

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA**

**ESCUELA DE POSGRADO
MAESTRÍA EN ECOLOGÍA APLICADA**



**“DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA PARA ESTIMAR
CAUDALES ECOLÓGICOS CON FINES DE PLANIFICACIÓN
HÍDRICA APLICADA EN LA CUENCA DEL RÍO PISCO”**

**Presentada por:
ERICK GARCÍA GONZALES**

**TESIS PARA OPTAR EL GRADO DE
MAGISTER SCIENTIAE EN ECOLOGÍA APLICADA**

Lima - Perú

2023

Document Information

Analyzed document	Tesis_EGarciaG_08032023_correg.docx (D164461751)	
Submitted	2023-04-19 18:51:00	
Submitted by	Diana Zulema Quinteros Carlos	
Submitter email	zquinteros@lamolina.edu.pe	Jorge Larry Tam Málaga Asesor de Tesis
Similarity	4%	
Analysis address	zquinteros.unalm@analysis.arkund.com	

Sources included in the report

SA	VII_CI-SECTEI2020_paper_86.pdf Document VII_CI-SECTEI2020_paper_86.pdf (D63600389)	 3
SA	Chávez-Bazán-COMPORTAMIENTO DE LA ESCORRENTIA SEGUN PROYECCIONES CLIMÁTICAS EN LA INTERCUENCA ALTO HUALLAGA 2020 - 2059.pdf Document Chávez-Bazán-COMPORTAMIENTO DE LA ESCORRENTIA SEGUN PROYECCIONES CLIMÁTICAS EN LA INTERCUENCA ALTO HUALLAGA 2020 - 2059.pdf (D141804579)	 3
SA	CAUDALES ECOLÓGICOS PARA CUENCAS ECUATORIANAS DETERMINADOS POR EL MÉTODO DE LA PENDIENTE DE LA CURVA DE MASAS.docx Document CAUDALES ECOLÓGICOS PARA CUENCAS ECUATORIANAS DETERMINADOS POR EL MÉTODO DE LA PENDIENTE DE LA CURVA DE MASAS.docx (D31321402)	 28
SA	A008 SA.docx Document A008 SA.docx (D56204687)	 4
SA	3635-Article Text-22440-1-2-20191231_mercy (1).docx Document 3635-Article Text-22440-1-2-20191231_mercy (1).docx (D62485928)	 1
SA	Paper-Cebadas_fin.docx Document Paper-Cebadas_fin.docx (D75020536)	 2

Entire Document

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA
 ESCUELA DE POSGRADO MAESTRÍA EN ECOLOGÍA APLICADA
 “DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA PARA ESTIMAR CAUDALES ECOLÓGICOS CON FINES DE PLANIFICACIÓN HÍDRICA APLICADA EN LA CUENCA DEL RÍO PISCO”
 Presentada por: ERICK GARCÍA GONZALES
 TESIS PARA OPTAR EL GRADO DE MAESTRO MAGISTER SCIENTIAE EN ECOLOGÍA APLICADA
 Lima - Perú 2023 UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA
 ESCUELA DE POSGRADO MAESTRÍA EN ECOLOGÍA APLICADA
 “DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA PARA ESTIMAR CAUDALES ECOLÓGICOS CON FINES DE PLANIFICACIÓN HÍDRICA APLICADA EN LA CUENCA DEL RÍO PISCO”
 TESIS PARA OPTAR EL GRADO DE MAESTRO MAGISTER SCIENTIAE EN ECOLOGÍA APLICADA
 Presentada por: ERICK GARCÍA GONZALES
 Sustentada y aprobada ante el siguiente jurado:
 Mg.Sc. Juan Torres Guevara Dr. Jorge Tam Málaga PRESIDENTE ASESOR
 Dr. Edgar Sánchez Infantas Mg.Sc. Cayo Ramos Taipe MIEMBRO MIEMBRO DEDICATORIA
 «A mis queridos padres Elsa y Vicente a quienes guardo en mi memoria y los recuerdo con mucho amor. A Cynthia y a mi hija Adriana, con quienes comparto siempre inolvidables momentos de diversión, de conocimiento y de aprendizaje mutuo».

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA**

**ESCUELA DE POSGRADO
MAESTRÍA EN ECOLOGÍA APLICADA**

**“DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA PARA ESTIMAR
CAUDALES ECOLÓGICOS CON FINES DE PLANIFICACIÓN
HÍDRICA APLICADA EN LA CUENCA DEL RÍO PISCO”**

**TESIS PARA OPTAR EL GRADO DE
MAGISTER SCIENTIAE**

**Presentada por:
ERICK GARCÍA GONZALES**

Sustentada y aprobada ante el siguiente jurado:

Mg.Sc. Juan Torres Guevara
PRESIDENTE

Dr. Jorge Tam Málaga
ASESOR

Dr. Edgar Sánchez Infantas
MIEMBRO

Mg.Sc. Cayo Ramos Taipe
MIEMBRO

DEDICATORIA

«A mis queridos padres Elsa y Vicente a quienes guardo en mi memoria y los recuerdo con mucho amor. A Cynthia y a mi hija Adriana, con quienes comparto siempre inolvidables momentos de diversión, de conocimiento y de aprendizaje mutuo».

«A los filósofos clásicos, a quienes a través de la lectura incesante conocí y me inspiraron nuevas formas de comprender el ecosistema que habitamos, de manera que nuestro paso por este mundo los vivamos acorde con la naturaleza, con el Lógos».

AGRADECIMIENTOS

- A mi asesor de tesis, el Dr. Jorge Tam Málaga por sus valioso aportes y sugerencias durante el desarrollo de la presente investigación.
- A la Cooperación Técnica Belga-CTB en Perú por el financiamiento para realizar mis estudios en la maestría de Ecología Aplicada en la Universidad Agraria La Molina-UNALM.
- A la Autoridad Nacional del Agua-ANA, mi centro de trabajo, en el cual he podido desarrollarme profesionalmente, lo cual me ha permitido identificar aspectos de la gestión integrada de los recursos hídricos que se deben implementar o mejorar en el país.
- A todo el equipo de Evaluación de Recursos Hídricos Superficiales de la Autoridad Nacional del Agua-ANA, en especial a los ingenieros Gastón Pantoja, Manuel Collas y Nelson Santillán, por sus valiosos aportes y conocimientos en recursos hídricos, por su amistad.
- A la Administración Local de Agua-ALA Pisco de la ANA, por la información sobre recursos hídricos de la cuenca del río Pisco cedida para el desarrollo de la presente investigación, en especial a Leonardo Delgado.
- A todas las instituciones publica y privadas, y personas que contribuyeron con información de manera directa e indirecta para el desarrollo de la presente investigación, en especial a la ONG WWF-Peru, muchas gracias.
- A mi amada familia por su apoyo, motivación e inspiración permanente, así como la comprensión por todo el tiempo dedicado para el desarrollo de esta investigación. Se las quiere mucho.

ÍNDICE GENERAL

I.	INTRODUCCIÓN.....	1
II.	REVISIÓN DE LA LITERATURA.....	4
2.1.	EL CAUDAL ECOLÓGICO.....	4
2.2.	METODOLOGÍAS PARA EL CÁLCULO DE CAUDALES ECOLÓGICOS CON FINES DE PLANIFICACIÓN HÍDRICA	6
2.3.	METODOLOGÍAS PARA EL CÁLCULO DE CAUDALES ECOLÓGICOS EN EL PERÚ	7
2.4.	CAUDALES ECOLÓGICOS EN EL MARCO DE LOS SISTEMAS SOCIAL- ECOLÓGICOS Y EL MANEJO ADAPTATIVO	10
2.5.	DEFINICIONES	12
2.5.1.	Paradigma del río natural	12
2.5.2.	Producción hídrica natural	12
2.5.3.	Oferta hídrica.....	13
2.5.4.	Disponibilidad hídrica.....	13
2.5.5.	Caudal ecológico	13
2.5.6.	Gestión Integrada de Recursos Hídricos	13
III.	MATERIALES Y MÉTODOS	14
3.1.	ÁREA DE ESTUDIO	14
3.2.	RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN.....	16
3.3.	METODOLOGÍA	18
3.3.1.	Método de Tennant (original y modificado)	18
3.3.2.	Determinación del Caudal Ecológico con la metodología CMEH-CDC.....	21
3.3.3.	Desarrollo del Índice de Amenaza Ecohidrológica (IAEH).....	23

3.3.4.	Tema I: Recurso Hídricos-Cantidad.....	24
3.3.5.	Tema II: Recurso Hídricos-Calidad	28
3.3.6.	Tema III: Factores Bióticos.....	29
3.3.7.	Transformación y estandarización estadística de los indicadores	31
3.3.8.	Índice de Amenaza Ecohidrológica (IAEH)	32
3.3.9.	Presente Estado Ecohidrológico (PEEH).....	35
3.3.10.	Clases de Manejo Ecohidrológico (CMEH).....	35
3.3.11.	Curva de Duración de Caudales (CDC).....	38
3.3.12.	Cálculo del Caudal Ecológico con la metodología CMEH-CDC	41
3.3.13.	Prueba de hipótesis.....	43
IV.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	45
4.1.	INDICADORES PARA EL CÁLCULO DEL ÍNDICE DE AMENAZA ECOHIDROLÓGICA (IAEH)	45
4.2.	CÁLCULO DEL ÍNDICE DE AMENAZA ECOHIDROLÓGICA (IAEH).....	54
4.3.	DETERMINACIÓN DEL PRESENTE ESTADO ECOHIDROLÓGICO (PEEH) 55	
4.4.	CÁLCULO DE LA CURVA DE DURACIÓN DE CAUDALES (CDC).....	57
4.4.1.	UH Incachaque-Sitio 1	57
4.4.2.	UH Medio Bajo Pisco-Sitio 2	60
4.4.3.	UH Bajo Pisco-Sitio 3	62
4.5.	DETERMINACIÓN DEL CAUDAL ECOLÓGICO CON EL MÉTODO DE TENNANT (ORIGINAL Y MODIFICADO)	65
4.5.1.	UH Incachaque-Sitio 1	65
4.5.2.	UH Medio Bajo Pisco-Sitio 2	69
4.5.3.	UH Bajo Pisco-Sitio 3.....	73

4.6. ASIGNACIÓN DE LAS CLASES DE MANEJO ECOHIDROLÓGICO (CMEH) Y DETERMINACIÓN DEL CAUDAL ECOLÓGICO CON LA METODOLOGÍA CMEH-CDC	77
4.6.1. UH Incachaque-Sitio 1	77
4.6.2. UH Medio Bajo Pisco-Sitio 2	80
4.6.3. UH Bajo Pisco-Sitio 3	83
4.7. COMPARACIÓN DE LOS MÉTODOS USADOS PARA DETERMINAR EL CAUDAL ECOLÓGICO	87
4.7.1. Análisis comparativo UH Incachaque-Sitio 1	87
4.7.2. Análisis comparativo UH Medio Bajo Pisco-Sitio 2	89
4.7.3. Análisis comparativo UH Bajo Pisco-Sitio 3	91
4.8. COMPARACIÓN CON CAUDALES ECOLÓGICOS EN OTROS RÍOS	93
4.9. LIMITACIONES DEL ESTUDIO	95
4.10. IMPLICANCIAS PARA LA GESTIÓN INTEGRADA DE LOS RECURSO HÍDRICOS	97
V. CONCLUSIONES	99
VI. RECOMENDACIONES	101
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	102
VIII. ANEXOS	108

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Información recopilada para el desarrollo de la metodología	16
Tabla 2. Rangos de clasificación del caudal ecológico con el método de Tennant.....	20
Tabla 3. Temas, indicadores y pesos para el cálculo del Índice de Amenaza Ecohidrológica	31
Tabla 4. Rangos de clasificación y leyenda del IAEH	34
Tabla 5. Presente Estado Ecohidrológico (PEEH) y Clases de Manejo Ecohidrológico (CMEH).....	36
Tabla 6. Clasificación del PEEH en función de los rangos de clasificación del IAEH.....	37
Tabla 7. PEEH para las UH de la cuenca del río Pisco	56
Tabla 8. TDD en los 17 puntos de porcentaje fijos en la UH Incachaque-Sitio 1.....	59
Tabla 9. TDD en los 17 puntos de porcentaje fijos en la UH Medio Bajo Pisco-Sitio 2	61
Tabla 10. TDD en los 17 puntos de porcentaje fijos en la UH Bajo Pisco-Sitio 3.....	64
Tabla 11. Caudales ecológicos estimados con el método de Tennant original en la UH Incachaque	66
Tabla 12. Caudales ecológicos con el método de Tennant original en la UH Incachaque...	67
Tabla 13. Caudales ecológicos estimados con el método de Tennant (modificado).....	67
Tabla 14. Caudales ecológicos estimados con el método de Tennant (modificado).....	68
Tabla 15. Caudales ecológicos estimados con el método de Tennant original- UH Medio Bajo Pisco	69
Tabla 16. Caudales ecológicos con el método de Tennant original en la UH Medio Bajo Pisco	70
Tabla 17. Caudales ecológicos estimados con el método de Tennant modificado en la UH Medio Bajo Pisco	71
Tabla 18. Caudales ecológicos para la UH Medio Bajo Pisco-Sitio 2 con el método de Tennant modificado.....	72
Tabla 19. Caudales ecológicos estimados con el método de Tennant original- UH Bajo Pisco	73
Tabla 20. Caudales ecológicos para la UH Bajo Pisco-Sitio 1 con el método de Tennant original.....	74

Tabla 21. Caudales ecológicos estimados con el método de Tennant modificado en la UH Bajo Pisco.....	75
Tabla 22. Caudales ecológicos para la UH Bajo Pisco-Sitio 1 con el método de Tennant modificado.....	76
Tabla 23. Caudales ecológicos determinados en la UH Incachaque para las cuatro CMEH posibles. Se resalta en azul el caudal ecológico asignado a dicha UH.....	78
Tabla 24. Balance hídrico en la UH Incachaque de acuerdo a la CMEH asignada.....	79
Tabla 25. Caudales ecológicos determinados en la UH Medio Bajo Pisco para las cuatro CMEH posibles. Se resalta en verde el caudal ecológico asignado a dicha UH	81
Tabla 26. Balance hídrico en la UH Medio Bajo Pisco de acuerdo a la CMEH asignada ...	82
Tabla 27. Caudales ecológicos determinados en la UH Bajo Pisco para las cuatro CMEH posibles. Se resalta en amarillo el caudal ecológico asignado a dicha UH	84
Tabla 28. Balance hídrico en la UH Bajo Pisco de acuerdo a la CMEH asignada.....	85
Tabla 29. Caudales ecológicos mensuales para los tres sitios evaluados y porcentaje que representan del caudal medio anual.....	86
Tabla 30. Caudales ecológicos para la UH Incachaque-Sitio 1 con los métodos usados.....	89
Tabla 31. Caudales ecológicos para la UH Medio Bajo Pisco-Sitio 2 con los métodos usados	91
Tabla 32. Caudales ecológicos para la UH Bajo Pisco-Sitio 1 con los métodos usados.....	93

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación del área de estudio	15
Figura 2. Ecorregiones en la cuenca del río Pisco.....	16
Figura 3. Flujograma de la metodología CMEH-CDC para determinar caudales ecológicos con fines de planificación hídrica.....	22
Figura 4. Modelo construido con la herramienta <i>ModelBuilder</i> para calcular el IAEH	34
Figura 5. CDC y su relación con las CMEH. Fuente: adaptado de Smakhtin y Anputhas (2006)	40
Figura 6. Transferencia de caudales mensuales en función del cálculo de la CDC. Fuente: adaptado de Hughes y Smakhtin (1996).....	41
Figura 7. Mapa del indicador fragmentación de ríos para la cuenca del río Pisco.....	46
Figura 8. Mapa del indicador índice de estrés hídrico consuntivo para la cuenca del río Pisco	47
Figura 9. Mapa del indicador índice de estrés hídrico humano para la cuenca del río Pisco	48
Figura 10. Mapa del indicador índice de estrés hídrico agrícola para la cuenca del río Pisco	49
Figura 11. Mapa del indicador interrupción del flujo para la cuenca del río Pisco.....	50
Figura 12. Mapa del indicador desconectividad de humedales para la cuenca del río Pisco	51
Figura 13. Mapa del indicador contaminación por aguas residuales para la cuenca del río Pisco	52
Figura 14. Mapa del indicador número de especies no-nativas para la cuenca del río Pisco	53
Figura 15. Mapa del indicador presión acuícola para la cuenca del río Pisco.....	54
Figura 16. Mapa del Índice de Amenaza Ecohidrológica para la cuenca del río Pisco.....	55
Figura 17. Mapa del Presente Estado Ecohidrológico para la cuenca del río Pisco.....	56
Figura 18. CDC histórica para la UH Incachaque-Sitio 1	58
Figura 19. CDC en los 17 puntos de porcentaje fijos en la UH Incachaque-Sitio 1	58
Figura 20. CDC en función de las cuatro CMEH posibles para la UH Incachaque-Sitio 1 .	59
Figura 21. CDC histórica para la UH Medio Bajo Pisco-Sitio 2.....	60

Figura 22. CDC en los 17 puntos de porcentaje fijos en la UH Medio Bajo Pisco-Sitio 2..	61
Figura 23. CDC en función de las cuatro CMEH posibles para la UH Medio Bajo Pisco-Sitio 2	62
Figura 24. CDC histórica para la UH Bajo Pisco-Sitio 3	63
Figura 25. CDC en los 17 puntos de porcentaje fijos en la UH Bajo Pisco-Sitio 3	63
Figura 26. CDC en función de las cuatro CMEH posibles para la UH Bajo Pisco-Sitio 3..	64
Figura 27. Hidrograma para la UH Incachaque-Sitio 1 con el método de Tennant original	66
Figura 28. Hidrograma para la UH Incachaque-Sitio 1 con el método de Tennant modificado	68
Figura 29. Hidrograma para la UH Medio Bajo Pisco-Sitio 2 con el método de Tennant original.....	70
Figura 30. Hidrograma para la UH Medio Bajo Pisco-Sitio 2 con el método de Tennant modificado.....	72
Figura 31. Hidrograma para la UH Bajo Pisco-Sitio 1 con el método de Tennant original.	74
Figura 32. Hidrograma para la UH Bajo Pisco-Sitio 1 con el método de Tennant modificado	76
Figura 33. Hidrograma de caudales determinados para las cuatro CMEH posibles en la UH Incachaque. Se resalta en azul el caudal ecológico asignado a dicha UH.....	79
Figura 34. Hidrograma de caudales determinados para las cuatro CMEH posibles en la UH Medio Bajo Pisco. Se resalta en verde el caudal ecológico asignado a dicha UH	82
Figura 35. Hidrograma de caudales determinados para las cuatro CMEH posibles en la UH Bajo Pisco. Se resalta en amarillo el caudal ecológico asignado a dicha UH	85
Figura 36. Ubicación de las UH y sitios evaluados para determinar el caudal ecológico en función de las CMEH asignadas.....	86
Figura 37. Hidrograma comparativo con los métodos de caudales ecológicos usados en la UH Incachaque-Sitio 1	88
Figura 38. Hidrograma comparativo con los métodos de caudales ecológicos usados en la UH Medio Bajo Pisco-Sitio 2.....	90
Figura 39. Hidrograma comparativo con los métodos de caudales ecológicos usados en la UH Bajo Pisco-Sitio 1	93

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Código en lenguaje Python para calcular el Índice de Amenaza Ecológica (IAEH).....	108
Anexo 2. Hidrogramas de caudales ecológicos usando la metodología CMEH-CDC en las UH Incachaque, Medio Bajo Pisco y Bajo Pisco para las cuatro CMEH posibles.	110

RESUMEN

El presente trabajo de investigación tuvo como objetivo desarrollar una propuesta de metodología para la determinación de caudales ecológicos con fines de planificación de los recursos hídricos para las cuencas del país, denominada CMEH-CDC, aplicándose a la unidad hidrográfica (UH) Pisco. La metodología propuesta es tipo holística «desktop» y flexible, ya que considera en su construcción la información disponible sobre aspectos ecológicos, hidrológicos y socioeconómicos. Con dicha información se calculó un índice de amenaza ecohidrológica (IAEH) y con base en este índice se determinó el presente estado ecohidrológico (PEEH) a nivel las UH menores de la cuenca del río Pisco. Luego, con información de descargas media mensuales históricas, simuladas con el modelo SWAT, se calcularon las curvas de duración de caudales (CDC) de referencia para cuatro escenarios o clases de manejo ecohidrológico (CMEH) y se asignó a cada UH la CMEH más adecuadas en función de su PEEH y del conocimiento de la cuenca, y en última instancia se determinó el caudal ecológico que se requiere para mantener a las UH en la CMEH asignada. Como resultado de la aplicación de la metodología en tres UH de la cuenca del río Pisco, se determinó que en la UH Incachaque el caudal ecológico asciende a 69.5 MMC anuales que equivale al 63.54 por ciento del caudal medio anual; en la UH Medio Bajo Pisco el caudal ecológico asciende a 257.3 MMC anuales que equivale al 33.7 por ciento del caudal medio anual y en la UH Bajo Pisco el caudal ecológico asciende a 132 MMC anuales que equivale al 17.68 por ciento del caudal medio anual. La presente metodología contribuye a conciliar las necesidades de agua del ecosistema y de los usuarios de agua, lo cual es de suma importancia en cuencas muy intervenidas y con derechos de agua comprometidos, asimismo contribuye a reservar con fines precautorios un caudal ecológico en las situaciones opuesta.

Palabras clave: Caudal ecológico, categoría de manejo ecohidrológico, curva de duración de caudales

ABSTRACT

This research work aim was to develop a proposal for the determination of ecological flows for the purpose of planning water resources of the river basins of the country, called CMEH-CDC, which was applied to the Pisco hydrographic unit (UH). The proposed methodology is holistic "desktop" and flexible, since it considers in its construction the available information on ecological, hydrological and socioeconomic aspects. With this information, an ecohydrological threat index (IAEH) was calculated and based on this index, the present ecohydrological state (PEEH) was determined at the level of the smaller UH of the Pisco river basin. Then, with information on average historical monthly discharges, simulated with the SWAT model, the reference flow duration curves (CDC) were calculated for four scenarios or classes of ecohydrological management (CMEH) and the most appropriate CMEH was assigned to each UH based on their PEEH and the knowledge of the basin, and ultimately the ecological flow required to maintain the HU in the assigned CMEH was determined. As a result of the application of the methodology in three HU of the Pisco river basin, it was determined that in the Incachaque HU the ecological flow amounts to 69.5 MMC per year, which is equivalent to 63.54 percent of the average annual flow; In the UH Medio Bajo Pisco the ecological flow amounts to 257.3 MMC per year, which is equivalent to 33.7 percent of the average annual flow, and in the UH Bajo Pisco the ecological flow amounts to 132 MMC per year, which is equivalent to 17.68 percent of the average annual flow. This methodology contributes to reconcile the water needs of the ecosystem and water users, which is extremely important in highly intervened basins and with compromised water rights, it also contributes to reserve an ecological flow for precautionary purposes in the opposite situations.

Keywords: Ecological flow, ecohydrological management category, flow duration curve

I. INTRODUCCIÓN

La definición de caudal ecológico en el Perú aparece legalmente en la normativa sobre recursos hídricos del país en marzo de 2009 con la promulgación de la Ley de Recursos Hídricos, Ley N° 29338 y posteriormente se desarrolla con mayor detalle en el Reglamento de dicha Ley, aprobado en marzo de 2010, que lo define como «El volumen de agua que se debe mantener en las fuentes naturales de agua para la protección o conservación de los ecosistemas involucrados, la estética del paisaje u otros aspectos de interés científico o cultural». Asimismo, el citado Reglamento señala que «Las metodologías para la determinación del caudal ecológico, serán establecidas por la Autoridad Nacional del Agua-ANA, en coordinación con el Ministerio del Ambiente, con la participación de las autoridades sectoriales competentes, en función a las particularidades de cada curso o cuerpo de agua y los objetivos específicos a ser alcanzados».

En diciembre de 2019, la ANA aprueba la norma denominada «Lineamientos Generales para Determinar Caudales Ecológicos», cuyo ámbito de aplicación considera la determinación de caudales ecológicos bajo dos escenarios, el primero, en el marco del procedimiento de acreditación de disponibilidad hídrica para proyectos de inversión, y el segundo, con fines de planificación de los recursos hídricos en los ámbitos de las cuencas para la protección y conservación de los ecosistemas acuáticos, como indica la norma. En ese sentido, actualmente la ANA no cuenta con una metodología establecida que le permita implementar a nivel nacional el segundo escenario, que permita para conocer el volumen de agua que se debe restringir o reservar para el ambiente en una cuenca y en función de este planificar el volumen de agua que se puede otorgar para los distintos usos del agua.

Con el objetivo de implementar el segundo escenario descrito en el párrafo anterior, se desarrolló la presente investigación, que tiene como finalidad desarrollar sobre la base de las metodologías de caudales ecológicos existentes a nivel internacional, una propuesta metodológica que permita estimar los caudales ecológicos para la planificación de los recursos hídricos en las unidades hidrográficas del país. La determinación del caudal ecológico en la presente metodología se conceptualiza como un método holístico de gabinete

o «Desktop» implementado con información existente o factible de generar, de manera que se pueda aplicar a nivel nacional. El método se considera holístico, ya que para determinar el caudal ecológico considera la relación entre las características hidrológicas de las cuencas mediante la evaluación de las curvas de duración de caudales (CDC) y, las características ecológicas y socioeconómicas a un nivel de semidetalle por medio del Índice de Amenaza Ecohidrológica (IAEH), que a su vez es la base para determinar el Presente Estado Ecohidrológico (PEEH) de las cuencas y las Clases de Manejo Ecohidrológico (CMEH); de ahí que la metodología propuesta para determinar el caudal ecológico en la presente investigación se le ha denominado como método «CMEH-CDC».

La metodología propuesta se aplicó en la cuenca del río Pisco y se usó la información disponible principalmente de manera libre, que incluye el uso de bases de datos geoespaciales de variables hidrológicas, climáticas, ecológicas y sociales para la generación de las variables de interés de la metodología, procesadas en un Sistema de Información Geográfica (SIG), así como la información de caudales medios mensuales del modelo hidrológico semidistribuido SWAT (The Soil and Water Assessment Tool) construido para la cuenca del río Pisco (ANA 2022). Se evaluaron tres sitios específicos dentro de la cuenca del río Pisco y se determinó el caudal ecológico en función de la CMEH asignadas, comparándose los resultados obtenidos con el método hidrológicos de Tennant, tradicional y modificado, que actualmente se usa en el país.

Con esta investigación se busca responder a preguntas que orienten la planificación de los recursos hídricos de la cuenca, por ejemplo: ¿Qué porcentaje de agua se debe reservar bajo la situación actual de la cuenca para los caudales ecológicos? O ¿ante un cambio en la demanda del recurso hídrico se seguirán cumpliendo los objetivos de conservación asignados en las cuencas? En ese sentido con la presente metodología se espera contribuirá a hacer un uso racional de los recursos hídricos e implementar en toda su extensión el concepto de Gestión Integrada de los Recursos Hídricos (GIRH).

La presente investigación tiene como objetivo general:

- Desarrollar una propuesta de metodología para la determinación de caudales ecológicos, denominada CMEH-CDC, con fines de planificación de los recursos hídricos a nivel de cuenca para la protección y conservación de los ecosistemas acuáticos.

Se proponen los siguientes objetivos específicos:

- Analizar las metodologías internacionales que se han desarrollado e implementado para la determinación de caudales ecológicos con fines de planificación de los recursos hídricos.
- Realizar un diagnóstico de la situación actual del Perú sobre cómo se determinan los caudales ecológicos con fines de planificación hídrica, a fin de identificar las oportunidades de mejora.
- Desarrollar la propuesta metodológica, denominada CMEH-CDC, para la determinación de caudales ecológicos con fines de planificación de los recursos hídricos a nivel de cuenca para la protección y conservación de los ecosistemas acuáticos.
- Aplicar la metodología propuesta (CMEH-CDC) en la cuenca del río Pisco, para demostrar su funcionalidad en determinar caudales ecológicos con fines de planificación de los recursos hídricos.

La hipótesis planteada es la siguiente:

La metodología propuesta, denominada CMEH-CDC, que relacionará un índice espacial del estado ecohidrológico actual de la cuenca con la información disponible de caudales, a través del cálculo de las curvas de duración de caudales, permitirá determinar adecuadamente, en una aproximación inicial y con fines de planificación hídrica, el caudal ecológico de una cuenca.

II. REVISIÓN DE LA LITERATURA

2.1. EL CAUDAL ECOLÓGICO

La evaluación de los caudales ecológicos también conocidos como ambientales, empezó a finales de 1940 en cursos de agua alimentados principalmente por deshielos, en ríos del oeste de los Estados Unidos, donde su principal objetivo era proteger la pesca en aguas frías (Poff y Matthews 2013; Tharme 2003, citados por Poff, Tharme y Arthington 2017). En Europa también se realizaron recomendaciones de los flujos mínimos necesarios para mitigar los problemas del deterioro de la calidad del agua en la época de flujos bajos y para el control de la contaminación (Poff, Tharme y Arthington 2017). Un progreso rápido ocurrió en los años 1970, debido principalmente al resultado de una nueva legislación ambiental y sobre recursos hídricos, en conjunto con las demandas de agua para la evaluación cuantitativa de caudales con la finalidad de proteger a las especies acuáticas impactadas por la construcción de embalses, que en ese entonces estuvo en su pico en los Estados Unidos (Poff, Tharme y Arthington 2017).

Otros países como Inglaterra, Australia, Sudáfrica y Nueva Zelanda comenzaron a involucrarse activamente en este tema en los años 80, seguidos de Brasil, Japón y varios países del continente europeo (Arthington y Zalucki 1998; Dyson *et al.* 2003; Tharme 2003, citados por Poff, Tharme y Arthington 2017). Cada aplicación trajo nuevas perspectivas de los retos y soluciones para el manejo de los ríos en diferentes contextos hidroclimáticos, biofísicos y sociopolíticos (Acreman y Dunbar 2004, citados por Poff, Tharme y Arthington 2017).

Sin embargo, como lo destaca Poff *et al.* (1997), históricamente «la protección» de los ecosistemas fluviales ha tenido un alcance limitado, destacando la calidad del agua y solo un aspecto de la cantidad de agua: el flujo mínimo. En ese sentido, Poff *et al.* (1997) señalan que la integridad ecológica del ecosistema fluvial depende de su carácter dinámico natural lo que se ha denominado como «el paradigma del régimen de flujo natural», siendo cinco los

componentes críticos del mismo: la magnitud, frecuencia, duración, estacionalidad y tasa de cambio de las condiciones hidrológicas.

Aunque las definiciones de caudales ecológicos no son recientes, es en el marco de la Declaración de Brisbane y la Agenda de Acción Global de Caudales Ecológicos del año 2007, en la cual se construyó una definición que sea ampliamente aceptada (Arthington *et al.* 2018). La Declaración de Brisbane (2007), destaca la importancia de los caudales ecológicos, ya que son esenciales para la salud de los ecosistemas acuáticos y el bienestar humano. Asimismo, la agenda de acción global del año 2007, incluyó entre uno de sus nueve puntos, la necesidad de integrar a los caudales ecológicos en cualquier aspecto de la gestión del territorio y del agua, es decir, la evaluación y gestión de los caudales ecológicos deberá ser un requisito básico de la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos (GIRH); de la Evaluación de Impacto Ambiental (EIA); de la Evaluación Ambiental Estratégica (EAE); del desarrollo y certificación de las infraestructuras y de la industria; y de las estrategias de usos del territorio, el agua y de la producción de energía.

En 2015, la Asamblea General de la ONU adoptó la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible, que es un plan de acción a favor de las personas, el planeta y la prosperidad, que también tiene la intención de fortalecer la paz universal y el acceso a la justicia. Dicha agenda plantea 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) con 169 metas de carácter integrado e indivisible que abarcan las esferas económica, social y ambiental. En ese marco, el ODS 6 «sobre agua limpia y saneamiento», incluye la Meta 6.4: «Uso y escasez de agua», que busca aumentar el uso eficiente de los recursos hídricos en todos los sectores y asegurar la sostenibilidad de la extracción y el abastecimiento de agua dulce para hacer frente a la escasez de agua y reducir considerablemente el número de personas que sufren falta de agua. En ese sentido, establece el indicador 6.4.2. «Nivel de estrés hídrico: extracción de agua dulce en proporción a los recursos de agua dulce disponible», que rastrea cuánta agua dulce está siendo extraída por todas las actividades económicas, en comparación con el total de recursos renovables de agua dulce disponibles y también tiene en cuenta los requisitos de caudal ambiental o ecológico. A pesar de que los ODS no son jurídicamente obligatorios, se espera que los gobiernos los adopten como propios y establezcan marcos nacionales para su logro.

