodo de validación.

Fuente: Olortegui (2021)

En la figura 13, se observan los caudales mensuales para el periodo de 1969 hasta el 2019, el valor promedio mensual es de 11.490 hm<sup>3</sup>/mes y los valores máximos obtenidos son mayores a 100 hm<sup>3</sup>/mes en los años con la presencia del fenómeno del Niño. Los valores mínimos que son el caudal base de la cuenca presentan valores cercanos a cero, viéndose la estacionalidad de los caudales.

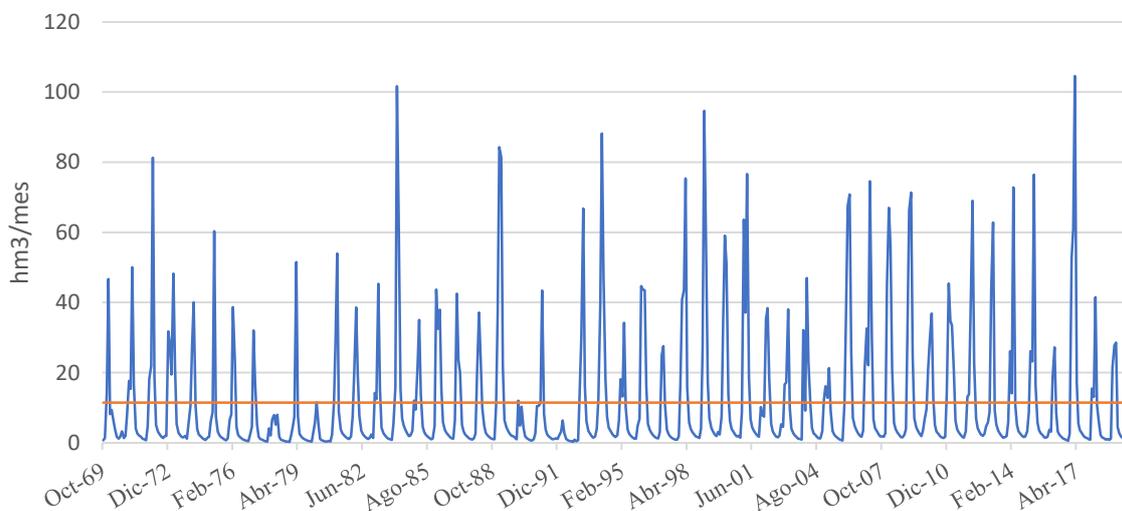


Figura 13: Caudal mensual modelado en la estación hidrométrica de Antapucro

Fuente: Elaborado con datos de Olortegui (2021)

Los caudales anuales se presentan en la figura 14. El caudal medio anual es de 149.1 hm<sup>3</sup>, se alcanzan caudales máximos y mínimos de 271.8 y 23.87 hm<sup>3</sup>/mes que coinciden con el fenómeno del Niño y la Niña respectivamente. El último episodio del fenómeno del Niño fue en año 2017, y se refleja en la serie alcanzando un volumen de 254.22 hm<sup>3</sup>/mes.

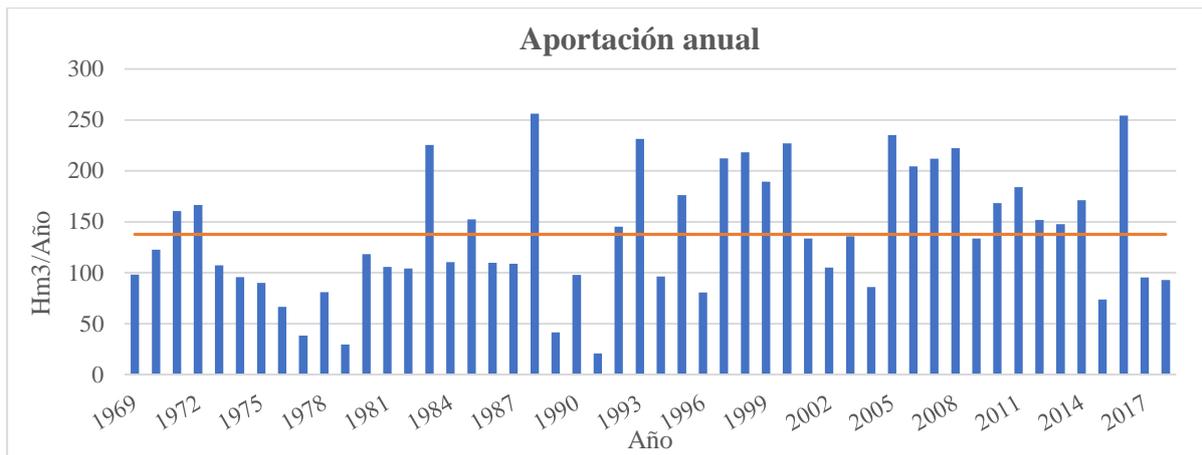


Figura 14: Volumen anual en la estación hidrométrica de Antapucro

Fuente: Elaborado con datos de Olortegui (2021)

### 3.1.2. Según la legislación peruana

En el Perú, el cálculo de caudal ecológico se puede hacer por los cuatro grupos de métodos ya descritos, según el nivel de complejidad del impacto de la intervención a realizar. Los métodos hidrológicos e hidráulicos son los mínimos requeridos. En caso del método hidrológico se puede realizar por el establecimiento de un porcentaje, utilizando los promedios mensuales históricos, tomando como referencia el valor de 15% del caudal medio mensual. La serie mínima de caudales a evaluar debe ser de 20 años, pudiendo ser datos históricos de las estaciones hidrométricas o caudales generados mediante modelamiento hidrológico (Resolución Jefatural N° 267-2019-ANA). Se siguieron los siguientes pasos para su cálculo:

- Identificación de los puntos (estación hidrométrica Antapucro, bocatoma de la comisión de regantes Lurín).
- Obtención de los promedios mensuales para la serie de caudales mensuales del periodo de 1969 al 2019, 50 años, en los dos puntos ya identificados.
- Multiplicación de los promedios mensuales obtenidos en el paso anterior por el 15%, se obtuvo un caudal por cada mes.

### 3.1.3. Tennant

El método de Tennant fue desarrollado por el servicio de pesca y vida silvestre de los EUA, se basa en el cálculo del caudal medio anual (CMA), en este método se establece diferentes niveles de evaluación según los objetivos trazados. El nivel mínimo recomendable para periodos cortos es de 10% del CMA. El nivel intermedio es de un 30% del CMA, este porcentaje permite una mejor adecuación del hábitat para la sobrevivencia de las formas de vida acuática. El último

nivel es de 60% del CMA, es el más adecuado para la conservación de los hábitats, como para usos recreativos (Gonzales y Banderas, 2015).

Para el cálculo de este método se siguió los siguientes pasos:

- Identificación de los puntos (estación hidrométrica Antapucro, bocatoma de la comisión de regantes Lurín).
- Cuantificación de los caudales medios anual en el periodo de 1969 al 2019.
- Definición de los periodos de estiaje y lluvia, considerándose meses de estiaje aquellos que son menores al caudal medio anual y meses de lluvia aquellos que son mayor al caudal medio anual.
- Una vez obtenidos tanto los caudales medios anuales y definido los meses de estiaje y lluvia, se asigna el caudal ecológico según la tabla 5.

**Tabla 5: Regímenes de flujo recomendados para implementar caudales ecológicos con el método de Tennant.**

Descripción narrativa del estado general del flujo	Regímenes de flujo recomendados (% de CMA)	Regímenes de flujo recomendados (% de CMA)
	Octubre a Marzo	Abril a septiembre
Lavado o Máximo	200 %	-
Rango optimo	60 – 100 %	-
Excepcional	40 %	60 %
Excelente	30 %	50 %
Bueno	20 %	40 %
Justo o degradante	10 %	30 %
Pobre o mínimo	10 %	10 %
Degradación severa	<10 %	<10 %

Fuente: Tennant (1976)

### 3.1.4. 7Q10

Se determina a partir del cálculo mínimo promedio con duración de 7 días y periodo de retorno de 10 años. Entrega el valor de un caudal mínimo estadístico, que corresponde al valor que, en promedio de cada diez años, será igual o menor que el caudal medio en cualquier evento de siete días de sequía consecutivos (Endesa Chile, 2011).

Para calcular el caudal ecológico por medio del método de 7Q10 se siguió la metodología de Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (2013) de Colombia:

- Una vez determinado el tramo de evaluación, se calculó la media móvil del caudal medio diario para 7 días seguidos.
- Hacer la serie anual de excedencias con los registros mínimos semanales calculados anteriormente para cada año, al final se obtuvo 50 datos.
- Realizar el análisis de frecuencia para alguna distribución de probabilidad de mejor ajuste.
- Calcular el caudal correspondiente para un periodo de retorno de 10 años.

### 3.1.5. Caudal básico (Qb)

Es el caudal mínimo que debe circular por el río. Se obtiene del análisis de discontinuidades en series de caudales medios diarios tratados con medias móviles de intervalos crecientes (Palau, 2000). El valor obtenido es un promedio de los valores anuales, con un mínimo de 10 años de datos.

Son necesarios los caudales diarios, para calcular las medias móviles de diferentes periodos, desde un día hasta los 3 meses. Se obtuvo un caudal básico para cada año, el valor final es un promedio de los valores anuales.

- A partir de los caudales medios diarios, se calcula las medias móviles, con las que forma matriz de orden  $j = 1 \dots 100$ , ver figura 15.

$$a_i^j = \frac{\sum_{k=i-j+1}^i q_k}{j} \quad 1 \leq i \leq 365 - j \quad j = 1, \dots, 100 \dots \dots \dots (1)$$

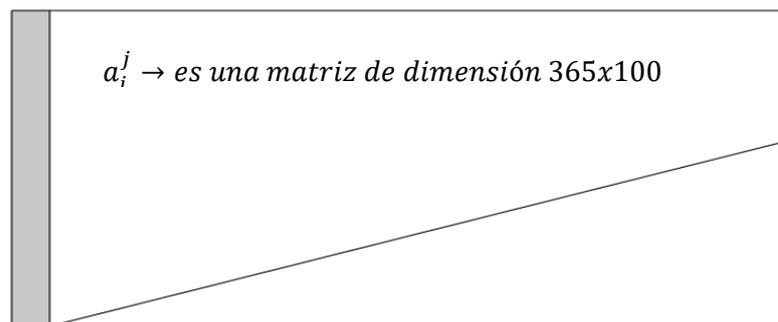


Figura 15: Matriz de medias móviles

Fuente: Adaptada de Alcazar (2007)

- Se calcula el vector V, a partir del valor mínimo de cada columna de la matriz anterior.

$$v_j = \min(a_i^j) \text{ con } 1 \leq i \leq 365 - j \quad j = 1, \dots, 100 \dots \dots \dots (2)$$

$$V = [V_1 \ V_2 \ V_3 \ \dots \ V_{100}]$$

- Se calcula el vector gradiente B, con los incrementos relativos, calculados entre cada par de componentes consecutivos del vector V.

$$b_k = \frac{v_{k+1} - v_k}{v_k} \quad k = 1, \dots, 99 \dots \dots \dots (3)$$

- El caudal básico para un año, es el valor de mayor gradiente relativo del vector B.

$$q_{bas} = \text{máx}(b_k) \rightarrow V_K \quad 1 \leq k \leq 99 \dots \dots \dots (4)$$

- El caudal básico final, se obtiene como la media aritmética de los caudales básicos de cada año.

$$Q_{bas} = \frac{\sum_{i=1}^{50} q_{bas,i}}{50} \dots \dots \dots (5)$$

### 3.1.6. Régimen de caudales

El caudal ecológico calculado por los métodos de caudal básico y el 7Q10, los resultados obtenidos son valores únicos, pero hay necesidad de multiplicarlo por un factor de variabilidad temporal, para que se pueda reflejar el régimen de caudales naturales. Por ejemplo, en las épocas de avenidas se puede tener un mayor caudal que el calculado y esto tendrá una afectación directa en la biota.

$$Factor = \sqrt{\frac{Q_i}{Q_{min}}} \dots \dots \dots (6)$$

Donde:  $Q_i$  es el caudal natural del mes y  $Q_{min}$  es el caudal del mes más seco (Castro, Carvajal y Céspedes, 2011)

### 3.2. Implementación del modelo de gestión en AQUATOOL – SIMGES.

La implementación del modelo de gestión se realizó en AQUATOOL, en el módulo de gestión SIMGES, teniendo en cuenta las diferentes demandas y las fuentes de agua que utilizan. El sistema empieza en la estación hidrométrica de Antapucro, ubicada en el distrito de Antioquía a una altura de 1020 m.s.n.m. Las principales demandas que se abastece son la agrícola, poblacional e industrial pero también existe las demandas pecuaria y recreativa, a continuación, se hace una descripción de los elementos utilizados según el Manual del Usuario del Modelo SIMGES.

### 3.2.1. Elementos utilizados para la implementación de la topología del sistema.

- **Nudos:** no son considerados propiamente como elementos, pero son necesarios para la implementación de la topología del sistema. Los nudos se utilizan para localizar un punto significativo en el sistema, confluencia de tramos de ríos o conducciones, incorporar elementos como aportaciones o retornos, también se utilizan para cambiar las características de una conducción.
- **Aportación:** son las entradas de agua al sistema, pueden hacerse directamente a los embalses o a las conducciones en este caso se llaman aportaciones intermedias. Los datos ingresados son el caudal en  $\text{hm}^3/\text{mes}$ . La aportación inicial lo constituye el río en la estación hidrométrica de Antapucro, las aportaciones intermedias son los manantiales que entregan el agua directamente a cada comisión de regantes y la quebrada Tinajas. El caudal de los manantiales se describió en la tabla 1.

Otro de los ingresos de agua al sistema son las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTARs), que en el tramo del río hay cuatro: Manchay, Cieneguilla y Julio C. Tello provienen de las poblaciones aledañas y se consideran aportaciones y no retorno porque las aguas consumidas por la población provienen del suministro subterráneo. Diferente es el caso de la PTAR San Bartolo que trata aguas residuales provenientes de la ciudad de Lima con un volumen de  $26.5 \text{ hm}^3/\text{año}$ , los volúmenes de cada PTAR se observan en la tabla 6.

**Tabla 6: Volumen de aguas tratadas vertidas por las PTARs al río Lurín**

PTAR	Cuerpo Receptor	Caudal (L/s)	Volumen ( $\text{hm}^3/\text{año}$ )	Ubicación	
				Este	Norte
Julio C. Tello	Río Lurín	25	0.788	293588	8643362
San Bartolo	Río Lurín	840	26.490	293810	8643569
Cieneguilla	Río Lurín	55	1.734	301461	8658256
Manchay	Río Lurín	50	1.577	296730	8650364

Fuente: ANA (2013)

- **Conducciones:** son la representación en el modelo de los tramos del río, canales y cualquier otra conexión, en ellas se pueden definir los caudales máximos y mínimos que pueden circular por dichos tramos. Las conducciones pueden ser de cinco tipos según las características de los tramos de río, la de tipo 1 es la más simple y conduce solo con restricciones de caudales máximos y mínimos. La conducción de tipo 2 se adiciona la infiltración hacia el acuífero y la conducción tipo 3 se puede definir una conexión hidráulica entre el río y el acuífero, sabiendo que puede existir infiltración del río hacia el acuífero o

drenaje del acuífero hacia el río. Esta última se utilizó para la topología del sistema, porque el río y el acuífero están conectados hidráulicamente, en cada una de ellas se estableció un coeficiente de infiltración, que en todo el sistema debe sumar 1. En el caso de la implementación de los caudales ecológicos se utilizó los caudales mínimos en los tramos evaluados que serán aguas abajo de estación Antapucro, en la bocatoma Lurín y en los tramos críticos.

- **Demandas consuntivas:** son elementos que utilizan el agua y parte de ella es consumida, es decir sale del sistema. Generalmente se unen al sistema mediante las tomas, entre ellas se encuentran las demandas agrícola, pecuaria, poblacional, recreativa e industrial. Las mismas pueden recibir agua de diferentes fuentes que pueden ser superficiales o subterráneas. La demanda agrícola está constituida por 13 comisiones de regantes, distribuidas a lo largo del recorrido del río y es abastecida principalmente por aguas superficiales. En la tabla 7, se observa la cantidad de agua demanda por cada una de ellas, siendo la comisión de regantes de Lurín la que consume más con 18.983 hm<sup>3</sup>/año. Las demandas poblacionales están agrupadas por distritos y son atendidas con agua proveniente del acuífero al igual que la demanda industrial, pecuaria y recreativa, sus valores se observan en la tabla 3. En el modelo la demanda poblacional y pecuaria se ha juntado en una sola por cada distrito, al igual que la demanda industrial y recreativa que se llama demanda productiva, para facilitar el análisis.