2.2. METODOLOGÍAS PARA EL CÁLCULO DE CAUDALES ECOLÓGICOS CON FINES DE PLANIFICACIÓN HÍDRICA

De la revisión bibliográfica del estado del arte con respecto a las metodologías que se usan para la determinación de caudales ecológicos con fines de planificación hídrica, actualmente destacan a nivel internacional aquellas metodologías desarrolladas desde inicio de los años 2000, también conocidas como metodologías «Desktop» (Hughes y Munster 2000, Hughes y Hannart 2003, Smakhtin y Anputhas 2006, Smakhtin *et al.* 2007, King *et al.* 2008, Poff *et al.* 2017). Estas metodologías también son conocidas como «Desktop Reserve Model-DRM» o «Reservas ecológicas para ríos», ya que es el término usado para caudales ecológicos en Sudáfrica donde han sido desarrolladas Smakhtin y Anputhas (2006). De acuerdo con Smakhtin y Anputhas (2006), la cuantificación de los caudales ecológicos bajo este tipo modelo, involucra determinar los volúmenes y descargas que sustentarán un cuerpo de agua, como un río, a través de la curva de duración de caudales para una condición o categoría predeterminada. Esto último, se denomina como «Categoría de Manejo Ecológico» (EMC del inglés Ecological Management Category) o recientemente como «Nivel de protección Ecológica» (LEP, del inglés Level of Ecological Protection) y está relacionado con la medida en la cual esta condición se desvía de su condición natural. Las EMC o LEP se determinan por medio de un sofisticado sistema de puntuación basado en un número de indicadores establecidos que se relacionan con la importancia y sensibilidad de los ecosistemas evaluados (Smakhtin y Anputhas 2006, Vörösmarty *et al.* 2010).

CDM Smith (2018), señala con respecto al DRM desarrollado en Sudáfrica, que este modelo surgió en respuesta a la necesidad de una evaluación rápida y de baja demanda de recursos para cuantificar caudales ecológicos, (referidos en Sudáfrica como reservas ecológicas), particularmente en ríos donde la información ecológica y otro tipo de información necesaria son limitadas. Este tipo de metodologías han sido aplicadas en muchos países del mundo con distintas adaptaciones, por ejemplo, Smakhtin y Anputhas (2006), señalan su uso en la India, Zimbawe, Sudáfrica, Nepal; McCartney *et al.* (2009) en Etiopia; Lagerblad, (2010) en Mozambique y Karimi *et al.* (2012) en Irán. Recientemente el reporte de CDM Smith (2018), señala su uso en Tanzania.

Cabe destacar en Latinoamérica la adopción de este tipo de metodologías «Desktop» en México, a través de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), donde se adaptó y adoptó su uso a nivel nacional bajo el concepto del programa de «Reservas de Agua para el Ambiente» (Barrios *et al.* 2011, Barrios *et al.* 2015, Salinas *et al.* 2018). Asimismo, cabe destacar que una adaptación de la metodología DRM, ha sido considerada por la Naciones Unidas como una opción para la implementación de las Metas 6.4 y 6.6 del Objetivo de Desarrollo Sostenible sobre Agua y Saneamiento (ODS 6), debido a su aplicación a gran escala para fines de planificación hidrológica y protección de los ecosistemas dependientes del agua como ríos, lagos, lagunas y humedales (Sood *et al.* 2017 y Dickens *et al.* 2019).

2.3. METODOLOGÍAS PARA EL CÁLCULO DE CAUDALES ECOLÓGICOS EN EL PERÚ

Los caudales ecológicos aparecen en el Perú legalmente con la promulgación de la Ley de Recursos Hídricos, Ley N° 29338, en marzo de 2008 y posteriormente se desarrollan con mayor detalle en el Reglamento de dicha Ley, aprobado en marzo de 2010, que lo define como «el volumen de agua que se debe mantener en las fuentes naturales de agua para la protección o conservación de los ecosistemas involucrados, la estética del paisaje u otros aspectos de interés científico o cultural». Asimismo, el citado Reglamento señala que «Las metodologías para la determinación del caudal ecológico, serán establecidas por la Autoridad Nacional del Agua, en coordinación con el Ministerio del Ambiente, con la participación de las autoridades sectoriales competentes, en función a las particularidades de cada curso o cuerpo de agua y los objetivos específicos a ser alcanzados».

Al respecto la Autoridad Nacional del Agua en el mes de julio de 2012, a través del Memorando Múltiple N° 018-2012-ANA-DCPRH-ERH-SUP e Informe Técnico N° 023-2012-ANA-DCPRH-ERH-SUP/GPT, estableció la primera metodología para calcular el caudal ecológico. Según indica dicho informe, debido a la ausencia de información para aplicar otros métodos de determinación el caudal ecológico, se optó por el «método hidrológico», ya que se dispone de información de caudales medios mensuales y en casos particulares de caudales diarios, que represente adecuadamente las variaciones estacionales

del caudal natural del río. La metodología propuesta consideró tres casos en función de la magnitud del caudal medio anual del curso de agua. En ese sentido, señala que caudales medios anuales menores a $20 \text{ m}^3/\text{s}$, el caudal ecológico será como mínimo el 10 por ciento del caudal medio mensual para la época de avenida, y para la época de estiaje será de un 15 por ciento del caudal medio mensual. Para cursos de agua con caudales medios anuales iguales o mayores a $20 \text{ m}^3/\text{s}$ y menores o iguales a $50 \text{ m}^3/\text{s}$, el caudal ecológico se determinará como un porcentaje del caudal medio mensual siendo este el 10 por ciento para la época de avenidas, y para la época de estiaje será de un 12 por ciento del caudal medio mensual. Y para cursos de agua con caudales medios anuales mayores a $50 \text{ m}^3/\text{s}$, el caudal ecológico corresponderá al 10 por ciento del caudal medio mensual para todos los meses del año. Esta metodología establece porcentajes fijos del caudal ecológico y divide el año hidrológico en época de avenidas, que va de diciembre a abril, y época de estiaje, que va de mayo a noviembre. Aunque la metodología es de simple aplicación, al establecer porcentajes mínimos fijos entre el 10 y 15 por ciento, no considera en su determinación la variabilidad mensual del caudal, ni los requerimientos de agua en función de las necesidades e importancia del ecosistema involucrado y las presiones sobre el uso del recurso hídrico en la cuenca.

La metodología anterior estuvo vigente hasta el mes de junio de 2016, fecha en que la ANA aprobó mediante la Resolución Jefatura N° 154-2016-ANA el instrumento denominado «Metodología para Determinar Caudales Ecológicos», el cual presenta un cambio sustancial con relación a la primera, ya que considera la posibilidad de la determinación de un «caudal ecológico referencial» y también mediante «Estudios específicos para la determinar caudales ecológicos». En el primer caso, el caudal ecológico es equivalente al caudal determinado al 95 por ciento de persistencia en el tramo de interés de la fuente natural de agua y en el segundo caso, involucra la elaboración de un estudio específico en el marco de la solicitud de aprobación de caudales ecológicos para proyectos de inversión, cuya complejidad estará en función de la naturaleza del instrumento de gestión aplicable. Se señala, por ejemplo, que, para proyectos con Declaración de Impacto Ambiental, se podrá aplicar el método hidrológico o hidráulico y para proyectos con Estudio de Impacto Ambiental Detallado o Semidetallado se podrá aplicar el método de simulación de hábitat o el método holístico. Si

bien este instrumento presenta un avance en la selección de los métodos para determinar caudales ecológicos, incluyendo los métodos de simulación de hábitat y holísticos, y de considerar sus cálculo a nivel mensual, aún se mantiene en el método hidrológico la selección de un porcentaje fijo, en ese caso la persistencia del 95 por ciento, lo cual busca asegurar un caudal mínimo, más no los requerimientos de agua en función de las necesidades del ecosistema involucrado y las presiones sobre el uso del recurso hídrico en la cuenca.

En diciembre de 2019, la ANA derogó la Resolución Jefatura N° 154-2016-ANA y aprobó la Resolución Jefatura N° 267-2019-ANA «Lineamientos Generales para Determinar Caudales Ecológicos», el cual presenta un avance significativo respecto a la parte conceptual de los caudales ecológicos, alineada con la definición actualizada de caudales ecológicos de la Declaración de Brisbane de 2018, ya que su determinación se amplía no solo a cursos de agua si no a lagunas o incluso humedales. Reconoce también que el cálculo del caudal ecológico se debe realizar considerando los «objetivos específicos a ser alcanzados en la cuenca, subcuenca, tramo, subtramos o área del cuerpo natural de agua con la finalidad de conciliar las necesidades de agua del ecosistema y de los usuarios de agua». Asimismo, reconoce la importancia de la determinación de parte de la Autoridad de los caudales ecológicos en el marco de la planificación de los recursos hídricos en el ámbito de las cuencas. Señala como metodologías que se pueden usar en la determinación del caudal ecológico a la hidrológicas e hidráulicas, así como las de simulación de hábitat u holísticas. Con respecto a la metodología hidrológica, si bien señala que se debe definir un porcentaje en función de las características del régimen hídrico del cuerpo de agua y su importancia ecológica, señala también que debe considerarse como referencia el 15 por ciento del caudal medio mensual como caudal ecológico. Si bien este nuevo instrumento presenta un avance en el enfoque de determinación de caudales ecológicos incluyendo no solo su uso en el marco de proyectos de inversión, sino en el de la planificación de los recursos hídricos de las cuencas, lo cual será fundamental para evitar sobreexplotar los recursos hídricos y establecer una reserva para el ambiente, no se desarrolla en dicho instrumento cual sería la propuesta metodológica para implementar el nivel de determinación de caudales ecológicos con fines de planificación de los recursos hídricos. Igualmente, tampoco como se determinarán los objetivos específicos a ser alcanzados en las cuencas con el cálculo del caudal ecológico.

Además, el hecho de establecer a priori un porcentaje de referencia a nivel mensual podría subestimar las necesidades de agua del ecosistema.

2.4. CAUDALES ECOLÓGICOS EN EL MARCO DE LOS SISTEMAS SOCIAL-ECOLÓGICOS Y EL MANEJO ADAPTATIVO

De acuerdo a Berkes y Folke (1998) los sistemas social-ecológicos son sistemas integrados complejos en los cuales los seres humanos son parte de la naturaleza. Los sistemas sociales ecológicos incluyen al subsistema social (humano) y ecológico (naturaleza) en una relación de retroalimentación de dos vías (Berkes 2011). Los sistemas social-ecológicos se comportan como sistemas adaptivos complejos (CAS, por sus siglas en inglés), debido a que se pueden auto organizar, se caracterizan por dinámicas no lineales, y pueden aprender y adaptarse en respuesta a las condiciones cambiantes (Gunderson y Holling 2002).

Según Conallin *et al.* (2018), históricamente las necesidades sociales y económicas de los seres humanos han impulsado la explotación de los recursos hídricos, lo cual ha resultado en la degradación de los ecosistemas de aguas dulce y sus servicios ecosistémicos asociados. En ese sentido, señala también que, debido a factores como el aumento de la población, muchos sistemas de agua dulce han incrementado en complejidad, tanto desde una perspectiva social como ecológica, de esta manera volviéndose un sistema social-ecológico complejo.

Por otra parte, el manejo adaptativo se centra en un aprendizaje y retroalimentación iterativa para evaluar la necesidad de cambiar la estrategia de manejo. Este proceso de aprendizaje permite que las acciones de manejo progresen mientras la incertidumbre se reduce con el tiempo (Allen y Garmestani 2015, Conallin *et al.* 2018). El manejo adaptativo es adecuado para problemas tales como la gestión ambiental de los recursos hídricos, donde los resultados son una respuesta a dicha gestión, existe incertidumbre acerca de los impactos de las acciones de manejo, y a pesar de eso deben adoptarse decisiones (Williams y Brown 2014). Existen múltiples fuentes de incertidumbre que afectan la gestión ambiental de los recursos hídricos, incluyendo la incertidumbre climática, que afecta la disponibilidad futura del agua y las demandas para los usos consuntivos, así como la incertidumbre científica concerniente a las

respuestas ecológicas ante los cambios de los patrones en la variabilidad de los caudales (Lowe *et al.* 2017, citados por Horne *et al.* 2017).

Para Overton *et al.* (2014) los gestores de recursos hídricos necesitan marcos y metodologías que incorporen esa inherente complejidad de las interacciones sociales, económicas y ecológicas para conseguir los resultados sociales y ecológicos deseados en la gestión de los recursos hídricos. Esta complejidad puede ser manejada de manera participativa, con el involucramiento de los actores y la participación en la toma de decisiones, impulsando el avance del proceso para evitar retrasos debido a conflictos y el incremento de los costos de transacciones (Conallin *et al.* 2018). Con base en los recientes avances en la ciencia de los caudales ecológicos, la gobernanza del agua y la gestión integrada de los recursos hídricos, existe una clara necesidad de adoptar una metodología más sistemática para la determinación de dichos caudales, tanto en los frentes de las ciencias naturales como de las ciencias sociales y en particular en las interrelaciones entre los sistemas social/político y ambiental (Pahl-Wostl *et al.* 2013).

De acuerdo con Baumgartner *et al.* 2014; King *et al.* 2010; Richter *et al.* 2006, citados por Conallin *et al.* (2018), el manejo adaptativo proporciona una estructura de gestión para la implementación de programas de caudales ecológicos, ya que reconoce la incertidumbre inherente dentro de los sistemas social-ecológicos y, sistemáticamente, lo pone a prueba mediante la adquisición y aplicación de información, a menudo a través de la experimentación científica, para el mejoramiento continuo de la gestión (Hockings 2003; Zedler 2017; citados por Conallin *et al.* 2018).

Recientemente en Sudáfrica unos de los países que presenta mayor avance en torno a la implementación de caudales ecológicos y pionero en el desarrollo de las metodologías *desktop* con fines de planificación hídrica, como es el modelo *desktop* de reservas de agua (DRM, por sus siglas en inglés), se viene implementando con éxito lo que han denominado como manejo adaptativo estratégico conocida como SAM por sus siglas en inglés (Kingsford *et al.* 2011). El método SAM está compuesto de cuatro pasos genéricos: i) Fijación de la condición ecológica deseada; ii) opciones de manejo; iii) operacionalización y iv) evaluación

y aprendizaje. Según Kingsford *et al.* (2011), la base del SAM para su uso en áreas protegidas con ecosistemas de agua dulce es el entendimiento de que dichos ecosistemas son sistemas social-ecológicos cuya resiliencia se ve amenazada. Las etapas del SAM deberían producir una visión consensuada y un objetivo común entre los actores con una apropiada jerarquización que determinen indicadores que se puedan medir, permitiendo una reflexión constante, aprendizaje y adaptación. Si bien señala que no existe una panacea para conseguir la conservación de los ecosistemas acuáticos, el manejo adaptativo estratégico ofrece una alternativa para considerar sus procesos entrelazados, y guiar en la complejidad y el aprendizaje.

2.5. DEFINICIONES

A continuación, se presentan las definiciones de los principales términos usados en la presente investigación.

2.5.1. Paradigma del río natural

En ecología acuática la integridad ecológica del ecosistema fluvial depende de su carácter dinámico natural lo que se ha denominado como «el paradigma del régimen de flujo natural», siendo cinco los componentes críticos del mismo: la magnitud, frecuencia, duración, estacionalidad y tasa de cambio de las condiciones hidrológicas (Poff *et al.* 1997).

2.5.2. Producción hídrica natural

La producción hídrica natural es la cantidad total de agua disponible a la salida de una cuenca hidrográfica para su posterior uso y representa las condiciones iniciales del caudal de una cuenca previo a las abstracciones humanas y las obras de regulación. La producción hídrica natural es la suma del agua proveniente de la escorrentía superficial, el flujo lateral y el flujo subterránea y es la base para la planificación de las asignaciones de agua para los distintos usos (domésticos, agrícolas, industriales, hidroenergético) y los requerimientos del caudal ecológico.

2.5.3. Oferta hídrica

La oferta hídrica es el volumen de agua anual, mensual; superficial y subterránea proyectado con probabilidad aceptable en una cuenca hidrográfica o acuífero, mediante estudios hidrológicos e hidrogeológicos, modelos y herramientas; basados en información hidrológica e hidrométrica suficiente y confiable (ANA 2014). La oferta de agua superficial se estima al 75 por ciento de persistencia para el cálculo de la disponibilidad hídrica (ANA 2014).

2.5.4. Disponibilidad hídrica

La disponibilidad hídrica es el volumen de agua superficial, anual, mensual o diaria en un punto determinado del cauce; obtenido de la diferencia de la oferta de agua menos el caudal ecológico; que permite atender los diferentes tipos de derechos de uso de agua otorgados, al cual se adiciona los volúmenes autorizados de agua subterránea y/o residual (ANA 2014).

2.5.5. Caudal ecológico

Es el volumen de agua que se debe mantener en las fuentes naturales de agua para la protección o conservación de los ecosistemas involucrados, la estética del pasaje u otros aspectos de interés científico o cultural (ANA 2012). Una definición más amplia es la sugerida por Arthington *et al.* (2018) en el marco de la Declaración de Brisbane, que usa el término caudal ambiental y señala que los caudales ambientales describen la cantidad, época y calidad de los flujos de agua dulce y niveles necesarios para sostener los ecosistemas acuáticos, lo cual, a su vez, soporta los aspectos culturales, económicos, los medios de vida sostenibles y el bienestar de los seres humanos.

2.5.6. Gestión Integrada de Recursos Hídricos

La gestión integrada de los recursos hídricos es un proceso que promueve el desarrollo y gestión coordinados del agua, la tierra y los recursos asociados, para maximizar el resultante bienestar económico y social de manera equitativa sin comprometer la sostenibilidad de ecosistemas vitales (GWP TAC 2000).

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio es la cuenca del río Pisco, que está ubicada en la vertiente del Pacífico entre los 13° 47' 38.4" y 12° 52' 37.2" de latitud sur y los 76° 13' 4.8" y 75° 2' 31.2", y tiene una extensión de 4208.7 km². De acuerdo a la delimitación oficial de Unidades Hidrográficas (UH) para el Perú usando el método de Pfafstetter, la UH Pisco es de nivel 5 con código 13752 y está conformada por 9 UH en su siguiente nivel de delimitación que corresponde al nivel 6 de Pfafstetter (Figura 1). La administración de los recursos hídricos está a cargo de la Administración Local del Agua (ALA) Pisco, que pertenece a la Autoridad Administrativa del Agua (AAA) Chaparra-Chincha. Políticamente, la cuenca de río Pisco abarca parte de los departamentos de Huancavelica e Ica.

La cuenca del río Pisco presenta tres ecorregiones (Figura 2): i) la ecorregión del desierto costanero del pacífico, cuyo límite altitudinal promedio es los 1 000 m s.n.m. y presenta un clima es semi-cálido muy seco (desértico o árido subtropical), con precipitaciones promedio anuales inferiores a los 150 mm y temperaturas medias anuales de 18 a 19° C; ii) la ecorregión serranía esteparia, entre los 1000 y 3800 m s.n.m. con un clima templado subhúmedo, entre los 1 000 y los 3 000 msnm, con temperaturas superiores a los 20° C y precipitaciones que están por debajo de los 500 mm/año; y el clima frío, encima de los 3 000 m s.n.m., con precipitaciones alrededor de los 700 mm/año, temperatura media anual alrededor de los 12° C, y veranos lluviosos e inviernos secos, con heladas por encima de los 3 200 msnm; y iii) la ecorregión puna por encima de los 3800 m s.n.m., con un clima frígido o de puna, que se caracteriza por presentar precipitaciones promedio de 700 mm anuales y temperaturas promedio anuales de 6° C. Los veranos (diciembre-marzo) son lluviosos y nubosos, y los inviernos (junio-agosto) son secos y con heladas nocturnas continuas.

De acuerdo con la ANA (2022) en la cuenca existe una gran variación de la distribución espacial de las variables del balance hídrico debido a las características propias de la cuenca. La precipitación, evapotranspiración actual y el rendimiento hídrico fueron mayores en las

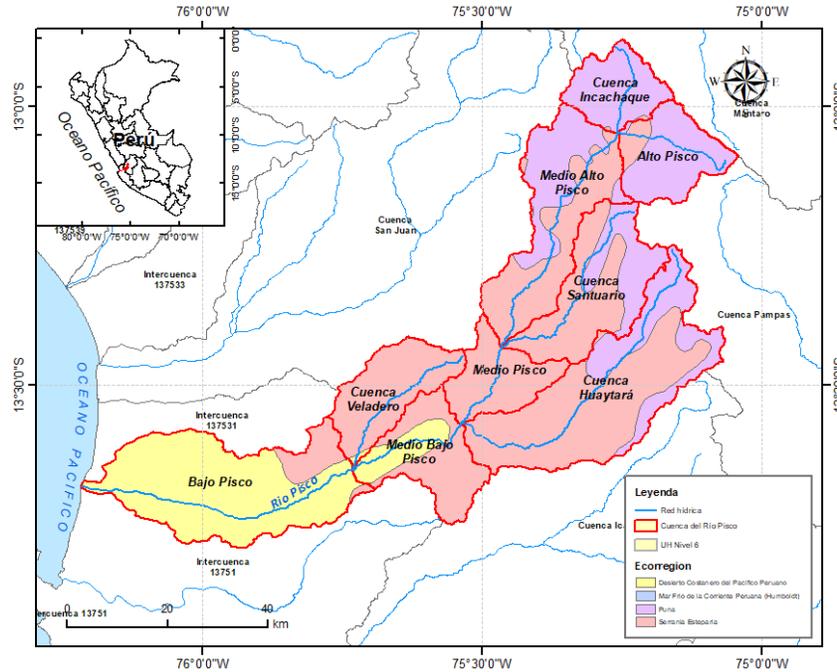


Figura 2. Ecorregiones en la cuenca del rio Pisco

3.2. RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN

Para el desarrollo de la propuesta metodológica y su posterior aplicación en la cuenca del rio Pisco, se recopiló para el ámbito de estudio la información que se detalla en la Tabla 1.

Tabla 1. Información recopilada para el desarrollo de la metodología

Información espacial	Descripción	Fuente	Tipo
Puentes	Ubicación espacial de puentes	MTC	Shapefile- Punto
Embalses	Ubicación espacial de embalses	ANA/ALA-Pisco	Shapefile- Punto
Bocatomas	Ubicación espacial de bocatomas	ANA/ALA-Pisco	Shapefile- Punto
Vertimiento de aguas residuales	Ubicación espacial de vertimientos de agua residual	ANA	Shapefile- Punto

<<Continuación>>

Punto de salida de caudales	Ubicación espacial de los puntos de salida de caudales para cada subcuenca	ANA	Shapefile- Punto
Red hidrográfica	Red hidrográficas a la escala 1: 100 000	IGN/MINEDU	Shapefile-Línea
Red vial	Red vial a la escala 1: 100 000	MTC	Shapefile-Línea
Límites de unidades hidrográficas	Límite de unidades hidrográfica- nivel 6 de Pfafstetter. Escala 1:100 000	ANA	Shapefile-Polígono
Extensión de áreas agrícolas	Extensión de áreas agrícolas. Información generada mediante imágenes de satélite y trabajo de campo. Escala 1:100 000	MIDAGRI	Shapefile-Polígono
Extensión de humedales	Extensión de humedales. Información generada mediante imágenes de satélite y trabajo de campo. Escala 1:100 000	ANA/DCPRH	Shapefile-Polígono
Extensión de superficies impermeables	Extensión de superficies impermeables. Información generada mediante imágenes de satélite y trabajo de campo. Escala 1:100 000	ANA/DCERH	Shapefile-Polígono
Extensión de áreas acuícolas	Extensión de áreas acuícola. Información obtenida del Castrito Acuícola Nacional.	PRODUCE	Shapefile-Polígono
Extensión de lagunas	Extensión de lagunas. Información generada mediante imágenes de satélite y trabajo de campo. Escala 1:100 000	ANA/DCPRH	Shapefile-Polígono

<<Continuación>>

Caudales de ríos	Información de caudales generados a través del modelo hidrológico SWAT	ANA-DCERH	Información alfanumérica
Usos consuntivos	Información de los distintos usos consuntivos del Observatorio del Agua	ANA	Información alfanumérica
Capacidad de embalses	Información de capacidad de almacenamiento de embalses.	ANA/ALA Pisco	Información alfanumérica
Número de especies no-nativas	Información de especies no nativas obtenida de la revisión de información bibliográfica.	MINAM/UNMSM	Información alfanumérica
Caudal de vertimiento de aguas residuales	Información de caudales de aguas residuales vertidos a los cuerpos de agua.	ANA	Información alfanumérica

3.3. METODOLOGÍA

En la presente investigación se calculó el caudal ecológico para tres subcuencas de interés de la cuenca del río Pisco, usando la metodología hidrológica más ampliamente usada a nivel nacional e internacional como lo es el método de Tennant, en su versión original y modificado, y la propuesta metodológica desarrollada en la presente investigación denominada CMEH-CDC (Clases de Manejo Ecohidrológico – Curva de Duración de Caudales). A continuación, se desarrollan los métodos mencionados:

3.3.1. Método de Tennant (original y modificado)

El método de Tennant también conocido como método de Montana (Tennant 1976), es un método hidrológico «Desktop» ampliamente usado por su facilidad para la determinación de caudales ecológicos. De acuerdo con Reiser *et al.* (1989) citados en Tharme (2003), resalta que el método de Tennant era el segundo método más usado para la determinación de

caudales ecológicos en Norteamérica, siendo usado de manera rutinaria en 16 estados o provincias. Desde entonces, Tharme (2003) señala que el método de Tennant (Montana), se ha convertido en el método hidrológico más ampliamente usado a nivel mundial para la determinación de caudales ecológicos, siendo al menos 25 países quienes lo han aplicado, sea en su forma original, considerando criterios hidrológicos, geomorfológicos y ecológicos a escala de cuenca o simplemente utilizando distintos rangos de porcentajes, a menudo seleccionados arbitrariamente.

El método de Tennant fue desarrollado con información recogida en 11 ríos en los estados de Montana, Nebraska y Wyoming en los Estado Unidos entre los años 1964 y 1974 y en su versión original considera que el caudal ecológico se puede estimar a través de porcentajes del Caudal Medio Anual (CMA). Según el método de Tennant, el 10 por ciento del CMA es el caudal mínimo instantáneo recomendado para mantener a corto plazo la existencia de hábitats para la mayoría de formas de vida acuática. El 30 por ciento del CMA es recomendado como flujo base para mantener buenas condiciones de supervivencia para la mayoría de formas de vida acuática y la recreación. El 60 por ciento del CMA provee excelentes a sobresalientes hábitat para para la mayoría de formas de vida acuática durante sus primeros periodos de crecimiento y para la mayoría de los usos recreaciones. Tennant señala que otros porcentajes de caudales pueden ser estudiados, pero manifiesta que estos tres regímenes cubren el rango de caudales desde el mínimo hasta el máximo que pueden normalmente ser justificados y recomendados para proteger el ambiente natural de la mayoría de ríos. En la Tabla 2 se muestra los valores recomendados por el método de Tennant.

Tabla 2. Rangos de clasificación del caudal ecológico con el método de Tennant

Descripción narrativa de los flujos	Regímenes de flujos base recomendados	
	Oct. – Mar.	Abr. – Set.
Crecidas de mantenimiento o máximas	200 por ciento del caudal medio	
Rango optimo	60 - 100 por ciento del caudal medio	
Sobresaliente	40 por ciento	60 por ciento
Excelente	30 por ciento	50 por ciento
Bueno	20 por ciento	40 por ciento
Regular a degradado	10 por ciento	30 por ciento
Pobre o mínimo	10 por ciento	10 por ciento
Degradación severa	10 por ciento del caudal medio a caudal nulo	

Fuente: Tennant (1976)

De la Tabla 2 se observa que, para el caso de los Estados Unidos y los Estados evaluados, los meses de oct.- mar. corresponden a la época de flujos bajos o época de estiaje, y los meses de abr. - set. corresponden a la época de flujos altos o época de avenida, en ese sentido debido a que estas épocas pueden ser diferentes en otras regiones del mundo, para su aplicación se deben modificar dichos periodos (Cassie y El-Jabi 1995).

Por otra parte, el método de Tennant modificado es muy similar al original usando los mismos rangos de porcentajes, solo se diferencia en que considera un porcentaje del caudal medio anual individualmente para la época de flujos bajos o época de estiaje, y para la época de flujos altos o época de avenida.

A efectos de aplicar el método de Tennant original y modificado en la cuenca del río Pisco, se consideró como época de flujos bajo o época de estiaje los meses de junio a noviembre (INRENA 2003) y como época de flujos altos o de época de avenida los meses de diciembre a mayo, aunque existen periodos de transición entre ambas épocas se consideró estos dos periodos para la aplicación del método de Tennant. La determinación del caudal ecológico

usando el método de Tennant fue calculado con base en los datos de caudales medio mensuales que han sido modelados con el programa SWAT en la cuenca del río Pisco para el periodo 1984-2016 (ANA 2022) y a la salida de las tres subcuencas seleccionadas para su aplicación y análisis, que fueron: UH Incachaque, UH Medio Bajo Pisco y UH Bajo Pisco.

3.3.2. Determinación del Caudal Ecológico con la metodología CMEH-CDC

La metodología desarrollada es una adaptación de las metodologías descritas en detalle en Kleynhans (1996, 2000), Smakhtin y Anputhas (2006), King *et al.* (2008), Vörösmarty *et al.* (2010) y Sood *et al.* (2017). Se ha conceptualizado para que sea un método holístico «desktop» que se pueda usar con fines de la planificación de los recursos hídricos en los ámbitos de las cuencas del país y a escala de subcuenca, siendo implementada principalmente en gabinete y con información existente (Tabla 1), de manera que se pueda aplicar en cualquier cuenca a nivel nacional.

El método se considera holístico, ya que para determinar el caudal ecológico se basa en las características ecológicas, hidrológicas y socioeconómicas de las cuencas a un nivel de semidetalle, por medio del cálculo del Índice de Amenaza Ecohidrológica (IAEH), que a su vez es la base para determinar el Presente Estado Ecohidrológico (PEEH) y posteriormente la asignación de una de las cuatro la Clase de Manejo Ecohidrológico (CMEH) posibles para cada subcuenca. Las CMEH se asignan de la evaluación hidrológica mediante el análisis de la información de caudales y el cálculo de las Curvas de Duración de Caudales (CDC) para los cuatro escenarios, y en última instancia reconstruir el valor del caudal ecológico a escala de tiempo mensual.

La metodología propuesta relaciona las características ecológicas, socioeconómicas e hidrológicas para la determinación del caudal ecológico a escala de cuenca y subcuenca, y es una alternativa ante la necesidad de una evaluación rápida y de baja demanda de recursos para cuantificar caudales ecológicos, particularmente en ríos donde la información ecológica y otro tipo de información necesaria son limitadas. Un Flujograma de la metodología desarrollada de se muestra en la Figura 3.

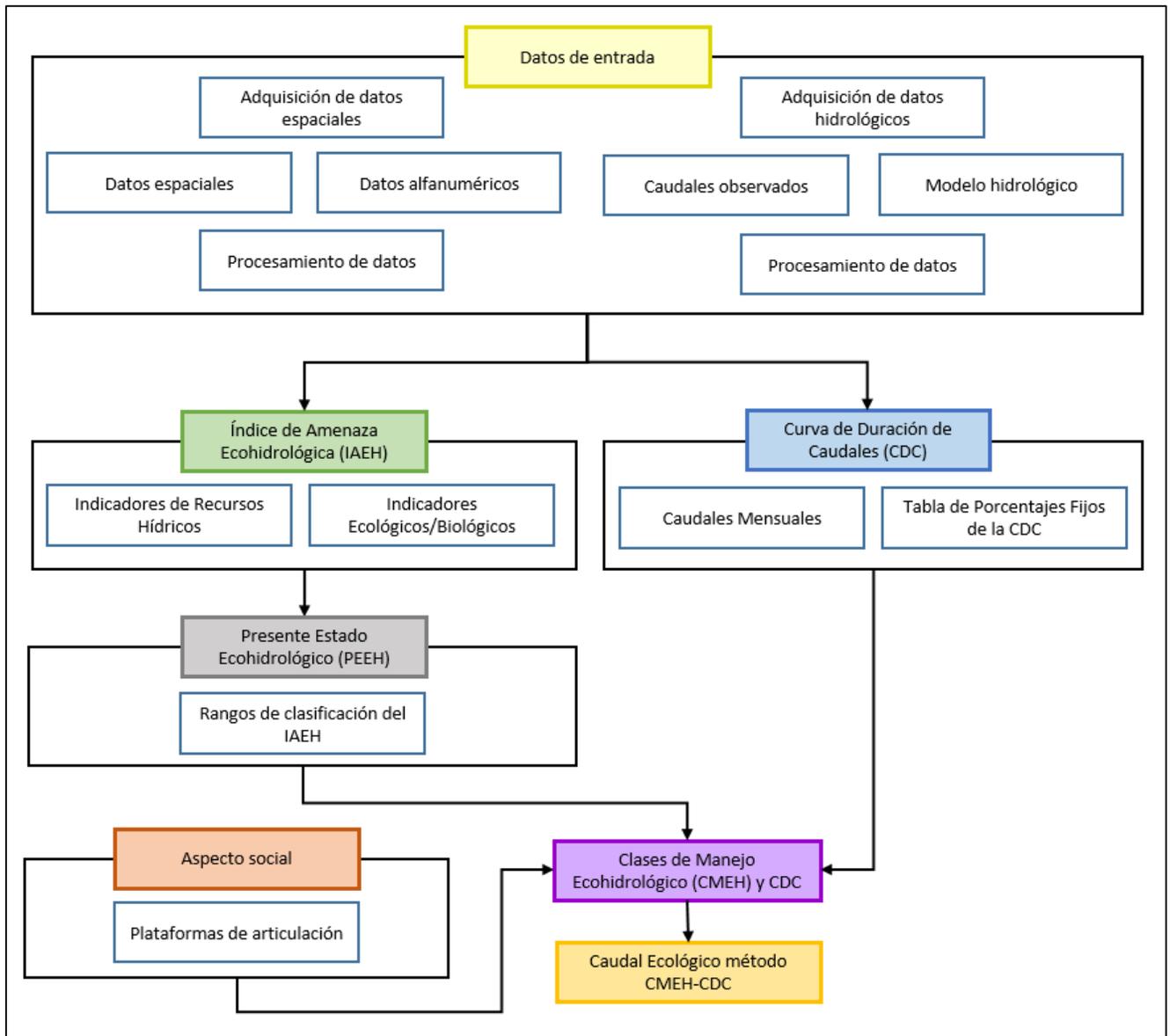


Figura 3. Flujograma de la metodología CMEH-CDC para determinar caudales ecológicos con fines de planificación hídrica

3.3.3. Desarrollo del Índice de Amenaza Ecohidrológica (IAEH)

El cálculo del Índice de Amenaza Ecohidrológica (IAEH), se basa en la metodología propuesta por Vörösmarty *et al.* (2010) para el cálculo de los índices de «Incidencia de Amenazas a la Seguridad Hídrica» (HWS, por sus siglas en inglés) e «Incidencia de Amenaza a la Biodiversidad» (BD, por sus siglas en inglés), y de las modificaciones hechas por Sood *et al.* (2017) para relacionar las «Clases Ecológicas de Manejo» (EMC, por sus siglas en inglés) con la «Salud» de los ríos, considerando esencialmente el índice BD. En ese sentido, de los cuatro temas y 23 indicadores propuestos por Vörösmarty *et al.* (2010), la presente metodología considera tres temas y nueve indicadores (Tabla 3), que se seleccionaron y reagruparon en función de su relevancia para el cálculo de caudales ecológicos y con base en la disponibilidad de información que existe para su implementación a nivel nacional, de manera que se puedan utilizar sin mayores inconvenientes en todas las cuencas del país.

El cálculo de los indicadores mencionados se realiza en un entorno de Sistemas de Información Geografía (SIG) con la finalidad de mostrar su distribución espacial a nivel de cada cuenca o subcuenca. Estos indicadores se estandarizan estadísticamente de manera que estén todos en el rango de 0-1, lo cual a su vez se interpreta que el valor de 0 es «sin amenazas incidentes» y el valor de 1 es «la más alta amenaza incidente», en ambos casos hacia los cuerpos de agua de la cuenca. Los nueve indicadores estandarizados se integra mediante una suma ponderada en único indicador que será el denominado IAEH, esto último se hace usando un modelo desarrollado con la herramienta *model buider* del programa ArcGIS como se muestra en la Figura 4. A continuación, se describe cada uno de los tres temas y nueve indicadores seleccionados para el cálculo del IAEH y la metodología empleada para su cálculo.

3.3.4. Tema I: Recurso Hídricos-Cantidad

Este tema se refiere a las intervenciones humanas que ocurren en la cuenca con fines de gestionar y manejar los aspectos relacionados con la cantidad del agua para los distintos usos, así como la conservación de sus bienes asociados y ecosistemas relacionados con el agua. Estas intervenciones pueden ocasionar un impacto negativo en la integridad ecológica de los ríos, lagos, lagunas y humedales, debido a la modificación o alteración de su régimen hídrico. Este tema comprende seis indicadores: 1) fragmentación de ríos, 2) índice de estrés hídrico por usos consuntivos, 3) índice de estrés hídrico humano, 4) índice de estrés hídrico agrícola, 5) interrupción del flujo y 6) desconectividad de humedales; cuya descripción y metodología de cálculo se detalla a continuación:

3.3.4.1. Indicador 1: Fragmentación de ríos

La construcción de embalses o el represamiento de ríos y lagunas, si bien es una medida necesaria para el almacenamiento y regulación del agua con el fin de destinarlo a los diferentes usos, sea poblacional o productivo; también tiene un impacto negativo en la salud de estos ecosistemas, ya que modifican o alteran su régimen hídrico natural, la conectividad hidrológica, así como el tiempo de residencia del agua. Además de los embalses, es importante considerar en la fragmentación de los ríos los impactos en la conectividad hidrológica que causan otras obras de infraestructura como bocatomas, puentes y alcantarillas, lo cual afecta directamente el flujo de especies, así como el transporte de materia orgánica, sedimentos, nutrientes y energía, tanto en espacio como en tiempo (Pringle 2003).

Información requerida: Se requieren las siguientes capas de información: i) ubicación espacial de infraestructura como puentes, embalses, bocatomas, alcantarilla, ii) delimitación de unidades hidrográficas y iii) red hidrográfica.

Cálculo del indicador: Este indicador se calcula para cada subcuenca, dividiendo la cantidad total de embalses, puentes, bocatomas entre la longitud de la red hidrográfica. Se expresa en número de infraestructuras por km de red hidrográfica (#/km).

3.3.4.2. Indicador 2: Índice de estrés hídrico por usos consuntivos

Según Vörösmarty *et al.* (2010), el uso consuntivo del agua en la agricultura, industria y otros usos consuntivos, puede poner en riesgo la disponibilidad del recurso hídrico para los seres humanos y los ecosistemas, cuando el consumo es mayor con relación al caudal de la cuenca.

Información requerida: Se requieren las siguientes capas de información: i) caudales medios anuales naturalizados, ii) usos consuntivos agrícola e industriales y iii) delimitación de unidades hidrográficas.

Cálculo del indicador: Este indicador se calcula para cada subcuenca, dividiendo la cantidad total de usos de agua por usos consuntivos entre los caudales medios anuales naturalizados. Se expresa en el rango de 0 a 1 y no tienen unidades.

3.3.4.3. Indicador 3: Índice de estrés hídrico humano

El concepto de índice de estrés hídrico humano fue introducido por Falkenmark y Widstrand (1992) y está basado en el mínimo nivel de agua per cápita necesario para mantener una adecuada calidad de vida. Este índice resume la idea de que, con menos agua disponible por persona, más alto es el nivel de amenaza a los recursos hídricos, es decir, captura las consecuencias negativas para la oferta hídrica de la alta densidad de población humana y la baja disponibilidad natural de agua.

Información requerida: Se requieren las siguientes capas de información: i) caudales medios anuales naturalizados, ii) cantidad de población y iii) delimitación de unidades hidrográficas.

Cálculo del indicador: Este indicador se calcula para cada subcuenca, dividiendo el caudal medio anual naturalizado entre la cantidad total de población. Se expresa $\text{m}^3/\text{persona}$.

3.3.4.4. Indicador 4: Índice de estrés hídrico agrícola

Según Vörösmarty *et al.* (2010), el índice de estrés hídrico agrícola es análogo al índice de estrés hídrico humano y estima la carga que la actividad agrícola impone sobre los recursos hídricos renovables, por consiguiente, refleja la opción conjunta de una porción del ciclo hidrológico, una a través de la irrigación y otra implícitamente mediante la precipitación y la disponibilidad de agua en el suelo. A menor disponibilidad de agua por área agrícola, mayor es la competición potencial por el uso del agua entre la agricultura (que es el mayor consumidor de agua) y los demás usos.

Información requerida: Se requieren las siguientes capas de información: i) caudales medios anuales naturalizados, ii) áreas agrícolas y iii) delimitación de unidades hidrográficas.

Cálculo del indicador: Este indicador se calcula para cada subcuenca, dividiendo el caudal medio anual naturalizado entre la extensión del área agrícola. Se expresa m^3/km^2 .

3.3.4.5. Indicador 5: Interrupción del flujo

De acuerdo con Vörösmarty *et al.* (2010), los cambios en el tiempo, frecuencia, duración y magnitud de eventos claves del flujo, tienen un impacto significativo en los ecosistemas de agua dulce. Por ejemplo, el aumento del tiempo de residencia es a menudo asociado con mayores cambios en el régimen térmico del río. De hecho, las guías para el cálculo de caudales ecológicos se enfocan en imitar el régimen natural del flujo, tanto como sea posible, para minimizar los impactos en la biodiversidad y los procesos ecológicos.

Información requerida: Se requieren las siguientes capas de información: i) caudales medios anuales naturalizados, ii) ubicación de embalses, iii) ubicación de puntos de salida de las subcuencas, iv) capacidad de embalses, v) delimitación de unidades hidrográficas y vi) red hidrográfica.

Cálculo del indicador: Este indicador se calcula para cada subcuenca, a través de una estimación del cambio del tiempo de residencia del agua en la red de hídrica, dividiendo la capacidad del embalse ubicado aguas arriba del punto de interés entre la descarga media anual en el punto de salida de la red de drenaje, lo cual se asigna a cada segmento de la red hídrica. Los resultados se expresan en años de incremento en el tiempo de residencia. Un mayor detalle de la metodología de cálculo del indicador se describe en Vörösmarty *et al.* (1997).

3.3.4.6. Indicador 6: Desconectividad de humedales

Según Vörösmarty *et al.* (2010), la desconectividad de humedales se define como la proporción de humedales ocupados por áreas agrícolas o urbanas, bajo la asunción de que la ocupación humana perjudica las interconexiones físicas y biológicas entre ríos y sus llanuras de inundación. Muchos casos de desconectividad se evidencian a través del drenaje y destrucción de humedales, a fin destinar dichas áreas para otros usos. Se debe señalar también que esta desconexión entre el río y su llanura de inundación se ha producido por la canalización y la construcción de diques con fines de proteger áreas urbanas y agrícolas.

Información requerida: Se requieren las siguientes capas de información: i) extensión de humedales, ii) extensión de áreas agrícolas, iii) extensión de superficies impermeables, y iv) delimitación de unidades hidrográficas.

Cálculo del indicador: Este indicador se calcula para cada subcuenca, estimando la fracción de humedales ocupada por áreas agrícolas y superficies impermeables. Se genera un *buffer* de 90 metros con un enfoque precautorio para la protección de lagunas y humedales, y se extrae dicha extensión, luego, se calcula la proporción de áreas desconectadas dividiéndola respecto al total. Se expresa en el rango de 0 a 1 y no tienen unidades.

3.3.5. Tema II: Recurso Hídricos-Calidad

Este tema se refiere a los distintos tipos de contaminantes que se generan producto de las intervenciones humanas en la cuenca y que a su vez ocasionan un impacto negativo en la salud de los ríos, a través de la alteración de la calidad del agua. Este tema comprende un solo indicador: contaminación por vertimiento de agua residual. Este indicador se seleccionó con base en la información disponible actualmente. Sin embargo, en la medida que se pueda contar con mayor información sobre la calidad del agua, se podrán incluir otros indicadores como los usados en Vörösmarty *et al.* (2010).

3.3.5.1. Indicador 7: Contaminación por vertimientos de agua residual

Las aguas residuales son aquellas aguas cuyas características originales han sido modificadas por actividades antropogénicas y que, por sus características de calidad requieren, de un tratamiento previo para su disposición final o reúso. Estas aguas pueden contener elementos como el fosforo, nitrógeno, materia orgánica, entre otros. Al considerar este indicador, de manera general se está considerando el impacto de todas aquellas sustancias que deterioran la calidad del agua de los ríos, hacia donde son vertidas principalmente y en muchos casos sin tratamiento previo.

Información requerida: Se requieren las siguientes capas de información: i) ubicación de fuentes contaminantes ii) caudal que se vierte hacia los cuerpos de agua, iii) caudal medio anual naturalizado, y iv) delimitación de unidades hidrográficas.

Cálculo del indicador: Este indicador se calcula para cada subcuenca, dividiendo el volumen medio anual de las descargas de agua residual entre el volumen medio anual de la subcuenca. Se expresa en el rango de 0 a 1 y no tienen unidades.

3.3.6. Tema III: Factores Bióticos

De acuerdo con Vörösmarty *et al.* (2010), este tema captura la distribución espacial y local de los impactos de los cambios de la biota en los ecosistemas de ríos. Los seres humanos han alterado la fauna de los ríos en muchas formas, pero existe poca información sobre la documentación de estos cambios. Este tema incluye dos indicadores de los cuatro propuestos por Vörösmarty *et al.* (2010), que se seleccionaron con base en la información disponible y son: 1) número de especies no nativas, y 2) presión acuícola. Estos indicadores tienen una variedad de efectos nocivos sobre los ecosistemas de agua dulce desde cambios en la carga y ciclo de nutrientes, la desestabilización de la cadena alimentaria hasta la alteración de las interacciones entre especies. Se debe indicar que en la medida que se pueda contar con mayor información, se podrá incluir otros indicadores, ya que la metodología propuesta es adaptable a dichos cambios.

3.3.6.1. Indicador 8: Número de especies no nativa

Los diversos impactos negativos de las especies no-nativas (introducidas) sobre los ecosistemas acuáticos, son una función del número absoluto de especies no-nativas (Vörösmarty *et al.* 2010). Sin embargo, en esta investigación se evidenció que la falta de información a nivel espacial de especies no-nativas para la cuenca del país es una limitante, por lo que para la construcción de dicho indicador se debe usar información referencial encontrada en la literatura sobre el tema. En este caso se toma de la lista de especies introducidas en aguas continentales del Perú según Ortega *et al.* (2012). Luego con base en la clasificación propuesta por Le Prieur *et al.* (2008) se reasignaron los valores del indicador para que estén en el rango de 0 a 1 al igual que los demás indicadores calculados.

Información requerida: Se requieren las siguientes capas de información: i) número de especies no-nativa, y ii) delimitación de unidades hidrográficas.

Cálculo del indicador: Este indicador se calcula para cada subcuenca, considerando la clasificación global propuesta por Le Prieur *et al.* (2008), que los agrupa en tres clases: 0-5, 5-20, y 20-70, reasignando dichos valores a 0, 0.5, y 1 respectivamente.

3.3.6.2. Indicador 9: Presión acuícola

Según Vörösmarty *et al.* (2010), la acuicultura es una amenaza de rápido crecimiento en los ríos del mundo y que impacta sobre la seguridad hídrica y la biodiversidad de los ecosistemas de agua dulce. El sustento del cálculo de este indicador es que la actividad acuícola degrada la calidad del agua, altera la estructura del hábitat y flujo del agua cuando se practica directamente en el cuerpo de agua, asimismo, es una fuente de especies no-nativas que pueden llegar a ser invasivas en algunos casos. Sin embargo, como también lo señalan Vörösmarty *et al.* (2010), se debe indicar que se reconoce la importancia de la acuicultura para la seguridad alimentaria cuando se realiza adecuadamente. Igual que en el caso del cálculo del indicador ocho, existe poca información sobre la producción acuícola a nivel detallado en los ríos del Perú. En ese sentido, con base en la información nacional existente se aproximó el cálculo de este indicador a través de la ubicación de los derechos y concesiones acuícolas obtenidas del Catastro Acuícola Nacional del Ministerio de la Producción.

Información requerida: Se requieren las siguientes capas de información: i) ubicación de la actividad acuícola, ii) extensión de los cuerpos de agua, y iii) delimitación de unidades hidrográficas.

Cálculo del indicador: Este indicador se calcula para cada subcuenca, dividiendo la extensión del área concesionada para acuicultura dentro de las lagunas entre el área total de las lagunas. Se expresa en el rango de 0 a 1 y no tienen unidades.

Tabla 3. Temas, indicadores y pesos para el cálculo del Índice de Amenaza Ecohidrológica

N°	Tema Indicador	IAEH
		Peso Relativo
I	Recursos hídricos-Cantidad	0.25
1	Fragmentación de ríos	0.3
2	Índice de estrés hídrico por usos consuntivos	0.22
3	Índice de estrés hídrico humano	0.04
4	Índice de estrés hídrico agrícola	0.07
5	Interrupción del flujo	0.12
6	Desconectividad de humedales	0.25
II	Recursos hídricos-Calidad	0.25
7	Contaminación por aguas residuales	1
III	Factores bióticos	0.5
8	Número de especies no-nativas	0.53
9	Presión acuícola	0.47

Nota: IAEH= Índice de Amenaza Ecohidrológica

3.3.7. Transformación y estandarización estadística de los indicadores

Se requiere realizar una transformación estadística de los datos, debido a que los indicadores, por lo general, no seguirán una distribución normal. En ese sentido, se puede usar algunas de las transformaciones estadísticas como la lognormal, exponencial, gamma, la transformación de Johnson o la transformación de *Two-step* (Templeton 2011) para aproximar los datos a una distribución normal, la cual se puede evaluar por medio de los test de normalidad de Kolmogorov-Smirnov, Shapiro-Wilk, y los valores de asimetría y curtosis.

Con los valores de los indicadores normalizados, se procede a su estandarización conforme al procedimiento sugerido por Vörösmarty *et al.* (2010) adaptándolo para en lugar de calcularlo por celdas realizarlo a nivel de subcuencas. La normalización es necesaria debido a que los indicadores calculados inicialmente se encuentran en distintas escala y unidades, por lo cual se requiere estandarizar dichos valores en una escala común y continua. Para

realizar la estandarización, se usó la Función de Distribución Acumulada (FDA) de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$\widehat{D}(D_i) = P(D_i) = \frac{n}{N_{total}}$$

Donde \widehat{D} es el valor del driver estandarizado para la celda i de la malla, D_i es el valor del driver normalizado, P es la probabilidad acumulada, n es el rango de D_i relativo a todas las celdas de la malla ordenadas de modo ascendente, y N_{total} es el número total de celdas en la malla. Este procedimiento escala los valores de los indicadores en el rango de 0 a 1 (0 sin amenazas incidentes y 1 la más alta amenaza incidente), reemplazando cada valor inicial del driver con su percentil dentro de la frecuencia de distribución de valores a través de todas las celdas de la malla. Según Vörösmarty *et al.* (2010), la finalidad de este procedimiento es que todos los drivers estén ubicados en una misma escala numérica, así la influencia de los valores extremos es moderada y no es necesario aplicar cortes o transformaciones arbitrarias. Para cada celda en las que el valor de un driver dado fu estimado con certeza en cero, dicho driver se fijó en cero y se excluyó de la estandarización FDA. Estos procedimientos se pueden aplicar en programas estadísticos como SPSS o Minitab.

3.3.8. Índice de Amenaza Ecohidrológica (IAEH)

El Índice de Amenaza Ecohidrológica (IAEH), se calcula usando la fórmula propuesta por Vörösmarty *et al.* (2010) para el cálculo de los índices de amenazas incidentes a la seguridad hídrica y la biodiversidad. El $IAEH_i$ se calcula mediante la siguiente formula:

$$IAEH_i = \sum_{j=1}^4 \sum_{k=1}^{d_j} W_j \omega_{k,j} \widehat{D}_{i,j,k}$$

Donde W_j es el peso del tema j , $\omega_{k,j}$ es el peso del indicador k dentro del tema j , d_j es el número de indicadores subsidiarios dentro del tema j , y $\widehat{D}_{i,j,k}$ es el puntaje estandarizado del

indicador k dentro del tema j para cada celda i de la malla. W_j de $j = 1, 2, \dots, 4$ suma 1.0, así como $\omega_{k,j}$ de $k = 1, 2, \dots, d_j$.

Los valores de los pesos W_j y $\omega_{k,j}$ sugerido por Vorosmarty *et al.* (2010), reflejan la opinión de expertos en un amplio rango de disciplinas (ecología de ríos, ingeniería civil, economía ambiental, hidrología, evaluación de recurso hídricos) y con experiencia en trabajos en la mayoría de los continentes (América del norte y del Sur, Europa del Este y del Oeste, África, Asia del sudeste y Australia). Sin embargo, Vörösmarty *et al.* (2010), reconoce que la composición del equipo tuvo un sesgo hacia instituciones de países occidentales industrializados (3 de Norteamérica, 2 de Europa, 2 de Australia y 1 de Asia).

Para el caso de su uso en el Perú, en la presente propuesta metodológica se realizaron algunas modificaciones en la distribución de los pesos conforme a la propuesta de temas e indicadores seleccionados en la presente investigación. En ese sentido, en el caso de las variables que eran las mismas que las señaladas por Vörösmarty *et al.* (2010), se usaron los mismos pesos. En el caso del Tema I y el Tema II, el peso asignado fue de 0.25 para cada uno, ya que se consideró la misma importancia de ambos temas. En el caso del Tema III se le asignó el peso de 0.5, de manera que entre los tres temas sumen la unidad, dándose igualmente la misma importancia a los temas sobre recursos hídricos y los temas biológicos que son la base para la determinación de los caudales ecológicos. En el caso de los dos indicadores del Tema III, se realizó un prorrateo entre los pesos asignados por Vörösmarty *et al.* (2010) de manera que sumen la unidad. Los valores finales se muestran en la Tabla 3.

La integración de los tres temas y nueve indicadores se realizó con el apoyo de la herramienta *ModelBuilder* del programa ArcGIS 10.7. *ModelBuilder* es una aplicación que se utiliza para crear, editar y administrar modelos. Los modelos gráficos, son una alternativa a la programación convencional, y en este caso se representan flujos de trabajo que encadenan secuencias de herramientas de geoprocésamiento y suministran la salida para su usarse en otra herramienta como entrada. *ModelBuilder* también puede considerarse como un lenguaje de programación visual para crear flujos de trabajo. El modelo construido para el cálculo del IAEH se muestra en la Figura 4. En la Tabla 4 se muestra los rangos de clasificación y la

leyenda que se usó para la elaboración de los mapas que resulten del cálculo del IAEH a fin de establecer una correspondencia cualitativa con el nivel de amenaza.

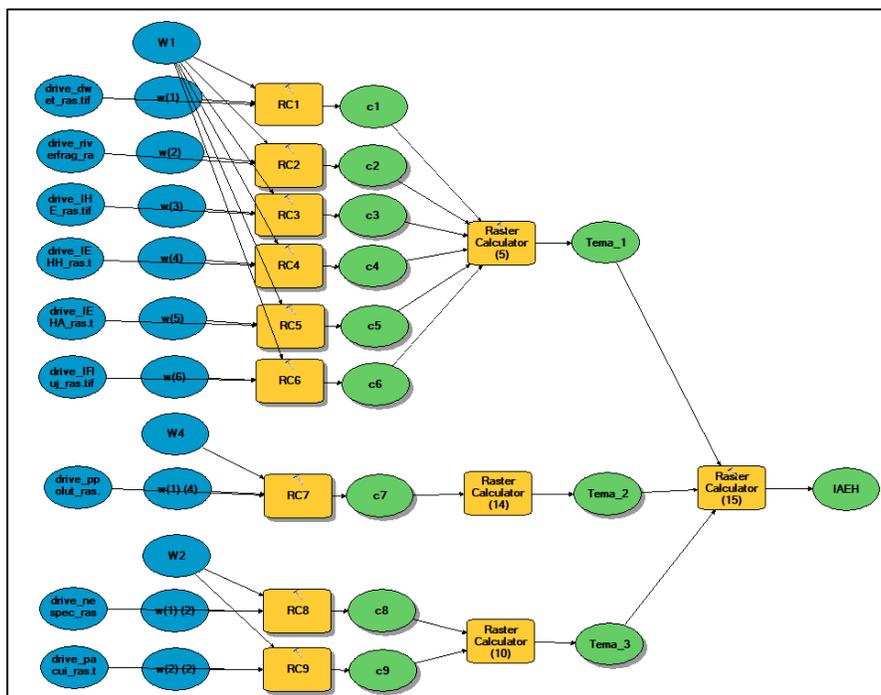


Figura 4. Modelo construido con la herramienta *ModelBuilder* para calcular el IAEH

Tabla 4. Rangos de clasificación y leyenda del IAEH

Rangos	Leyenda	
0.0-0.25		Baja
0.25-0.5		Baja - Moderada
0.5-0.65		Moderada
0.65-0.75		Moderada - Alta
0.75-1.00		Alta

Fuente: Adaptado de Vörösmarty *et al.* (2010) y Sood *et al.* (2017)

3.3.9. Presente Estado Ecohidrológico (PEEH)

El Presente Estado Ecohidrológico (PEEH), es un indicador del estado ecohidrológico actual del ecosistema acuático en comparación de cuanto se aleja de su estado natural considerando los cinco estados de la Tabla 5, adaptada de Kleynhans (1996) y Kleynhans (2000). El PEEH se determina en función de los resultados del IAEH, el cual se agrupa en cinco rangos: 0-0.25, 0.25-0.5, 0.5-0.65, 0.65-0.75 y 0.75-1.00. Según Sood *et al.* (2017), este agrupamiento es un tanto arbitrario, pero es consistente con la escala del índice BD y HWS propuesto por Vörösmarty *et al.* (2010), el cual toma como punto de quiebre el valor de 0.5 para separar la baja y alta amenaza, y, asimismo, considera a los valores >0.5 como moderados niveles de amenazas y a los valores >0.75 como niveles muy altos de amenaza. En la Tabla 6, se detallan los rangos de clasificación del IAEH que se asociarán con el PEEH.

3.3.10. Clases de Manejo Ecohidrológico (CMEH)

Las Clases de Manejo Ecohidrológico (CMEH), representan la condición en la que se desea mantener los ecosistemas acuáticos de la cuenca, y puede coincidir con el PEEH, pero también puede diferir si se le asigna una condición ecológica distinta a la actual, producto, por ejemplo, de una negociación entre los actores de la cuenca debido a la competencia por el uso de los recursos hídricos. Las CMEH se toman de las metodologías descritas en Kleynhans (1996, 2000), Smakhtin y Anputhas (2006), King *et al.* (2008), Vörösmarty *et al.* (2010) y Sood *et al.* (2017) con algunas adaptaciones y se asignan directamente las cuencas o subcuencas evaluadas conforme a la Tabla 5. En la Tabla 6, se detallan los rangos de clasificación del PEEH que se asociarán con las CMEH.

Tabla 5. Presente Estado Ecohidrológico (PEEH) y Clases de Manejo Ecohidrológico (CMEH)

PEEH	CMEH	Descripción	Perspectiva de manejo
A: Natural	A: Natural	Condiciones prístinas o modificaciones mínimas del hábitat del río y del hábitat ribereños	Protección de los cuerpos de agua y de la cuenca hidrográfica. No se permiten nuevos proyectos de agua (embalses, desvíos, trasvases, etc.)
B: Levemente modificado	B: Levemente modificado	Los hábitats y la biodiversidad está ampliamente intacta a pesar de los proyectos de recursos hídricos y las modificaciones que existen en la cuenca	Sistemas de abastecimiento de agua o el desarrollo de proyectos de irrigaciones están presentes y/o permitidos.
C: Moderadamente modificado	C: Moderadamente modificado	Los hábitats y la dinámica de la biota han sido disturbados, pero las funciones básicas del ecosistema siguen aún intactas. Algunas especies sensibles se han perdido o reducido en extensión, Existe presencia de especies invasoras.	Múltiples áreas disturbadas asociados con las necesidades del desarrollo socio económico de la población, ej., embalses, desvíos de agua, modificaciones del hábitat y reducción de la calidad del agua.
D: Mayormente modificado	D: Mayormente modificado	Ha ocurrido grandes cambios del hábitat natural, la biota y las funciones básicas de los	Área disturbadas de manera significativa y claramente visibles asociadas con el desarrollo de la cuenca y los

<<Continuación>>

		ecosistemas. Una clara disminución de la riqueza de especies, disminución de especies no tolerables al hábitat modificado y prevalencia de especies invasoras.	recursos hídricos, que incluye embalses, represas, desvíos de agua, trasvases, modificación del hábitat y degradación de la calidad del agua.
E: Severamente modificado	No aceptable como una CMEH	La disponibilidad y diversidad de hábitat han declinado. Una notable disminución de la riqueza de especies. Solo especies tolerantes permanecen. Las especies nativas ya no pueden reproducirse. Especies introducidas han invadido el ecosistema.	Alta densidad de población y una extensiva explotación de los recursos hídricos. Este estado no es aceptable como un objetivo de manejo, por lo que se requiere más bien de intervenciones para restaurar los patrones del flujo y así “mover” al ecosistema a una de las categoría de manejo.

Fuente: Adaptado de DWAF (1999), Smakhtin y Anputhas (2006) y Dickens *et al.* (2019)

Tabla 6. Clasificación del PEEH en función de los rangos de clasificación del IAEH

Rangos IAEH	Leyenda PEEH/CMEH	Descripción PEEH/CMEH
0.0-0.25	A/A	Natural
0.25-0.5	B/B	Levemente Modificado
0.5-0.65	C/C	Moderadamente Modificado
0.65-0.75	D/D	Largamente Modificado
0.75-1.00	E/D	Severamente Modificado

Fuente: Adaptado de King *et al.* (2008), Vörösmarty *et al.* (2010) y Sood *et al.* (2017)

3.3.11. Curva de Duración de Caudales (CDC)

El cálculo de la Curva de Duración de Caudales (CDC) es la siguiente etapa de la metodología para determinar los caudales ecológicos con fines de la planificación de los recursos hídricos en los ámbitos de cuencas. Según Smakhtin (2000), la CDC es la relación que existe entre el valor de una descarga dada y el porcentaje del tiempo que esta descarga es igualada o excedida, y además, ofrece un resumen de la variabilidad del flujo en un sitio específico y representa quizás el método más informativo para mostrar el rango completo de descargas de un río, desde eventos de bajo flujo a evento de inundaciones. La CDC es frecuentemente usada en temas relacionados con la calidad del agua, diseño de esquemas de abstracciones de agua de ríos y estimaciones de los requerimientos de flujos ambientales o caudales ecológicos, etc. Para el cálculo de la CDC se usó el procedimiento descrito en detalle en Hughes y Smakhtin (1996) y que ha sido la base para las más recientes metodologías de caudales ecológicos basadas en el uso de la CDC. Este procedimiento se puede calcular con apoyo de distintos programas informáticos hidrológicos que existen actualmente, pero también se puede implementar en programas de hoja de cálculo o por medio de un lenguaje de programación. En esta aplicación se usó el programa Excel para su construcción a fin de tener el control de todo el procedimiento, pero se usó también el programa libre FDC 2.1 (Gregor, 2010) para un contraste de los resultados durante el procedimiento de su cálculo.

Los pasos involucrados en la construcción de la CDC fueron los siguientes:

- 1. Construcción de la CDC de referencia:** Para la construcción de la CDC de referencia se requiere de información de caudales sea a nivel diario o mensual y en un periodo de tiempo lo suficientemente extenso, lo recomendable es entre un mínimo de 10 a 30 años (Vogel y Fennessey 1994; Hope y Bart 2002; Pérez *et al.* 2018). Esta información puede provenir de datos medidos o producto de un modelamiento hidrológico. En la presente investigación se usaron los datos de descargas mensuales históricas (1984-2016) modelados con el programa SWAT (ANA, 2022). Estos datos se introdujeron en el programa Excel computándose el número total de registros y luego se ordenaron de mayor a menor. Seguidamente se usó la función jerarquía para

establecer un número de orden consecutivo y por último se calculó la probabilidad de excedencia con la fórmula que se muestra a continuación:

$$P = 100 x \left[\frac{M}{(n + 1)} \right]$$

Donde, P es la probabilidad que un caudal dado sea igualado o excedido (porcentaje de tiempo), M es la posición que ocupa el caudal en el registro ordenado de manera decreciente (adimensional) y n es el número de datos para el periodo de registro (adimensional).