**Tabla 7: Volumen de la demanda agrícola por meses y por comisión de regantes**

Comisión de regantes	Área bajo riego (has)	Oct (hm <sup>3</sup> )	Nov (hm <sup>3</sup> )	Dic (hm <sup>3</sup> )	Ene (hm <sup>3</sup> )	Feb (hm <sup>3</sup> )	Mar (hm <sup>3</sup> )	Abr (hm <sup>3</sup> )	May (hm <sup>3</sup> )	Jun (hm <sup>3</sup> )	Jul (hm <sup>3</sup> )	Ago (hm <sup>3</sup> )	Set (hm <sup>3</sup> )	Total (hm <sup>3</sup> )
Sisicaya	289.56	0.712	0.852	0.890	0.875	0.933	0.859	0.531	0.334	0.081	0.059	0.308	0.438	<b>6.872</b>
Sub Sector Cieneguilla	259.75	0.659	0.702	0.412	0.539	0.590	0.567	0.413	0.225	0.112	0.054	0.274	0.429	<b>4.976</b>
Toledo	157.78	0.238	0.281	0.320	0.314	0.291	0.279	0.217	0.170	0.132	0.124	0.149	0.177	<b>2.692</b>
Cieneguilla	480.25	0.838	0.773	1.128	1.258	1.497	1.513	1.038	0.479	0.314	0.228	0.447	0.654	<b>10.167</b>
Cóndor Huaca - Molino	218.26	0.605	0.532	0.308	0.332	0.229	0.252	0.227	0.128	0.074	0.021	0.198	0.407	<b>3.313</b>
Tambo Inga	274.48	0.548	0.558	0.480	0.619	0.747	0.576	0.374	0.257	0.120	0.018	0.229	0.366	<b>4.892</b>
Jatosisa - Sotelo	235.55	0.243	0.249	0.533	0.607	0.857	0.616	0.357	0.174	0.076	0.006	0.119	0.204	<b>4.041</b>
Caña Hueca	311.64	0.729	0.528	0.510	0.515	0.699	0.586	0.266	0.136	0.068	0.020	0.245	0.541	<b>4.843</b>
San Fernando	458.86	1.046	0.715	0.977	0.979	1.146	0.789	0.392	0.345	0.283	0.099	0.597	0.960	<b>8.328</b>
Pan de Azúcar	417.18	0.624	0.389	0.482	0.665	0.891	0.988	0.481	0.291	0.128	0.042	0.303	0.635	<b>5.919</b>
Mejorada	772.83	1.333	1.287	0.546	1.193	1.565	2.450	1.293	0.262	0.087	0.067	0.586	1.273	<b>11.942</b>
Venturosa	338.94	0.651	0.631	0.602	0.686	0.900	0.744	0.464	0.141	0.109	0.045	0.290	0.540	<b>5.803</b>
Lurín	1055.45	2.001	2.113	1.97	1.519	2.067	2.869	2.046	0.982	0.452	0.348	0.934	1.682	<b>18.983</b>
<b>Total (hm<sup>3</sup>)</b>	<b>5270.53</b>	<b>10.227</b>	<b>9.610</b>	<b>9.158</b>	<b>10.101</b>	<b>12.412</b>	<b>13.088</b>	<b>8.099</b>	<b>3.924</b>	<b>2.036</b>	<b>1.131</b>	<b>4.679</b>	<b>8.306</b>	<b>92.771</b>

Fuente: INRENA (2004)

- **Embalses:** son elementos de almacenamiento superficial de agua, pueden estar al inicio del sistema o en la parte intermedia. Están definidos por parámetros físicos y de gestión entre ellos volúmenes máximos, volúmenes objetivos entre otros. La simulación se efectúa por balance de masas según la ecuación 7 (Andreu et al., s.f.).

$$V_f = V_i + A_e + A_a - P_f - E - S_c - S_v \dots \dots \dots (7)$$

Donde:

- $V_f$  volumen al inicio del mes
- $A_e$  aportación al embalse
- $A_a$  aportaciones de la parte alta del esquema aguas arriba del embalse,
- $P_f$  pérdidas por infiltración,
- $E$  pérdidas por evapotranspiración
- $S_c$  las sueltas controladas, aquellas que no sobrepasan la capacidad de desagüe del embalse, incluidas tomas dentro del vaso,
- $S_v$  son los vertidos, desembalses producidos por superarse la capacidad del embalse y no caber por los dispositivos de desagüe controlados.

El embalse esta seccionado por zonas para una mejor gestión, como se observa en la figura 16. Las zonas son: volumen máximo (V max), volumen mínimo (Vmin), Volumen objetivo (V obj) y volumen utilitario V\*.

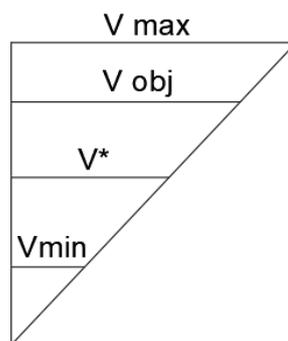


Figura 16: Zonas de un embalse en el modelo SIMGES

Fuente: Andreu et al. (s.f.)

En la implementación de las propuestas de gestión, se ha considerado la construcción de un embalse para satisfacer las demandas agrícolas. Este embalse estará ubicado en la microcuenca de la quebrada Tinajas, el volumen propuesto es de 40 hm<sup>3</sup>/año para suministrar a la demanda agrícola, esta propuesta aparece inicialmente en el proyecto de infraestructura para agua potable a construir para el año 2035 del “Plan Maestro para Lima

y Callao 2012 – 2040” con un volumen de 25 hm<sup>3</sup>/mes y la ubicación en la quebrada Tinajas, pero no fue incluida en el plan final (SEDAPAL, 2012). Las aportaciones que abastecerán al embalse es la misma quebrada Tinajas y una derivación del río Lurín a través de un canal.

- **Acuíferos:** los acuíferos están definidos según la relación que estos tengan con los tramos del río y el tipo de modelamiento que se va a realizar. Así se tienen acuíferos tipo deposito, unicelular, manantial, pluricelular, y otros más detallados para el modelamiento de forma distribuida. Acá nos centraremos en el acuífero de tipo unicelular, este, tipo de acuífero está conectado hidráulicamente con el río, mediante un coeficiente de desagüe ( $\alpha$ ). Las ecuaciones que definen al acuífero son las siguientes:

$$V_n = V_{n-1}e^{-\alpha} + \frac{R_n}{\alpha}(1 - e^{-\alpha}) \dots \dots \dots (8)$$

$$Q_n = \alpha V_n = Q_{n-1}e^{-\alpha} + R_n(1 - e^{-\alpha}) \dots \dots \dots (9)$$

Donde se tiene que:

$V_n$  volumen al final del mes

$V_{n-1}$  volumen al inicio del mes

$\alpha$  coeficiente de desagüe

$R_n$  recarga en el mes

$Q_n$  caudal de relación río acuífero en función del caudal del mes anterior

En el sistema creado el acuífero es de tipo unicelular, con un coeficiente  $\alpha$  de 0.0001 y un volumen inicial de 350 hm<sup>3</sup>, el mismo, es recargado por la infiltración del lecho del río en las épocas de avenida y por filtraciones del regadío, se ha considerado un volumen de bombeo de aproximadamente 24.365 hm<sup>3</sup>/año sumando todas las demandas (ANA, 2019).

- **Tomas:** son los enlaces entre las fuentes de agua y las demandas consuntivas, en ellas se puede establecer la prioridad con la que se debe atender a la demanda que se abastece. También se define el porcentaje de agua que retorna al sistema mediante los retornos y el porcentaje de infiltración del riego que termina en el acuífero.
- **Bombeos adicionales:** son elementos de agua procedente de los acuíferos que se incorporan al sistema superficial para la utilización en un lugar distinto a la zona de extracción de agua. Cuando la demanda se abastece directamente del río se utilizan las tomas, en caso que la demanda solo es abastecida por aguas del acuífero se utilizó los bombeos adicionales, al no tener un punto de referencia en el río.

- **Elementos de retorno:** son puntos de reintegro de agua al sistema, provenientes de las demandas consuntivas. Es un porcentaje del agua que pasa por una determinada toma. En este caso solo hay un retorno, de las aguas de la comisión de regantes de Caña Hueca.

En la figura 17, se observa topología del sistema con todos los elementos ya descritos.

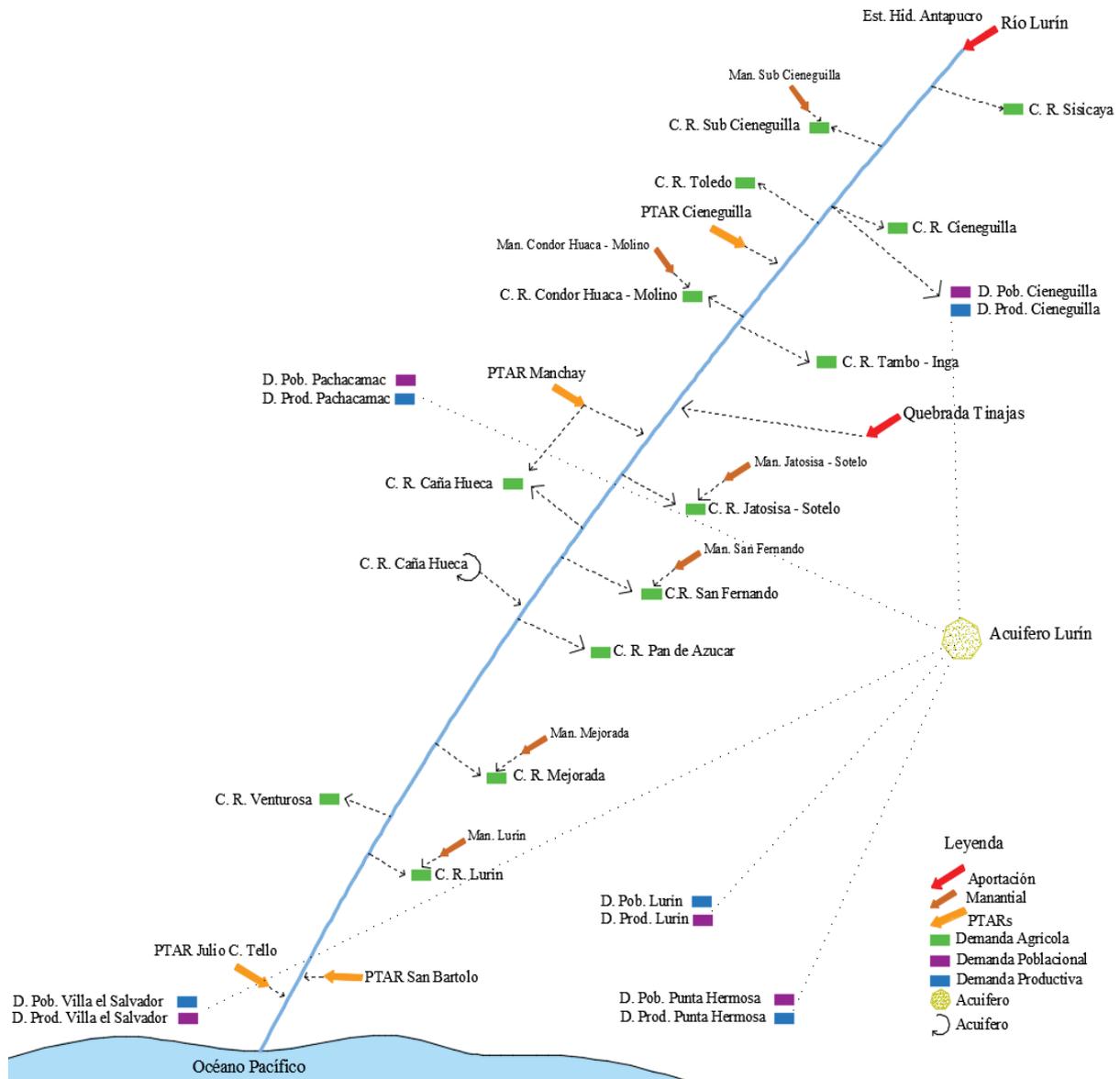


Figura 17: Representación de los elementos del sistema en la situación actual

Fuente: Elaborado con datos de INRENA (2004), ANA (2013) y ANA (2019).

### 3.2.2. Planteamiento de las propuestas de gestión

El establecimiento de los escenarios es para evaluar la respuesta del sistema a las diferentes medidas como la: implementación de los caudales ecológicos, utilización de las aguas tratadas y la construcción de un embalse. Estas medidas buscan mejoras en las garantías del suministro

de agua y en las condiciones ambientales del río. Las propuestas fueron evaluadas con los caudales determinados en la legislación peruana como metodología hidrológica.

- a) **Situación actual:** se evalúa la respuesta del sistema en la situación actual con los datos ya descritos anteriormente. Es el punto de partida y de comparación con las otras situaciones propuestas.
- b) **Propuesta 1 (Qeco):** en este caso, a la situación actual se le asigna los caudales ecológicos en los tramos después de la estación Antapucro, en la bocatoma de la comisión de regantes de Lurín y tramos críticos. Estos últimos, se han considerado porque en los meses secos no hay caudal circulante en el cauce del río.
- c) **Propuesta 2 (Reutilización + Qecol + ↑Qacui):** una vez implementado el caudal ecológico, se busca compensar a los usuarios agrícolas el volumen de agua que van a dejar de recibir para cumplir con los mismos. Para ello se utiliza el volumen de agua de las PTARs para uso agrícola, precisando que estas deben de cumplir con los estándares ambientales (ECAs) establecidos en la legislación peruana. Las demandas agrícolas que se encuentran cercanas a las PTARs se beneficiaran de ello, principalmente las que se encuentran cercanas a la PTAR San Bartolo, ver figura 18. También se aumenta el volumen de agua bombeada del acuífero para cada comisión de regantes.
- d) **Propuesta 3 (Embalse + Qecol + ↑Qacui):** la cuenca actualmente no cuenta con infraestructura de almacenamiento, pero hay diversos proyectos que proponen la construcción de un embalse. En este escenario se evalúa la construcción de un embalse de 40 hm<sup>3</sup>/año de capacidad y este se ubicará en la microcuenca de la quebrada Tinajas. Las aportaciones para el embalse serán la quebrada Tinajas y una derivación del río Lurín, para ello se construirá un canal, con una capacidad de volumen por mes que se determinará en el modelamiento. En esta misma propuesta está incluido el caudal ecológico y el aumento del volumen de bombeo.
- e) **Propuesta 4 (Reutilización + Embalse + Qecol + ↑Qacui):** es la integración de las otras propuestas, en todas ellas también está implícito la utilización de las aguas superficiales del río y los manantiales. La capacidad del canal para este caso se determinará en la simulación, el volumen del embalse es de 40 hm<sup>3</sup>/año. Las aguas de reúso serán entregadas a cada comisión de regantes, según la proximidad y estableciendo que si es necesario se utilizarán para cumplir con el caudal ecológico.

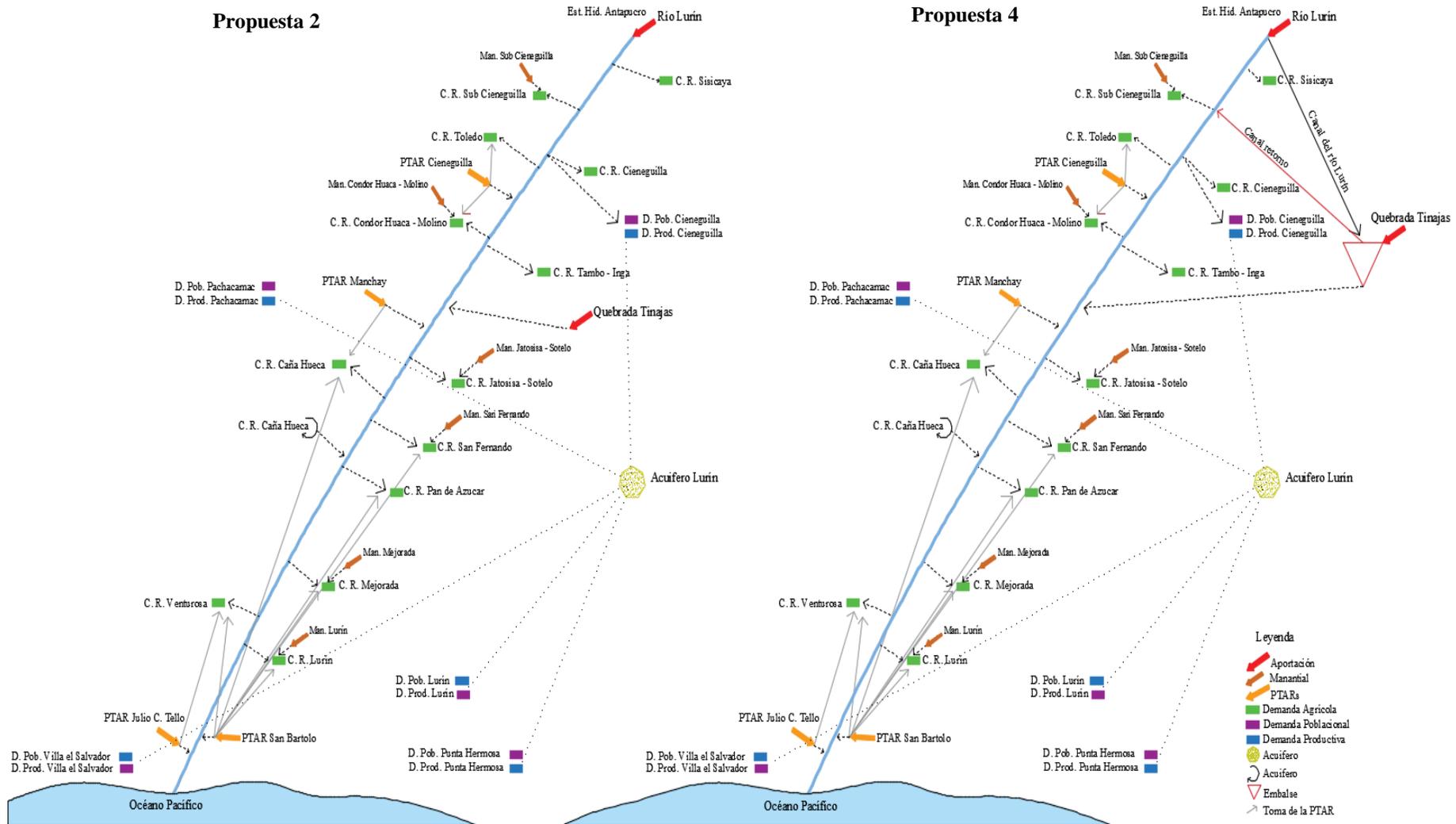


Figura 18: Esquemas de las propuestas 2 y 4, donde se integra la reutilización de aguas residuales y la construcción de un embalse  
Fuente: Elaborado con datos de INRENA (2004), ANA (2013), ANA (2019) y SEDAPAL (2012).

### 3.3. Índices de alteración hidrológica (IAH)

Estos índices se encargan de medir la variación entre el caudal que pasa en un determinado punto después de atender a las diferentes demandas (caudal alterado), con un periodo de referencia sin la existencia de las mismas (caudal natural). Martínez y Fernández, (2010), lo definen como la relación que existe entre el caudal natural y el caudal alterado en un punto o tramo de río, entendiéndose como caudal natural las características del régimen hidrológico que no han sido modificadas. Los IAH también se puede aplicar a los resultados de los modelos hidrológicos que se utilizan para evaluar futuras propuestas en la gestión del agua, o al comparar los flujos naturalizados simulados por modelos con las condiciones actuales (Mathews y Richter, 2007). Los valores obtenidos van de cero a uno, siendo cero el estado con más alteración y uno un sistema sin ninguna alteración. En la tabla 8, se hace una clasificación de los valores de los IAH para determinar el estado en que se encuentra el tramo del río. Los niveles son del 1 a 5 y se clasifican en: muy buen estado, buen estado, estado moderado, estado deficiente y estado malo respectivamente.

**Tabla 8: Clasificación del estado hidrológico de un río según los IAH**

Estado Hidrológico				
Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3	Nivel 4	Nivel 5
$1 < \text{IAH} < 0.8$	$0.8 < \text{IAH} < 0.6$	$0.6 < \text{IAH} < 0.4$	$0.4 < \text{IAH} < 0.2$	$0.2 < \text{IAH} < 0$

Fuente: Ortín (2017)

Los índices están basados en las características de los regímenes hidrológicos y estos se definen según Martínez y Fernández (2010) y Richter et al. (1996) en:

- **Magnitud:** Cantidad de agua disponible según los atributos del sistema como el área humedecida o las condiciones de hábitat.
- **Frecuencia de ocurrencia:** vinculada con la periodicidad de ocurrencia de los eventos como sequías, inundaciones y otros, que puede traer consecuencias en la dinámica de las especies que viven en el medio.
- **Momento:** en qué momento ocurre los eventos extremos y si estos están relacionados con los ciclos de la vida de las especies, entonces las perturbaciones pueden generar estrés en ellas.
- **Duración:** cantidad de tiempo que perdura unas condiciones específicas de las aguas, está estrechamente ligadas con completar las fases de ciclo de vida de las especies
- **Taza de cambio:** referido con qué celeridad se producen los cambios.

Todas las características tienen una afectación directa en los organismos que viven dentro del río, así como también es sus orillas. Puede existir una relación entre ellos o índices que estén basados en dos o más características. Uno de los inconvenientes para el cálculo de los indicadores de alteración hidrológica es la falta de datos o no hay en los puntos donde se realizaron los muestreos biológicos (Radinger, Alcaraz-Hernández, y García-Berthou, 2018). Una de las soluciones es implementar modelos de gestión, para calcular los caudales mensuales donde sean necesarios. En Ortin (2017) se establecen 12 IAH a partir de Richter et al. (1996) y IAHRios, que utilizan caudales mensuales para evaluar el nivel de alteración, los mismos que se utilizaran para este TFM, cada uno de ellos se detallan en la tabla 9.

Los IAH fueron calculados mediante unas sub rutinas de MATLAB, que fueron desarrolladas por el Instituto de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente (iiama) de la UPV y proporcionadas para este estudio. Para ello se necesitó de dos tipos de caudales, el caudal natural y el caudal después de las intervenciones humanas (caudal alterado) en cada tramo del río. La naturalización de caudales se realizó en AQUATOOL, módulo SIMGES, haciendo todas las demandas cero y quitando las aportaciones de las plantas de tratamiento (PTARs). Los caudales alterados fueron obtenidos después de la simulación de las diferentes propuestas planteadas, en ambos casos se exportaban los archivos de SIMGES, utilizando la herramienta de G2S. Los IAH se evaluaron para todos los tramos del río desde la estación hidrométrica de Antapucro hasta desembocadura en el Océano Pacífico y para el caudal ecológico según la legislación peruana. Para hacer una evaluación general del sistema en las mismas subrutinas se agrega un índice de alteración global.

- **IAHG. Índice de alteración hidrológica global:** Es obtenido mediante el cálculo de la media aritmética de los 12 índices mencionados en la tabla 9 y es un solo valor para todo el sistema.

$$IAHG = \overline{IAHG}_t \dots \dots \dots (10)$$

**Tabla 9: Índices de alteración hidrológica utilizando caudales mensuales**

Clasificación	Aspecto	Código	Nombre	Descripción del índice
Valores Habituales	Magnitud	IAH 1	Índice de magnitud de las aportaciones	Es el cociente entre el caudal promedio anual alterado con el natural, para cada tramo del río y su valor es anual.
		IAH 2	Índice de Magnitud de las aportaciones mensuales	Es el cociente entre el caudal promedio mensual entre el régimen natural y alterado, obteniéndose valores por cada mes, pero el valor final es un promedio de todos ellos.
	Variabilidad	IAH 3	Índice de variabilidad habitual	Es el cociente entre la resta del percentil 10% menos 90%, tanto para régimen natural como alterado.
		IAH 4	Índice de variabilidad externa	Es el cociente entre la resta del caudal máximo y mínimo para un mismo tramo. Se necesita tanto el régimen natural, como alterado.
	Estacionalidad	IAH 5	Índice de estacionalidad de máximos	Es el promedio de meses de desfase entre los meses de máxima aportación del año (i), para régimen natural y alterado. Solo se considera en 6 el máximo desfase posible.
		IAH 6	Índice de estacionalidad de mínimos	Es el promedio de meses de desfase entre los meses de mínima aportación anual (i), para régimen natural y alterado. Solo se considera en 6 el máximo desfase posible.
Valores extremos máximos	Magnitud	IAH 7	Índice de magnitud de avenidas habituales	Es el cociente entre los caudales que se encuentran en el percentil 5, para régimen natural como alterado.
	Variabilidad	IAH 8	Índice de variabilidad de avenidas habituales	Es el cociente entre los coeficientes de variación de régimen natural y alterado, para caudales superiores al percentil 5
	Estacionalidad	IAH 9	Índice de estacionalidad de avenidas	Número de años que el caudal medio mensual supera al caudal de avenida habitual (Q <sub>5</sub> ) para cada mes, el valor final es la media para todos los meses.
Valores extremos mínimos	Magnitud	IAH 10	Índice de magnitud de las sequías habituales	Es el cociente de sequía habitual (que se establece en Q <sub>95</sub> , de acuerdo con el método IAHRIS) en régimen natural y alterado.
	Variabilidad	IAH 11	Índice de variabilidad de las sequías habituales	Es el cociente entre los coeficientes de variación de los caudales de sequía habitual, de los regímenes alterado y natural.
	Estacionalidad	IAH 12	Índice de estacionalidad de sequías	Número de años que el caudal medio mensual supera al caudal de sequía habitual (Q <sub>95</sub> ) para cada mes, el valor es la media de todos los meses.

Fuente: Adaptado de Ortín (2017)

## IV. Resultados y discusiones

### 4.1. Cálculo del caudal ecológico

#### a) Estación hidrométrica de Antapucro

En este punto el cálculo de los caudales ecológicos se realizó por los cuatro métodos especificados en la metodología, los resultados varían según el método utilizada. La legislación peruana en la metodología hidrológica establece un 15% del promedio mensual, con series superiores a 20 años, los resultados obtenidos son de 0.201 hm<sup>3</sup>/mes para los meses secos de septiembre y octubre y de 6.742 hm<sup>3</sup>/mes para el mes de marzo, lo que representa que el caudal ecológico del mes más húmedo es 30 veces el caudal ecológico de los meses de estiaje. En el caso del cálculo por el método de 7Q10, la función de distribución utilizada es la distribución de Gumbel, que se presenta en la ecuación 11. Los valores de la media aritmética y desviación estándar son 0.027475 y 0.01122 obtenidos de la serie de los promedios mínimos de 7 días para cada año, y las otras variables son valores de tablas.

$$F(x) = e^{-e^{-\left(\frac{x-u}{\alpha}\right)}} \dots \dots \dots (11)$$

$$\alpha = \frac{S_x}{\sigma_y} = \frac{0.0122124}{1.1607} = 0.010521582$$

$$u = \bar{x} - \mu_y * \alpha \rightarrow 0.02747511 - 0.5485 * 0.010522 = 0.021704027$$

Donde:

$F(x)$  = probabilidad de que se presente un valor igual o menor que x.

$e$  = base de los logaritmos neperianos

$\bar{x}$  = media aritmética de la muestra

$S_x$  = desviación estándar de la muestra

$\sigma_y$   $\mu_y$  = (1.1607 y 0.5485) son valores de tabla, que dependen de la cantidad de valores de la serie, los valores fueron 50, porque se calculó un valor por cada año (Sánchez, 2013).

Para calcular el caudal de un periodo de retorno de 10 años se necesita despejar “x” de la ecuación 11, como resultado queda la expresión de la ecuación 12. Después de reemplazar los datos se obtuvo un valor de 0.045381 hm<sup>3</sup>/día, haciendo un total de 1.361 hm<sup>3</sup>/mes, este volumen al ser un valor único para todo el año se multiplica por el factor establecido en la ecuación 7, con la finalidad obtener un régimen de caudales mensuales.

$$F(x) = 1 - \frac{10}{100} = 0.90$$

$$x = -\ln(-\ln(F(x))) * \alpha + u \dots \dots \dots (12)$$

$$x = -\ln(-\ln(0.9)) * 0.010521582 + 0.021704027$$

$$x = 0.045381451 \text{ hm}^3/\text{día}$$

$$x = 0.525 \text{ m}^3/\text{s}$$

El caudal medio anual (CMA) utilizado para el cálculo del caudal ecológico por el método de Tennant fue de 11.488 hm<sup>3</sup>/mes, además con este caudal se identificó a los meses húmedos y secos. Los meses húmedos fueron 4: enero, febrero, marzo y abril y los meses secos fueron de mayo a diciembre, como se puede observar en la tabla 10. Los porcentajes escogidos para cada mes fueron establecidos según la tabla 5, de la metodología. Los valores mínimos corresponden a los meses secos y son el 10% del caudal medio anual y el máximo valor es de 11.488 hm<sup>3</sup>/mes que corresponde al mes de marzo, este caudal se realiza para hacer un lavado del cauce y que el agua pueda llegar a las riberas del río (Gonzales y Banderas, 2015).

**Tabla 10: Cálculo del caudal ecológico por el método de Tennant**

Mes	Caudal medio Mensual (hm <sup>3</sup> /mes)	Caudal Medio Anual (hm <sup>3</sup> /mes)	Meses secos y Húmedos	Caudal Ecológico (hm <sup>3</sup> /mes)	Caudal Ecológico (m <sup>3</sup> /s)	Porcentaje del CMA (%)
Oct	1.339	11.488	Seco	1.149	0.443	10
Nov	2.128	11.488	seco	1.149	0.443	10
Dic	7.466	11.488	Seco	2.298	0.886	20
Ene	22.683	11.488	Húmedo	3.446	1.330	30
Feb	33.471	11.488	Húmedo	3.446	1.425	30
Mar	44.947	11.488	Húmedo	11.488	4.432	100
Abr	13.044	11.488	Húmedo	3.446	1.330	30
May	4.592	11.488	Seco	1.149	0.443	10
Jun	2.905	11.488	Seco	1.149	0.443	10
Jul	2.233	11.488	Seco	1.149	0.443	10
Ago	1.708	11.488	Seco	1.149	0.443	10
Set	1.340	11.488	Seco	1.149	0.443	10

El valor del caudal ecológico calculado por el método del caudal básico es de 1.184 hm<sup>3</sup>/mes, representa el valor promedio para los 50 años evaluados. Para este método fue necesario utilizar el factor de la ecuación 7, para determinar los regímenes de caudales. Los resultados de los cuatro métodos se observan en la tabla 11, todos ellos coinciden que los valores de los caudales mínimos y máximos son en los meses de octubre y marzo. Si comparamos los caudales mínimos calculados por el método establecido en la legislación peruana con los métodos de 7Q10, Tennant y caudal básico (Qb) es inferior en 14.77%, 17.5% y 17% respectivamente.

**Tabla 11: Caudal ecológico en la estación hidrométrica de Antapucro**

Mes	Caudal medio (hm <sup>3</sup> /mes)	Caudal medio (m <sup>3</sup> /s)	Caudal ecológico (hm <sup>3</sup> /mes)			
			Perú	7Q10	Tennant	Qb
Oct	1.339	0.517	0.201	1.361	1.149	1.184
Nov	2.128	0.821	0.319	1.716	1.149	1.493
Dic	7.466	2.880	1.120	3.214	2.298	2.796
Ene	22.683	8.751	3.402	5.602	3.446	4.874
Feb	33.471	13.835	5.021	7.044	3.446	6.128
Mar	44.947	17.341	6.742	7.885	11.488	6.861
Abr	13.044	5.032	1.957	4.248	3.446	3.696
May	4.592	1.772	0.689	2.521	1.149	2.193
Jun	2.905	1.121	0.436	2.005	1.149	1.744
Jul	2.233	0.861	0.335	1.758	1.149	1.529
Ago	1.708	0.659	0.256	1.537	1.149	1.337
Set	1.340	0.517	0.201	1.361	1.149	1.185

En la figura 19, se observan los valores de caudal ecológico en m<sup>3</sup>/s, siendo el método 7Q10 superior en la mayoría de meses, a excepción del mes de marzo que es superado por el método de Tennant en un 33.3%. Todos los métodos alcanzan su valor máximo en el mes de marzo, siendo 2.65 m<sup>3</sup>/s el determinado por el 15 % del promedio mensual y el caudal básico, el valor para el método de Tennant es de 4.432 m<sup>3</sup>/s y de 3 m<sup>3</sup>/s para 7Q10. Los valores mínimos son en los meses de setiembre y octubre, para el caudal determinado según la legislación peruana que es de 0.078 m<sup>3</sup>/s, en el resto de métodos el valor mínimo es de aproximadamente 0.457 m<sup>3</sup>/s.

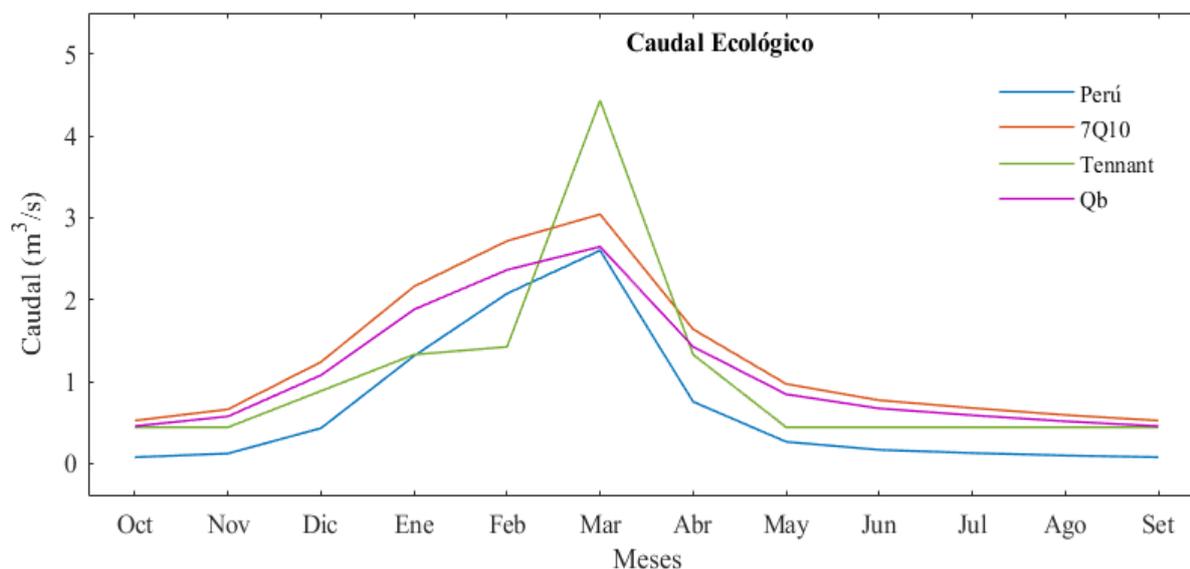


Figura 19: Caudal ecológico en m<sup>3</sup>/s en la estación hidrométrica de Antapucro

El valor acumulado en hm<sup>3</sup>/año se visualiza en la figura 20, el método de mayor caudal es de 7Q10 que alcanza los 40.251 hm<sup>3</sup>/año, seguido por el método del caudal básico (Qb) con 35.021 hm<sup>3</sup>/año, después el de Tennant y el de la legislación peruana con 32.166 y 20.678 hm<sup>3</sup>/año

respectivamente. Si comparamos el primero con el ultimo la diferencia es de 48.63% más para el método de 7Q10, que si tomáramos solo el 15% de los promedios mensuales. La diferencia entre 7Q10 con Tennant y el caudal básico es de 20 y 13 % respectivamente. El caudal determinado por la legislación peruana es inferior en 94.25, 55.56 y 69.36 %, con respecto a los métodos de 7Q10, Tennant y Qb.