2. **Determinación de valores de porcentajes fijos de la CDC de referencia:** De acuerdo con Hughes y Smakthin (1996), se definieron 17 puntos de porcentaje fijo para el cálculo de la CDC de referencia que corresponden al 0.01, 0.1, 1, 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 95, 99, 99.9 y 99.99 por ciento del tiempo de excedencia, con la finalidad de cubrir adecuadamente el rango completo de la variabilidad de los caudales. Estos 17 puntos con sus correspondientes valores de caudales, se representa en una Tabla de Duración de Descargas (TDD), que es una representación discreta de la CDC para su posterior uso y análisis (Smakhtin 2000). A efectos de estimar los porcentajes fijos de los tiempos de excedencia señalados, se usó un método de interpolación y extrapolación logarítmico según los sugerido por Hughes y Smakhtin (1996), Shu y Ouarda (2012) y Requena *et al.* (2017), cuya ecuación se describe a continuación:

$$\ln Q_x = \ln Q_i + \left[\frac{\ln Q_{i-1} - \ln Q_i}{Pe_{i-1} - Pe_i} \right] x (Pe_x - Pe_i)$$

Donde, Q_x es el caudal interpolado, Q_{i-1} y Q_i son los caudales ubicados a ambos lados de Pe_x , que es la probabilidad de excedencia para la cual se determinará el caudal, Pe_{i-1} y Pe_i son las probabilidades de excedencia ambos lados de Pe_x .

3. Determinación de las CDC para las CMEH: Los 17 puntos de porcentaje fijo para el cálculo de la CDC de referencia, también se calcularon para las cuatro Clases de Manejo Ecohidrológico (CMEH) posibles, previamente definidas en la metodología (A, B, C y D). Este cálculo se realizó a través del procedimiento señalado en Smakhtin y Anputhas (2006). Las nuevas CDC son determinadas por un desplazamiento lateral de la CDC de referencia, sobre el eje de la probabilidad de excedencia. Por ejemplo, el desplazamiento de un punto en la CDC de referencia, equivale a decir que el caudal excedido el 99.99 por ciento, ahora es excedido el 99.9 por ciento, el caudal excedido el 99.9 por ciento ahora es excedido el 99 por ciento, y así sucesivamente. En la Figura 5 se muestra un gráfico del procedimiento indicado.

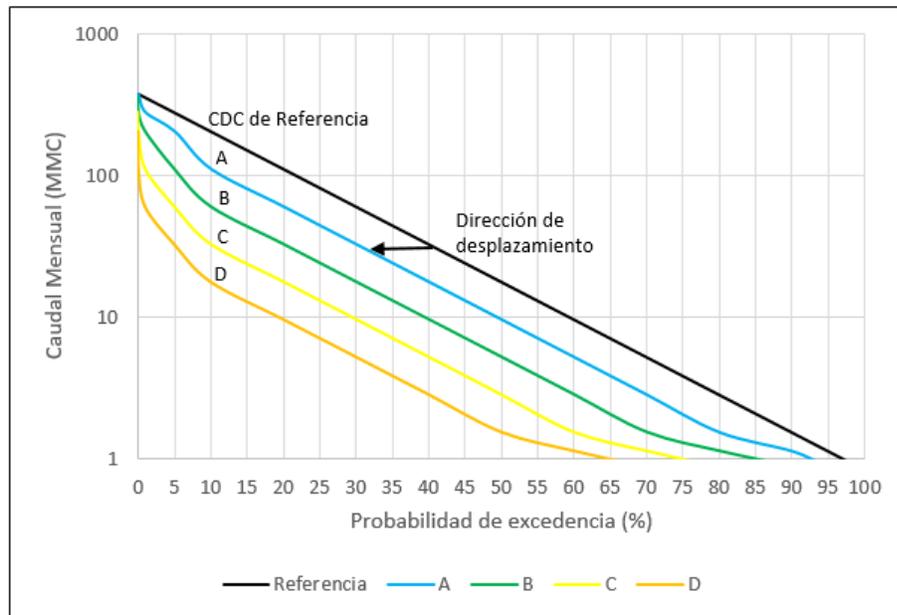


Figura 5. CDC y su relación con las CMEH. Fuente: adaptado de Smakhtin y Anputhas (2006)

4. Transferencia de la CDC de las CMEH a caudales mensuales: Del cálculo de las CDC para las cuatro CMEH posibles que se muestran a través de las TDD, se obtienen los valores de los caudales estimados en los 17 puntos de porcentajes fijos establecidos, por lo que luego de este cálculo, es necesario transferir y generar a partir

de dichos valores la serie histórica mensual. Esta transferencia se realiza a través del procedimiento de interpolación descrito anteriormente (Hughes y Smakhtin 1996) y que gráficamente se muestra en la Figura 6. Según Smakhtin y Anputhas (2006) el principio que subyace en esta técnica es que el caudal que ocurre simultáneamente en sitios razonablemente cercanos, se corresponde con similares puntos de porcentaje de sus respectivas CDC.

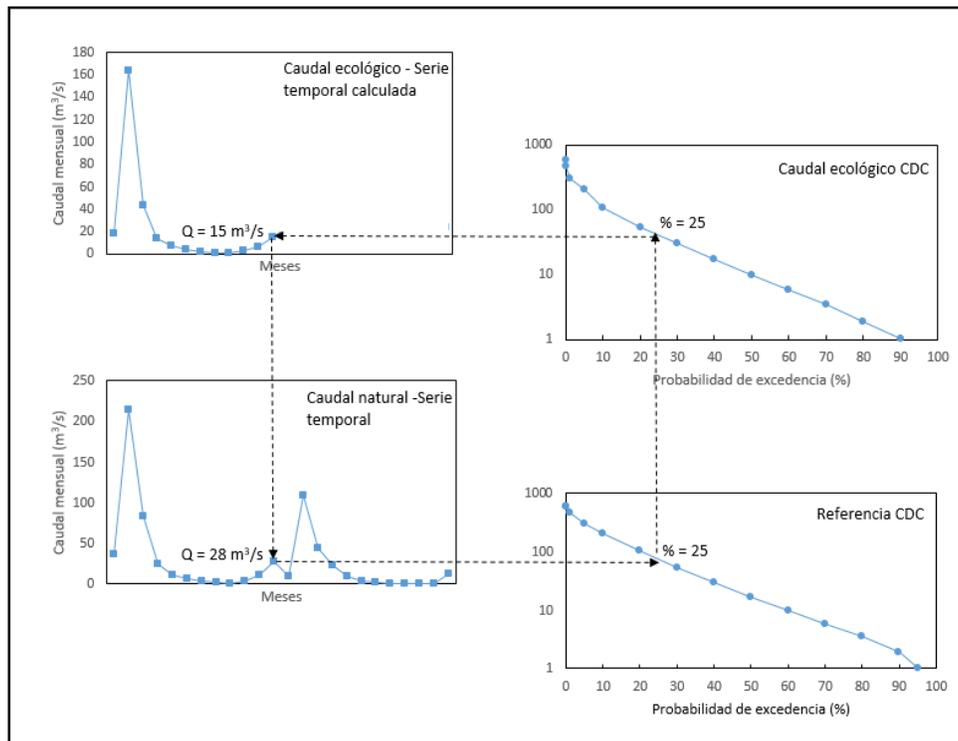


Figura 6. Transferencia de caudales mensuales en función del cálculo de la CDC

Fuente: adaptado de Hughes y Smakhtin (1996)

3.3.12. Cálculo del Caudal Ecológico con la metodología CMEH-CDC

La determinación del caudal ecológico con la presente metodología «CMEH-CDC» se ha conceptualizado como un método holístico para su uso con fines de planificación hídrica, siendo implementado en gabinete y con información existente, de manera que se pueda aplicar a nivel nacional. En ese sentido, el método se considera holístico, ya que para

determina el caudal ecológico considera, además de las características hidrológicas de las cuencas mediante la evaluación de la información de caudales a través de las curvas de duración y la probabilidades de excedencia; las características ecológicas y socioeconómicas a un nivel de semidetalle, por medio del Índice de Amenaza Ecohidrológica (IAEH), que a su vez es la base para determinar el Presente Estado Ecohidrológico (PEEH) de las cuencas. De esta manera se consigue relacionar principalmente las características ecológicas e hidrológicas para la determinación del caudal ecológico, y a su vez, el IAEH también considera en cierta medida las características socioeconómicas de las cuencas, por lo que puede considerarse como un método holístico de gabinete o «Desktop».

Para la determinación del caudal ecológico en una UH específica, se usará la siguiente información: i) el Presente Estado Ecohidrológico (PEEH) y ii) las Curvas de Duración de Caudales (CDC) definida para la condición de referencia y las cuatro Clases de Manejo Ecohidrológico (CMEH) o escenarios posibles de gestión que se consideran como aceptable para mantener en la UH evaluada. Idealmente, en esta etapa se recomienda la realización de talleres con los actores de la cuenca o el uso de plataformas de articulación como los consejos de recursos hídricos de cuenca que se vienen implementado en el país por la ANA, de manera que producto de la información generada y los intercambios de opiniones se tomen las mejores decisiones, a fin de definir la CMEH deseada producto de las negociaciones a las que se llegue, lo cual está acorde con la determinación de caudales ecológicos en el marco del enfoque de sistemas social-ecológicos complejos. De lo contrario se puede tomar directamente las CMEH en función del PEEH, como una primera aproximación.

Se debe tener presente que, por lo general, se busca mantener o mejorar el PEEH de una UH cuando se define su CMEH, es decir, una determinada UH se puede subir a otra CMEH de entre las posibles (A, B, C y D), pero también se puede optar a la inversa. Del mismo modo, se puede optar por pasar de un PEEH como el E (severamente modificado) a una CMEH de las permitidas (A, B, C y D) a fin de contribuir a su recuperación, teniendo en cuenta que una clase más alta siempre implicará una mayor asignación de agua y una mayor preservación de la variabilidad del caudal. En función de las presiones por los usos del agua y las negociaciones a las que se lleguen, también podría pasar a una clase inferior pero dentro de

las cuatro clases aceptables (A-D). Todo dependerá de los intereses de los involucrados y a los acuerdos a los que se lleguen. Cuando se definen las CMEH para cada unidad hidrográfica de la cuenca. El paso siguiente es determinar los caudales ecológicos a nivel mensual en función de los caudales calculados por medio de la Curva de Duración de Caudales (CDC).

Para el Perú, debido a que en el marco legal vigente (Ley N° 29338 y su Reglamento) se señala que: «Los caudales ecológicos se mantienen permanentemente en su fuente natural, constituyendo una restricción que se impone con carácter general a todos los usuarios de la cuenca, quienes no podrán aprovecharlos bajo ninguna modalidad para un uso consuntivo», será fundamental retirar este valor de la oferta hídrica de la UH y planificar el uso de los recursos hídricos con base en la disponibilidad hídrica una vez retirados los caudales ecológicos. La determinación del caudal ecológico usando el método propuesto (CMEH-CDC) será calculado con base en los datos de caudales medio mensuales que han sido modelados con el programa SWAT en la cuenca del río Pisco para el periodo 1984-2016 (ANA 2022) y a la salida de tres UH previamente seleccionadas para su aplicación y análisis, que son las siguientes: UH Incachaque, UH Medio Bajo Pisco y UH Bajo Pisco.

3.3.13. Prueba de hipótesis

Para probar la hipótesis planteada en la presente investigación, se definió un Índice de Déficit del Caudal Ecológico (IDCE), el cual se calculó a nivel mensual con la siguiente fórmula:

$$\text{IDCE} = \text{Producción Hídrica Natural} - \text{Caudal Ecológico}$$

El IDCE para el mes evaluado se considera adecuado cuando es positivo (+) y no adecuado cuando es negativo (-). Debido a que en un año puede haber meses con valores tanto positivos y negativos del IDCE, en su aplicación práctica se considerará como el método más adecuado aquel que presenta el mayor número de meses con valores positivos.

Para el caso del método de Tennant (original y modificado), el IDCE presentará valores positivos cuando en el mes evaluado es posible cumplir con los requerimientos del caudal

ecológico para la CMEH asignada, mientras que presentará valores negativos cuando no sea posible cumplir con estos requerimientos.

Para el caso del método propuesto CMEH-CDC, el IDCE presentará valores máximos cuando de las CMEH posibles (A, B, C y D), se seleccione la de menor requerimiento de caudal mensual, es decir la clase D y presentará valores mínimos cuando se seleccione la CMEH de mayor requerimiento de caudal mensual. En la práctica el método CEMEHCDC siempre presentará valores positivos del IDCE, a diferencia del método de Tennant original y modificado, en los que el IDCE puede ser positivo o negativo en función del caudal ecológico calculado a nivel mensual y que se cubra dicho requerimiento con la producción hídrica de la cuenca.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. INDICADORES PARA EL CÁLCULO DEL ÍNDICE DE AMENAZA ECOHIDROLÓGICA (IAEH)

La metodología propuesta para calcular los nueve indicadores del Índice de Amenaza Ecohidrológica (IAEH), se aplicó en la cuenca del río Pisco a nivel de sus nueve unidades hidrográficas menores. Los resultados obtenidos se muestran en las Figuras de la 7 a la 15. A continuación se detallan los resultados obtenidos del cálculo de cada indicador:

- i. El indicador de fragmentación de ríos se muestra en la Figura 7. Se observa, conforme a la escala estandarizada en el rango de 0-1, que la mayor fragmentación ocurre en la UH Bajo Pisco, debido principalmente a la existencia de bocatomas que captan el agua del río Pisco y la derivan para el uso agrícola en el valle; seguida de las UH Huaytará e Incachaque ubicadas en la parte media alta y alta de la cuenca del río Pisco. En esta última, a pesar de ser una zona de baja intervención, la presencia de vías ha fragmentado el paisaje de los humedales conocidos como bofedales. Mientras que las UH Veladero, Alto Pisco y Medio Pisco, son las que presentan una menor fragmentación de ríos. En el caso de la primera, es una cuenca de la parte media baja, ubicada en la zona árida, en la cual no existe mayor uso debido a la baja disponibilidad natural de la cuenca y la escasa población en la misma. La UH Alto Pisco, ubicada en la parte alta de la cuenca, presenta ligeramente una mayor fragmentación de ríos, debido principalmente a la existencia de lagunas, las cuales han sido represadas (Pultoc). En el caso de la UH Medio Pisco, se ubica en la parte media de la cuenca y no presentan un uso directo del agua del río y tampoco la presencia de embalses que modifiquen la conectividad hidrológica. En las demás UH la fragmentación se ve influenciada por la presencia de bocatomas, lagunas represadas y alcantarillas debido a los cruces de vías.

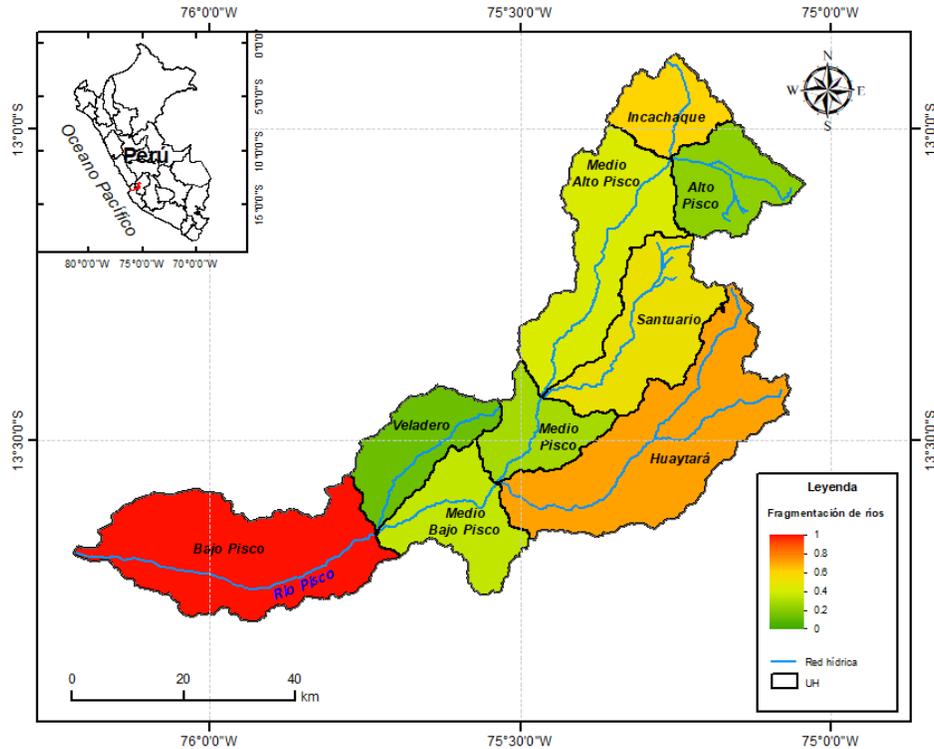


Figura 7. Mapa del indicador fragmentación de ríos para la cuenca del río Pisco

- ii. El indicador de estrés hídrico consuntivo se muestra en la Figura 8. Se observa que, conforme a la escala estandarizada en el rango de 0-1, el mayor estrés hídrico consuntivo ocurre en la cuenca baja, en la UH Bajo Pisco, debido principalmente a la existencia de extensas áreas agrícolas y urbanas que hacen uso intensivo del agua que se extrae del río Pisco, siendo la actividad agrícola la de mayor consumo. La UH Huaytará, ubicada en la cuenca media-alta, también muestra un alto estrés hídrico consuntivo debido a la existencia de áreas agrícolas y centro poblados, que hacen uso del agua que se extrae del río Huaytará, pero en menor medida de lo que sucede en la UH Bajos Pisco. En las UH Santuario y Medio Alto Pisco también existe un uso del agua con fines de riego, sin embargo, debido a la alta producción hídrica, presentan un menor estrés hídrico consuntivo. En las UH Incachaque y Alto Pisco, debido al bajo uso consuntivo de agua que existe, estas UH no presentan estrés hídrico consuntivo.

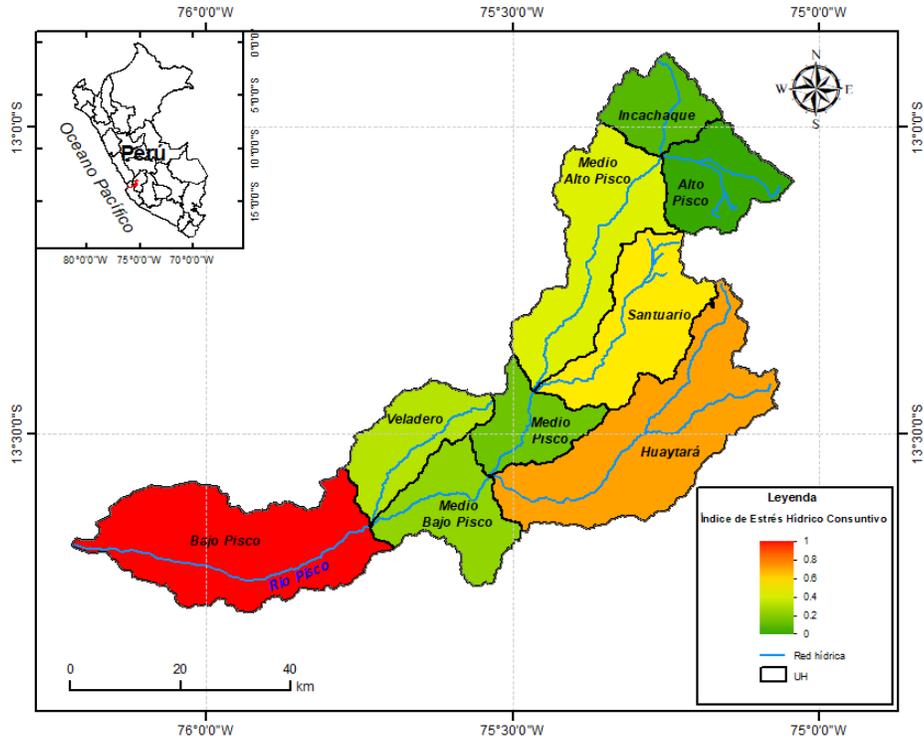


Figura 8. Mapa del indicador índice de estrés hídrico consuntivo para la cuenca del río Pisco

iii. El indicador de estrés hídrico humano se muestra en la Figura 9. Este indicador mostró una mayor variabilidad a nivel de todas las UH de la cuenca. Se observó conforme a la escala estandarizada en el rango de 0-1, que el mayor estrés hídrico humano ocurre en la cuenca baja, en la UH Bajo Pisco y Veladero, seguido de la cuenca media alta con las UH Huaytará, Santuario, Medio Alto Pisco, Alto Pisco e Incachaque. El menor estrés hídrico humano ocurre en las UH Medio Bajo Pisco y Medio Pisco, debido a la menor cantidad de población existente y la mayor disponibilidad de agua. Se debe indicar que este valor calculado de estrés hídrico humano, es relativo, ya que está en función de los valores determinados en cada UH. Sin embargo, si los comparamos con los estándares internacionales, por ejemplo, la clasificación de Moore *et al.* (2015), ninguna de las UH presentaría estrés hídrico humano. Pero este análisis, como se mencionó, permite establecer

una escala relativa de este indicador para el cálculo posterior del índice de amenazas ecohidrológica a en la cuenca.

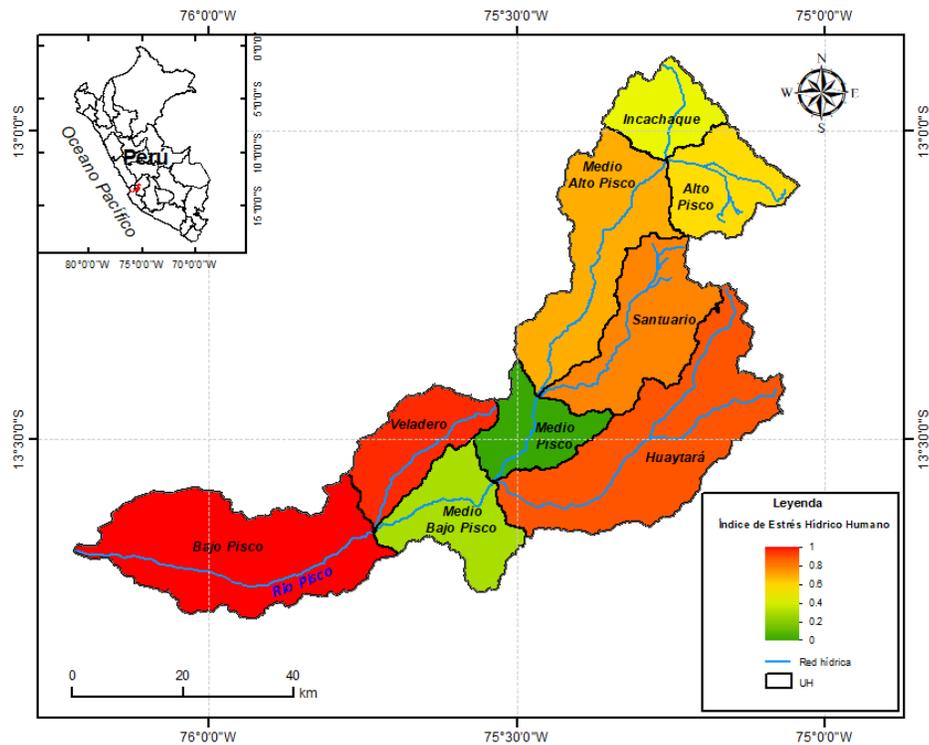


Figura 9. Mapa del indicador índice de estrés hídrico humano para la cuenca del río Pisco

- iv. El indicador de índice de estrés hídrico agrícola se muestra en la Figura 10. Este indicador también mostró una alta variabilidad a nivel de todas las UH de la cuenca. Se observó que, conforme a la escala estandarizada en el rango de 0-1, el mayor estrés hídrico agrícola ocurre en la cuenca baja, en la UH Bajo Pisco y en la cuenca media alta, en las UH Huaytará, Medio Alto Pisco y Santuario; seguido de la cuenca media baja, en las UH Veladero y Medio Bajo Pisco. Las UH Alto Pisco e Incachaque, no presentan estrés hídrico agrícola, debido a que no se identificaron áreas agrícolas bajo riego en dichas UH. En general, los valores de

este indicador varían en función de la extensión de las áreas bajo riego y la producción hídrica de cada UH.

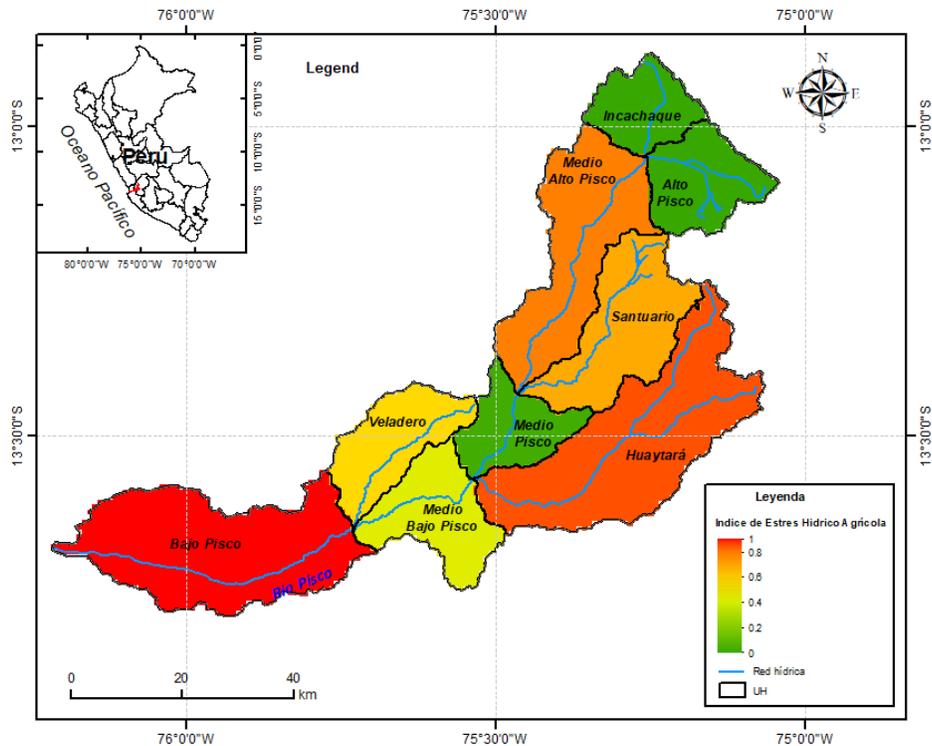


Figura 10. Mapa del indicador índice de estrés hídrico agrícola para la cuenca del río Pisco

- v. El indicador de interrupción de flujo se muestra en la Figura 11. Este indicador también mostró una mayor variabilidad en la parte media alta de la cuenca. Se observó conforme a la escala estandarizada en el rango de 0-1, que la mayor interrupción del flujo ocurre en las UH Huaytará, Alto Pisco y Santuario; seguida por las UH Medio Alto Pisco, Medio Pisco y Medio Bajo Pisco. Las UH Bajo Pisco y Veladero presentan la menor interrupción del flujo, mientras que la UH Incachaque no presenta interrupción del flujo, debido a que no está regulada y forma parte de la cabecera de la cuenca. En general, los valores de este indicador varían en función de la presencia de lagunas reguladas en las UH de la cuenca, así como de la distancia e influencia de la red hidrográficas hacia dichas lagunas.

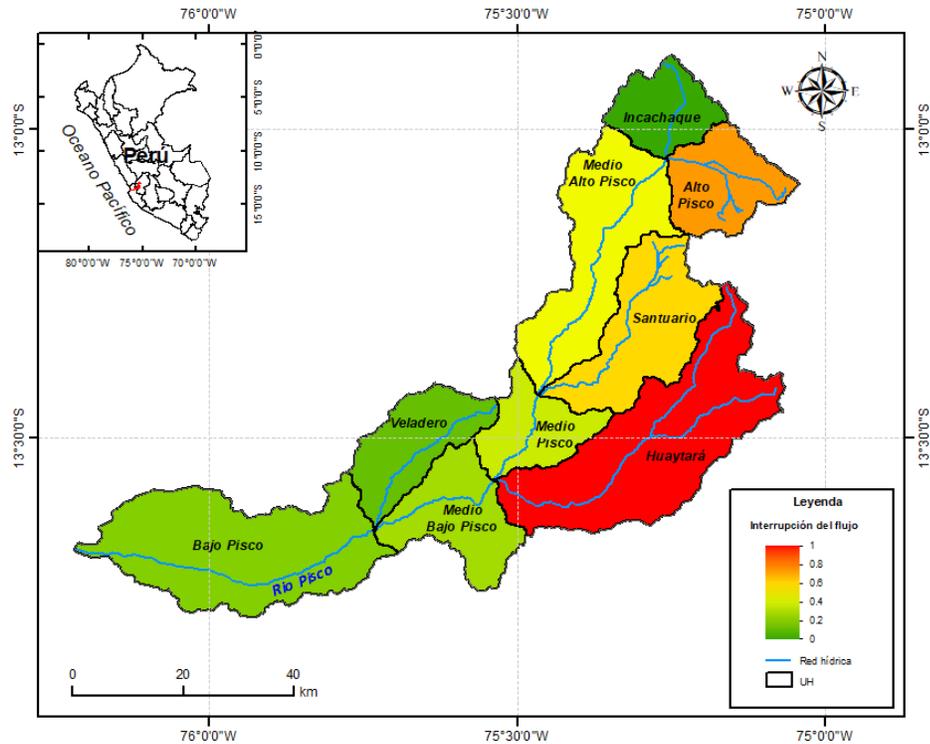


Figura 11. Mapa del indicador interrupción del flujo para la cuenca del río Pisco

- vi. El indicador de desconectividad de humedales se muestra en la Figura 12. Se observa conforme a la escala estandarizada en el rango de 0-1, que la mayor desconectividad de humedales ocurre en la UH Bajo Pisco, debido principalmente a la existencia de extensas áreas agrícolas y urbanas, las cuales han contribuido a fragmentar los humedales de esta parte de la cuenca. En la parte alta de la cuenca la desconectividad de humedales, de mayor a menor orden, ocurren en las UH Santuario, Incachaque, Alto Pisco, Medio Alto Pisco y Huaytará, y se debe principalmente a la fragmentación que han sufrido los humedales a causa de las vías de comunicación que los cruzan. En el caso de las UH Medio Pisco, Medio Bajo Pisco y Veladero, no se identificó la presencia de humedales.

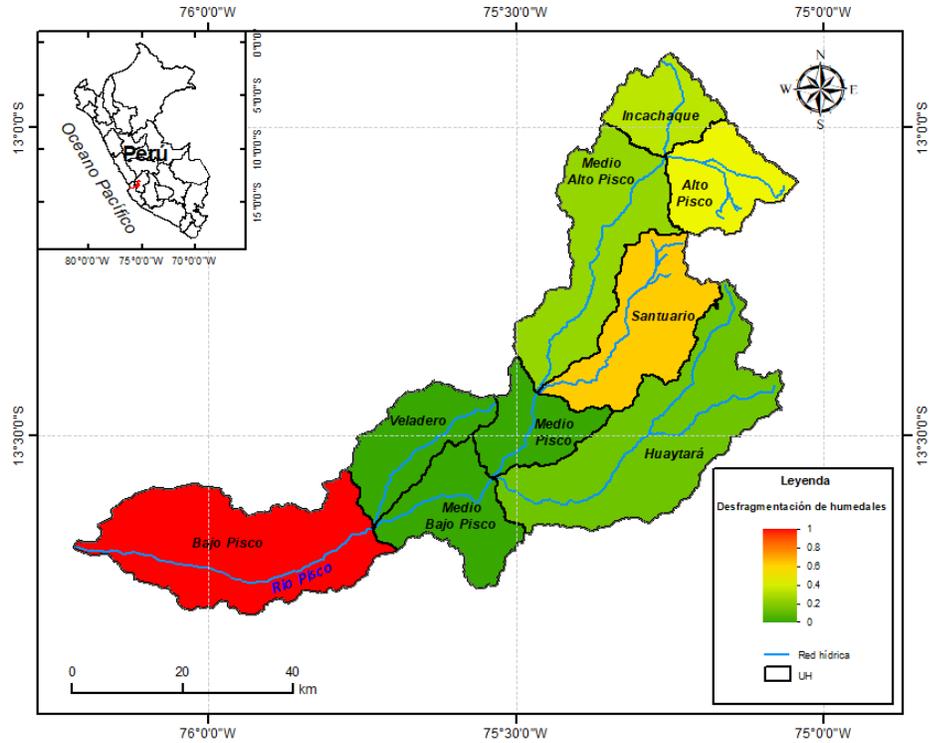


Figura 12. Mapa del indicador desconectividad de humedales para la cuenca del río Pisco

vii. El indicador de contaminación por aguas residuales se muestra en la Figura 13. Se observó conforme a la escala estandarizada en el rango de 0-1, que la mayor contaminación por vertimientos de aguas residuales a la red hidrográfica de la cuenca ocurre en las UH Bajo Pisco y Santuario; seguido de las UH Huaytará, Medio Bajo Pisco, Medio Pisco y Alto Pisco. Las UH Incachaque, Medio Alto Pisco y Veladero, presentan un valor de cero del indicador de contaminación por aguas residuales, debido a que no existe información para su cálculo. En general, los valores de este indicador varían en función de la ubicación de los puntos de vertimientos y del caudal de aguas residuales que se vierte en cada una de las UH de la cuenca del río Pisco.