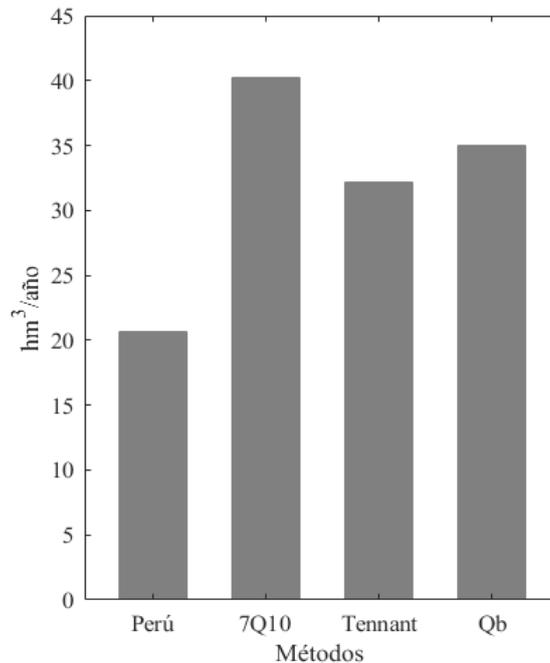


Figura 20: Caudales ecológicos acumulados en un año

#### b) Caudales ecológicos en la bocatoma Lurín

Los valores de los caudales ecológicos calculados en la bocatoma Lurín se muestran en la tabla 12, para el método propuesto en la legislación peruana y el método de Tennant, debido a que solo se cuenta con series de datos mensuales. Los valores anuales de los caudales son 22.688 y 35.292 hm<sup>3</sup>/año para Perú y Tennant respectivamente, representan un incremento de 10%, con respecto a los valores calculados en la estación hidrométrica de Antapucro debido principalmente a la aportación de la quebrada Tinajas en la época de avenidas. Los valores máximos son de 12.604 y 7.078 hm<sup>3</sup>/mes, para los métodos según Tennant y la legislación peruana y se producen en el mes de marzo. Con respecto a los valores mínimos hay un incremento de un 64.18 y 9.66 %, para los métodos de la legislación peruana y Tennant, principalmente por los aportes al caudal base de los manantiales que permanecen constantes durante el año.

**Tabla 12: Caudales ecológicos en la bocatoma Lurín (hm<sup>3</sup>/mes)**

Métodos	Caudales ecológicos (hm <sup>3</sup> /mes)											
	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set
<b>Perú</b>	0.330	0.445	1.265	3.857	5.305	7.078	2.121	0.820	0.561	0.464	0.385	0.326
<b>Tennant</b>	1.260	1.260	2.521	3.781	3.781	12.604	3.781	1.260	1.260	1.260	1.260	1.260

## 4.2. Análisis de los resultados del módulo SIMGES

El sistema abastece a 13 demandas agrícolas y a las demandas poblacionales, industriales y recreativas de los distritos que se encuentran en la parte baja de la cuenca. Las demandas diferentes a la agrícola se abastecen de las aguas del acuífero y no presentan ningún tipo de déficits, con garantías de suministro y volumétricas del 100%. El análisis del cumplimiento de las garantías en las demandas agrícolas se basó en el criterio de UTAH que está establecido en el módulo de SIMGES. Se fundamenta en los déficits para uno, dos y diez años, estos no deben ser mayores en 50, 75 y 100 %, respectivamente, los otros criterios establecidos son el número de meses que no presentan déficit (garantía de suministro) y las garantías volumétricas en cada demanda (Andreu et al., s.f.).

### 4.2.1. Satisfacción de las demandas

Uno de los principales objetivos de la gestión integrada de los recursos hídricos es garantizar el adecuado abastecimiento de las demandas. Los menores suministros se presentan en la demanda agrícola para la situación actual, los valores son menores al 60% de las garantías, esto quiere decir que en los 50 años evaluados en un 40% de los meses se ha producido déficits. Esta situación empeora si implementamos el caudal ecológico (propuesta 1), con valores que se sitúan alrededor del 50%, lo que puede generar un descontento en los usuarios. La utilización de las aguas tratadas (propuesta 2), eleva las garantías por encima de un 60% pero todavía no es suficiente para cumplir con los criterios de UTAH. Por ello se propone la construcción de un embalse en la quebrada Tinajas con capacidad de 40 hm<sup>3</sup>/año (propuesta 3) y la utilización conjunta de la reutilización de las aguas tratadas y el embalse (propuesta 4), en ambos casos las garantías de suministro y volumétricas son mayores al 90% en todas las comisiones de regantes, pero los criterios de UTAH solo se cumplen en la propuesta 4, en el cual los valores de garantías son superiores al 95%. En todas las comisiones de regantes tienen un comportamiento parecido para todas las propuestas evaluadas como se puede observar en la figura 21.

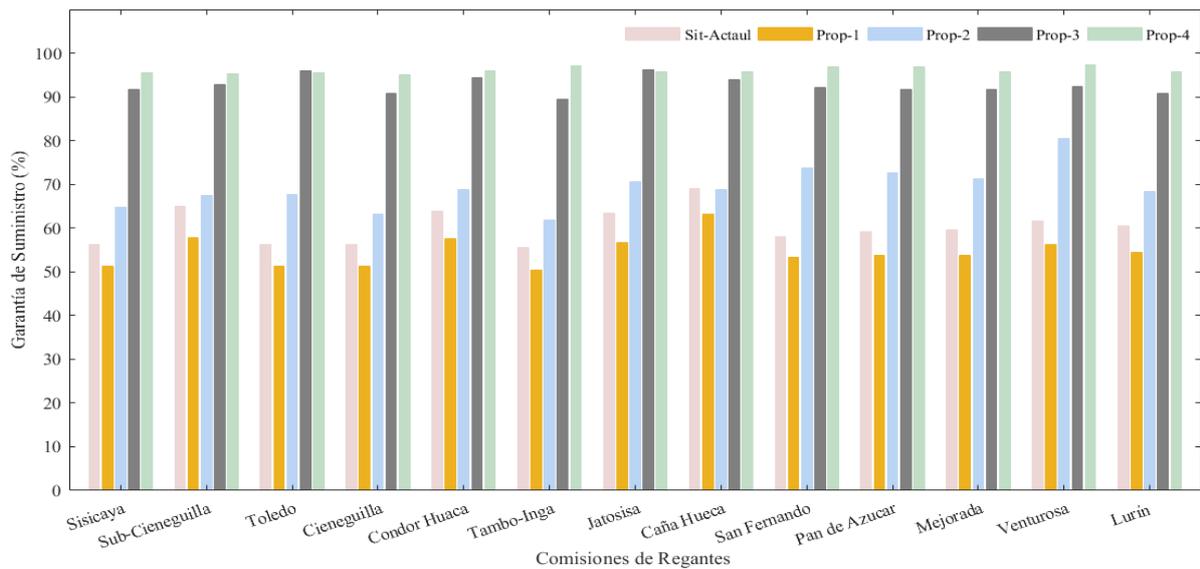


Figura 21: Garantías de suministro para las demandas agrícolas por comisión de regantes

Las garantías volumétricas representan el porcentaje del volumen de la demanda cubierta por alguna de las fuentes de agua. Al igual que en el caso de garantías de suministro las demandas diferentes a la agrícola tienen un 100 % de abastecimiento. En la figura 22, se observan las garantías volumétricas para las diferentes comisiones de regantes según las propuestas de solución a implementar. Los valores más bajos se presentan cuando se implementa los caudales ecológicos sin ninguna otra fuente de suministro, estos son inferiores a 65%. Los valores más altos son para las propuestas 3 y 4, cuando se implementa el embalse y la reutilización de las aguas tratadas con valores por encima de 95% en todas las comisiones de regantes. Si nos centramos en cada comisión de regantes la que presenta menores garantías volumétricas es la de Tambo Inga, en la situación actual y en las propuestas 1 y 2 con valores de 50 a 60 %, pero en las propuestas 3 y 4 mejora y tiene valores similares a las demás comisiones de regantes.

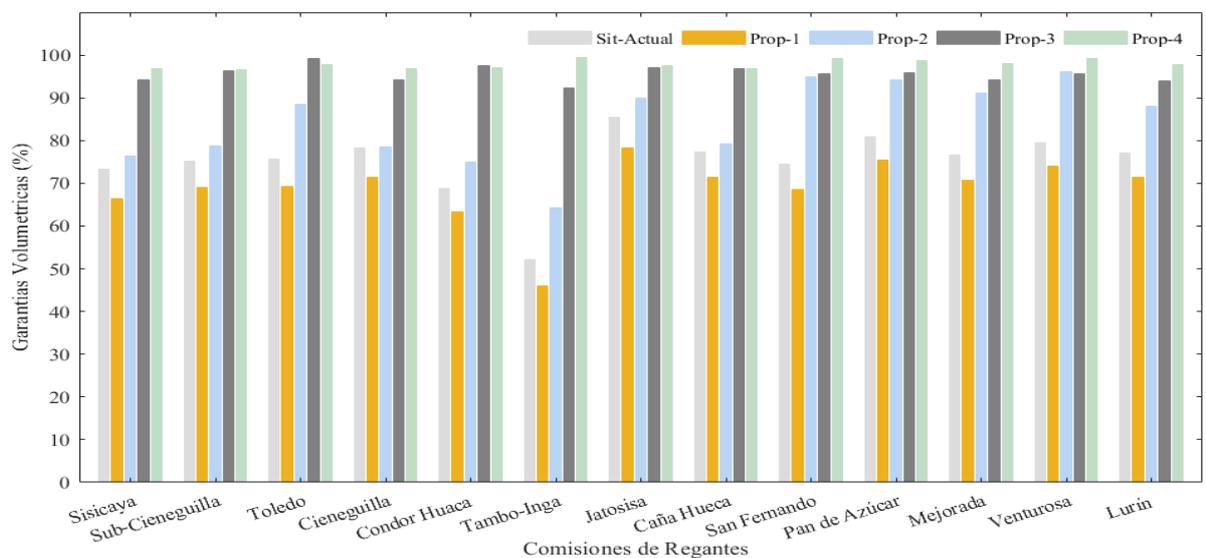


Figura 22: Garantías volumétricas para las demandas agrícolas por comisión de regantes

En la figura 23, se muestran los resultados de los déficits para uno, dos y 10 años para la situación actual y la propuesta 4, los mismos que se comparan con el criterio IPH08, para evaluar el cumplimiento en el caso de la demanda agrícola. En la situación actual los valores obtenidos en la simulación son mayores a los criterios establecidos, por ejemplo, para dos años en la comisión de Tambo Inga el valor es mayor al 100% cuando el límite establecido es de 75%. Lo mismo ocurre para 10 años con valores de hasta 500% de déficits haciéndose imprescindible la adopción de medidas para mitigar esos déficits. Todo lo contrario ocurre cuando se suman la reutilización de las aguas tratadas y la construcción de la presa (propuesta 4) con déficits para un año menores al 40% en todas las comisiones de regantes siendo inferior al 50% que se exige, para los dos años los valores están por debajo de 65% en la mayoría de los casos, cumpliendo de ser menores de 75%. En el criterio de los 10 años el valor no puede sobrepasarse a un déficit de 100%, los máximos valores alcanzado son de 97.7%, para la comisión de regantes de Cieneguilla, en todos los casos se cumple con lo establecido. En las otras demandas (industrial, poblacional, pecuaria y recreativa) al tener un abastecimiento de un 100 %, los déficits son mínimos, además no están expuestos a ningún tipo de estacionalidad porque son abastecidos con aguas provenientes del acuífero Lurín.

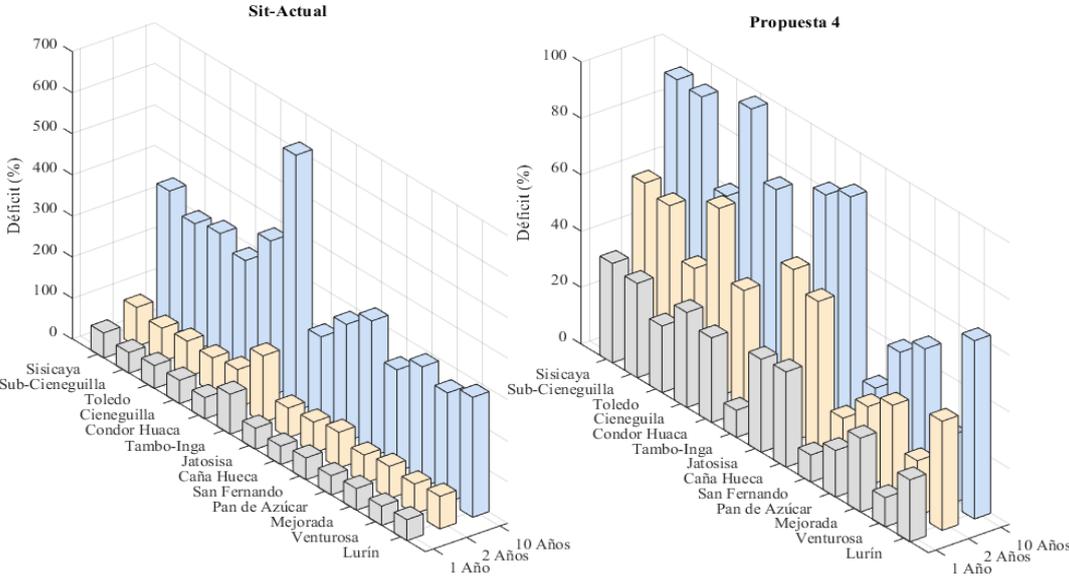


Figura 23: Déficit de las demandas agrícolas para 1 año, 2 años y 10 años.

**4.2.2. Respuesta del acuífero**

El acuífero de Lurín es una fuente de agua muy importante para las poblaciones y empresas asentadas en la parte baja de la cuenca, pero la sobreexplotación pone en riesgo su sostenibilidad. La recarga depende principalmente de las aguas infiltradas del riego por gravedad y las infiltraciones del lecho del río, estas últimas se calculan cercanas a 3.850 hm<sup>3</sup>/año (ANA, 2019). Estudios como el realizado por el Servicio de Agua Potable y

Alcantarillado de Lima (SEDAPAL) en el año 2014, calcularon que se podía explotar un caudal de  $0.482 \text{ hm}^3/\text{mes}$ , con un volumen de explotación de aproximadamente  $13.650 \text{ hm}^3/\text{año}$  (SEDAPAL, 2014). En el presente trabajo, para un volumen explotado de  $24.236 \text{ hm}^3/\text{año}$ , la recarga neta es negativa por lo que el acuífero tiene un balance negativo, esto también se puede corroborar porque en la época de estiaje en algunos tramos el río se vuelve perdedor. La dificultad para hacer estimaciones exactas del volumen utilizado por los usuarios genera incertidumbre en los resultados, haciéndose imprescindible la adopción de medidas para la medición más exacta.

En la figura 24, se observan los valores de la recarga neta y el volumen bombeado, según el caudal ecológico establecido en la legislación peruana. Los valores negativos en la recarga se producen en la situación actual y en la propuesta 1, llegando hasta un valor de aproximadamente  $2.231 \text{ hm}^3/\text{año}$  para la propuesta 1 y  $0.044 \text{ hm}^3/\text{año}$  en la situación actual. Esta situación se revierte con la propuesta de la construcción de la represa al pasar la recarga neta negativa a positiva y alcanza valores de hasta  $9.074 \text{ hm}^3/\text{año}$  en la propuesta 4, este volumen se podría utilizar para ampliar la frontera agrícola o en casos de sequías prolongadas en la cuenca. El volumen utilizado por las demandas en el año 2019 es de  $24.256 \text{ hm}^3/\text{año}$  ANA (2019), en la modelación de SIMGES el volumen es de  $24.235 \text{ hm}^3/\text{año}$  para la situación actual. El volumen de bombeo más elevado se produce en la propuesta 2, alcanzando un valor de  $26.620 \text{ hm}^3/\text{año}$ , lo que representa un incremento del 9.84 %, con respecto a la situación actual. En la propuesta 4, el volumen de bombeo es de  $22.520 \text{ hm}^3/\text{mes}$  siendo una reducción del 7.16 % con respecto a la situación actual.

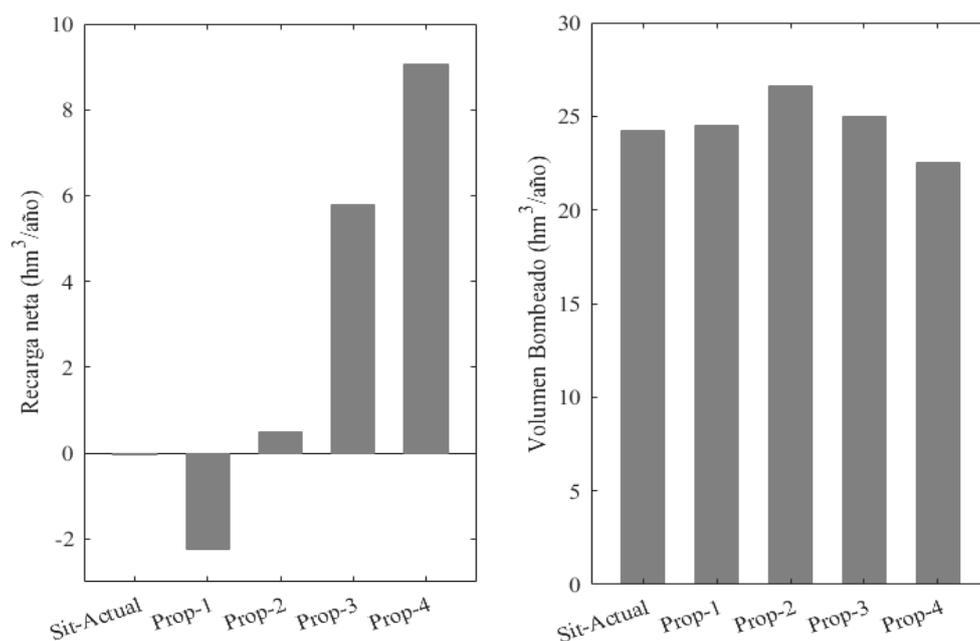


Figura 24: Volumen de la recarga neta y el volumen bombeado del acuífero Lurín

### 4.2.3. Embalse y canal de derivación

El embalse y el canal de derivación son alternativas de solución en las propuestas 3 y 4, para cubrir el déficit hídrico de las demandas agrícolas. Las aportaciones que se utilizarán para el embalse son la quebrada Tinajas y un canal de derivación del río Lurín que puede transportar un volumen de 25 y 15 hm<sup>3</sup>/mes para las propuestas 3 y 4. Lo que se buscó con el volumen del canal es derivar el mínimo posible para generar la menor alteración hidrológica en el cauce del río y poder cumplir con la implementación de los caudales ecológicos, satisfaciendo todas las demandas. El comportamiento del embalse se observa en la figura 25, en las dos propuestas que se establece como alternativa de solución. La capacidad es de 40 hm<sup>3</sup>/año y en la propuesta 3 es donde más veces se alcanza el valor mínimo, a diferencia de la propuesta 4, en la cual se tendría más reservas.

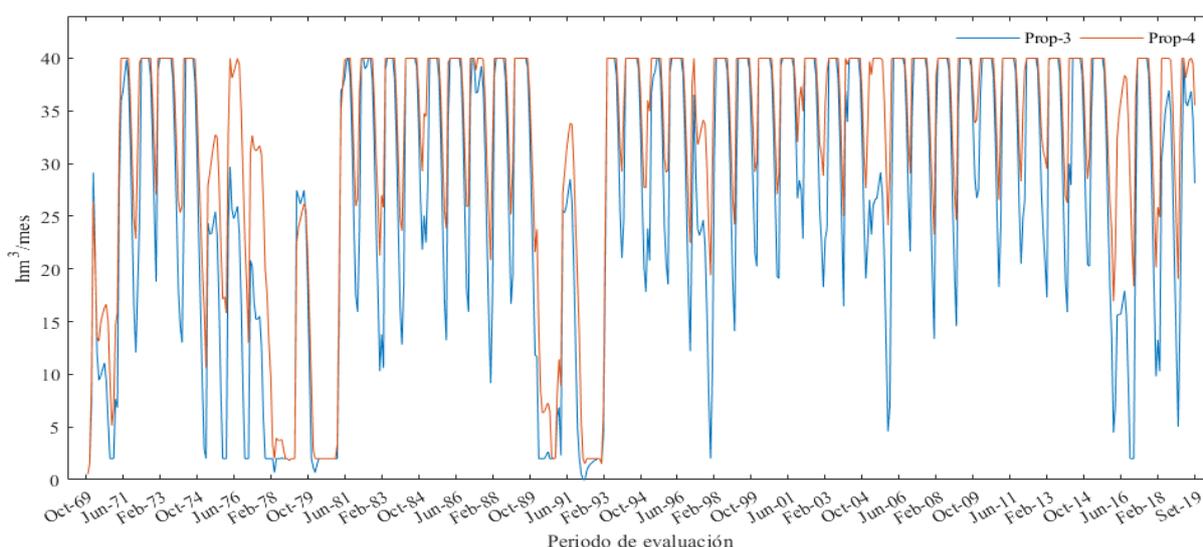


Figura 25: Variación del volumen embalsado para la propuesta 3 y 4

### 4.2.4. Cumplimiento de los caudales ecológicos en la bocatoma Lurín

Los caudales ecológicos tienen la función de reducir los impactos de las alteraciones que ocurren en los ríos por la utilización del agua para las actividades antrópicas. En la figura 26, se analizan el cumplimiento de los caudales asignados en el tramo de la bocatoma Lurín identificado como un punto crítico. En la situación actual (línea de color rojo) en los meses de agosto a noviembre el caudal circulante es cero, con la implementación de los caudales ecológicos se asegura un caudal mínimo que pase por este tramo, en el resto de los meses el caudal es superior o igual que el caudal ecológico calculado. La línea de color celeste representa el caudal natural sin ninguna intervención humana y como es de esperar es superior a los otros casos en todos los meses del año, llegando aproximadamente los 47 hm<sup>3</sup>/mes en el mes de marzo.

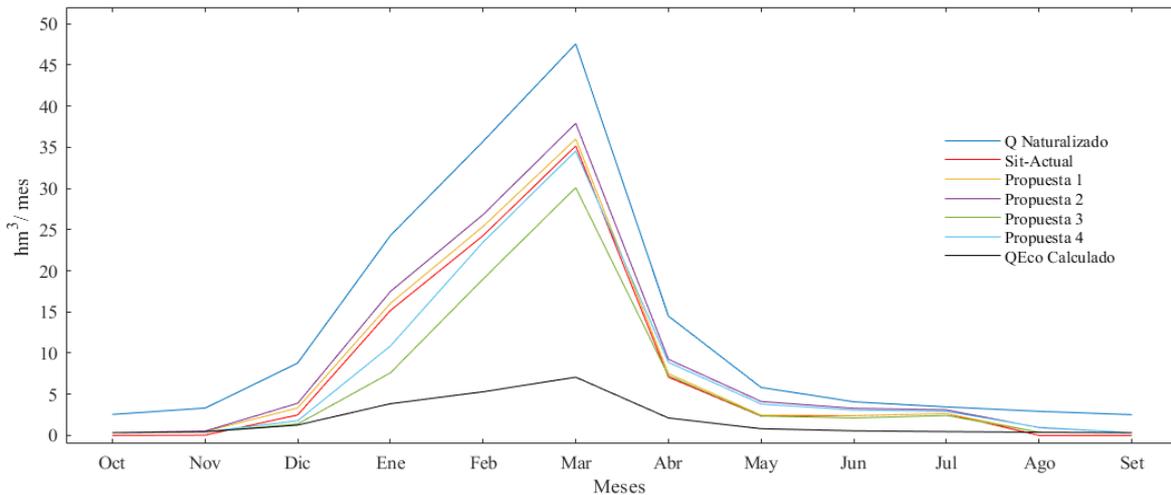


Figura 26: Promedio mensual de los caudales que pasan por el tramo de la bocatoma Lurín

#### 4.2.5. Respuesta del sistema a la implementación de los diferentes métodos de caudales ecológicos.

A continuación, se analizará cómo afectará a las garantías de suministro y volumétricas, a los déficits y al acuífero, la adopción del caudal ecológico con los diferentes métodos calculados en el ítem 4.1. Los promedios de las garantías de suministro y volumétricas de la demanda agrícola se muestran en la figura 27, según el método de caudal ecológico implementado, en los diferentes casos propuestos. En la propuesta 1, que es solo la implementación de caudales ecológicos se observa que los valores más bajos se obtienen con los métodos que en el volumen acumulado anual son mayores, así en porcentaje de garantía de suministro y volumétricas son de 48 y 58 % para el método de 7Q10, siendo menor que la situación actual en 20 y 8% respectivamente. La situación descrita anteriormente solo se presenta en la propuesta 1, en el resto de propuestas los valores son muy cercanos, inclusive en la propuesta 4, los resultados son similares en todos los métodos con valores por encima del 95% siendo superiores a la situación actual. Estos resultados nos indican que es posible satisfacer las demandas con la adopción de medidas que ayuden al cuidado del medio ambiente.

La figura 28, muestra los promedios de los déficits para un 1, 2 y 10 años de la demanda agrícola, los valores máximos se alcanzan en los déficits para los 10 años en la propuesta 1, con el caudal del método 7Q10 llegando hasta valores cercanos a los 600%. Las medidas adoptadas en cada propuesta, garantizan a los usuarios de las comisiones de regantes que los recursos hídricos que produce la cuenca puede cubrir sus demandas y con déficits que cumplen el criterio de UTAH. En la propuesta de la utilización de aguas tratadas y la construcción de la presa, los déficits generados son menores a los requeridos con valores promedios de 27, 40 y 60 % para

1, 2 y 10 años respectivamente. Los mayores déficits se alcanzan con los métodos que utilizan un mayor volumen de agua para abastecer al caudal ecológico.

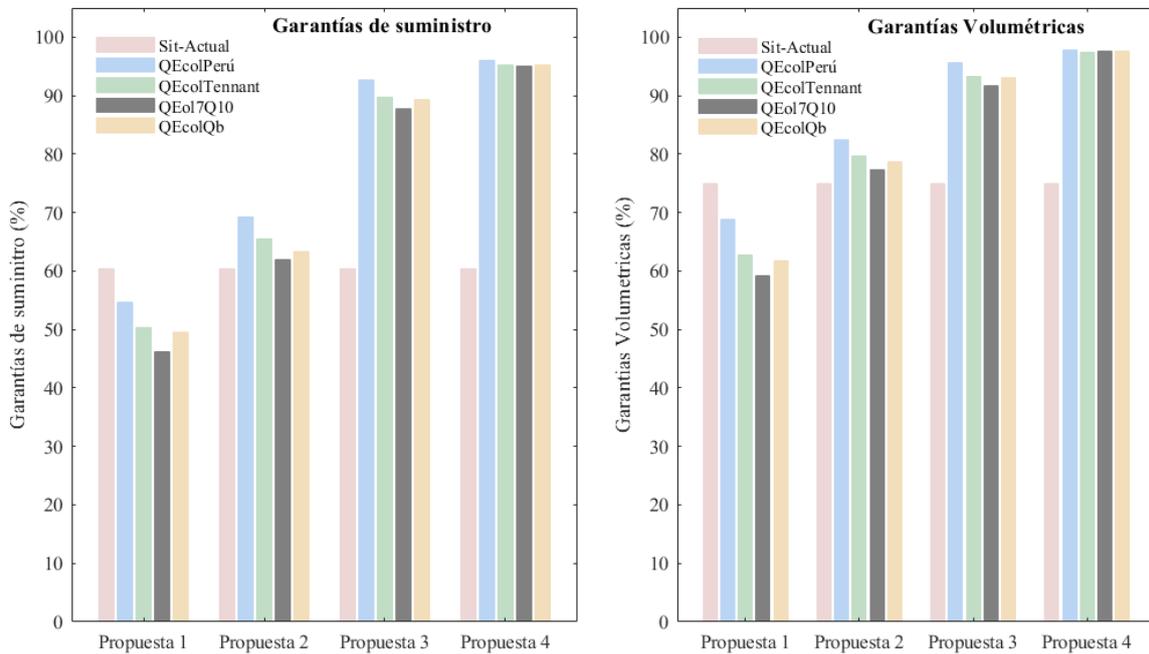


Figura 27: Promedio de las garantías de suministro y volumétricas de la demanda agrícola según el caudal ecológico.

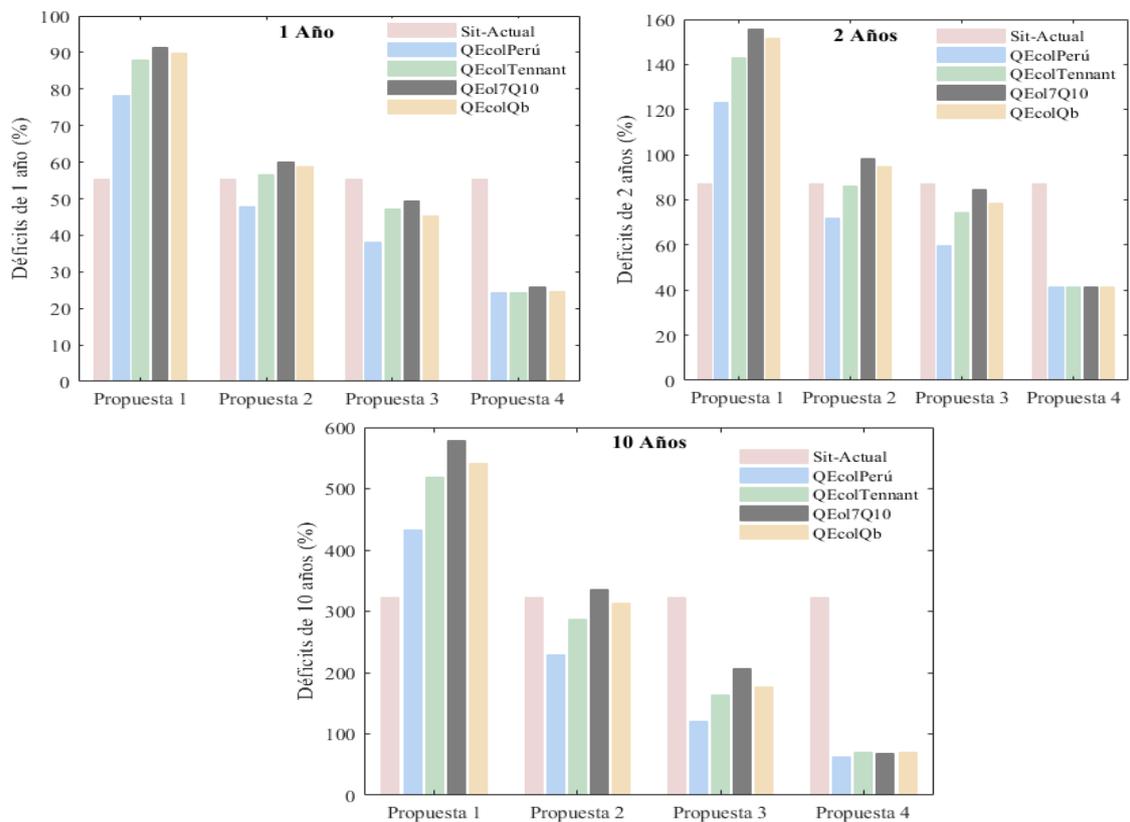


Figura 28: Promedio de los déficits para 1, 2 y 10 años de las demandas agrícolas según los caudales ecológicos

En la figura 29, se observan los valores de la recarga neta y el volumen bombeado para la situación actual y las cuatro propuestas, según los cuatro métodos de caudal ecológico, se puede verificar que a mayor volumen de caudal ecológico mayor será el volumen bombeado, lo que ocasiona que la recarga neta se vuelva negativa. Los valores negativos en la recarga se producen en las propuestas 1 y 2, llegando hasta un valor de 5.547 hm<sup>3</sup>/año para la propuesta 1 con el caudal ecológico de 7Q10. Esta situación se revierte con la construcción de la represa al pasar la recarga neta de negativa a positiva y alcanza valores de hasta 9.074 hm<sup>3</sup>/año en la propuesta 4, con el caudal ecológico según la legislación peruana. El volumen de bombeo más elevado se produce en la propuesta 2 con caudal ecológico 7Q10, alcanzando un valor de 27.500 hm<sup>3</sup>/año, lo que representa un incremento del 13.5 %, con respecto a la situación actual. Con respecto a la propuesta 4, el volumen de bombeo es de 22.520, 23.499, 24.641 y 23.837 hm<sup>3</sup>/año para los métodos de 15% del caudal mensual, Tennant, 7Q10 y caudal básico (Qb) respectivamente, en todos los casos hay una reducción del volumen bombeado con respecto a la situación actual y las otras propuestas.

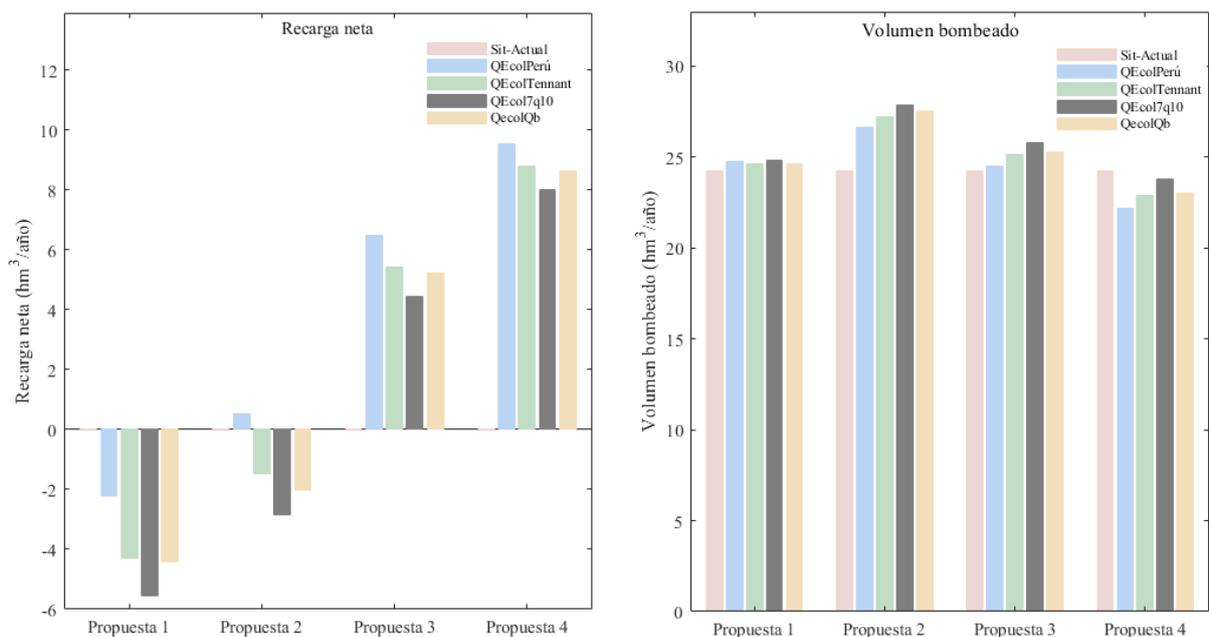


Figura 29: Volumen de la recarga neta y el volumen bombeado del acuífero Lurín

### 4.3. Índices de alteración hidrológica (IAH)

Las evaluaciones de los IAH en los ríos normalmente se realizan en un solo punto, pero conocer lo que sucede en un tramo más grande puede servir para identificar los puntos donde se presentan más diferencias entre los regímenes naturales y alterados, especialmente en aquellos ríos que no tienen infraestructura de regulación. Los doce IAH evaluados para la situación actual se observan en la figura 30, la alteración se va haciendo más notoria cuando el río se

acercas a la desembocadura en el océano, porque existe canales de derivación hacia las demandas agrícolas a lo largo del cauce. Los tramos con valores más bajos en algunos IAH son en el puente Mototaxi (km 25, partiendo desde Antapucro) y en mayor medida en la bocatoma Lurín donde se ha observado que en los meses de estiaje no hay caudal circulando por el cauce. Los índices con valores más bajos son IAH 10, IAH 11 y IAH 12, llegando hasta cero en el tramo de la bocatoma Lurín hasta la PTAR San Bartolo, estos índices evalúan los caudales en la época de estiaje o sequías.