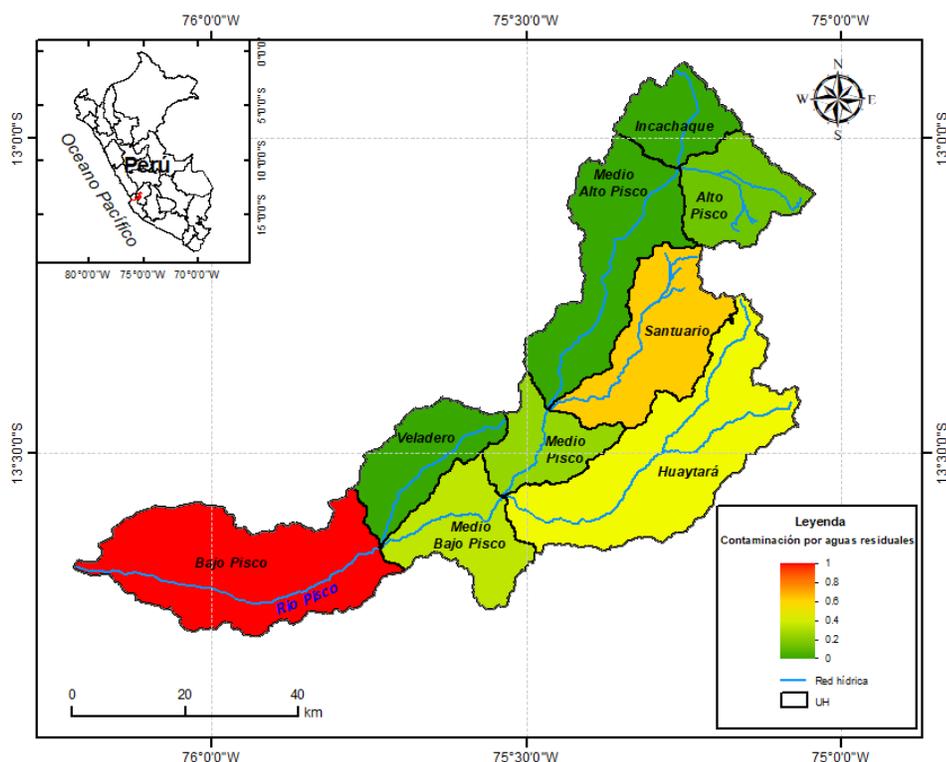


Figura 13. Mapa del indicador contaminación por aguas residuales para la cuenca del río Pisco

viii. El indicador número de especies no-nativas se muestra en la Figura 14. Se observó, conforme a la escala estandarizada en el rango de 0-1, que el mayor número de especies no-nativas o introducidas ocurren en la cuenca baja, en la UH Bajo Pisco. En las demás UH de la cuenca el valor del indicador es cero por la ausencia de información. En general, se puede indicar que los valores de este indicador varían en función de la disponibilidad de información existente de especies introducidas, de la presencia de humedales con espejos de agua superficiales o masas de agua abiertas y de la mayor población a nivel de toda la cuenca, lo cual en este caso ocurre en la parte baja de la misma. Los valores de este indicador son referenciales debido a la falta de información y en la medida que se cuente con mayores datos de especies no-nativas, para las demás UH de la cuenca se podrá actualizar su cálculo.

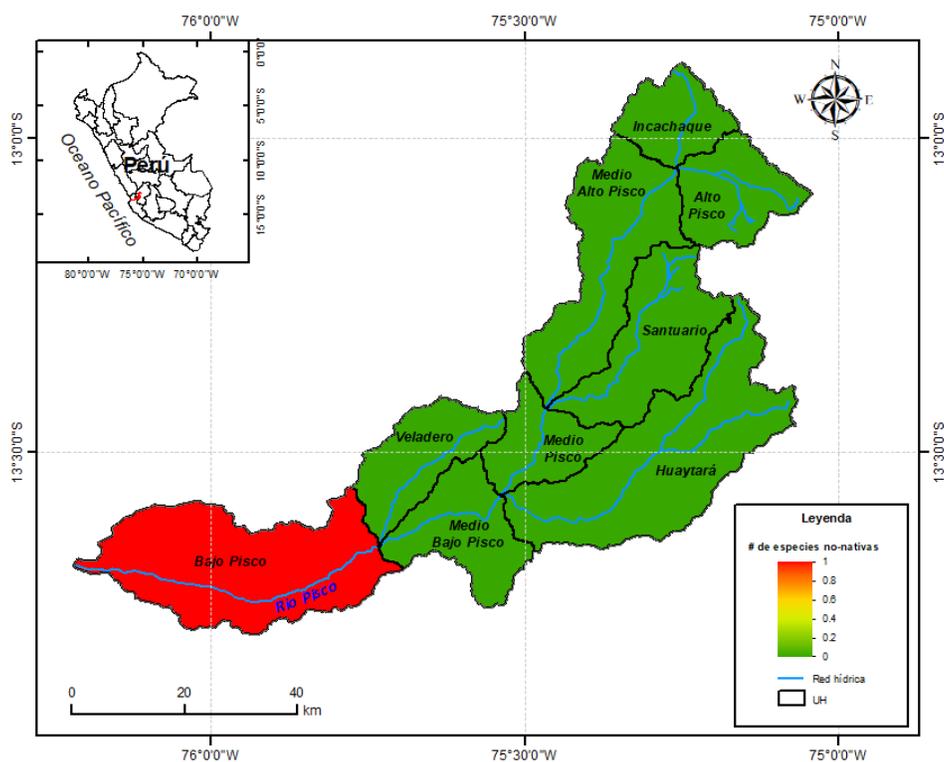


Figura 14. Mapa del indicador número de especies no-nativas para la cuenca del río Pisco

ix. El indicador presión acuícola se muestra en la Figura 15. Se observó, conforme a la escala estandarizada en el rango de 0-1, que la mayor presión acuícola ocurre en la cuenca alta, en las UH Alto Pisco y en la cuenca media alta, en las UH Santuario y Huaytará. En las demás UH de la cuenca no se identificó la presencia de actividad acuícola por lo cual el valor del indicador en estas cuencas es cero. En general, los valores de este indicador varían en función de la ubicación de los derechos acuícolas otorgados y de la existencia de lagunas de extensión considerable para el desarrollo de esta actividad, lo cual ocurre, por lo general, en la parte alta de la cuenca.

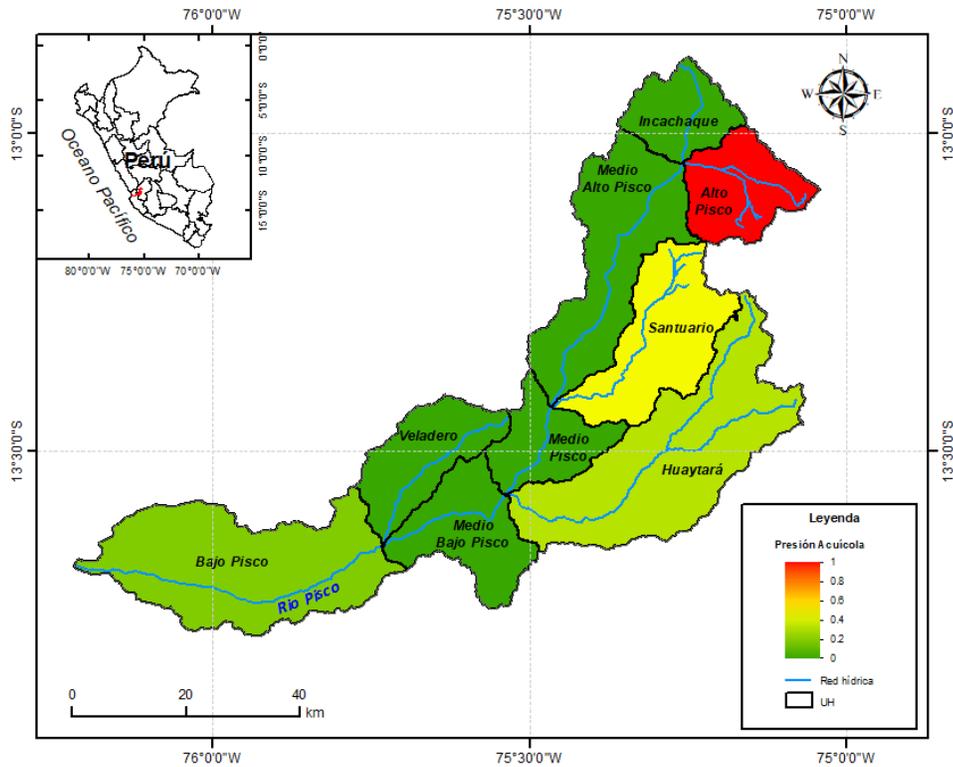


Figura 15. Mapa del indicador presión acuícola para la cuenca del río Pisco

4.2. CÁLCULO DEL ÍNDICE DE AMENAZA ECOHIDROLÓGICA (IAEH)

Los resultados del cálculo del Índice de Amenaza Ecohidrológica (IAEH) para la cuenca del río Pisco se pueden ver en la Figura 16. De acuerdo al IAEH calculado y a la Tabla 4, la UH Bajo Pisco se encuentra en la clase definida como «amenaza moderada», que va del rango de 0.5 a 0.65. Las UH Alto Pisco, Santuario y Huaytará se encuentra en la clase definida como «amenaza baja a moderada», que va del rango de 0.25 a 0.5. Las UH Incachaque, Medio Alto Pisco, Medio Pisco, Medio Bajo Pisco y Veladero se encuentra en la clase definida como «amenaza baja», que va del rango de 0 a 0.25. De acuerdo al IAEH, no existen en la cuenca del río Pisco alguna UH que esté dentro de la clase «amenaza moderada a alta» y «amenaza alta».

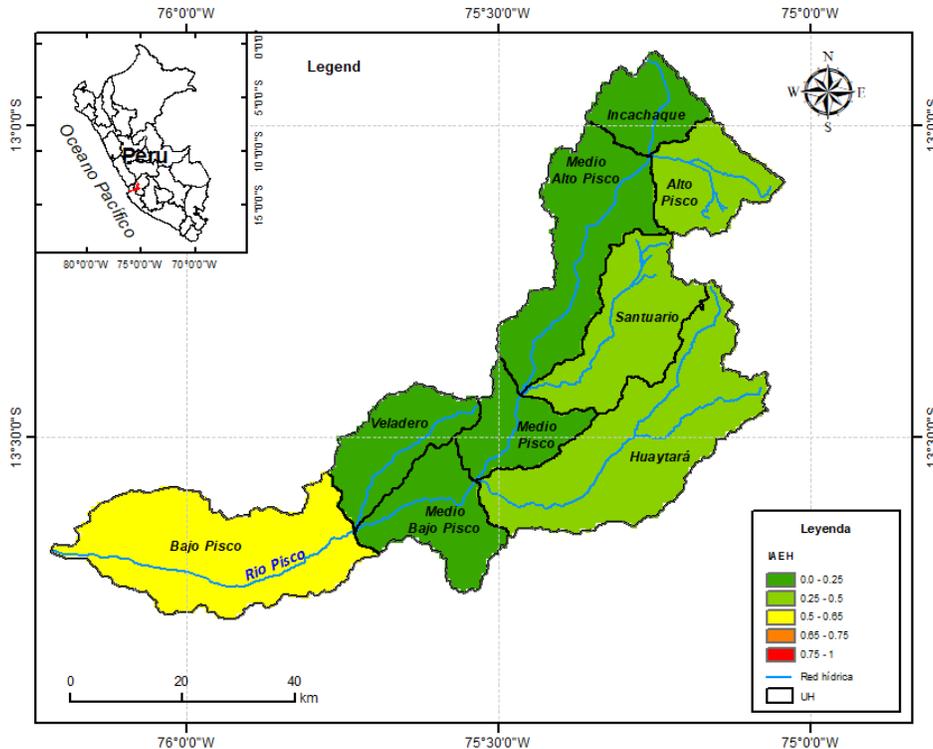


Figura 16. Mapa del Índice de Amenaza Ecohidrológica para la cuenca del río Pisco

4.3. DETERMINACIÓN DEL PRESENTE ESTADO ECOHIDROLÓGICO (PEEH)

Para determinar el PEEH, se relacionaron las clases del IAEH determinado anteriormente con las clases de PEEH posibles, considerando para tal fin la Tabla 4 y Tabla 5. De aquí se definió para cada UH su PEEH lo cual se muestra en la Figura 17 y en la Tabla 7. Las UH Incachaque, Medio Alto Pisco, Medio Pisco, Medio Bajo Pisco y Veladero se encuentra en la clase A, es decir están en un estado muy cerca al natural. Las UH Alto Pisco, Santuario y Huaytará se encuentra en la clase B, es decir están levemente modificadas. Las UH Bajo Pisco se encuentra en la clase C, es decir moderadamente modificada. Esta clasificación es coherente con la información usada y las características de la cuenca evaluada para la construcción del IAEH, en ese sentido, la UH Bajo Pisco, es la que presenta el mayor número de áreas disturbadas, debido a las necesidades del desarrollo socioeconómico de la población, que ha inducido la necesidad del desvío de agua para riego, modificaciones del hábitat y reducción de la calidad del agua.

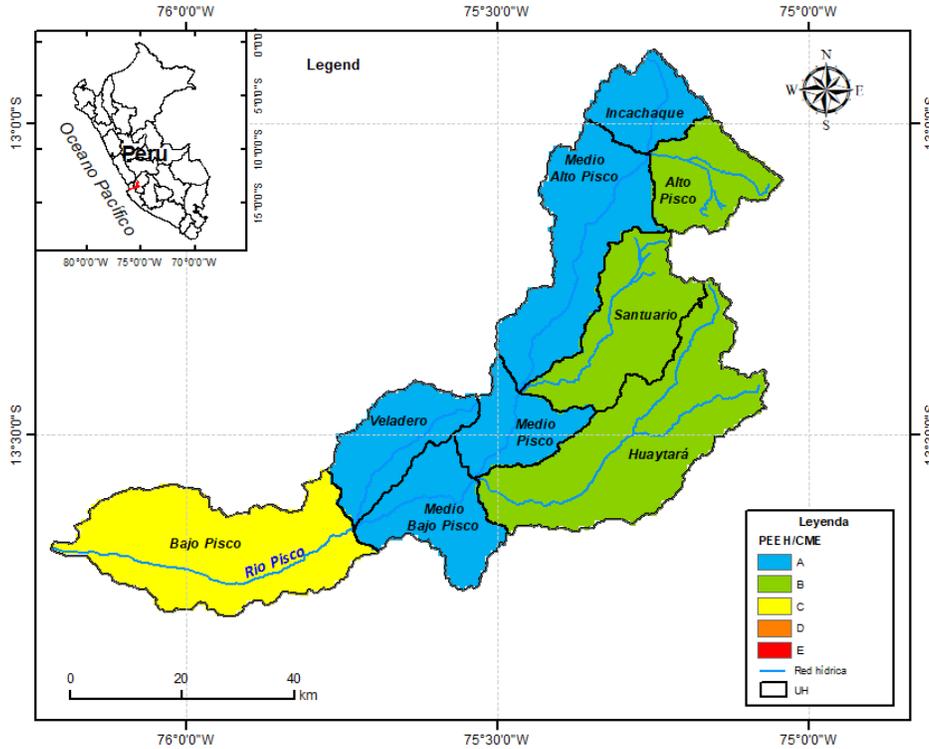


Figura 17. Mapa del Presente Estado Ecohidrológico para la cuenca del río Pisco

Tabla 7. PEEH para las UH de la cuenca del río Pisco

UH-Cuenca Pisco	PEEH	Descripción
Incachaque, Medio Alto Pisco, Medio Pisco, Medio Bajo Pisco y Veladero	A	Condiciones prístinas o modificaciones mínimas del hábitat del río y del hábitat ribereños
Alto Pisco, Santuario y Huaytará	B	Los hábitats y la biodiversidad está ampliamente intacta a pesar de los proyectos de recursos hídricos y las modificaciones que existen en la cuenca
Bajo Pisco	C	Los hábitats y la dinámica de la biota han sido disturbados, pero las funciones básicas del ecosistema siguen aún intactas. Algunas especies sensibles se han perdido o reducido en extensión, Existe presencia de especies invasoras.

4.4. CÁLCULO DE LA CURVA DE DURACIÓN DE CAUDALES (CDC)

El cálculo de la Curva de Duración Caudales (CDC) en la presente investigación se realizó para tres Unidades Hidrográficas (UH) de la cuenca del río Pisco, 1) UH Incachaque – Sitio 1, 2) UH Medio Bajo Pisco – Sitio 2 y 3) UH Bajo Pisco – Sitio 3. Estas UH se seleccionaron en función de los resultados del PEEH determinado, la producción hídrica y la oferta al 75 por ciento de persistencia simulada por el modelo SWAT, los derechos de agua otorgados, así como su ubicación en función de la topografía de la cuenca y el grado de intervención actual que existe. La UH Incachaque está ubicada en la cuenca alta o zona de cabeceras de cuenca, la UH Medio Bajo Pisco está ubicada en la parte media baja de la cuenca y es la que recibe todo el aporte que se genera en la cuenca media y alta; y la UH Bajo Pisco está ubicada en la parte baja de la cuenca, donde se ubica el valle del río Pisco que es el mayor consumidor de agua. Los sitios evaluados se ubican a la salida de cada una de las tres UH (Figura 30).

4.4.1. UH Incachaque-Sitio 1

En la Figura 18 se muestra la CDC calculada en función de la serie de caudales históricos (periodo 1984-2016) que han sido simulados a la salida de la UH Incachaque con el modelo SWAT. El caudal medio histórico simulado en la UH Incachaque es de $3.46 \text{ m}^3/\text{s}$ el cual es igualado o excedido únicamente el 28.7 por ciento del tiempo. Asimismo, el caudal de excedencia del 50 por ciento es de $1.18 \text{ m}^3/\text{s}$, el cual equivale a la mediana. En la Figura 19 se observa la CDC calculada para los 17 puntos de porcentaje fijo conforme a la metodología (0.01, 0.1, 1, 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 95, 99, 99.9 y 99.99 %), construida con base a los caudales de referencia que se muestran en la TDD (Tabla 8). En la Tabla 8 se muestran también los valores de los caudales que le corresponden a cada una de las CMEH posibles (A, B, C y D) calculados en función del caudal de referencia, como se indicó, para los 17 puntos de porcentaje fijo. En la Figura 20 se muestran las CDC graficadas en escala logarítmicas para los caudales de referencia y los caudales de los cuatro escenarios de las CMEH posibles para la UH Incachaque. Se observa que a mayor CMEH, mayor es el requerimiento de agua y mejor se reproduce la variabilidad anual del caudal.

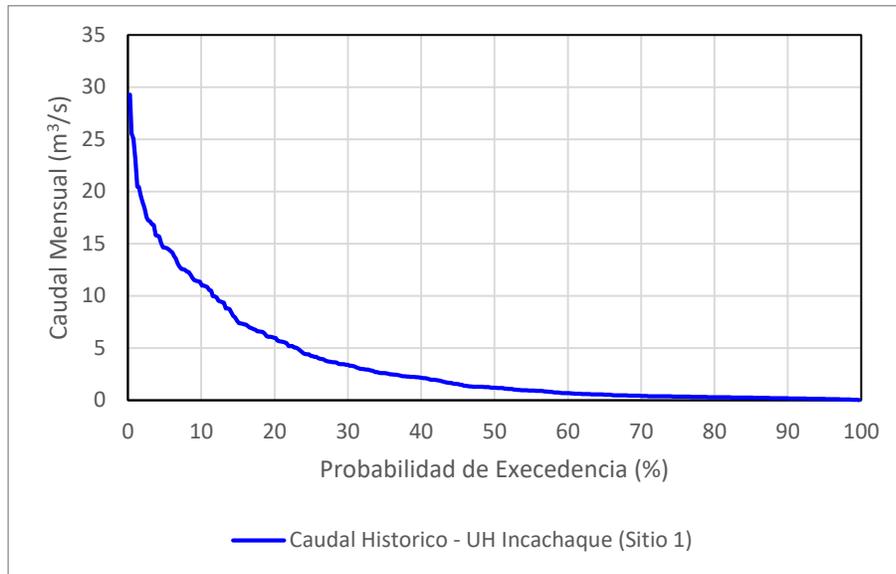


Figura 18. CDC histórica para la UH Incachaque-Sitio 1

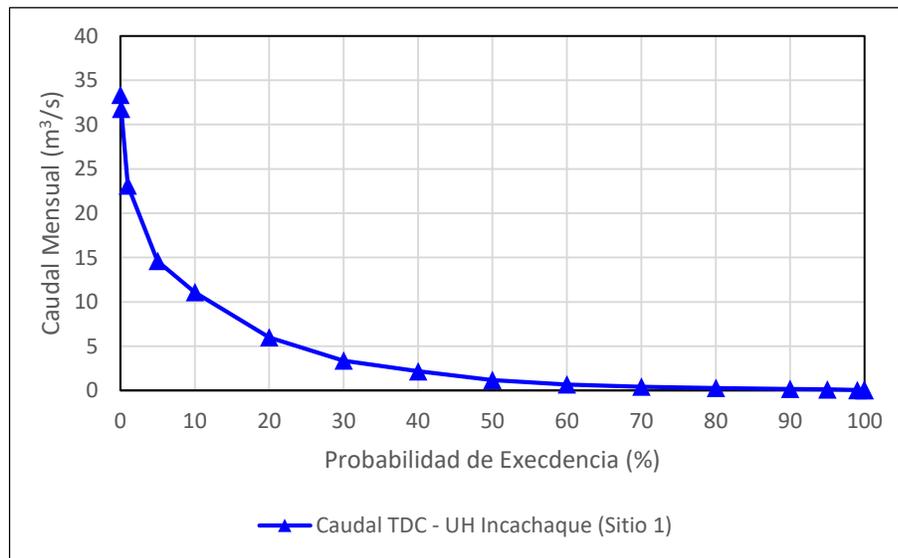


Figura 19. CDC en los 17 puntos de porcentaje fijos en la UH Incachaque-Sitio 1

Tabla 8. TDD en los 17 puntos de porcentaje fijos en la UH Incachaque-Sitio 1

Porcentaje %	Caudal de Referencia	A	B	C	D
0.01	33.356	31.776	23.120	14.611	11.096
0.1	31.776	23.120	14.611	11.096	5.985
1	23.120	14.611	11.096	5.985	3.376
5	14.611	11.096	5.985	3.376	2.162
10	11.096	5.985	3.376	2.162	1.184
20	5.985	3.376	2.162	1.184	0.673
30	3.376	2.162	1.184	0.673	0.419
40	2.162	1.184	0.673	0.419	0.290
50	1.184	0.673	0.419	0.290	0.178
60	0.673	0.419	0.290	0.178	0.115
70	0.419	0.290	0.178	0.115	0.047
80	0.290	0.178	0.115	0.047	0.032
90	0.178	0.115	0.047	0.032	0.031
95	0.115	0.047	0.032	0.031	0.031
99	0.047	0.032	0.031	0.031	0.031
99.9	0.032	0.031	0.031	0.031	0.031
99.99	0.031	0.031	0.031	0.031	0.031

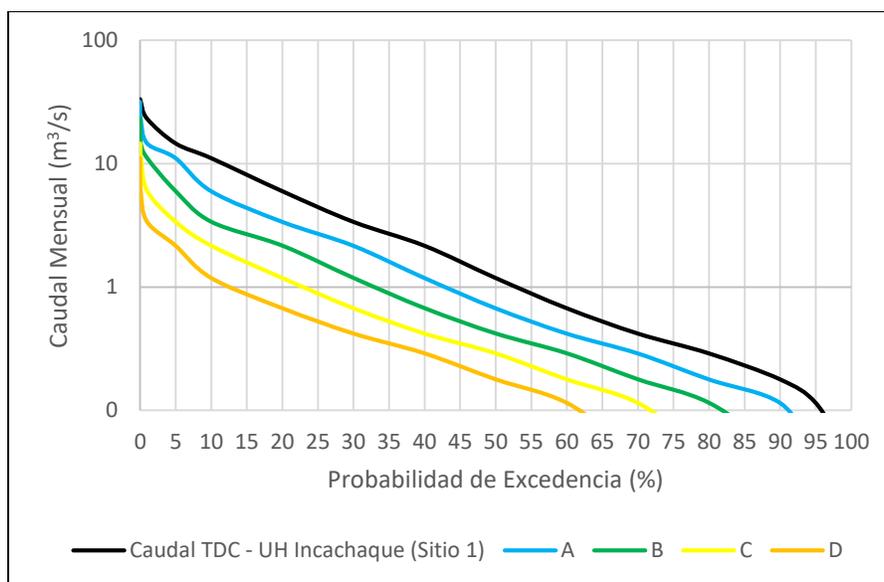


Figura 20. CDC en función de las cuatro CMEH posibles para la UH Incachaque-Sitio 1

4.4.2. UH Medio Bajo Pisco-Sitio 2

En la Figura 21 se muestra la CDC calculada en función de la serie de caudales históricos que han sido simulados a la salida de la UH Medio Bajo Pisco con el modelo SWAT. El caudal medio histórico simulado en la UH Medio Bajo Pisco es de $24.19 \text{ m}^3/\text{s}$ el cual es igualado o excedido únicamente el 27.3 por ciento del tiempo. Asimismo, el caudal de excedencia del 50 por ciento es de $6.52 \text{ m}^3/\text{s}$, que equivale a la mediana. En la Figura 22 se observa la CDC calculada para los 17 puntos de porcentaje fijo conforme a la metodología (0.01, 0.1, 1, 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 95, 99, 99.9 y 99.9 %), la cual ha sido construida con base a los caudales de referencia que se muestran en la TDD (Tabla 9). En la Tabla 9 se muestran también los valores de los caudales que le corresponden a cada una de las CMEH posibles (A, B, C y D) calculados en función del caudal de referencia, como se indicó, para los 17 puntos de porcentaje fijo. En la Figura 23 se muestran las CDC graficadas en escala logarítmica para los caudales de referencia y los caudales de las cuatro CMEH posibles para la UH Medio Bajo Pisco. Se observa que a mayor CMEH, mayor es el requerimiento de agua y mejor se reproduce la variabilidad anual del caudal.

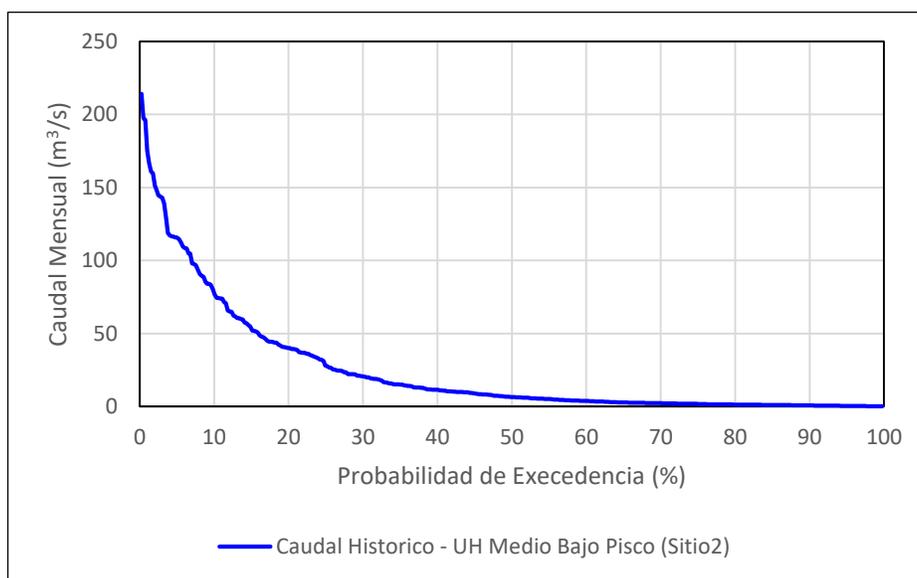


Figura 21. CDC histórica para la UH Medio Bajo Pisco-Sitio 2

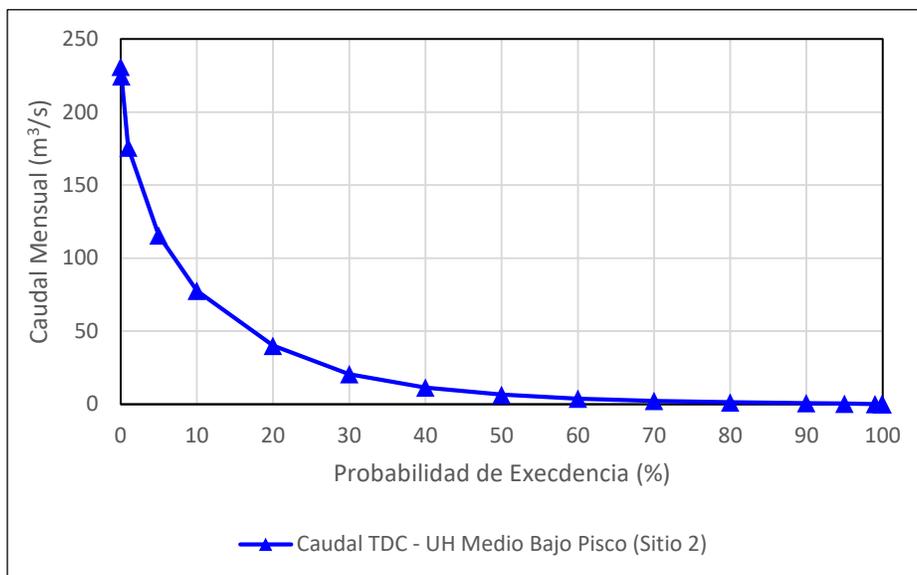


Figura 22. CDC en los 17 puntos de porcentaje fijos en la UH Medio Bajo Pisco-Sitio 2

Tabla 9. TDD en los 17 puntos de porcentaje fijos en la UH Medio Bajo Pisco-Sitio 2

Porcentaje %	Caudal de Referencia	A	B	C	D
0.01	230.988	224.503	175.671	115.605	77.665
0.1	224.503	175.671	115.605	77.665	40.066
1	175.671	115.605	77.665	40.066	20.571
5	115.605	77.665	40.066	20.571	11.385
10	77.665	40.066	20.571	11.385	6.529
20	40.066	20.571	11.385	6.529	3.778
30	20.571	11.385	6.529	3.778	2.254
40	11.385	6.529	3.778	2.254	1.329
50	6.529	3.778	2.254	1.329	0.720
60	3.778	2.254	1.329	0.720	0.389
70	2.254	1.329	0.720	0.389	0.112
80	1.329	0.720	0.389	0.112	0.030
90	0.720	0.389	0.112	0.030	0.026
95	0.389	0.112	0.030	0.026	0.026
99	0.112	0.030	0.026	0.026	0.026
99.9	0.030	0.026	0.026	0.026	0.026
99.99	0.026	0.026	0.026	0.026	0.026

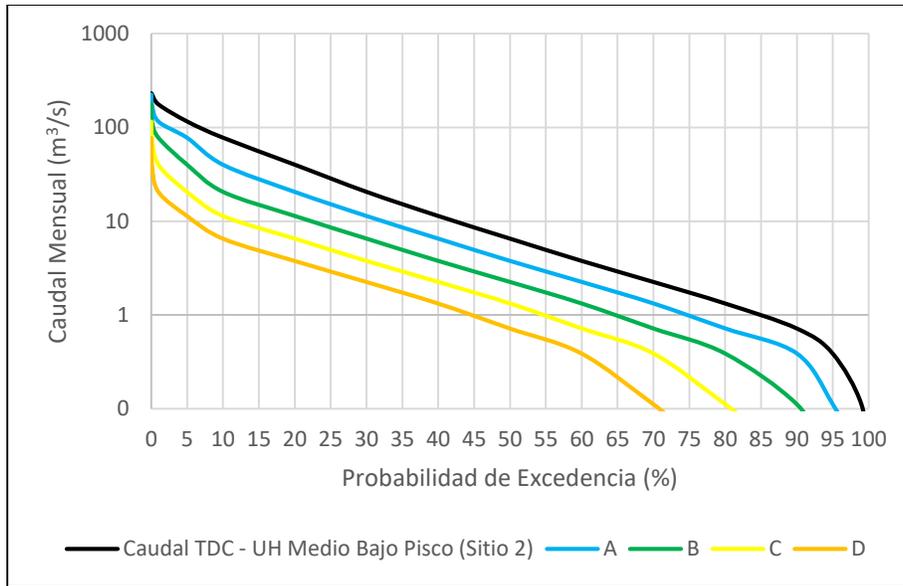


Figura 23. CDC en función de las cuatro CMEH posibles para la UH Medio Bajo Pisco-Sitio 2

4.4.3. UH Bajo Pisco-Sitio 3

En la Figura 24 se muestra la CDC calculada en función de la serie de caudales históricos que han sido simulados a la salida de la UH Bajo Pisco con el modelo SWAT. El caudal medio histórico simulado en la UH Bajo Pisco es de $23.7 \text{ m}^3/\text{s}$, el cual es igualado o excedido únicamente el 27.2 por ciento del tiempo. Asimismo, el caudal de excedencia del 50 por ciento es de $6.04 \text{ m}^3/\text{s}$, el cual equivale a la mediana. En la Figura 25 se observa la CDC calculada para los 17 puntos de porcentaje fijo conforme a la metodología (0.01, 0.1, 1, 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 95, 99, 99.9 y 99.9 %), la cual ha sido construida con base a los caudales de referencia que se muestran en la TDD (Tabla 10). En la Tabla 10 se muestran también los valores de los caudales que le corresponden a cada una de las CMEH posibles (A, B, C y D) calculados en función del caudal de referencia, como se indicó, para los 17 puntos de porcentaje fijo. En la Figura 26 se muestran las CDC, graficadas en escala logarítmica para los caudales de referencia y los caudales de las cuatro CMEH posibles para la UH Bajo Pisco. Se observa que a mayor CMEH, mayor es el requerimiento de agua y mejor se reproduce la variabilidad anual del caudal.