El índice que no ha sufrido ningún tipo de alteración es el IAH 9, que corresponde a la estacionalidad de avenidas, porque en la cuenca cuando sucede avenidas las bocatomas u obras de captación y derivación muchas veces son arrastradas por la corriente, por lo que no se modifica el caudal. Otro de los índices que varía muy poco (1 - 0.97) es el que corresponde a índices de estacionalidad de mínimos (IAH 6), debido a que el caudal mínimo es parecido todos los años. Los índices que reducen su valor en el tramo de la bocatoma Lurín aparte de los mencionados en el párrafo anterior son el IAH 2 con valores de 0.3 y el IAH 5 cuyo valor es de 0.44, quiere decir que para estos índices el tramo se encuentra en estado deficiente, pero después mejoran sus valores por las aguas de la PTAR San Bartolo.

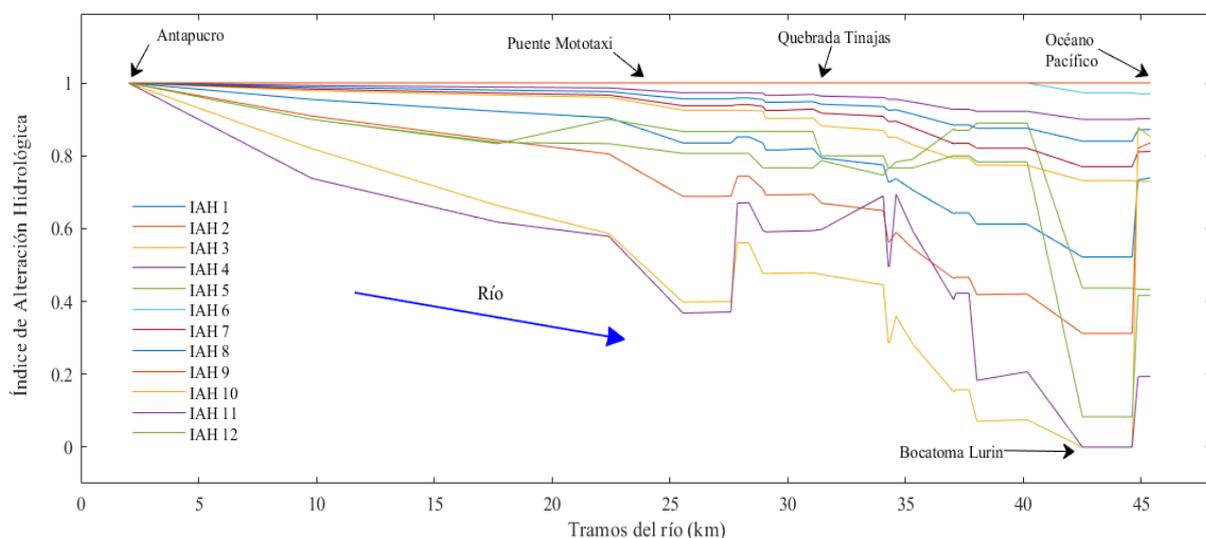


Figura 30: IAH en la situación actual en todos los tramos del río Lurín

#### 4.3.1. Comportamiento de cada uno de los IAH según las propuestas a implementar

En la figura 31, se observan los IAH desde 1 al 6 comparándose entre las diferentes propuestas implementadas, en el caso de las variaciones de las aportaciones anuales (IAH 1), los resultados más altos son para la situación actual y las propuestas 1 y 2 con valores superiores a 0.87, hasta el tramo comprendido entre la bocatoma Lurín y la PTAR San Bartolo donde los valores varían entre 0.6 a 0.7. En las propuestas 3 y 4, con la reutilización de las aguas tratadas y la

construcción de la presa, hay un descenso de los valores en el tramo desde Antapucro hasta la quebrada Tinajas donde recupera sus valores, pero estos son siempre menores que en los otros casos. Los descensos son explicados porque la derivación de caudal a la presa reduce el caudal que pasa por el cauce del río. El valor mínimo alcanzado es de 0.48 después de la bocatoma Lurín para la propuesta 3. El IAH 2 que es la magnitud de las aportaciones mensuales tiene un comportamiento similar en todas las propuestas evaluadas. La mayoría de los tramos presenta valores superiores a 0.6, ubicándose en el nivel 2 clasificándose en buen estado según la tabla 8. La situación actual (línea continua de color rojo) llega a su valor más bajo en el tramo después de la bocatoma Lurín con valores por debajo de 0.4, lo que quiere decir que ese tramo está muy alterado, pero al final del tramo se recupera por la aportación de la PTAR San Bartolo.

Los valores de la variabilidad habitual (IAH 3) se observan en la figura 31, es uno de los índices que presenta más diferencia entre las propuestas, siendo la situación actual y las propuestas 1 y 2, en las que se alcanza los valores más altos lo que indica poca alteración. Los valores más bajos son para la propuesta 3, siendo menores a 0.6, en la propuesta 4 los valores varían entre 0.6 a 0.8, considerados en buen estado. En los IAH 4 y 6 varían muy poco en todas las propuestas evaluadas y su valor es superior a 0.8, considerado en muy bueno estado. Estos índices en la situación actual presentan poca variabilidad en todos los tramos y su valor es superior a 0.9, esto quiere decir que los caudales máximos y mínimos no presenta variación debido a que no existe regulación en el río, siendo muy similares para el régimen natural y alterado. Los caudales mínimos que se utilizan para el IAH 6 no se modificarán con las medidas adoptadas y siendo los caudales mínimos muy similares a los caudales ecológicos calculados, debido a la marcada estacionalidad del régimen hidrológico del río.

En el índice de estacionalidad de máximos (IAH 5) en la situación actual y las propuestas 1 y 2 entre Antapucro y la bocatoma Lurín los valores son superiores a 0.8, en este último tramo todos los valores bajan a 0.43, hasta la desembocadura del río en el Océano Pacífico. En las propuestas 3 y 4, hay un salto brusco después de Antapucro, debido al canal que deriva agua a la presa, luego los valores se mantienen estables alrededor de 0.4 a 0.6, llegando a mejorar los valores hasta 0.5 en el tramo después de la bocatoma Lurín. Estos 6 primeros índices están clasificados como valores habituales.

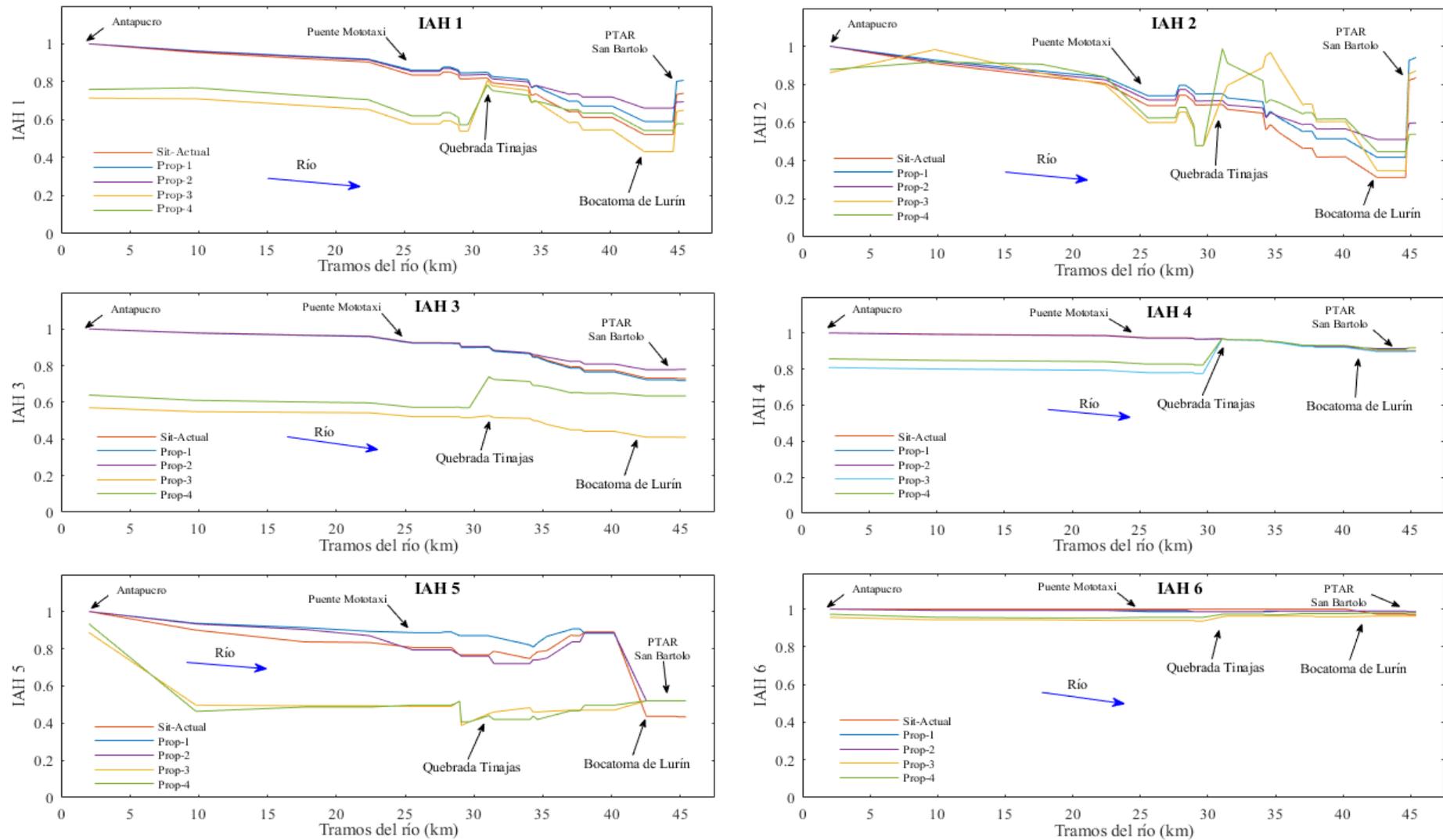


Figura 31: Variación de cada uno de los IAH del 1 al 6 según las propuestas evaluadas en los tramos del río.

Los valores del índice de magnitud de avenidas habituales (IAH 7) se observan en la figura 32. En la situación actual y las propuestas 1 y 2 el valor del índice es superior a 0.8, lo que nos indica poca o nula alteración hidrológica. Los valores cambian cuando se propone como medida para abastecer a la demanda agrícola la construcción de la represa, ubicándose en un rango de 0.6 a 0.8, los valores cercanos al 0.8 que es la línea de color verde corresponde a la propuesta 4. El índice de variabilidad de avenidas habituales (IAH 8) y el de estacionalidad de avenidas (IAH 9), los valores son superiores a 0.8, lo que se puede decir que hay poca variabilidad de las avenidas habituales. En el caso del IAH 9, el valor es 1, lo que indicaría ninguna variabilidad. Estos tres índices están clasificados como valores extremos máximos y su mínima variación se refleja en la realidad, porque en época de avenidas el río es muy caudaloso y sus aguas llegan al océano, también porque no hay una infraestructura de regulación y la que se propone construir no se encuentra en el cauce principal de río Lurín.

En el caso del IAH 10, los valores se observan en la figura 32. El valor mínimo en la situación actual llega a ser 0, en los tramos aguas abajo de la bocatoma Lurín, pero después se recupera por el caudal vertido por las PTARs San Bartolo y Julio C. Tello. Al inicio de los tramos los valores están alrededor de 0.8, que baja cuando el agua se deriva a las comisiones de regantes, en la propuesta de implementación de los caudales ecológicos (propuesta 1) hay una mejora en el tramo después de la bocatoma Lurín pasando de 0 a 0.2. El índice de variabilidad de las sequías habituales (IAH 11) es el índice que presenta mayor variabilidad en los tramos del río, llegando a ser crítico en el tramo después de la bocatoma Lurín con valor de cero. En algunos casos se mejora la situación actual con la implementación del caudal ecológico, la utilización de las aguas tratadas y la construcción de la presa, pero no en los tramos después de la bocatoma Lurín, con valores de 0 en todos los casos.

El IAH 12 evalúa la estacionalidad de sequías, cuyos valores mínimos corresponden a la situación actual en los tramos después de la bocatoma Lurín llegando hasta 0, que corresponde a una condición muy alterada. Con la implementación de los caudales ecológicos los valores en este tramo suben y superan en la mayoría de casos el valor de 0.6, lo que lo clasifica como una alteración en estado moderado. Estos últimos índices se clasifican como valores extremos mínimos y son los que más alteración presentan, porque en época de estiaje no hay caudal en algunos tramos del río, razón por la que se plantea la implementación de los caudales ecológicos.

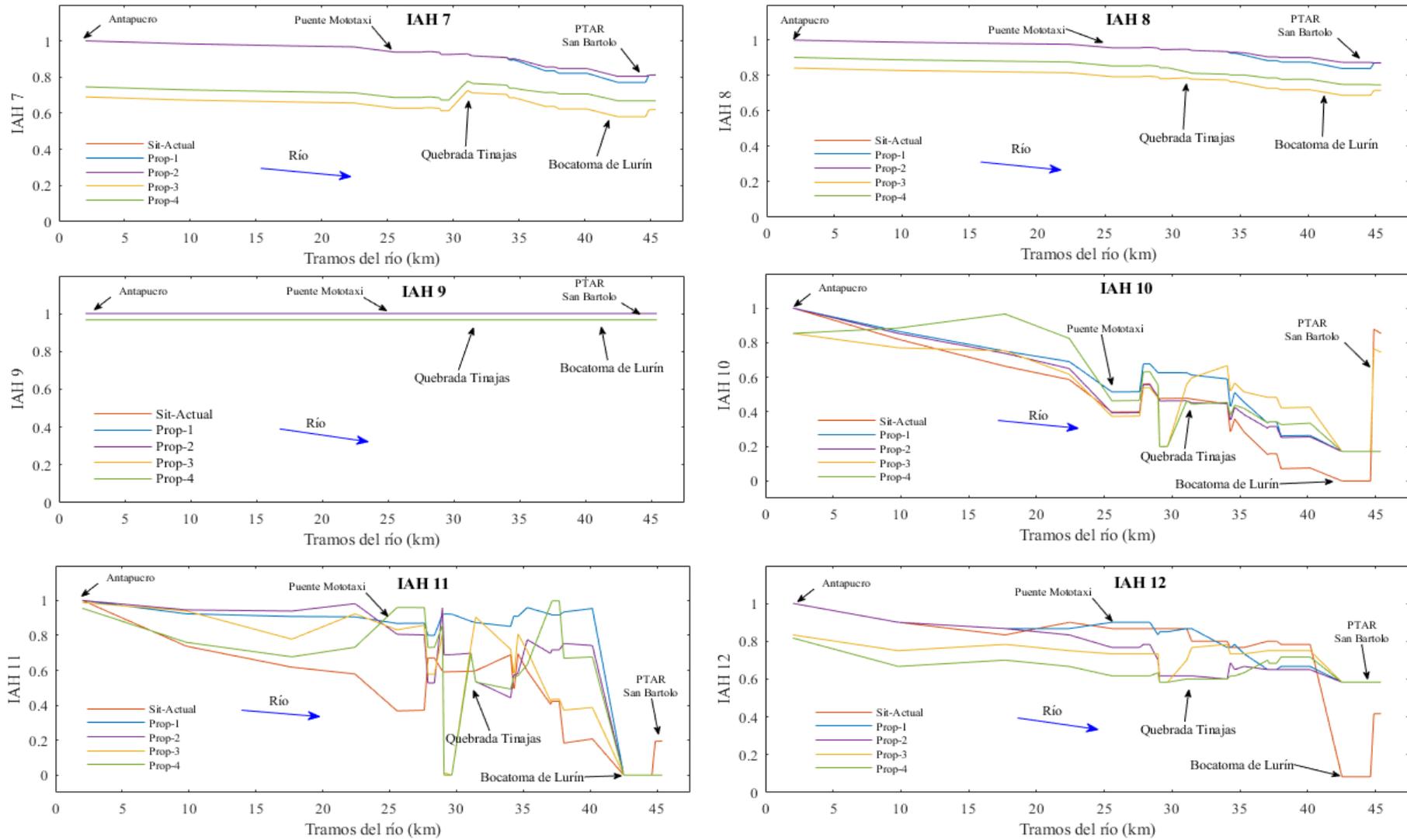


Figura 32: Variación de cada uno de los IAHI del 7 al 12 según las propuestas evaluadas en los tramos del río.

### 4.3.2. Índices de alteración hidrológica en la bocatoma Lurín

En los resultados de los IAH por tramos del río, el tramo que presentó valores más bajos fue el ubicado después de la bocatoma Lurín. Los valores de los índices 10, 11 y 12 que evalúan los caudales en sequías son 0 en la situación actual, como se puede observar en la figura 33. La respuesta del IAH12 a la implementación de los caudales ecológicos es buena porque se alcanza valores mayores o cercanos a 0.6, en el caso del IAH10 hasta un valor de 0.2. Pero en el caso del IAH 11 no mejora el valor y sigue siendo 0. En ríos con largos periodos de caudales bajos, las desviaciones o la extracción directa de agua tanto para riego, ganado y suministro de agua doméstica afectan principalmente a los componentes de bajo caudal (De Girolamo et al., 2017). Esto último estaría ocurriendo en el río Lurín porque los índices 10, 11 y 12, son los encargados de evaluar los valores extremos mínimos.

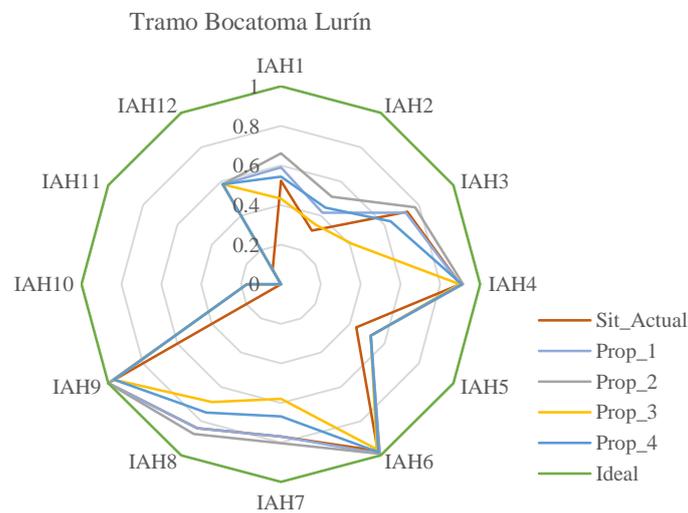


Figura 33: IAH en el tramo de la bocatoma Lurín

### 4.3.3. Índice de alteración hidrológica global

El IAH global se observan en la figura 34, son valores promedios de todos los tramos desde la estación hidrométrica de Antapucro hasta la desembocadura del río en el Océano Pacífico y de todos los índices, para cada uno de las propuestas evaluadas. En la situación actual el valor alcanzado es de 0.78, ubicándose en el nivel 2, que corresponde a una clasificación de buen estado, se esperaba valores más bajos, por los tramos sin caudal circulante, pero teniendo en cuenta que los mayores volúmenes de descarga son en los meses de avenidas, es un valor coherente. Los porcentajes de descarga del río Lurín son de un 68.3% del volumen en los meses de avenida (enero-marzo), un 20.3% en los meses de transición (abril y diciembre) y en los 7 meses restantes (mayo – noviembre) un 11.4% (INRENA, 2004). Los mejores resultados se obtienen con las propuestas 1 y 2, que mejoran la situación actual, en ellos se implementa los

caudales ecológicos sin la priorización del cumplimiento de las garantías de las demandas agrícolas, con valores de 0.82 y 0.8 respectivamente.

En las propuestas 3 y 4, hay un empeoramiento de los IAH debido principalmente a la reducción de los volúmenes de agua en la época de avenida que se utilizan para el llenado del embalse, siendo los caudales ecológicos insuficientes para controlar este descenso. Los nuevos valores de los IAH son 0.69 y 0.70, pero siguen estando en el nivel 2 según la tabla 8 que corresponde a un buen estado, pero los resultados son los esperados porque la construcción de un embalse es una gran alteración para los regímenes de caudales naturales en los ríos (Zhang et al., 2015; Radecki-Pawlik et al., 2020). Pero los embalses son imprescindibles en cuencas con estacionalidad de caudales, para garantizar el abastecimiento de las demandas.

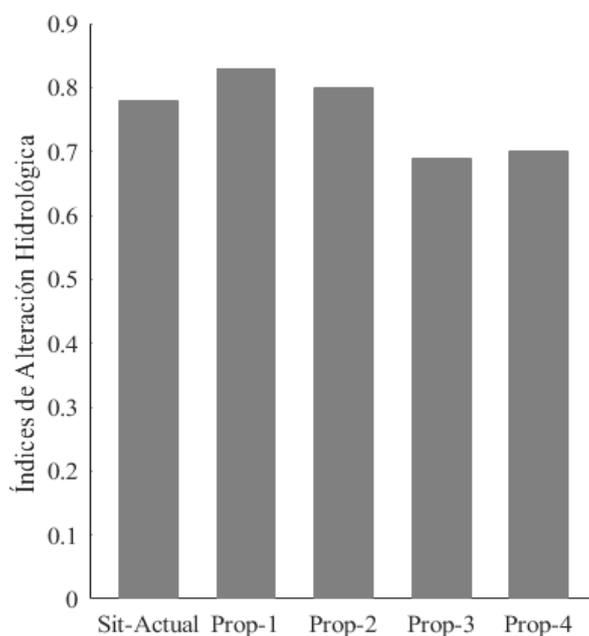


Figura 34: Resultados del IAH global para las propuestas evaluadas

#### **4.3.4. Influencia de los caudales ecológicos en el cálculo de los índices de alteración hidrológica.**

El volumen del caudal ecológico varía según el método utilizado para su cálculo y su influencia en los IAH, se observan en la figura 35, para cada una de las propuestas. En la propuesta 1 y 2, los resultados obtenidos con la implementación de los caudales ecológicos son mayores de la situación actual, pero entre ellos no hay una diferencia marcada y sus valores varían entre 0.82 a 0.85. En las propuestas 3 y 4, los valores son inferiores a la situación actual por la derivación de las aguas para el llenado del embalse, que luego se utiliza en la satisfacción de las demandas agrícolas y deja de circular por el cauce del río. En estos dos últimos casos los resultados son

similares para todos los métodos, por lo que la aplicación de cualquiera de ellos el resultado final será similar. Los valores en la propuesta 4 con el método del 15% del promedio mensual establecido por la legislación peruana es de 0.70, por Tennant es de 0.71 y para 7Q10 y Qb es de 0.72 y 0.73 respectivamente, ubicándose en el nivel 2 de la tabla 8, lo que indica que hay buen estado hidrológico en el río.

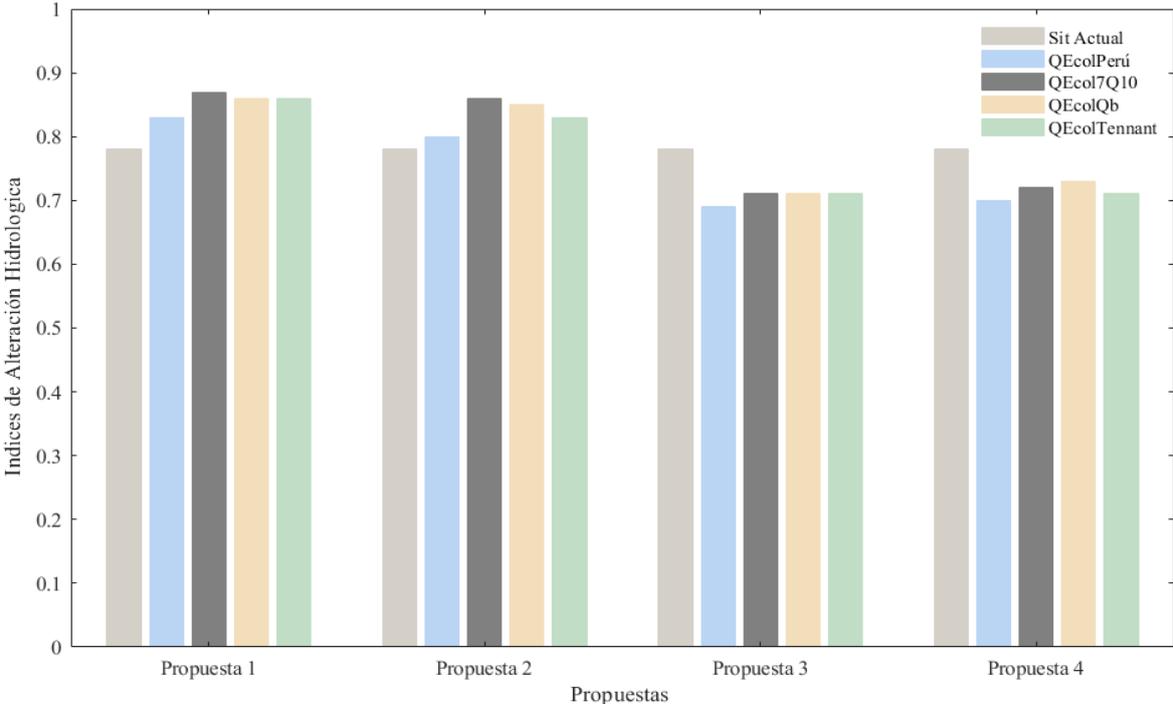


Figura 35: IAH global según el tipo de caudal ecológico para las propuestas evaluadas.

**4.4. Resumen de los resultados obtenidos en la gestión de los recursos hídricos del río Lurín.**

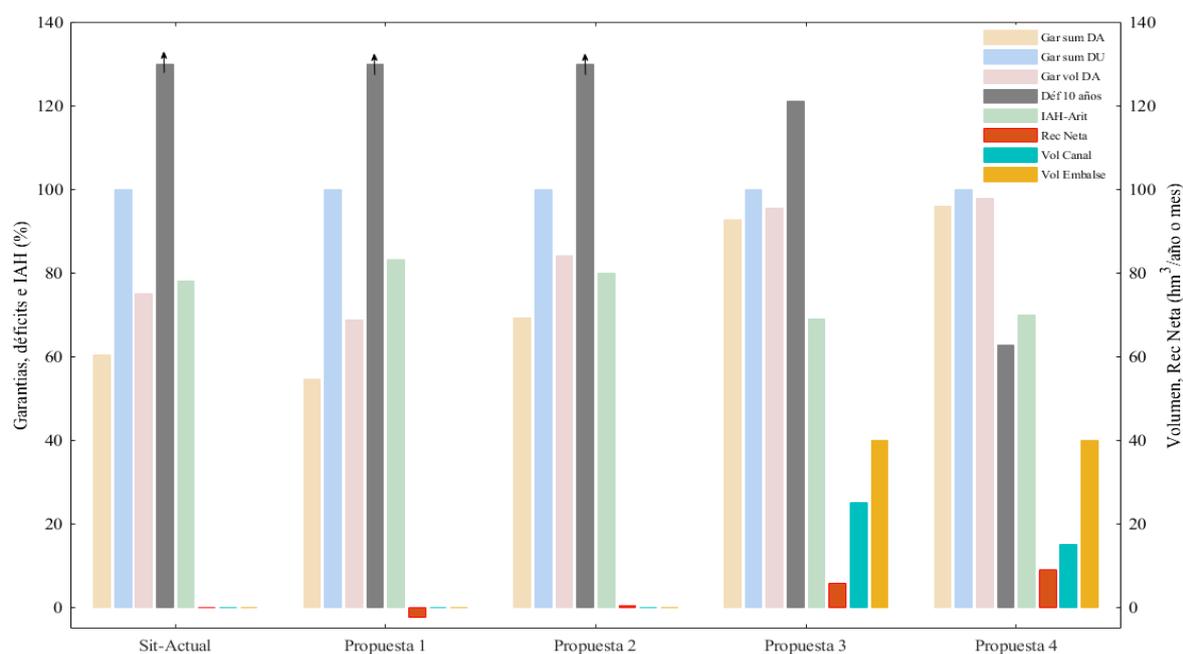
La gestión integrada de los recursos hídricos exige tener en cuenta a todos los sectores estén directamente o indirectamente involucrados. De los resultados del modelo se desprende que la necesaria implantación de los caudales ecológicos en la cuenca del río Lurín traerá un incremento de los déficits agrarios del orden del 14.3 % con graves consecuencias económicas y sociales, lo que puede generar un descontento en la población. En la tabla 13 y figura 36, se puede observar cómo será la respuesta de cada indicador según las propuestas planteadas para un caudal ecológico según lo establecido por la legislación peruana, desde la respuesta del acuífero hasta la alteración hidrológica que provocará cada medida a implementar. En algunos de los escenarios hay indicadores con valores de cero, debido que no existe esa medida o no está contemplado como alternativa de solución en esa propuesta. La flecha que se observa para el déficit de 10 años, es porque los valores son mayores, que pueden llegar hasta valores de más de 500%, en el caso de la situación actual.

Las garantías volumétricas y de suministro para las demandas urbanas son del 100% en los 5 escenarios evaluados, debido a que tienen como fuente principal a las aguas provenientes del acuífero. En la demanda agrícola estas garantías mejoran cuando se utilizan otras fuentes de agua, pasan de alrededor un 60% en la situación actual y propuesta 1, hasta valores por encima de 95% para las propuestas 3 y 4. Los déficits de 1, 2 y 10 años para la demanda agrícola solo se cumple en la propuesta 4, cuando al sistema se sumarán la reutilización de las aguas tratadas para riego agrícola y la construcción de una presa de 40 hm<sup>3</sup>/año ubicada en la quebrada Tinajas. El volumen de agua de las PTARs que se pueden reutilizar son de aproximadamente 30 hm<sup>3</sup>/año, la reutilización no sería nuevo en el Perú, porque en un estudio realizado por Dirk (2015) señala que se utiliza cerca del 1% de las aguas tratadas, principalmente en riegos de áreas verdes urbana. En la misma zona ya existe actualmente la reutilización de las aguas de la PTAR Manchay para la agricultura. Debemos tomar en cuenta que, sin la construcción de la presa y la reutilización de las aguas tratadas, se producirá una sobreexplotación del acuífero, con las consecuencias de volver el río perdedor y la intrusión salina, eso se demuestra en la propuesta 1, el volumen de la recarga neta es negativa en 2.231 hm<sup>3</sup>/año.

Con respecto al volumen bombeado este desciende cuando aumenta la oferta de agua, en la situación actual el volumen es de 24.236 hm<sup>3</sup>/año y en la propuesta 4 es de 22.205 hm<sup>3</sup>/año, con recarga neta positiva lo que permitiría ampliar las áreas de cultivo. Las fuentes de agua para el suministro del embalse son 2: la primera es la misma quebrada Tinajas donde se construirá la presa y la segunda es un canal que aprovechara las aguas del río Lurín, en este se establece un caudal de 25 hm<sup>3</sup>/mes para la propuesta 3 y 15 hm<sup>3</sup>/mes para la propuesta 4. Estos volúmenes lo que buscan es generar el menor índice de alteración hidrológica. Los índices de alteración hidrológica se presentan en porcentaje en la figura 36, aunque en la situación actual y las 4 propuestas evaluadas el valor global indica que el río se encuentra en buen estado, oculta valores bajos en algunos tramos, principalmente de los índices que evalúan los valores extremos mínimos, que es mejor evaluar a cada uno de ellos.

**Tabla 13: Resumen de resultados de la gestión de los recursos hídricos en la parte baja del río Lurín.**

Características del sistema	Unid	Situación Actual	Propuesta 1	Propuesta 2	Propuesta 3	Propuesta 4
Gar Sum y Vol. DU	%	100	100	100	100	100
Gar Suministro DA	%	60.35	54.7	69.2	92.62	96.03
Gar Volumétricas DA	%	74.96	68.88	84.2	95.58	97.77
Vol. Q Ecológico	hm3/año	-	20.678	20.678	20.678	20.678
Déficit 1 año DA	%	55.43	78.1	47.95	38.22	24.38
Déficit 2 años DA	%	87.1	123.2	72	59.76	41.4
Déficit 10 años DA	%	322.72	433.5	229.05	121.09	62.76
IAH Global		0.78	0.83	0.80	0.69	0.70
Recarga Neta	hm3/año	-0.044	-2.231	0.506	5.781	9.074
Vol. Bombeado	hm3/año	24.235	24.486	26.62	24.957	22.52
Caudal del Canal	hm3/mes	-	-	-	25	15
Volumen del embalse	hm3/año	-	-	-	40	40
Vol. de Reutilización	hm3/año	-	-	30.589	-	30.589



**Figura 36: Resultados generales de la implementación de medidas en la gestión del agua en la parte baja del río Lurín.**

## V. Conclusiones

- El cálculo del caudal ecológico en la estación hidrométrica de Antapucro fue de 20.678, 32.166, 35.021 y 40.251 hm<sup>3</sup>/año para los métodos según la legislación peruana, Tennant, caudal básico (Qb) y 7Q10. Al comparar los métodos se tiene que el determinado según la legislación peruana es inferior a los otros en 55.56, 69.36 y 94.25 % respectivamente. Los valores anuales de los caudales ecológicos en la bocatoma Lurín son 22.688 y 35.292 hm<sup>3</sup>/año para Perú y Tennant, representan un incremento de 10%, con respecto a los valores calculados en la estación hidrométrica de Antapucro debido principalmente a la aportación de la quebrada Tinajas en la época de avenidas
- El mes que se alcanza el caudal máximo es marzo en todos los métodos, y el valor corresponde al método de Tennant con 4.5 m<sup>3</sup>/s, seguido del 7Q10 con 3.0 m<sup>3</sup>/s y por último los otros dos métodos con 2.60 m<sup>3</sup>/s. Los meses de menor valor son desde mayo hasta noviembre, en los cuatro métodos los valores son similares y varían entre 0.5 a 1 m<sup>3</sup>/s. La implementación del caudal ecológico es necesaria en los tramos críticos (bocatoma Lurín) para mejorar las condiciones en los meses de estiaje, especialmente en setiembre, octubre y noviembre, porque en el resto de meses el caudal que circula es superior al caudal establecido en los métodos de cálculo, para todas las propuestas evaluadas.
- En el modelo de gestión desarrollado, se evaluaron la situación actual y cuatro propuestas para la mejora de la gestión. La implementación de caudales ecológicos (propuesta 1), baja las garantías volumétricas de la demanda agrícola de 74.96 % a 68.88%, haciéndose necesario la implementación de fuentes alternativas como la reutilización de las aguas tratadas (propuesta 2) y la construcción de un embalse de 40 hm<sup>3</sup>/año (propuesta 3), con los que se logra subir a 84.2 y 95.58 % respectivamente. En la propuesta 4, se hace uso de la reutilización y el embalse, llegando hasta un 96.03 y 97.76 % de garantía de suministro y volumétrica cumpliendo con los criterios de déficits. En la situación actual y en todas las propuestas la demanda poblacional, pecuaria, industrial y recreativa se abastece con aguas del acuífero Lurín por lo que tiene el 100 de abastecimiento y no sufre ningún déficit, contrario a lo que ocurre con la demanda agrícola.
- La reutilización de las aguas tratadas (30.589 hm<sup>3</sup>/año) y la construcción de la presa de 40 hm<sup>3</sup>/año en la subcuenca de la quebrada Tinajas (propuesta 4), permiten hacer un uso sostenido los recursos hídricos de la parte baja de la cuenca del río Lurín. El acuífero pasa de tener una recarga neta negativa a positiva con aproximadamente 9.074 hm<sup>3</sup>/año con un

volumen de bombeo de 22.534 hm<sup>3</sup>/año, que puede permitir la ampliación de las áreas agrícolas. Además, se demuestra que no es necesario hacer el transvase de 96 hm<sup>3</sup>/año de la vertiente del Amazonas como está establecido en el plan estratégico de los recursos hídricos desarrollado por la ANA en el 2013.