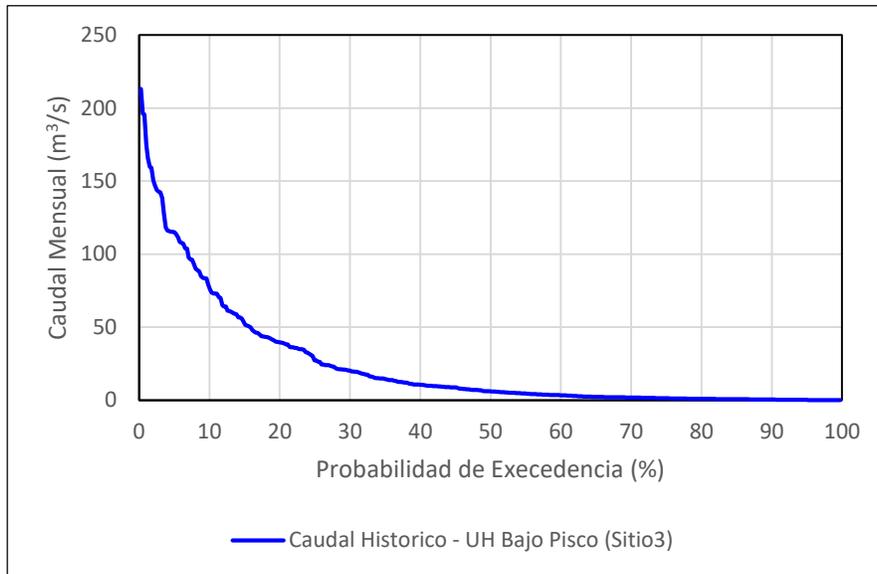


Figura 24. CDC histórica para la UH Bajo Pisco-Sitio 3

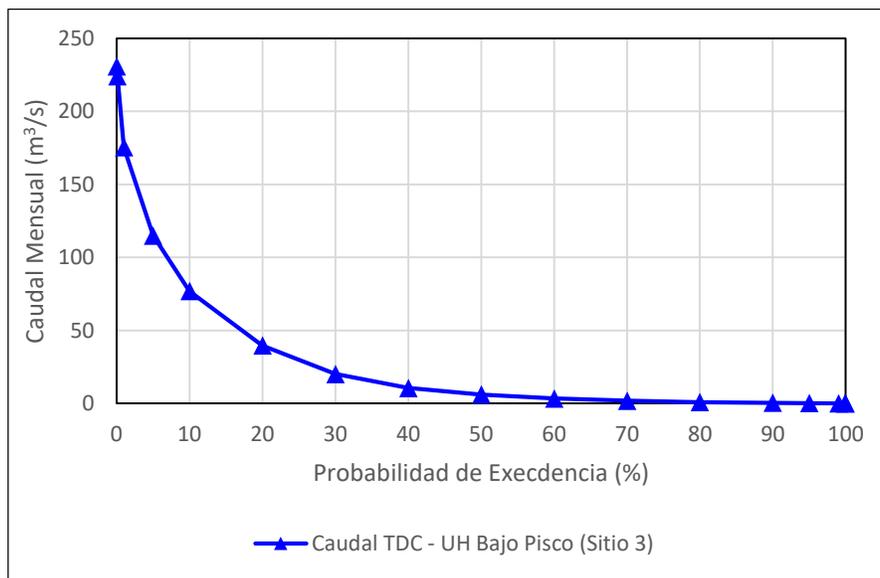


Figura 25. CDC en los 17 puntos de porcentaje fijos en la UH Bajo Pisco-Sitio 3

Tabla 10. TDD en los 17 puntos de porcentaje fijos en la UH Bajo Pisco-Sitio 3

Porcentaje %	Caudal de Referencia	A	B	C	D
0.01	230.795	224.049	175.362	114.951	76.848
0.1	224.049	175.362	114.951	76.848	39.647
1	175.362	114.951	76.848	39.647	20.173
5	114.951	76.848	39.647	20.173	10.611
10	76.848	39.647	20.173	10.611	6.043
20	39.647	20.173	10.611	6.043	3.392
30	20.173	10.611	6.043	3.392	1.820
40	10.611	6.043	3.392	1.820	0.918
50	6.043	3.392	1.820	0.918	0.407
60	3.392	1.820	0.918	0.407	0.171
70	1.820	0.918	0.407	0.171	0.037
80	0.918	0.407	0.171	0.037	0.002
90	0.407	0.171	0.037	0.002	0.001
95	0.171	0.037	0.002	0.001	0.001
99	0.037	0.002	0.001	0.001	0.001
99.9	0.002	0.001	0.001	0.001	0.001
99.99	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001

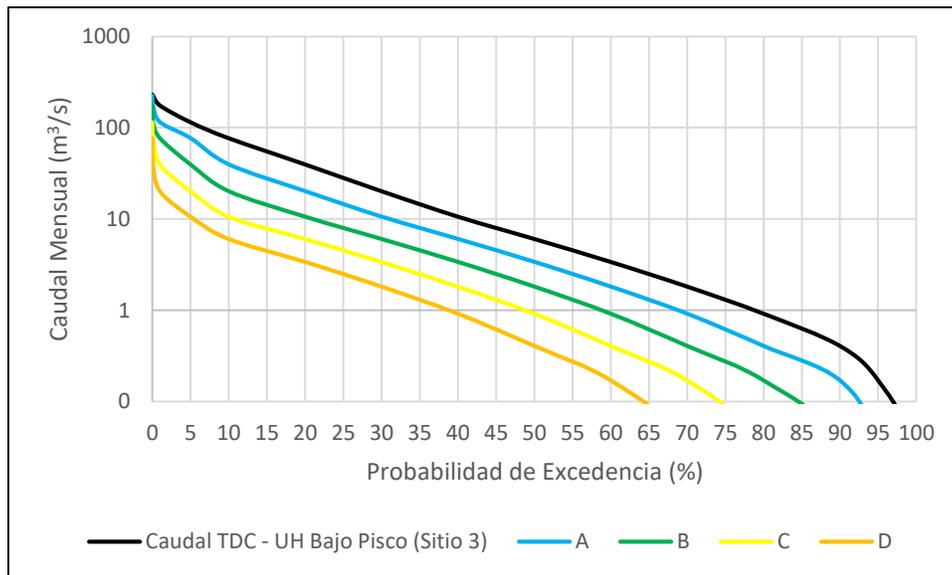


Figura 26. CDC en función de las cuatro CMEH posibles para la UH Bajo Pisco-Sitio

4.5. DETERMINACIÓN DEL CAUDAL ECOLÓGICO CON EL MÉTODO DE TENNANT (ORIGINAL Y MODIFICADO)

El método de Tennant se aplicó en las tres UH seleccionadas (UH Incachaque, UH Medio Bajo Pisco y UH Bajo Pisco) para evaluar el caudal ecológico, tanto en su forma original y como en una versión modificada. Previo a la aplicación del método de Tennant se debe definir las dos estaciones del año hidrológico, que se conocen como estación de «flujos bajo» o «época de estiaje» y de «flujos alto» o «época de avenida» para las condiciones hidrológicas de la cuenca de análisis. Se usó el procedimiento señalado en Gippel *et al.* (2012), que determina el inicio del año hidrológico en la estación seca, la cual es determinada considerando la media móvil de seis meses consecutivos. Para el caso de las tres UH evaluadas, la época de estiaje o de flujos bajos corresponde a los meses de junio a noviembre y la época de avenida o de flujos altos corresponde a los meses de diciembre a mayo. A continuación, se detallan los resultados obtenidos de la aplicación del método de Tennant para cada UH evaluada.

4.5.1. UH Incachaque-Sitio 1

En la Tabla 11 se muestra los caudales ecológicos calculados para la UH Incachaque con el método de Tennant original, que usa el caudal medio anual de la serie histórica para las dos condiciones de flujos (bajo y altos) previamente definidos y con base en los porcentajes establecidos por dicho método.

Si se considera que para la UH Incachaque se definió como escenario idóneo una CMEH «A», se ha ubicado de acuerdo a la metodología de Tennant, en la clase «sobresaliente», que equivale al 40 por ciento del CMA para la época de flujos bajos y al 60 por ciento del CMA flujos altos. Los resultados se muestran en la Figura 27 y en la Tabla 12. Se observa tanto gráficamente como numéricamente que el caudal ecológico calculado para la época de estiaje (junio a noviembre) es de $1.39 \text{ m}^3/\text{s}$, el cual sobrepasa a la producción hídrica natural de la UH. Para el caso del caudal ecológico de $2.08 \text{ m}^3/\text{s}$ calculado para la época de avenida (diciembre a mayo), si bien se llega a cubrir dichas necesidades de agua para el ecosistema,

este presenta valores muy por debajo de la producción hídrica natural de la UH, en ese sentido en ambos casos el caudal ecológico muestra valores poco realistas para la clase asignada.

Tabla 11. Caudales ecológicos estimados con el método de Tennant original en la UH Incachaque

Descripción de los flujos	Regímenes de flujos base recomendados	
	Jun. – Nov. Flujos Bajos	Dic. – May. Flujos Altos
Rango optimo	2.08 - 3.467	2.08 - 3.467
Sobresaliente	1.387	2.080
Excelente	1.040	1.734
Bueno	0.693	1.387
Regular a degradado	0.347	1.040
Pobre o mínimo	0.347	0.347
Degradación severa	< 0.347	< 0.347

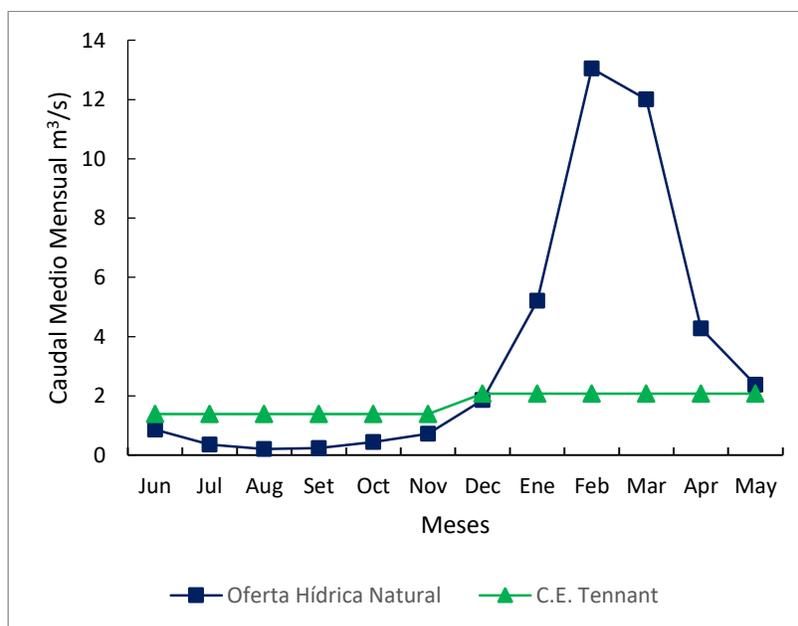


Figura 27. Hidrograma para la UH Incachaque-Sitio 1 con el método de Tennant original

Tabla 12. Caudales ecológicos con el método de Tennant original en la UH Incachaque

Caudales medios mensuales (m ³ /s)-UH Incachaque	Periodo 1984-2016												
	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Oct.	Nov.	Dic.	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Total
PHN	0.86	0.36	0.21	0.24	0.45	0.72	1.86	5.21	13.04	12.00	4.28	2.38	3.47
C.E. Tennant (original)	1.39	1.39	1.39	1.39	1.39	1.39	2.08	2.08	2.08	2.08	2.08	2.08	1.73

Nota: PHN= Producción hídrica natural, CE= Caudal ecológico

En la aplicación del método de Tennant modificado, se consideró la separación de los caudales medios anuales en función de la estacionalidad de las descargas, es decir, considerando un caudal para la época de estiaje o de flujos bajos y otro caudal para la época de avenida o de flujos altos, a fin de mejorar los resultados obtenidos con el método de Tennant original. En la Tabla 13 se muestra el resultado de los caudales ecológicos calculados para la UH Incachaque con el método de Tennant modificado.

Tabla 13. Caudales ecológicos estimados con el método de Tennant (modificado)

Descripción de los flujos	Regímenes de flujos base recomendados	
	Jun. – Nov. Flujos Bajos	Dic. – May. Flujos Altos
Rango optimo	0.283 - 0.473	3.877 - 6.462
Sobresaliente	0.189	3.877
Excelente	0.142	3.231
Bueno	0.095	2.585
Regular a degradado	0.047	1.939
Pobre o mínimo	0.047	0.646
Degradación severa	< 0.047	< 0.646

Como se indicó anteriormente, para la UH Incachaque se definió una CMEH «A», por lo que de acuerdo a la metodología de Tennant, se consideró ubicarla en la clase «sobresaliente» que equivale al 40 por ciento del CMA para la época de flujos bajos y al 60 por ciento del CMA para la época de flujos altos. Los resultados de la aplicación del método Tennant modificado para la UH Incachaque se muestran en la Figura 28 y en la Tabla 14. Se observa

que el caudal ecológico calculado para la época de estiaje (junio a noviembre) es de 0.19 m³/s, el cual es menor que la producción hídrica natural de la UH por lo que presenta resultados realísticos. Para el caso del caudal ecológico calculado para la época de avenida (diciembre a mayo) de 3.88 m³/s, si bien se llega a cubrir dichas necesidades de agua para el ecosistema en la mayoría de los meses, a excepción de diciembre y mayo, presenta valores muy por debajo de la oferta hídrica natural de la UH, además tampoco recoge la variabilidad media mensual del hidrograma, en ese sentido para la época de avenida el caudal ecológico sigue presentando valores poco realistas para la clase asignada.

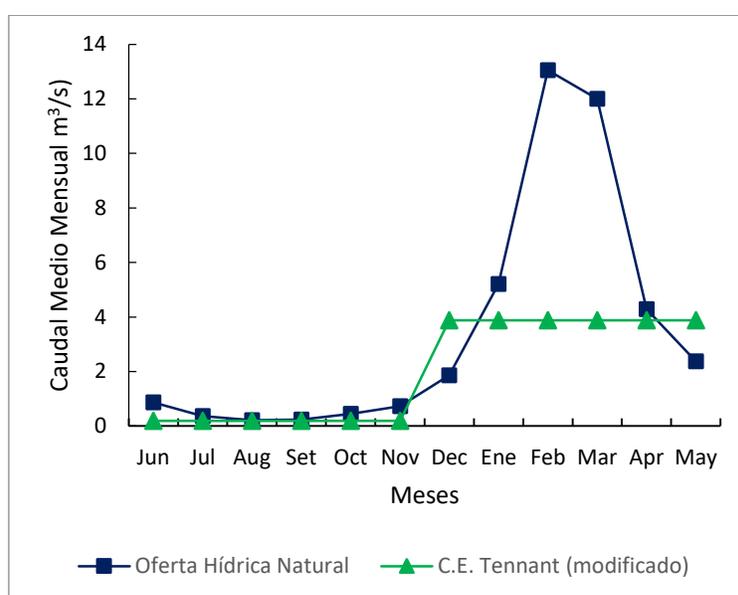


Figura 28. Hidrograma para la UH Incachaque-Sitio 1 con el método de Tennant modificado

Tabla 14. Caudales ecológicos estimados con el método de Tennant (modificado)

Caudales medios mensuales (m ³ /s)-UH Incachaque	Periodo 1984-2016												
	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Oct.	Nov.	Dic.	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Total
PHN	0.86	0.36	0.21	0.24	0.45	0.72	1.86	5.21	13.04	12.00	4.28	2.38	3.47
C.E Tennat (modificado)	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	3.88	3.88	3.88	3.88	3.88	3.88	2.03

Nota: PHN= Producción hídrica natural, CE= Caudal ecológico

4.5.2. UH Medio Bajo Pisco-Sitio 2

En la Tabla 15 se muestra el resultado de los caudales ecológicos calculados para la UH Medio Bajo Pisco con el método de Tennant original, que usa el caudal medio anual de la serie histórica para las dos condiciones de flujos (bajo y altos) y los porcentajes establecidos por dicho método.

Tabla 15. Caudales ecológicos estimados con el método de Tennant original- UH Medio Bajo Pisco

Descripción narrativa de los flujos	Regímenes de flujos base recomendados	
	Jun. – Nov. Flujos Bajos	Dic. – May. Flujos Altos
Rango óptimo	14.460 - 24.100	14.460 - 24.100
Sobresaliente	9.640	14.460
Excelente	7.230	12.050
Bueno	4.820	9.640
Regular a degradado	2.410	7.230
Pobre o mínimo	2.410	2.410
Degradación severa	< 2.410	< 2.410

Si se considera que para la UH Bajo Pisco se definió como escenario idóneo una CMEH «B», se ha ubicado de acuerdo a la metodología de Tennant, en la clase «Bueno», que equivale al 20 por ciento del CMA para la época de flujos bajos y al 40 por ciento del CMA flujos altos. Los resultados se muestran en la Figura 29 y en la Tabla 16. Se observa que el caudal ecológico calculado para la época de estiaje (junio a noviembre) es de 4.82 m³/s, el cual sobrepasa a la producción hídrica natural de la UH en todos los meses excepto en el mes de junio. Para el caso del caudal ecológico de 9.64 m³/s calculado para la época de avenida (diciembre a mayo), si se llega a cubrir dichas necesidades de agua para el ecosistema, aunque estima valores muy por debajo de la producción hídrica natural de la UH y no se mantiene la variabilidad mensual del hidrograma. En ese sentido, solo se podría cubrir el caudal ecológico en los meses de la época de avenida y solo en el mes de junio, que es el inicio de la época seca.

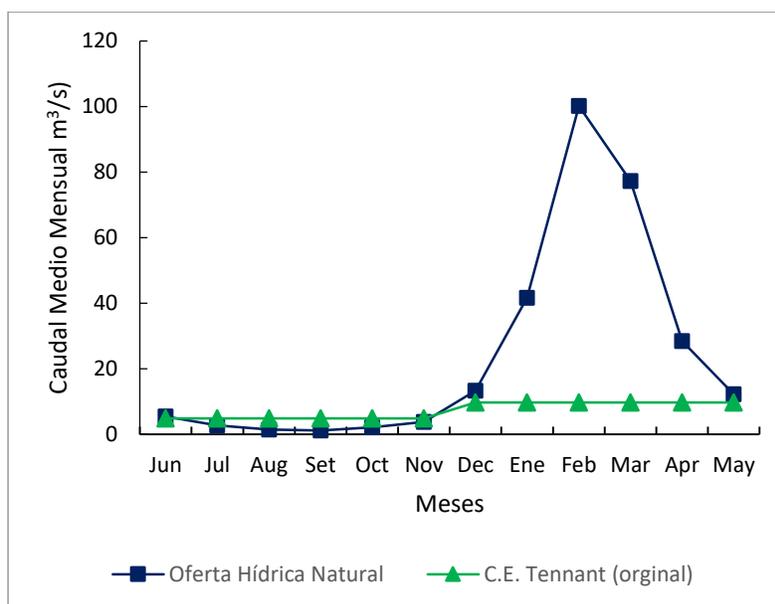


Figura 29. Hidrograma para la UH Medio Bajo Pisco-Sitio 2 con el método de Tennant original

Tabla 16. Caudales ecológicos con el método de Tennant original en la UH Medio Bajo Pisco

Caudales medios mensuales (m³/s)-UH Medio Bajo Pisco	Periodo 1984-2016												
	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Oct.	Nov.	Dic.	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Total
PHN	5.43	2.67	1.38	1.13	2.09	3.78	13.24	41.56	100.15	77.20	28.38	12.18	24.10
C.E. Tennant (original)	4.82	4.82	4.82	4.82	4.82	4.82	9.64	9.64	9.64	9.64	9.64	9.64	7.23

Nota: PHN= Producción hídrica natural, CE= Caudal ecológico

Por otra parte, se aplicó el método de Tennant modificado, que considera la separación de los caudales medios anuales en función de la estacionalidad de las descargas, es decir, considerando un caudal para la época de estiaje o de flujos bajos y otro caudal para la época de avenida o de flujos altos, a fin de mejorar los resultados obtenidos con el método de Tennant original. En la Tabla 17 se muestra el resultado de los caudales ecológicos calculados para la UH Incachaque con el método de Tennant modificado.

Tabla 17. Caudales ecológicos estimados con el método de Tennant modificado en la UH Medio Bajo Pisco

Descripción de los flujos	Regímenes de flujos base recomendados	
	Jun. – Nov. Flujos Bajos	Dic. – May. Flujos Altos
Rango optimo	1.099 - 2.746	27.272 - 45.453
Sobresaliente	1.099	27.272
Excelente	0.824	22.726
Bueno	0.549	18.181
Regular a degradado	0.275	13.636
Pobre o mínimo	0.275	4.545
Degradación severa	< 0.275	< 4.545

Como se indicó anteriormente, para la UH Medio Bajo Pisco se definió una CMEH «B» y se le ubicó de acuerdo a la metodología de Tennant, en la clase «Bueno», que equivale al 20 por ciento del CMA para la época de flujos bajos y al 40 por ciento del CMA flujos altos. Los resultados de la aplicación del método Tennant modificado para la UH Medio Bajo Pisco se muestran en la Figura 30 y en la Tabla 18. Se observa que el caudal ecológico calculado para la época de estiaje (junio a noviembre) es de 0.55 m³/s, el cual es menor que la producción hídrica natural de la UH por lo que presenta resultados realísticos. Para el caso del caudal ecológico calculado para la época de avenida (diciembre a mayo) de 18.18 m³/s, no se llega a cubrir para los meses de diciembre y mayo, que son los meses de transición entre la época estiaje y avenida respectivamente y viceversa, pero en los demás meses sí presenta resultados realistas en función de la CMEH asignada, aunque no se mantiene la variabilidad mensual del hidrograma.

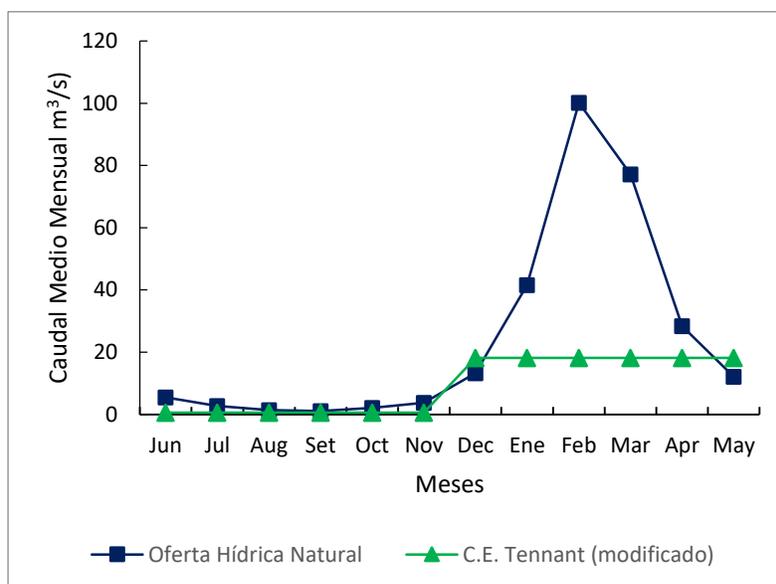


Figura 30. Hidrograma para la UH Medio Bajo Pisco-Sitio 2 con el método de Tennant modificado

Tabla 18. Caudales ecológicos para la UH Medio Bajo Pisco-Sitio 2 con el método de Tennant modificado

Caudales medios mensuales (m3/s)-UH medio Bajo Pisco	Periodo 1984-2016												
	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Oct.	Nov.	Dic.	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Total
PHN	5.43	2.67	1.38	1.13	2.09	3.78	13.24	41.56	100.15	77.20	28.38	12.18	24.10
C.E. Tennant (modificado)	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55	18.18	18.18	18.18	18.18	18.18	18.18	9.36

Nota: PHN= Producción hídrica natural, CE= Caudal ecológico

4.5.3. UH Bajo Pisco-Sitio 3

En la Tabla 19 se muestra el resultado de los caudales ecológicos calculados para la UH Bajo Pisco con el método de Tennant original, es decir, usando como base al caudal medio anual de la serie histórica para las dos condiciones de flujos (bajo y altos) y los porcentajes establecidos por dicho método.

Tabla 19. Caudales ecológicos estimados con el método de Tennant original- UH Bajo Pisco

Descripción de los flujos	Regímenes de flujos base recomendados	
	Jun. – Nov. Flujos Bajos	Dic. – May. Flujos Altos
Rango optimo	14.220 - 23.700	14.220 - 23.700
Sobresaliente	9.480	14.220
Excelente	7.110	11.850
Bueno	4.740	9.480
Regular a degradado	2.370	7.110
Pobre o mínimo	2.370	2.370
Degradación severa	< 2.370	< 2.370

Si se considera que para la UH Bajo Pisco se definió como escenario idóneo una CMEH «C», se ha ubicado de acuerdo con la metodología de Tennant, en la clase «Regular a degradado», que equivale al 10 por ciento del CMA para la época de flujos bajos y al 30 por ciento del CMA flujos altos. Los resultados se muestran en la Figura 31 y en la Tabla 20. Se observa que el caudal ecológico calculado para la época de estiaje (junio a noviembre) es de 2.37 m³/s, el cual sobrepasa a la producción hídrica natural de la UH en todos los meses excepto en el mes de junio. Para el caso del caudal ecológico de 7.11 m³/s calculado para la época de avenida (diciembre a mayo), sí se llega a cubrir dichas necesidades de agua para el ecosistema, aunque este presenta valores muy por debajo de la producción hídrica natural de la UH y no se mantiene la variabilidad mensual del hidrograma. En ese sentido, solo se podría cubrir el caudal ecológico en los meses de la época de avenida y en el mes de junio, que es el inicio de la época de estiaje.

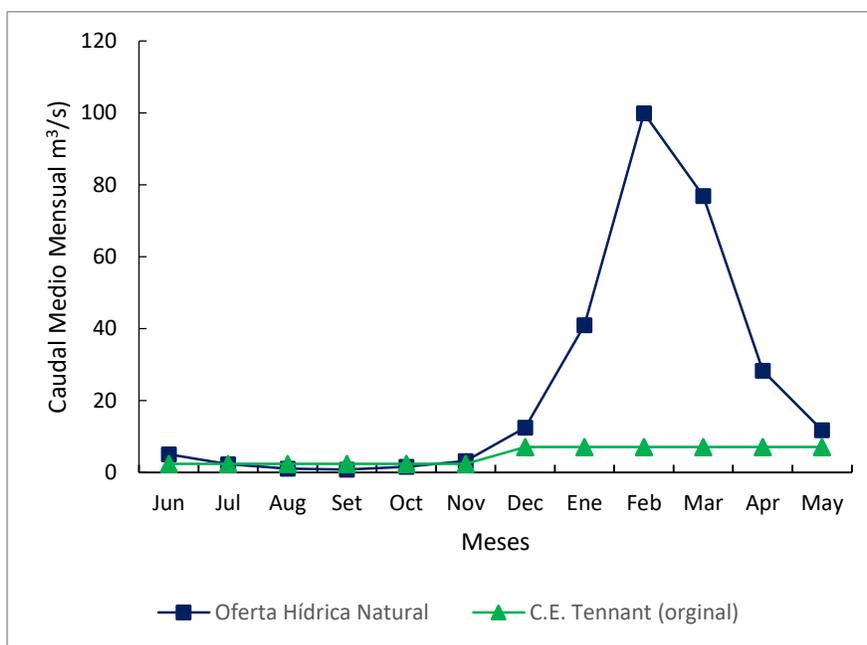


Figura 31. Hidrograma para la UH Bajo Pisco-Sitio 1 con el método de Tennant original

Tabla 20. Caudales ecológicos para la UH Bajo Pisco-Sitio 1 con el método de Tennant original

Caudales medios mensuales (m3/s)-UH Bajo Pisco	Periodo 1984-2016												
	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Oct.	Nov.	Dec.	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Total
PHN	5.08	2.34	1.09	0.78	1.58	3.17	12.50	40.98	99.88	76.94	28.29	11.78	23.70
C.E. Tennant (original)	2.37	2.37	2.37	2.37	2.37	2.37	7.11	7.11	7.11	7.11	7.11	7.11	4.74

Nota: PHN= Producción hídrica natural, CE= Caudal ecológico

Por otra parte, se aplicó también el método de Tennant modificado, que considera la separación de los caudales medios anuales en función de la estacionalidad de las descargas, es decir, considerando un caudal para la época de estiaje o de flujos bajos y otro caudal para la época de avenida o de flujos altos, a fin de mejorar los resultados obtenidos con el método

de Tennant original. En la Tabla 21 se muestra el resultado de los caudales ecológicos calculados para la UH Bajo Pisco con el método de Tennant modificado.

Tabla 21. Caudales ecológicos estimados con el método de Tennant modificado en la UH Bajo Pisco

Descripción de los flujos	Regímenes de flujos base recomendados	
	Jun. – Nov. Flujos Bajos	Dic. – May. Flujos Altos
Rango optimo	1.404 - 2.340	27.036 - 45.060
Sobresaliente	0.936	27.036
Excelente	0.702	22.530
Bueno	0.468	18.024
Regular a degradado	0.234	13.518
Pobre o mínimo	0.234	4.506
Degradación severa	< 0.234	< 4.506

Como se indicó anteriormente, para la UH Bajo Pisco se definió una CMEH «C» y se le ubicó de acuerdo a la metodología de Tennant, en la clase «Regular a degradado», que equivale al 10 por ciento del CMA para la época de flujos bajos y al 30 por ciento del CMA flujos altos. Los resultados de la aplicación del método Tennant modificado para la UH Bajo Pisco se muestran en la Figura 32 y en la Tabla 22. Se observa que el caudal ecológico calculado para la época de estiaje (junio a noviembre) es de 0.23 m³/s, el cual es menor que la producción hídrica natural de la UH para dichos meses por lo que presenta resultados realísticos. Para el caso del caudal ecológico calculado para la época de avenida (diciembre a mayo) de 13.52 m³/s, este no se llega a cubrir para los meses de diciembre y mayo, que son los meses de transición entre la época de estiaje y la época de avenida respectivamente y viceversa, pero en los demás meses sí presenta resultados realistas en función de la CMEH asignada, aunque no se mantiene la variabilidad mensual del hidrograma.