- La alteración hidrológica del río Lurín desde la estación hidrométrica de Antapucro hasta el Océano Pacífico, varía según la derivación del agua por parte de las comisiones de regantes, al inicio del trayecto se observa poca alteración, a diferencia de los tramos finales que en algunos índices hay valores de 0. El IAH global indica que el río está en buen estado, con valores de 0.78, 0.83, 0.80, 0.69 y 0.70 para la situación actual y las propuestas de la 1 a la 4 respectivamente, como es de esperar las últimas propuestas los valores son menores por la construcción del embalse. Pero en todas ellas hay un tramo crítico para los índices que se obtiene los resultados más bajos (IAH 10, IAH 11 y IAH 12), con valores en la situación actual de cero, que en el caso del primero y el último se mejoran con los caudales ecológicos, pero el IAH 11, sigue siendo cero.
- En la evaluación de la afectación de los déficits de las demandas y la alteración hidrológica si se optaba por la implementación de un método de caudal ecológico u otro, los resultados nos muestran que la afectación es mínima, aunque en la propuesta 4, que es la que se cumple con los criterios de garantía, los resultados son similares. Esto se debe principalmente a que en la época de estiaje los caudales ecológicos son similares para todos los métodos y también porque se tiene resultados de satisfacción de la demanda similares.
- En el presente TFM se ha planteado una metodología de gestión integral de cuencas en la que se considera la satisfacción de la demanda e indicadores ambientales lo que ha permitido plantear soluciones de compromiso para ambos sectores.

## **VI. Recomendaciones**

- Fortalecer la institucionalidad de los Organismos encargadas de la gestión del agua en la cuenca, principalmente en aquellas que se encargan de la fiscalización de la calidad y cantidad del agua.
- Hacer una valoración socioeconómica de cada una de las propuestas desarrolladas en el presente estudio y hacer una sensibilización de la población en temas de cuidado del río y la importancia de los caudales ecológicos para la preservación de especies y mejora de la calidad del agua.
- Se recomendaría la implementación de los caudales ecológicos, para la mejora de las condiciones ambientales en el río Lurín y en cumplimiento de las disposiciones legales que actualmente existen.
- Hacer un estudio de la intrusión salina en el acuífero Lurín.

## VII. Bibliografía

- Autoridad Nacional de licencias Ambientales - Colombia (2013). *Metodología para la estimación y evaluación del caudal ambiental en proyectos que requieren Licencia Ambiental*. 66.
- Alcazar Montero, J. (2007). El método del Caudal básico para la determinación de Caudales Mantenimiento Aplicada al Ebro. *Tesis*.
- ANA (Autoridad Nacional del Agua - Perú). (2013). *Monitoreo de la Calidad de Agua Superficial de la Cuenca del río Lurín*. (2), 43. Retrieved from <https://repositorio.ana.gob.pe/handle/20.500.12543/3042?show=full>
- ANA (Autoridad Nacional del Agua - Perú). (2013). Plan Nacional de Recursos Hídricos del Perú: Memoria 2013. p 255.
- ANA (Autoridad Nacional del Agua). (2017). El Padrón Electoral de la Junta de Usuarios del Sector Hidráulico Lurín. P 66. [https://www.ana.gob.pe/sites/default/files/j.u\\_lurin\\_-\\_carta1.pdf](https://www.ana.gob.pe/sites/default/files/j.u_lurin_-_carta1.pdf)
- ANA (Autoridad Nacional del Agua - Perú). (2019). Estudio Hidrogeológico del Acuífero Lurín. Autoridad Administrativa del agua Cañete Forteleza, Dirección de calidad de Recursos Hídricos, Autoridad Nacional del Agua. <https://repositorio.ana.gob.pe/handle/20.500.12543/4444>
- ANDINA (Agencia Peruana de Noticias). (14 de octubre del 2018). Camarón de río será la estrella de Festival Ecogourmet de Pachacámac. <https://andina.pe/agencia/noticia-camaron-rio-sera-estrella-festival-ecogourmet-pachacam-198705.aspx>
- Andreu Alvares, J. (s.f.). *Análisis de sistemas y modelación* (p. 10). p. 10.
- Andreu Álvarez, J., Sahuquillo Herráriz, A., Solera Solera, A., Pulido Velásquez, M., Pulido Velásquez, D., & Paredes Arquiola, J. (2010). *USO CONJUNTO DE AGUAS SUPERFICIALES Y SUBTERRÁNEAS*.
- Andreu, J., Solera, A., Capilla, J., & Ferrer, J. (s.f.). *Modelo SIMGES de Simulación de la Gestión de Recursos Hídricos, incluyendo Utilización Conjunta: Manual de Usuario*.
- Arora, M., Casas-Mulet, R., Costelloe, J. F., Peterson, T. J., McCluskey, A. H., & Stewardson, M. J. (2017). Impacts of Hydrological Alterations on Water Quality. In *Water for the Environment: From Policy and Science to Implementation and Management*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803907-6.00006-1>
- Banco Mundial. (20 de setiembre de 2017). Gestión de los recursos hídricos. <https://www.bancomundial.org/es/topic/waterresourcesmanagement#1>
- Carvajal-Escobar, Y. (2008). Environmental flow regime in the framework of integrated water resources management strategy. *Ecology and Hydrobiology*, 8(2-4), 307-315. <https://doi.org/10.2478/v10104-009-0024-x>
- Castro Heredia, L. M., Carvajal Escobar, Y., & Céspedes López, G. (2012). Aplicación de la metodología de caudales básicos de mantenimiento en la Cuenca Media del río Tuluá - Subcuenca del Río Cauca. *Revista Tecnura*, 16(31), 33. <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2012.1.a03>

- Ceballo, O., Galli, A., Gonzalez, I., Romeu, O., & Dominguez, A. (2015). Modelo de Gestión Integrada de los Recursos Hídricos en Cuencas Hidrográficas y de Adaptación al Cambio Climático . *ResearchGate*, (December).
- D. N. Moriasi, J. G. Arnold, M. W. Van Liew, R. L. Bingner, R. D. Harmel, & T. L. Veith. (2007). Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885–900. <https://doi.org/10.13031/2013.23153>
- De Girolamo, A. M., Barca, E., Pappagallo, G., & Lo Porto, A. (2017). Simulating ecologically relevant hydrological indicators in a temporary river system. *Agricultural Water Management*, 180, 194–204. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.05.034>
- Dirk, L. (2015). Diagnóstico de las plantas de tratamiento de aguas residuales en el ámbito de operación de las entidades prestadoras de servicios de saneamiento. *Depósito Legal En La Biblioteca Nacional Del Perú N° 2015-16066, I*, 150. Retrieved from <http://www.sunass.gob.pe/doc/Publicaciones/ptar.pdf.L>
- Endesa-Chile. (2011). *Introducción al Cálculo de caudales ecologicos: Un análisis de las tendencias actuales*.
- Felipe - Morales, C. (2012). Manual para Gestores del Agua de la Cuenca del Río Lurín. 31. Retrieved from <https://docplayer.es/7237733-Manual-para-gestores-del-agua-de-la-cuenca-del-rio-lurin.html>
- Fernandes, M. R., Aguiar, F. C., Martins, M. J., Rivaes, R., & Ferreira, M. T. (2020). Long-term human-generated alterations of Tagus River: Effects of hydrological regulation and land-use changes in distinct river zones. *Catena*, 188(November 2019), 104466. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104466>
- GEO GPS PERÚ. (febrero del 2020). Base de datos Perú - Shapefile - \*.shp - MINAM - IGN - Límites Políticos. <https://www.geogpsperu.com/2014/03/base-de-datos-peru-shapefile-shp-minam.html>
- Gholami, V., Khalili, A., Sahour, H., Khaleghi, M. R., & Tehrani, E. N. (2020). Assessment of environmental water requirement for rivers of the Miankaleh wetland drainage basin. *Applied Water Science*, 10(11), 1–14. <https://doi.org/10.1007/s13201-020-01319-8>
- GONZALEZ Villela, Rebeca y BANDERAS Tarabay, A. G. (2015). *Ecológicos Y Ambientales*. 276.
- Gourbesville, P. (2008). Challenges for integrated water resources management. *Physics and Chemistry of the Earth*, 33(5), 284–289. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2008.02.002>
- Gunawardana, S. K., Shrestha, S., Mohanasundaram, S., Salin, K. R., & Piman, T. (2021). Multiple drivers of hydrological alteration in the transboundary Srepok River Basin of the Lower Mekong Region. *Journal of Environmental Management*, 278(P1), 111524. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111524>
- INEI. (2018). *Provincia de Lima Resultados definitivos. Tomo 1*, 1101.
- INRENA (Instituto nacional de Recursos Naturales). (2004). Estudio Hidrológico de la cuenca del río Lurín. Intendencia de Recursos Hídricos, Instituto nacional de Recursos Naturales. <https://repositorio.ana.gob.pe/handle/20.500.12543/1691>
- Jiménez, B. y Asano, T. 2008: Water Reuse: An International Survey of Current Practice. Issues

- and Needs. London, IWA Pub. DOI 10.2166/9781780401881.
- Karakoyun, Y., Yumuttaci, Z., Dönmez, A. (2018). *Environmental Flow Assessment Methods: A case Study*. 1061–1074. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813734-5.00060-3>
- Le Page, M., Fakir, Y., & Aouissi, J. (2020). Modeling for integrated water resources management in the Mediterranean region. In *Water Resources in the Mediterranean Region*. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-818086-0.00007-8>
- Ley N° 29338. 2009. Ley de los Recursos Hídricos. <https://www.ana.gob.pe/publicaciones/ley-no-29338-ley-de-recursos-hidricos>
- López-Ballesteros, A., Senent-Aparicio, J., Martínez, C., & Pérez-Sánchez, J. (2020). Assessment of future hydrologic alteration due to climate change in the Aracthos River basin (NW Greece). *Science of the Total Environment*, 733, 139299. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139299>
- Martínez Santa-María, C., & Fernández Yuste, J. A. (2010). *Índices de Alteración Hidrológica en Ríos (IAHRIS). Manual de Usuario*.
- Mathews, R., & Richter, B. D. (2007). Application of the indicators of hydrologic alteration software in environmental flow setting. *Journal of the American Water Resources Association*, 43(6), 1400–1413. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2007.00099.x>
- Momblanch, A., Paredes-arquiola, J., Andreu, J., & Hernández, J. G. (2015). *Análisis de medidas para la mejora de la calidad del agua en el tramo bajo del río Lurín ( Perú ) Lia Ramos Fernández , Wilfredo Baldeón Quispe*. (October).
- Momblanch, A., Pedro-Monzonís, M., Solera, A., & Andreu, J. (2018). Water Accounting for Integrated Water Resources Management. In *Advances in Chemical Pollution, Environmental Management and Protection* (Vol. 3). <https://doi.org/10.1016/bs.apmp.2018.08.001>
- Municipalidad de Cieneguilla. (6 de abril del 2017). Turismo Cieneguilla: Río Lurín. <http://turismo.municieneguilla.gob.pe/descubrir-cieneguilla/que-ver/patrimonio-natural/valle2/rio-lurin/>
- Olortegui, C. (2021). Simulación Hidrológica de la Oferta y Demanda de la cuenca del río Lurín con Fines de Establecer Indicadores de Garantía de la Demanda. <http://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/UNALM/4598>
- Ortín, A. (2017). Estudio de alteración hidrológica en cuencas con elevado estrés hídrico: el caso de la cuenca del río Júcar.
- Palau, A. (2000). *Aspectos clave sobre los caudales de mantenimiento en la elaboración del plan hidrológico del ebro*. 1–22.
- Popovici, R., Erwin, A., Ma, Z., Prokopy, L. S., Zanotti, L., Bocardo Delgado, E. F., ... Arce Larrea, G. R. (2020). Outsourcing governance in Peru's integrated water resources management. *Land Use Policy*, (xxxx). <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.105105>
- Prats-Rico, D. (2016). La reutilización de aguas depuradas regeneradas a escala mundial: análisis y prospectivas. *Agua y Territorio*, (8), 10–21. <https://doi.org/10.17561/at.v0i8.3292>
- Pumo, D., Francipane, A., Cannarozzo, M., Antinoro, C., & Noto, L. V. (2018). Monthly Hydrological Indicators to Assess Possible Alterations on Rivers' Flow Regime. *Water*

- Resources Management*, 32(11), 3687–3706. <https://doi.org/10.1007/s11269-018-2013-6>
- Radecki-Pawlik, A., Wałęga, A., Młyński, D., Młoczek, W., Kokoszka, R., Tokarczyk, T., & Szalińska, W. (2020). Seasonality of mean flows as a potential tool for the assessment of ecological processes: Mountain rivers, Polish Carpathians. *Science of the Total Environment*, 716. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136988>
- Radinger, J., Alcaraz-Hernández, J. D., & García-Berthou, E. (2018). Environmental and spatial correlates of hydrologic alteration in a large Mediterranean river catchment. *Science of the Total Environment*, 639, 1138–1147. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.05.227>
- Resolución Jefatural N° 267-2019-ANA. Lineamientos generales para determinar caudales ecológicos. P 16.
- Richter, B. D., Baumgartner, J. V., Powell, J., & Braun, D. P. (1996). A Method for Assessing Hydrologic Alteration within Ecosystems. *Conservation Biology*, 10(4), 1163–1174. <https://doi.org/10.1046/j.1523-1739.1996.10041163.x>
- Rolls, R. J., & Bond, N. R. (2017). Environmental and Ecological Effects of Flow Alteration in Surface Water Ecosystems. In *Water for the Environment: From Policy and Science to Implementation and Management*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803907-6.00004-8>
- Sanchez, J. (2013). Cálculos Estadísticos en Hidrología. Universidad de Salamanca, 1–11. Retrieved from <http://hidrologia.usal.es>
- Savenije, H. H. G., & Van der Zaag, P. (2008). Integrated water resources management: Concepts and issues. *Physics and Chemistry of the Earth*, 33(5), 290–297. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2008.02.003>
- SEDAPAL (Servicio de Agua Potable y Alcantarillado de Lima). (2012). *Plan maestro para lima y callao 2012-2040*. 2040.
- SEDAPAL (Servicio de Agua Potable y Alcantarillado de Lima). (2014). Actualización del modelo de flujo de aguas subterráneas acuífero de Lurín.
- Solera, A., Paredes, J., & Andreu, J. (2015). *Entorno de desarrollo de sistemas de ayuda a la decisión en materia de planificación de la gestión de cuencas hidrográficas incluyendo utilización conjunta y criterios de calidad de aguas*.
- Stewardson, M. J., Acreman, M., Costelloe, J. F., Fletcher, T. D., Fowler, K. J. A., Horne, A. C., ... Peel, M. C. (2017). Understanding Hydrological Alteration. In *Water for the Environment: From Policy and Science to Implementation and Management*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803907-6.00003-6>
- Tennant, D. L. (1976). Instream Flow Regimens for Fish, Wildlife, Recreation and Related Environmental Resources. *Fisheries*, 1(4), 6–10. [https://doi.org/10.1577/1548-8446\(1976\)001<0006:ifrffw>2.0.co;2](https://doi.org/10.1577/1548-8446(1976)001<0006:ifrffw>2.0.co;2)
- Uday Kumar, A., & Jayakumar, K. V. (2020). Hydrological alterations due to anthropogenic activities in Krishna River Basin, India. *Ecological Indicators*, 108(September 2019), 105663. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105663>
- Zhang, Q., Gu, X., Singh, V. P., & Chen, X. (2015). Evaluation of ecological instream flow using multiple ecological indicators with consideration of hydrological alterations. *Journal of Hydrology*, 529(P3), 711–722. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.08.066>