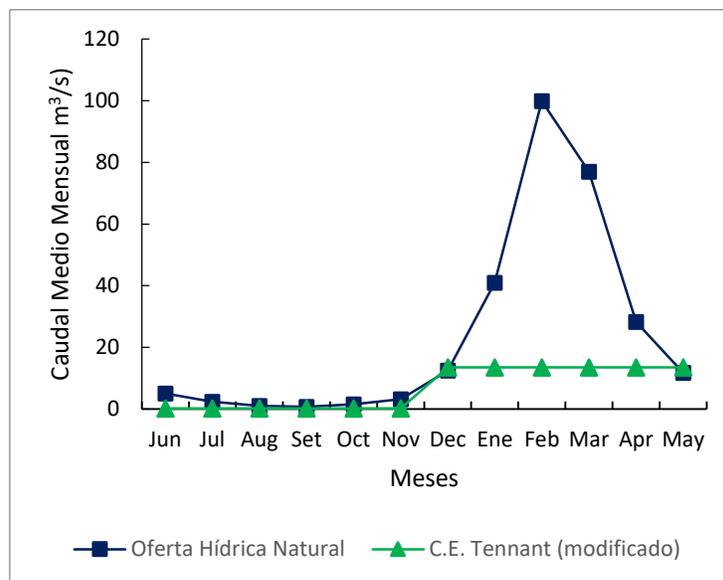


Figura 32. Hidrograma para la UH Bajo Pisco-Sitio 1 con el método de Tennant modificado

Tabla 22. Caudales ecológicos para la UH Bajo Pisco-Sitio 1 con el método de Tennant modificado

Caudales medios mensuales (m3/s)-UH Bajo Pisco	Periodo 1984-2016												
	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Oct.	Nov.	Dic.	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Total
PHN	5.08	2.34	1.09	0.78	1.58	3.17	12.50	40.98	99.88	76.94	28.29	11.78	23.70
C.E. Tennant (modificado)	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	13.52	13.52	13.52	13.52	13.52	13.52	6.88

Nota: PHN= Producción hídrica natural, CE= Caudal ecológico

4.6. ASIGNACIÓN DE LAS CLASES DE MANEJO ECOHIDROLÓGICO (CMEH) Y DETERMINACIÓN DEL CAUDAL ECOLÓGICO CON LA METODOLOGÍA CMEH-CDC

4.6.1. UH Incachaque-Sitio 1

Del cálculo del PEEH realizado previamente, la UH Incachaque presenta «condiciones prístinas o modificaciones mínimas del hábitat del río y del hábitat ribereños, así como de humedales», en ese sentido está en una condición «A», es decir, natural. Si se relaciona el PEEH con los cuatro escenarios o CMEH disponibles, le corresponde una CMEH «A», es decir natural, que tendría como finalidad la «Protección de los cuerpos de agua y de la cuenca hidrográfica. No se permiten nuevos proyectos de agua (embalses, desvíos, trasvases, etc.)»; pero también podría ubicarse en una CMEH «B», es decir «Levemente modificado» que permitiría la «Instalación de sistemas de abastecimiento de agua o el desarrollo de proyectos de irrigaciones». Esta decisión finalmente le corresponderá tomar a la Autoridad de Aguas como se expresó en el subtítulo 3.3.10., en el que se señaló que, idealmente, en esta etapa se recomienda la realización de talleres con los actores de la cuenca o el uso de plataformas de articulación como los consejos de recursos hídricos de cuenca. De esta manera, producto de la información generada y los intercambios de opiniones se tomen las mejores decisiones, a fin de definir la CMEH deseada producto de las negociaciones a las que se llegue, lo cual está acorde con la determinación de caudales ecológicos en sistemas social-ecológicos complejos. De lo contrario se puede tomar directamente las CMEH en función del PEEH como una primera aproximación.

De la evaluación en la presente investigación de las opciones de las CMEH disponibles en función del conocimiento de la cuenca obtenido del análisis del IAEH, se decidió proponer que la UH Incachaque se ubique en las CMEH A. La opción A si bien es la más estricta, podría aplicarse dado que dicha UH está ubicada en la cabecera de cuenca del río Pisco, y conforme al marco legal vigente en el Perú, las cabeceras de cuenca tienen un tratamiento especial. La opción B es un poco más flexible. ya que permite ciertos usos del recurso hídrico. Sin embargo, se debe tener en cuenta que la oferta hídrica es mínima, con un promedio anual de 3.4 m³/s que equivale a 109.3 MMC anual, siendo su régimen hídrico estacional con una

marcada época de avenida y de estiaje. Si se considera la CMEH A, se tendría un caudal ecológico de 2.2 m³/s promedio anual que equivale 69.49 MMC anual y que representa aproximadamente el 64 por ciento del caudal de referencia.

En la Tabla 23 se presentan los resultados de los caudales ecológicos a nivel mensual para la UH Incachaque considerando las cuatro CMEH posibles, y se ha resaltado en azul la opción recomendada en la presente investigación. En la Figura 33 se muestra también el hidrograma de caudales para las cuatro CMEH posibles y se resalta igualmente en azul el caudal ecológico correspondiente a la clase asignada. Se observa claramente que la opción seleccionada es la que requiere el mayor volumen anual en comparación con las clases B, C y D; y que el caudal ecológico reproduce bien la variabilidad del régimen hídrico a través de las descargas mensuales. En la Tabla 24 se muestra la producción de agua mensual en la UH Incachaque, el caudal ecológico asignado de acuerdo a la CMEH «A» y la disponibilidad media de agua superficial. De los 109.3 MMC que se produce en la UH, un volumen de 69.49 MMC deberán reservarse como caudal ecológico. La disponibilidad hídrica media de agua superficial para destinarlo a los usos poblacionales o productivos sería de 39.86 MMC.

Tabla 23. Caudales ecológicos determinados en la UH Incachaque para las cuatro CMEH posibles. Se resalta en azul el caudal ecológico asignado a dicha UH

Mes	Caudal Medio		CMEH-A		CMEH-B		CMEH-C		CMEH-D	
	MMC	m ³ /s	MMC	m ³ /s	MMC	m ³ /s	MMC	m ³ /s	MMC	m ³ /s
Ene.	13.697	5.212	8.026	3.054	4.772	1.816	2.789	1.061	1.615	0.615
Feb.	34.278	13.044	22.433	8.536	13.870	5.278	8.279	3.150	4.769	1.815
Mar.	31.545	12.004	20.921	7.961	12.703	4.834	7.268	2.766	4.287	1.631
Abr.	11.249	4.280	6.857	2.609	4.091	1.557	2.317	0.882	1.375	0.523
May.	6.242	2.375	3.807	1.448	2.147	0.817	1.283	0.488	0.832	0.317
Jun.	2.265	0.862	1.323	0.504	0.848	0.323	0.551	0.210	0.344	0.131
Jul.	0.949	0.361	0.613	0.233	0.389	0.148	0.233	0.089	0.130	0.050
Ago.	0.547	0.208	0.325	0.123	0.187	0.071	0.107	0.041	0.085	0.032
Set.	0.628	0.239	0.395	0.150	0.234	0.089	0.142	0.054	0.095	0.036
Oct.	1.176	0.447	0.736	0.280	0.474	0.180	0.296	0.113	0.179	0.068
Nov.	1.895	0.721	1.157	0.440	0.717	0.273	0.459	0.175	0.280	0.106
Dic.	4.877	1.856	2.894	1.101	1.694	0.645	1.039	0.395	0.669	0.255

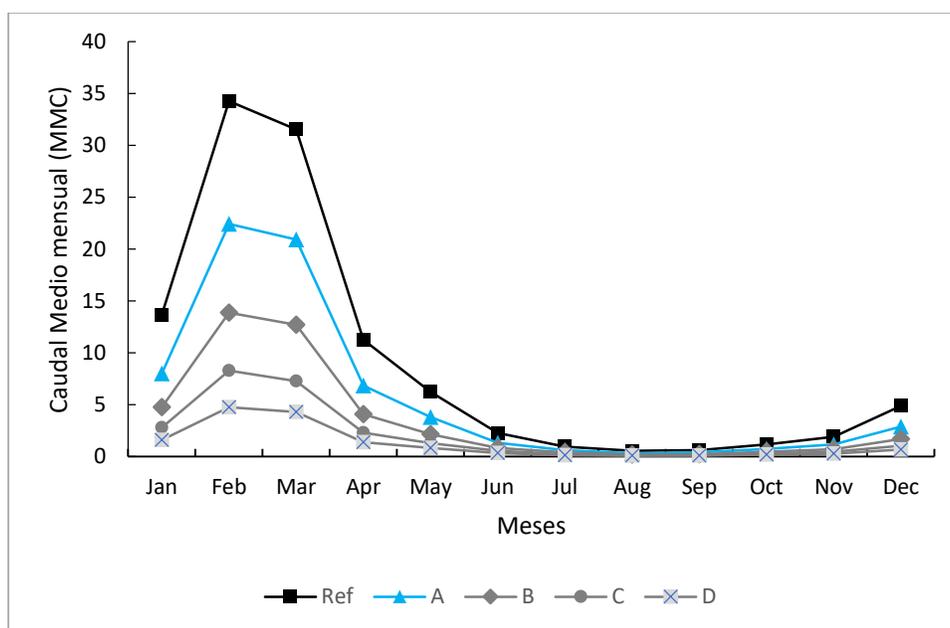


Figura 33. Hidrograma de caudales determinados para las cuatro CMEH posibles en la UH Incachaque. Se resalta en azul el caudal ecológico asignado a dicha UH

Tabla 24. Balance hídrico en la UH Incachaque de acuerdo a la CMEH asignada

Balance Hídrico Medio (MMC)-UH Incachaque	Periodo 1984-2016												
	Ago.	Set.	Oct.	Nov.	Dic.	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Total
PHN.	0.55	0.63	1.18	1.90	4.88	13.70	34.28	31.55	11.25	6.24	2.27	0.95	109.35
CE.-CMEH-CDC "A"	0.32	0.39	0.74	1.16	2.89	8.03	22.43	20.92	6.86	3.81	1.32	0.61	69.49
DHSM	0.22	0.23	0.44	0.74	1.98	5.67	11.85	10.62	4.39	2.44	0.94	0.34	39.86

Nota: PHN= Producción hídrica natural, CE= Caudal ecológico; DHSM= Disponibilidad hídrica superficial media

4.6.2. UH Medio Bajo Pisco-Sitio 2

Del cálculo del PEEH realizado previamente, la UH Medio Bajo Pisco presenta «condiciones prístinas o modificaciones mínimas del hábitat del río y del hábitat ribereños, así como de humedales», en ese sentido está en una condición «A», es decir, natural. Si se relaciona el PEEH con las CMEH, le corresponde también una CMEH «A», es decir Natural, que tendría como finalidad la «Protección de los cuerpos de agua y de la cuenca hidrográfica y no se permitirían nuevos proyectos de agua (embalses, desvíos, trasvases, etc.)». Pero, evaluando dicha UH en función del conocimiento de la cuenca obtenido del análisis del IAEH, entre otras consideraciones como que está ubicada en la cabecera del valle del río Pisco donde se requiere la mayor disponibilidad de agua para el uso agrícola principalmente, sobre todo durante los meses de junio a diciembre, que según el estudio de la ANA (2022) existe déficit hídrico; en esta investigación se decidió fijar a la UH Medio Bajo Pisco en la CMEH «B».

La CMEH «B» se refiere a una UH en la que «se permiten o están presentes sistemas de abastecimiento de agua o el desarrollo de proyectos de irrigaciones». En ese sentido, mantener a la UH Medio Bajo Pisco en la CMEH B contribuirá además de garantizar el caudal ecológico de dicha UH, a garantizar la disponibilidad de agua para su uso aguas abajo. Como se indicó en el caso de la UH Incachaque, finalmente la decisión de ubicar una UH en una CMEH específica le corresponderá a la Autoridad de Aguas como se expresa en el subtítulo 3.3.10., en el que se señaló que, idealmente, en esta etapa se recomienda la realización de talleres con los actores de la cuenca o el uso de plataformas de articulación como los consejos de recursos hídricos de cuenca. De esta manera, producto de la información generada y los intercambios de opiniones, se tomen las mejores decisiones a fin de definir para cada cuenca o subcuenca la clase de manejo ecohidrológica (CMEH) deseada producto de las negociaciones a las que se llegue. De lo contrario se puede tomar también directamente las CMEH en función del PEEH como una primera aproximación.

La producción hídrica natural de la UH Medio Bajo Pisco es de 24.2 m³/s promedio anual que equivale a 763 MMC anual y su régimen hídrico es estacional con una marcada época de avenida y de estiaje. Además, se debe indicar que esta UH recibe los aportes de las

descargas de las lagunas represadas de la parte alta de la cuenca del río Pisco. Si se considera la CMEH B, se tendría un caudal ecológico de 8.16 m³/s promedio anual que equivale 257 MMC anual que representa aproximadamente el 34 por ciento del caudal de referencia.

A continuación, en la Tabla 25 se presentan los resultados del cálculo de los caudales ecológicos a nivel mensual para la UH Medio Bajo Pisco considerando las cuatro CMEH posibles, y se ha resaltado en verde la opción recomendada en la presente investigación. En la Figura 34 se muestra el hidrograma de caudales para las cuatro CMEH posibles y se resalta igualmente en verde el caudal ecológico correspondiente a la clase asignada. Se observa que la clase asignada requiere un menor volumen anual en comparación con la clase A y que el caudal ecológico reproduce bien la variabilidad del régimen hídrico a través de las descargas mensuales. En la Tabla 26 se muestra la producción de agua mensual en la UH Medio Bajo Pisco, el caudal ecológico asignado de acuerdo a la CMEH «B» y la disponibilidad media de agua superficial. De los 763 MMC que se producen en la UH, un volumen de 258 MMC deberá reservarse como caudal ecológico. La disponibilidad hídrica media de agua superficial para destinarlo a los usos poblacionales o productivos sería de 506 MMC.

Tabla 25. Caudales ecológicos determinados en la UH Medio Bajo Pisco para las cuatro CMEH posibles. Se resalta en verde el caudal ecológico asignado a dicha UH

Mes	Caudal Medio		CMEH-A		CMEH-B		CMEH-C		CMEH-D	
	MMC	m3/s	MMC	m3/s	MMC	m3/s	MMC	m3/s	MMC	m3/s
Ene.	109.884	41.813	61.756	23.499	34.161	12.999	18.933	7.204	10.761	4.095
Feb.	264.515	100.653	170.420	64.848	101.095	38.468	54.957	20.912	29.467	11.213
Mar.	204.005	77.628	120.546	45.870	64.386	24.500	34.467	13.115	19.309	7.348
Abr.	74.947	28.519	39.745	15.124	22.142	8.425	12.709	4.836	7.407	2.819
May.	31.948	12.157	18.326	6.973	10.584	4.027	6.196	2.358	3.612	1.374
Jun.	14.207	5.406	8.145	3.099	4.765	1.813	2.743	1.044	1.485	0.565
Jul.	6.952	2.645	4.105	1.562	2.336	0.889	1.235	0.470	0.592	0.225
Ago.	3.541	1.347	1.962	0.746	1.002	0.381	0.450	0.171	0.152	0.058
Set.	2.871	1.092	1.517	0.577	0.735	0.280	0.288	0.110	0.114	0.043
Oct.	5.388	2.050	3.063	1.166	1.694	0.645	0.878	0.334	0.424	0.161
Nov.	9.842	3.745	5.664	2.155	3.238	1.232	1.814	0.690	0.968	0.368
Dic.	34.893	13.277	19.659	7.481	11.205	4.264	6.513	2.478	3.780	1.439

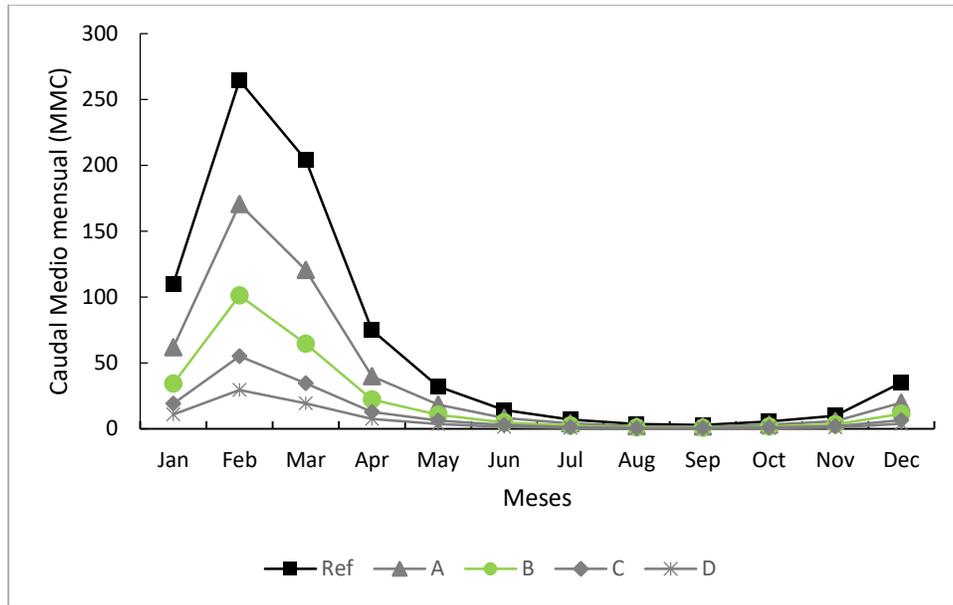


Figura 34. Hidrograma de caudales determinados para las cuatro CMEH posibles en la UH Medio Bajo Pisco. Se resalta en verde el caudal ecológico asignado a dicha UH

Tabla 26. Balance hídrico en la UH Medio Bajo Pisco de acuerdo a la CMEH asignada

Balance hídrico Medio (MMC)-UH Medio Bajo Pisco	Periodo 1984-2016												
	Ago.	Set.	Oct.	Nov	Dic.	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Total
PHN.	3.5	2.9	5.4	9.8	34.9	109.9	264.5	204.0	74.9	31.9	14.2	7.0	763.0
CE.-CMEH-CDC "B"	1.0	0.7	1.7	3.2	11.2	34.2	101.1	64.4	22.1	10.6	4.8	2.3	257.3
DHSM	2.5	2.1	3.7	6.6	23.7	75.7	163.4	139.6	52.8	21.4	9.4	4.6	505.7

Nota: PHN= Producción hídrica natural, CE= Caudal ecológico; DHSM= Disponibilidad hídrica superficial media

4.6.3. UH Bajo Pisco-Sitio 3

Del cálculo del PEEH realizado previamente, la UH Bajo Pisco se ubica en el PEEH «C», Moderadamente Modificada, es decir «Los hábitats y la dinámica de la biota han sido disturbados, pero las funciones básicas del ecosistema siguen aún intactas. Algunas especies sensibles se han perdido o reducido en extensión, Existe presencia de especies invasoras». En ese sentido, le correspondería directamente la CMEH C, es decir, «Múltiples áreas disturbadas asociados con las necesidades del desarrollo socio económico de la población, ej., embalses, desvíos de agua, modificaciones del hábitat y reducción de la calidad del agua».

Por otra parte, si se evalúa a la UH Bajo Pisco en función del conocimiento de la cuenca obtenido del análisis del Índice de Amenaza Ecohidrológica (IAEH), y entre otras consideraciones como la UH en la que se ubica el valle del río Pisco donde se requiere la mayor disponibilidad de agua para el uso agrícola principalmente, sobre todo durante los meses de junio a diciembre, que según el estudio de la ANA (2022) existe déficit hídrico; al aporte de los excedentes de riego o flujos de retorno que ocurren aguas abajo y la existencia de un estuario en la desembocadura del río Pisco y la presencia de humedales que se alimentan de los excedentes de riego, en esta investigación se decidió mantener la UH Medio Bajo Pisco en la CMEH «C». Como se indicó en el caso de la UH Incachaque y Medio Bajo Pisco, finalmente la decisión de ubicar una UH en una CMEH específica es competencia de la Autoridad de Aguas como se expresa en el subtítulo 3.3.10., en el que se señala que: «Idealmente, en esta etapa se recomienda la realización de talleres con los actores de la cuenca o el uso de plataformas de articulación como los consejos de recursos hídricos de cuenca, de manera que producto de la información generada y los intercambios de opiniones se tomen las mejores decisiones a fin de definir para cada cuenca o subcuenca la clase de manejo ecohidrológica (CMEH) deseada producto de las negociaciones a las que se llegue. De lo contrario se puede tomar también directamente las CMEH en función del PEEH».

La oferta hídrica en la UH Medio Bajo Pisco es de 23.7 m³/s promedio anual que equivale a 763 MMC anual y su régimen hídrico es estacional con una marcada época húmeda y época seca. Además, se debe indicar que esta UH recibe los aportes de las descargas de las lagunas

represadas de la parte alta de la cuenca del río Pisco. Si se considera la CMEH «C», se tendría un caudal ecológico de 4.19 m³/s promedio anual que equivale 132 MMC anual que representa aproximadamente el 18 por ciento del caudal de referencia.

A continuación, en la Tabla 27 se presentan los resultados del cálculo de los caudales ecológicos a nivel mensual para la UH Bajo Pisco considerando las cuatro CMEH posibles, y se ha resaltado en amarillo la opción recomendada en la presente investigación. En la Figura 35 se muestra también el hidrograma de caudales para las cuatro CMEH posibles y se resalta igualmente en amarillo el caudal ecológico correspondiente a la clase asignada. Se observa que la opción seleccionada requiere un menor volumen anual en comparación con las clases A y B. Asimismo, se observa que el caudal ecológico reproduce bien la variabilidad del régimen hídrico a través de las descargas mensuales. En la Tabla 28 se muestra la producción de agua mensual en la UH Bajo Pisco, el caudal ecológico asignado de acuerdo a la CMEH «C» y a disponibilidad media de agua superficial. De los 747 MMC que se produce en la UH, un volumen de 132 MMC deberán reservarse como caudal ecológico. La disponibilidad hídrica media de agua superficial para destinarlo a los usos poblacionales o productivos sería de 615 MMC.

Tabla 27. Caudales ecológicos determinados en la UH Bajo Pisco para las cuatro CMEH posibles. Se resalta en amarillo el caudal ecológico asignado a dicha UH

Mes	Caudal Medio		CMEH-A		CMEH-B		CMEH-C		CMEH-D	
	MMC	m ³ /s	MMC	m ³ /s	MMC	m ³ /s	MMC	m ³ /s	MMC	m ³ /s
Ene.	107.685	40.976	61.643	23.456	33.270	12.660	18.070	6.876	9.940	3.783
Feb.	262.489	99.881	168.903	64.271	99.788	37.971	53.879	20.502	28.367	10.794
Mar.	202.188	76.936	118.927	45.254	63.179	24.041	33.084	12.589	17.998	6.848
Abr.	74.346	28.290	38.457	14.634	20.715	7.882	11.629	4.425	6.392	2.432
May.	30.965	11.783	17.308	6.586	9.725	3.701	5.280	2.009	2.706	1.030
Jun.	13.343	5.077	7.367	2.803	3.904	1.486	1.958	0.745	0.900	0.342
Jul.	6.161	2.344	3.329	1.267	1.646	0.626	0.740	0.282	0.309	0.117
Ago.	2.874	1.093	1.411	0.537	0.623	0.237	0.254	0.096	0.097	0.037
Set.	2.040	0.776	0.940	0.358	0.396	0.151	0.151	0.057	0.084	0.032
Oct.	4.149	1.579	2.191	0.834	1.071	0.407	0.495	0.188	0.226	0.086
Nov.	8.324	3.167	4.574	1.741	2.418	0.920	1.215	0.462	0.579	0.220
Dic.	32.838	12.496	18.062	6.873	9.941	3.783	5.420	2.062	2.831	1.077

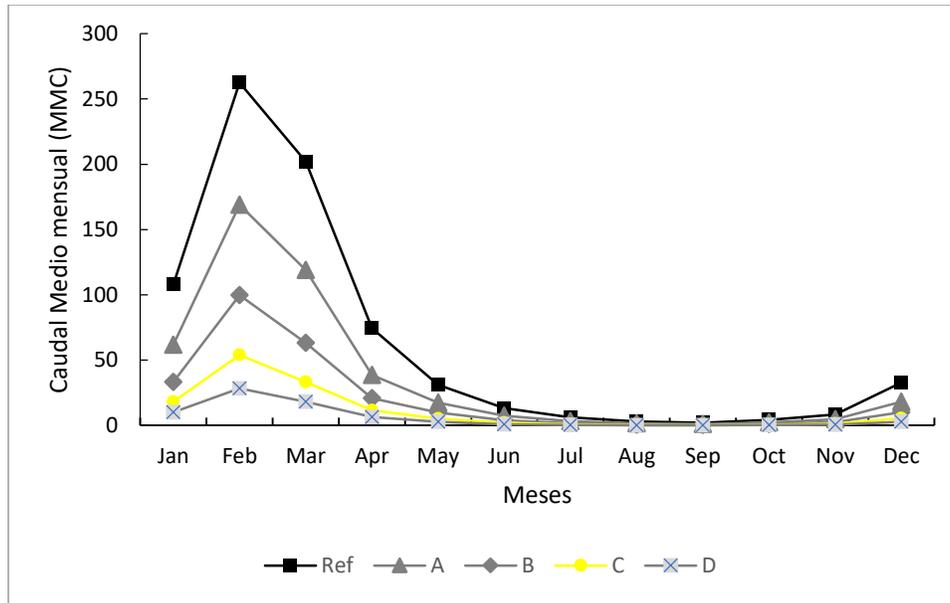


Figura 35. Hidrograma de caudales determinados para las cuatro CMEH posibles en la UH Bajo Pisco. Se resalta en amarillo el caudal ecológico asignado a dicha UH

Tabla 28. Balance hídrico en la UH Bajo Pisco de acuerdo a la CMEH asignada

Balance hídrico Medio (MMC)-UH Bajo Pisco	Periodo 1984-2016												
	Ago.	Set.	Oct.	Nov	Dic.	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Total
PHN.	2.9	2.0	4.1	8.3	32.8	107.7	262.5	202.2	74.3	31.0	13.3	6.2	747.4
CE.-CMEH-CDC "C"	0.3	0.2	0.5	1.2	5.4	18.1	53.9	33.1	11.6	5.3	2.0	0.7	132.2
DHSM	2.6	1.9	3.7	7.1	27.4	89.6	208.6	169.1	62.7	25.7	11.4	5.4	615.2

Nota: PHN= Producción hídrica natural, CE= Caudal ecológico; DHSM= Disponibilidad hídrica superficial media

En la Figura 36 se muestra la ubicación de las UH y los sitios evaluados para determinar el caudal ecológico en la presente investigación, así como las CMEH asignada y en la Tabla 29 se muestra un resumen de los caudales ecológicos mensuales en m³/s para los tres sitios evaluados y los porcentajes que representan del caudal medio anual.

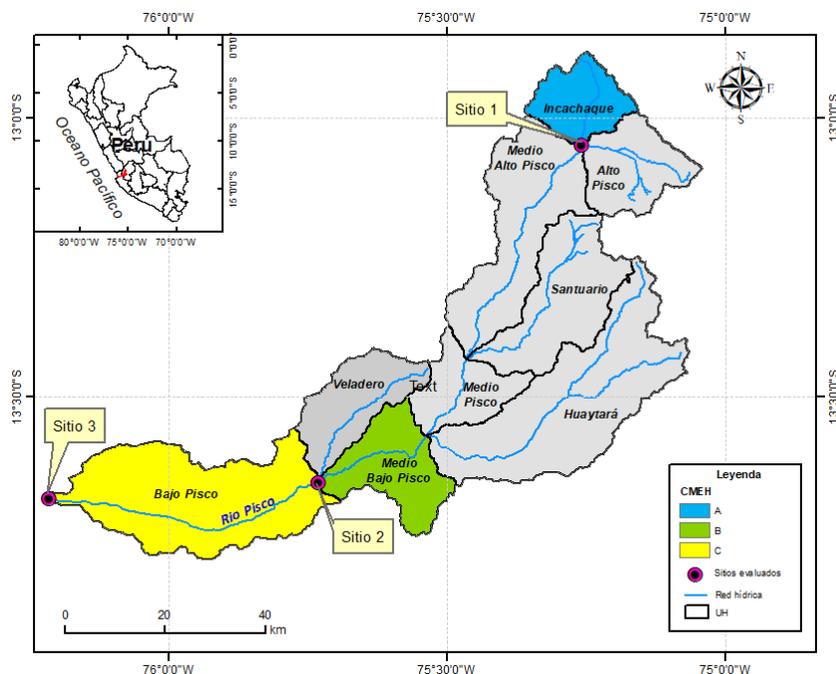


Figura 36. Ubicación de las UH y sitios evaluados para determinar el caudal ecológico en función de las CMEH asignadas

Tabla 29. Caudales ecológicos mensuales para los tres sitios evaluados y porcentaje que representan del caudal medio anual

Mes	Caudal Ecológico (m ³ /s)		
	UH Incachaque - Sitio 1	UH Medio Bajo Pisco - Sitio 2	UH Bajo Pisco - Sitio 3
Ago.	0.123	0.381	0.096
Set.	0.150	0.280	0.057
Oct.	0.280	0.645	0.188
Nov.	0.440	1.232	0.462
Dic.	1.101	4.264	2.062
Ene.	3.054	12.999	6.876
Feb.	8.536	38.468	20.502
Mar.	7.961	24.500	12.589
Abr.	2.609	8.425	4.425
May.	1.448	4.027	2.009
Jun.	0.504	1.813	0.745
Jul.	0.233	0.889	0.282
PA	2.203	8.160	4.191
% CMA	63.54	33.7	17.6

Nota: PA= Promedio anual, CMA= porcentaje del caudal medio anual

4.7. COMPARACIÓN DE LOS MÉTODOS USADOS PARA DETERMINAR EL CAUDAL ECOLÓGICO

Se llevó a cabo la comparación de los tres métodos usados en la presente investigación: (i) el método desarrollado en la tesis basado en la asignación de Categorías de Manejo Ecohidrológico y la definición del caudal ecológico en función de las Curvas de Duración de Caudales denominado como CMEH-CDC; (ii) el Método de Tennant en su versión original (Tennant Original) y (iii) en una versión modificada (Tennant Modificado). A continuación, se detallan los resultados de esta comparación para los tres sitios evaluados en la cuenca del río Pisco: UH Incachaque-Sitio 1-, UH Medio Bajo Pisco-Sitio 2 y UH Bajo Pisco-Sitio 3.

4.7.1. Análisis comparativo UH Incachaque-Sitio 1

En la Figura 37 se muestra gráficamente la comparación entre el método CMEH-CDC y el método de Tennant (Original y Modificado) en la UH Incachaque. Se observó que el método CMEH-CDC permite cubrir de manera realista el caudal ecológico asignado para dicha UH, ya que considera tanto la cantidad de agua expresada a través de la producción hídrica natural de la cuenca, así como de su variabilidad mensual conforme al año hidrológico, lo cual está alineado con el concepto del régimen natural del flujo. Dado que a la UH Incachaque se le asignó la CMEH «A», los requerimientos anuales del caudal ecológico son altos con relación a la producción hídrica natural de la UH, representando el 63.5 por ciento del caudal medio anual.

En el caso del método de Tennant original y modificado, en el que se asigna un porcentaje fijo para el caudal ecológico en función del caudal medio anual y de las dos estaciones consideradas (época de estiaje y de avenida), se observa que el mejor resultado se obtiene con el método de Tennant modificado, con el cual el caudal ecológico estimado se logra cubrir el mayor número de meses, con excepción de los meses de diciembre y mayo. Con el método de Tennant original se obtienen resultados que no son realistas para la UH evaluada, con valores que sobrepasan la producción hídrica natural de la UH en la época de estiaje y de avenida, y valores que están muy por debajo de la producción hídrica en la época de

avenida, lo cual a su vez impactaría los requerimientos de agua del ecosistema, ya que se aparta demasiado de sus condiciones naturales.

El resultado del Índice de Déficit del Caudal Ecológico (IDCE) para la UH Incachaque se muestra en la Tabla 30. Se observa que con el método CMEH-CDC, los 12 meses del año el IDCE fue positivo, seguido del método de Tennant modificado con 10 meses del año con el IDCE positivo y por último el método de Tennant original con solo 5 meses del año con el IDCE positivo, lo cual apoya la hipótesis planteada.

El caudal ecológico medio anual con el método CMEH-CDC es $2.20 \text{ m}^3/\text{s}$ y con el método de Tennant modificado es de $2.03 \text{ m}^3/\text{s}$ son similares, sin embargo, como se indicó el primer método permite reflejar la variabilidad mensual del caudal para el año hidrológico. El valor del caudal con el método de Tennant original es $1.73 \text{ m}^3/\text{s}$, algo menor que los otros dos valores calculados (Tabla 30).

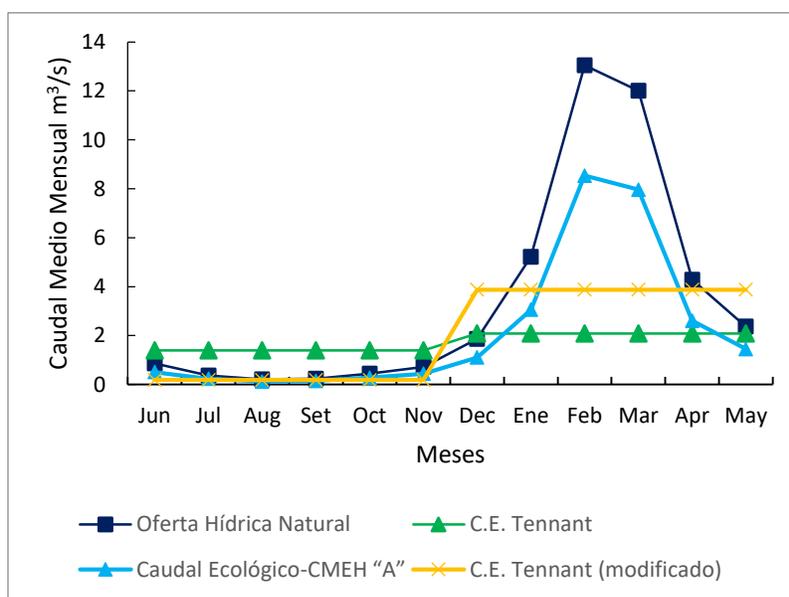


Figura 37. Hidrograma comparativo con los métodos de caudales ecológicos usados en la UH Incachaque-Sitio 1

Tabla 30. Caudales ecológicos para la UH Incachaque-Sitio 1 con los métodos usados

Balance hídrico Medio (m3/s)- UH Incachaque	Periodo 1984-2016												
	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Oct.	Nov.	Dic.	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	PA
PHN	0.86	0.36	0.21	0.24	0.45	0.72	1.86	5.21	13.04	12.00	4.28	2.38	3.47
C.E. CMEH-CDC "A"	0.50	0.23	0.12	0.15	0.28	0.44	1.10	3.05	8.54	7.96	2.61	1.45	2.20
C.E. Tennant (original)	1.39	1.39	1.39	1.39	1.39	1.39	2.08	2.08	2.08	2.08	2.08	2.08	1.73
C.E. Tennant (modificado)	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	3.88	3.88	3.88	3.88	3.88	3.88	2.03

Nota: PHN= Producción hídrica natural, CE= Caudal ecológico, PA = Promedio anual

Leyenda: IDCE (+) IDCE (-)

4.7.2. Análisis comparativo UH Medio Bajo Pisco-Sitio 2

En la Figura 38 se muestra gráficamente la comparación entre el método CMEH-CDC y el método de Tennant (Original y Modificado) en la UH Medio Bajo Pisco. Se observa que el método CMEH-CDC permite cubrir de manera realista el caudal ecológico asignado para dicha UH, ya que este método considera tanto la cantidad de agua expresada a través de la producción hídrica de la cuenca, así como su variabilidad mensual conforme al año hidrológico, lo cual está alineado con el concepto del régimen natural del flujo. Debido a que a la UH Medio Bajo Pisco se le asignó la CMEH «B», los requerimientos anuales del caudal ecológico representan el 33.7 por ciento del caudal medio anual.

En el caso del método de Tennant original y modificado, en el que se asigna un porcentaje fijo para el caudal ecológico en función del caudal medio anual y de las dos estaciones consideradas (época de estiaje y de avenida), se observó que el mejor resultado se obtiene con el método de Tennant modificado, con el cual el caudal ecológico estimado se logra cubrir el mayor número de meses en el año, con excepción de los meses de diciembre y mayo. Con el método de Tennant original se obtienen resultados que no son realista para la UH evaluada, ya que los valores del caudal ecológico sobrepasan la producción hídrica de la cuenca en la época de estiaje y para el caso de la época de avenida, los valores del caudal ecológico están muy por debajo de la producción hídrica natural. Asimismo, se observó que el método de Tennant, no refleja la variabilidad temporal del caudal que transita por el río

principal, lo cual a su vez impactaría los requerimientos de agua del ecosistema, así como la disponibilidad de agua que puede asignarse para los distintos usos de agua en la UH Medio Bajo Pisco. El resultado del Índice de Déficit del Caudal Ecológico (IDCE) se muestra en la Tabla 31. Se observa que con el método CMEH-CDC, los 12 meses del año el IDCE fue positivo, seguido del método de Tennant modificado con 10 meses del año con el IDCE positivo y por último el método de Tennant original con solo 5 meses del año con el IDCE positivo, lo cual apoya la hipótesis planteada.

El caudal ecológico medio anual con el método CMEH-CDC es $8.16 \text{ m}^3/\text{s}$, con el método de Tennant original modificado es de $7.23 \text{ m}^3/\text{s}$ y con el método de Tennant modificado es de $9.36 \text{ m}^3/\text{s}$, los cuales son similares, sin embargo, como se indicó, el primer método refleja la variabilidad mensual del caudal ecológico para la UH Medio Bajo Pisco (Figura 38 y Tabla 31). Se debe indicar que para el caso de esta UH el caudal ecológico es mucho menor que la producción hídrica anual, debido a la CMEH asignada («B»), la cual se asignó considerando que además de las características ecohidrológicas de la UH, se requiere cubrir las demandas de agua para riego a la salida de esta UH.

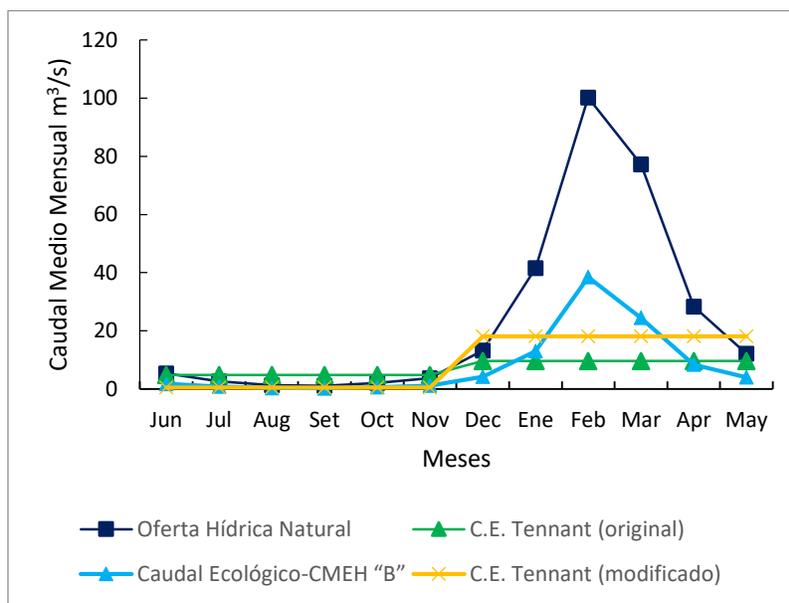


Figura 38. Hidrograma comparativo con los métodos de caudales ecológicos usados en la UH Medio Bajo Pisco-Sitio 2

Tabla 31. Caudales ecológicos para la UH Medio Bajo Pisco-Sitio 2 con los métodos usados

Balance hídrico Medio (m3/s)-UH Medio Bajo Pisco	Periodo 1984-2016												
	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Oct.	Nov.	Dic.	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	PA
PHN	5.43	2.67	1.38	1.13	2.09	3.78	13.24	41.56	100.2	77.2	28.38	12.18	24.1
C.E. CMEH-CDC "B"	1.83	0.88	0.38	0.27	0.65	1.22	4.26	13.01	38.47	24.51	8.41	4.03	8.16
C.E. Tennant (original)	4.82	4.82	4.82	4.82	4.82	4.82	9.64	9.64	9.64	9.64	9.64	9.64	7.23
C.E. Tennant (modificado)	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55	18.18	18.18	18.18	18.18	18.18	18.18	9.36

Nota: PHN= Producción hídrica natural, CE= Caudal ecológico, PA = Promedio anual

Leyenda: IDCE (+) IDCE (-)

4.7.3. Análisis comparativo UH Bajo Pisco-Sitio 3

En la Figura 39 se muestra gráficamente la comparación entre el método CMEH-CDC y el método de Tennant (Original y Modificado) en la UH Bajo Pisco. Igualmente, que en las dos UH anteriores, el método CMEH-CDC permitió cubrir de manera realista el caudal ecológico asignado a la UH Bajo Pisco, ya que este método considera tanto la cantidad de agua expresada a través de la producción hídrica de la cuenca, así como su variabilidad mensual conforme al año hidrológico, lo cual está alineado con el concepto del régimen natural del flujo. Debido a que a la UH Bajo Pisco se le asignó una CMEH «C», los requerimientos anuales del caudal ecológico son mucho menores con relación a la producción hídrica natural de la UH, representando apenas el 17.6 por ciento del caudal medio anual.

En el caso del método de Tennant original y modificado, en el que se asigna un porcentaje fijo para el caudal ecológico en función del caudal medio anual y de las dos estaciones consideradas (época avenida y de estiaje), se observa que el mejor resultado se obtiene con el método de Tennant modificado, con el cual el caudal ecológico estimado se logra cubrir el mayor número de meses del año, con excepción de los meses de diciembre y mayo en la época de avenida. Con el método de Tennant original se obtienen resultados que no son realistas para la UH evaluada, ya que los valores del caudal ecológico sobrepasan la

producción hídrica natural en la época de estiaje, con excepción de los meses de junio y noviembre. Para el caso de la época de avenida, sí se logran cubrir el caudal ecológico con la producción hídrica de estos meses. Se observó que con el método de Tennant, no se refleja la variabilidad temporal del caudal que transita por el río principal, lo cual a su vez tendría un impacto en los requerimientos de agua del ecosistema del río y del estuario que se forma en la desembocadura del río Pisco; así como en la disponibilidad de agua que puede asignarse para los distintos usos de agua dentro de la UH Bajo Pisco. El resultado del Índice de Déficit del Caudal Ecológico (IDCE) se muestra en la Tabla 32. Se observa que con el método CMEH-CDC, los 12 meses del año el IDCE fue positivo, seguido del método de Tennant modificado con 10 meses del año con el IDCE positivo y por último el método de Tennant original con solo 5 meses del año con el IDCE positivo, lo cual apoya la hipótesis planteada.

El caudal ecológico medio anual con el método CMEH-CDC es $4.20 \text{ m}^3/\text{s}$ y con el método de Tennant original es de $4.74 \text{ m}^3/\text{s}$, los cuales, si bien son similares en cantidad, el segundo no refleja la variabilidad del régimen hidrológico mensual. Con el método de Tennant modificado, el caudal ecológico es de $6.88 \text{ m}^3/\text{s}$, el cual es algo mayor pero igual no refleja la variabilidad del régimen hidrológico mensual, que es clave en mantener el régimen natural del flujo (Figura 39 y Tabla 32). Se debe indicar que para el caso de la UH Bajo Pisco el caudal ecológico es mucho menor que la producción hídrica anual, debido a la CMEH «C» asignada, sin embargo, esta decisión se debió a que se consideró, además de las características ecohidrológicas de la UH, el hecho que se requiere cubrir las demandas de agua para riego dentro de esta UH, en la cual se ubica el valle de Pisco que es el mayor consumidor de agua, lo cual implica una negociación entre los usuarios a fin de evitar posteriores conflictos por el uso del agua.

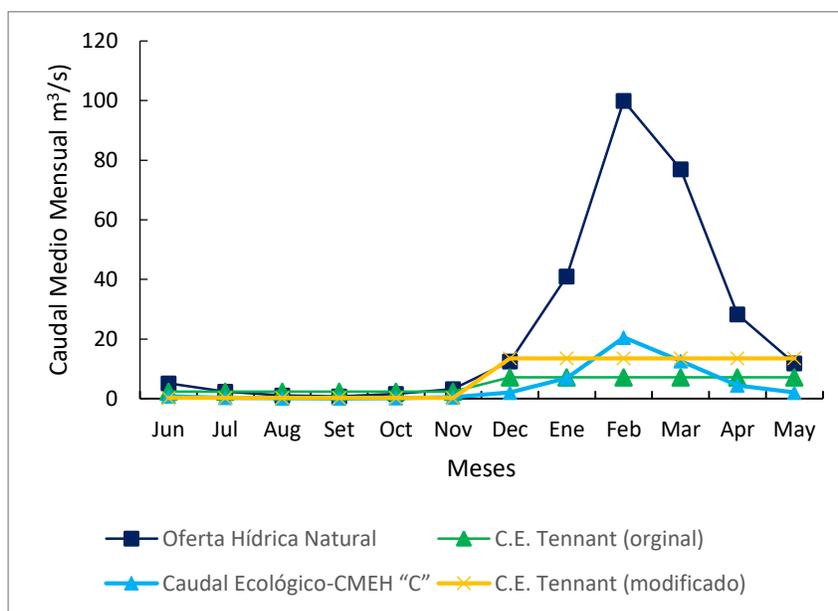


Figura 39. Hidrograma comparativo con los métodos de caudales ecológicos usados en la UH Bajo Pisco-Sitio 1

Tabla 32. Caudales ecológicos para la UH Bajo Pisco-Sitio 1 con los métodos usados

Balance hídrico Medio (m3/s)-UH Bajo Pisco	Periodo 1984-2016												
	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Oct.	Nov.	Dic.	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	PA
PHN	5.08	2.34	1.09	0.78	1.58	3.17	12.50	40.98	99.88	76.94	28.29	11.78	23.70
C.E. CMEH-CDC "C"	0.76	0.27	0.11	0.08	0.19	0.46	2.05	6.89	20.51	12.60	4.41	2.02	4.20
C.E. Tennant (original)	2.37	2.37	2.37	2.37	2.37	2.37	7.11	7.11	7.11	7.11	7.11	7.11	4.74
C.E. Tennant (modificado)	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	13.52	13.52	13.52	13.52	13.52	13.52	6.88

Nota: PHN= Producción hídrica natural, CE= Caudal ecológico, PA = Promedio anual

Leyenda: ■ IDCE (+) ■ IDCE (-)

4.8. COMPARACIÓN CON CAUDALES ECOLÓGICOS EN OTROS RÍOS

Se realizó una comparación general de los caudales ecológicos determinados en estudios hidrológicos llevados a cabo por la ANA. Al respecto, se revisaron dos casos: (i) cuenca del río Cañete (ANA 2019a) y (ii) cuenca del río Pampas (ANA 2019b).

Con respecto al estudio realizado en la cuenca del río Cañete se señala lo siguiente: «Previamente al balance, se propone un caudal ecológico para el tramo final del río Cañete (aguas abajo de la última captación Pachacamilla Vieja) en base a métodos hidrológicos y a los excedentes, luego de atender las demandas del valle Cañete. El caudal ecológico propuesto es de un mínimo de 3.5 m³/s para los meses de estiaje julio-octubre, y tiene una distribución para los meses de avenidas que van desde 7 m³/s en diciembre hasta 18 m³/s en marzo (para los meses de transición noviembre y junio 5 m³/s).»

Con respecto al estudio realizado en la cuenca del río Pampas se señala lo siguiente: «Las cuencas del río Pampas, deben mantener un caudal mínimo que haga posible la subsistencia de la flora y fauna del cauce y del bosque ribereño que albergan sus riberas. Este caudal de preservación se denomina «Caudal ecológico» y su cuantificación engloba múltiples factores, muchos de ellos de difícil valoración, por lo que se requiere de estudios detallados que abarquen temas de la biodiversidad de su curso natural.» Asimismo, se señala que: «En la selección de los tramos de estudio, se ha dado prioridad a las zonas con mayor importancia ambiental y a aquellas que están situadas aguas abajo de grandes presas o derivaciones importantes y que puedan condicionar las asignaciones y reservas de recursos en la cuenca.» Además, señala que se calculó el caudal ecológico referencial en 12 tramos considerando el 95 por ciento de persistencia, conforme a la metodología vigente de la ANA hasta diciembre de 2019.

Del análisis de dichos estudios se concluye que, en el caso de la cuenca del río Cañete, el caudal ecológico se determinó en un solo punto de la cuenca (cuenca baja) y considerando el caudal ecológico como un «flujo mínimo», sea con base al 10 por ciento del caudal medio anual o al 95 por ciento de persistencia, en el tramo evaluado del río, en ese sentido, es un método netamente hidrológico y no considera en su determinación las características ecológicas de las cuencas y de los ecosistemas acuáticos que existen (ríos, lagunas, humedales, estuarios), y tampoco la determinación de un caudal ecológico mayor al denominado flujo mínimo, sobre todo en las cuencas que estén menos o sin intervención, a fin de que esté más cerca de su régimen hidrológico natural del flujo en función del análisis

del hidrograma y de los ecosistemas acuáticos o dependientes directamente del agua que existen en la cuenca.

Con respecto al caso de la cuenca del río Pampas, sucede algo similar, si bien se determinó el caudal ecológico en 12 tramos de la red hidrográfica de la cuenca, y se incluyeron algunos aspectos de tipo ecológico y biológica, además del hidrológico, como es el caso de la existencia de especies hidrobiológicas en dichos cursos de agua, finalmente el cálculo del caudal ecológico sigue siendo netamente hidrológico y de mantener un «flujo mínimo», el cual se define como el caudal al 95 por ciento de persistencia, conforme a la metodología vigente de la ANA hasta diciembre de 2019. Lo cual como en el caso anterior, presenta varias limitaciones como considerar solo el enfoque del «flujo mínimo» en la determinación del caudal ecológico, el cual no sería el óptimo en cuencas que estén menos o sin intervención o que existan áreas naturales protegidas o sitios Ramsar u otras áreas de protección espacial como las denominadas cabeceras de cuenca. En ese sentido, es necesario contar con una metodología holística y flexible que permita calcular el caudal ecológico en distintos escenarios de manejo y en función del régimen hidrológico natural, de las amenazas o presiones actuales a los cuerpos de agua y sus bienes asociados, de la importancia ambiental de la cuenca y no solo de los usos de agua que ya existen o que se planean otorgar.

4.9. LIMITACIONES DEL ESTUDIO

De acuerdo con los resultados de la presente investigación, se puede indicar con respecto a la aplicación del método de Tennant (original y modificado) que en la práctica presentan varias limitaciones, ya que estiman el caudal ecológico en dos estaciones del año (época de avenida y estiaje) y no recoge la variabilidad mensual del caudal, lo cual está alejado del concepto del paradigma del régimen natural del flujo (Poff *et al.* 1997). Asimismo, en función del porcentaje el caudal medio anual seleccionado puede suceder que en algunos meses no se logre cumplir dichos caudales, es decir se sobreestimen y en otros meses se subestime en función de la producción de agua de la cuenca.

Con respecto al método propuesto CMEH-CDC, si bien su desarrollo y aplicación fue posible debido a que actualmente existe mucha información libre tanto de fuentes nacionales como internacionales, para el cálculo de los indicadores que se requieren implementar (hidrológicos, ecológicos y socioeconómicos), aún existe brechas que superar sobretodo en la información que se genera con respecto a la distribución espacial de las especies hidrobiológicas que existen en los cursos de agua del país. Asimismo, otra brecha de información que se requiere considerar previo a su implementación en una cuenca específica, es que es necesario contar con una información de descargas medias mensuales históricas, sea de aforos históricos o simuladas de modelo hidrológico, lo cual, de no existir, deberá de generarse y el estudio de caudal ecológico demandará un mayor tiempo para su aplicación.

Si bien no existe un método ideal o único para calcular el caudal ecológico, se debe tener en cuenta que el presente método propuesto (CMEH-CDC) es adecuado para un nivel de planificación de los usos del agua a nivel de cuenca y subcuencas o escala regional, atendiendo a los principios de sostenibilidad; precautorio, de gestión integrada participativa por cuenca hidrográficas, señalados en la Ley de Recursos Hídricos, permitiendo reservar un volumen inicial como caudal ecológico en función de las condiciones actuales de las subcuencas evaluadas. Por otra parte, a escala de sitio o para proyectos de alta controversia y que involucren ríos con especies de alta importancia, se pueden usar otros métodos disponibles como los hidrobiológicos/hidráulicos bajo un enfoque holístico.

Asimismo, se debe tener en cuenta que la metodología CMEH-CDC en última instancia muchas veces recaerá en una decisión humana a fin de establecer un compromiso entre el uso de los recursos hídricos y el mantenimiento de un río en una acordada/prescrita condición. Además, dado que se expresa como un hidrograma continuo que replica los elementos básicos del régimen de flujo natural, diferentes flujos desempeñaran diferentes funciones ambientales y sociales con la limitación de que mientras más natural o saludable deseamos mantener un río mayor es el caudal ecológico o volumen que se debe reservar.

4.10. IMPLICANCIAS PARA LA GESTIÓN INTEGRADA DE LOS RECURSO HÍDRICOS

La metodología propuesta contribuirá a la implementación de la Gestión Integrada de Recursos Hídricos (GIRH) en toda su extensión, que incluye integrar las necesidades de agua de los ecosistemas en la gestión del agua de la cuenca, considerando a los ecosistemas fluviales como sistemas social ecológicos complejos, es decir que su integridad ecológica depende del mantenimiento de sus estructura y procesos y no de elementos individuales del ecosistema. Asimismo, esta investigación busca contribuir al cambio en la conceptualización e implementación de los caudales ecológicos en el país, pasando del enfoque tradicional del «caudal mínimo» al paradigma del «rio natural» y aplicar en toda su extensión los conceptos de «gestión integrada de recursos hídricos» y «seguridad hídrica» en lo que respecta a la conservación de los ecosistemas acuáticos.

En ese sentido el método denominado como CMEH-CDC permitirá a la Autoridad de agua en el Perú efectuar la planificación de los recursos hídricos a nivel de cuenca y subcuencas, de tal manera que se determine un caudal ecológico o volumen ecológico que se pueda reservar para el ambiente, de manera que se excluya de la disponibilidad de agua de las mismas, para asegurar la conservación de los ecosistemas acuáticos y de la cuenca. Esta metodología se presenta como una metodología flexible, ya que permite previo análisis con los actores de la cuenca, llegar a un consenso sobre qué objetivos específicos se quieren alcanzar o mantener en una determinada cuenca con la determinación del caudal ecológico a través de cuatro escenarios para la gestión denominadas Clases de Manejo Ecohidrológico y decidir hasta qué punto se puede negociar una determinada condición entre el uso ecológico y los usos poblaciones o productivos de la mismas, para evitar potenciales conflictos en aquellas cuencas más intervenidas y con menor producción hídrica. Asimismo, busca que, en aquellas cuencas con la presencia de importantes ecosistemas, áreas protegidas, sitios Ramsar o de las denominadas cabeceras de cuenca, garantizar un caudal ecológico que las mantengas en tales condiciones.

Dado que la determinación del caudal ecológico con la presente metodología CMEH-CDC se conceptualizó como un método holístico de gabinete o «Desktop» implementado con información existente o factible de generar, de manera se puede aplicar a nivel nacional para la planificación de los recursos hídricos con el objetivo de reservar un volumen de agua destinado a la conservación de los ecosistemas acuáticos a nivel de subcuencas. El método también se sustenta en el enfoque de sistemas social-ecológicos complejos y el manejo adaptivo, ya que para su aplicación se considera tanto las componentes ecológicas o biofísicas y socioeconómicas, a través de las intervenciones antrópicas que ocurren en la cuenca y sus interrelaciones por medio de un índice de amenazas ecohidrológicas que es la base para su implementación.

Al respecto, conforme al enfoque de sistemas social-ecológicos complejos la metodología señala que, idealmente, las cuatro categorías de manejo ecohidrológico definidas en la presente investigación se asignen producto del involucramiento y dialogo entre los actores de la cuenca mediante la realización de talleres y haciendo uso de plataformas de articulación existentes relacionada con los recursos hídricos, que para el caso de nuestro país son los consejos de recursos hídricos de cuenca. Esto último permitirá que producto de la información generada y de los intercambios de opiniones y de las negociaciones a las que se lleguen entre los actores de la cuenca, se tomen las mejores decisiones para la planificación de los recursos hídricos del país, considerando las necesidades de agua de los ecosistemas acuáticos, lo cual representa es un gran avance con respecto a cómo actualmente se calcula el caudal ecológico en el Perú.

Asimismo, al ser una metodología flexible en todas sus etapas de aplicación, permite que las CMEH asignadas, así como de los caudales ecológicos o reservas de agua determinadas para cada subcuenca, puedan evaluarse en el tiempo a fin de que se cumplan los objetivos deseados. El monitoreo del caudal ecológico, que sería el indicador a evaluar permitiría definir en el tiempo si la clase asignada es la más idónea en función de la realidad de la cuenca y en la medida que se genere mayor información, se podrán recalcular el índice de amenaza ecohidrológica, que es la base para el cálculo del presente estado ecológico y la asignación de la CMEH.

V. CONCLUSIONES

En la presente investigación se desarrolló una propuesta de metodología para la determinación de caudales ecológicos con fines de planificación hídrica a nivel de subcuenca denominada CMEH-CDC, enfocada en la protección y conservación de los ecosistemas aplicándose en la cuenca del río Pisco. A diferencia de los métodos basados en el establecimiento de porcentajes fijos sea a nivel estacional o mensual, la presente metodología considera la variabilidad espacial y temporal del régimen de flujo en la cuenca, apelando al paradigma del régimen natural del flujo y considerando a los ecosistemas fluviales como sistemas social ecológicos complejos, es decir que su integridad ecológica depende del mantenimiento de sus estructura y procesos y no de elementos individuales del ecosistema.

La metodología propuesta relacionó las características ecológicas, socioeconómicas e hidrológicas para la determinación del caudal ecológico a escala de cuenca y subcuenca, y es una alternativa para llevar a cabo una evaluación rápida y de baja demanda de recursos para cuantificar caudales ecológicos, particularmente en ríos donde la información ecológica y otro tipo de información necesaria son limitadas. Además, permite involucrar a los actores locales de la cuenca en la determinación de las clases de manejo ecohidrológico y así conciliar las necesidades de agua del ecosistema y de los usuarios de agua, lo cual es clave en la implementación de la gestión integrada de los recursos hídricos en cuencas muy intervenidas y con derechos de agua comprometidos.

La presente propuesta metodológica puede aplicarse en otras cuencas del país, ya que en su desarrollo consideró la información disponible sobre aspectos ecológicos, hidrológicos y socioeconómicos con la finalidad de estimar un índice de amenaza ecohidrológica que es la base para determinar el presente estado ecohidrológico y con la información de descargas media mensuales históricas simuladas con un modelo hidrológico semidistribuido, se calculan las curvas de duración de caudales de referencia para cada subcuenca; y en última instancia del cruce de la información generada, se asignan los escenarios o clases de manejo ecohidrológico y los caudales ecológicos que se requiere mantener.

Como resultado de la aplicación de la metodología CMEH-CDC a la salida de tres Unidades Hidrográficas (UH) de la cuenca del río Pisco, en la UH Incachaque el caudal ecológico estimado fue 69.5 MMC anuales, que equivale al 63.5 por ciento del caudal medio anual; en la UH Medio Bajo Pisco el caudal ecológico estimado fue 257.3 MMC anuales, que equivale al 33.7 por ciento del caudal medio anual y en la UH Bajo Pisco el caudal ecológico fue 132 MMC anuales, que equivale al 17.68 por ciento del caudal medio anual, la magnitud de dichos caudales varía en función de la CMEH asignadas, sin embargo, en todos los casos, los caudales ecológicos determinados reflejan de manera realista el régimen hídrico mensual de los curso de agua de la cuenca.

De la evaluación de la prueba de hipótesis mediante la construcción del índice de déficit del caudal ecológico (IDCE), se contrastó la metodología desarrollada en la presente investigación (CMEH-CDC) y el método de Tennant (original y modificado), que es el método hidrológico más ampliamente usado, se concluye que los mejores resultados se obtuvieron con el método CMEH-CDC, que permitió estimar un caudal ecológico que se puede cumplir durante todos los meses del años, a diferencia del método de Tennant modificado y de Tennant original, que en ese orden obtienen resultados que en algunos meses no se pueden cumplir; lo cual apoya la hipótesis planteada de que el método CMEH-CDC permite determinar adecuadamente el caudal ecológico de una cuenca.

Con respecto al estado de las metodologías que se aplican en el Perú para la determinación de caudales ecológicos, se ha venido usando, en mayor medida, el enfoque del caudal o flujo mínimo, sin embargo, se requiere de un cambio de enfoque conceptual en su determinación, moviéndose hacia el paradigma del régimen de flujo natural y los métodos holísticos, a fin de mantener la integridad ecológica de las cuencas y sus ecosistemas acuáticos. Si bien existe un gran avance en los instrumentos de regulación de caudales ecológicos en el Perú, entre los años 2012, 2016 y 2019; se debe destacar en particular este último, que considera la determinación de los caudales ecológicos por la ANA con fines de planificación de los recursos hídricos en los ámbitos de las cuencas, pero que aún carece de una metodología para su implementación a nivel nacional, por lo que la presente propuesta metodológica desarrollada puede contribuir con dicho fin.

VI. RECOMENDACIONES

Es necesario que las entidades públicas que generan información de aspectos ecológicos, hidrológicos y socioeconómicos continúen desarrollando estudio en dichas materias, de manera que se acorten las brechas de información, en particular, en lo que respecta a la información de la distribución de especies hidrobiológicas en cuerpos de agua continentales (ríos, lagunas y humedales) para las 159 unidades hidrográficas (UH) y sus unidades menores; así como la generación de caudales, a través de la instalación de más estaciones hidrométricas o la elaboración de modelos hidrológicos semidistribuidos.

La etapa de asignación de las clases de manejo ecohidrológico (CMEH), se recomienda que se lleve a cabo mediante talleres con los diversos actores de la cuenca usando plataformas o espacios de articulación como son los consejos de recursos hídricos de cuenca, en donde estén creados, de manera que producto de la información técnica generada y los intercambios de opiniones se tomen las mejores decisiones para cada subcuenca en el marco de la gestión integrada de los recursos hídricos.

Dado que aún no se ha determinado oficialmente los caudales ecológicos que se deben mantener a nivel de subcuencas en el la UH Pisco, la ANA pueda usar la metodología desarrollada en la presente investigación para calcular el caudal ecológico con fines de planificación de los recursos hídricos, de manera que el volumen estimado se retire de la disponibilidad de agua, ya que son una restricción que se imponen a todos los usuarios de la cuenca, quienes no podrán aprovecharlos bajo ninguna modalidad para un uso consuntivo, de acuerdo al reglamento de la Ley de Recursos Hídricos.

Aplicar la metodología propuesta CMEH-CDC en otras cuencas del país, tanto de las vertientes del Pacífico, Atlántico y Titicaca, que presenten distintos niveles de intervención antrópica, usos del agua comprometidos, plataformas de gestión del agua, e importancia ecológica o ambiental, de manera que se pueda validar para su uso a escala nacional. Asimismo, realizar balances hídricos a nivel de subcuencas a fin de evaluar el estado de la disponibilidad actual de agua para la asignación de caudales ecológicos.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Allen, C. y Garmestani, A. 2015. Adaptive Management. 10.1007/978-94-017-9682-8_1.
- Autoridad Nacional del Agua. 2012. Ley de Recursos Hídricos y su Reglamento. Ley No. 29338. Lima, Perú.
- Autoridad Nacional del Agua. 2014. Reglamento del Plan de Aprovechamiento de las Disponibilidades Hídricas. Lima Perú.
- Autoridad Nacional del Agua. 2019a. Estudio Hidrológico de la Unidad Hidrográfica Cañete. Lima, Perú.
- Autoridad Nacional del Agua. 2019b. Evaluación de Recursos Hídricos en la Cuenca Pampas. Lima, Perú.
- Autoridad Nacional del Agua. 2022. Implementación del Modelo SWAT en la Cuenca del Río Pisco (p. 114). Lima, Perú.
- Arthington, AH; Bhaduri, A; Bunn, SE; Jackson, SE; Tharme, RE; Tickner, D; Young, B; Acreman, M; Baker, N; Capon, S; Horne, AC; Kendy, E; McClain, ME; Poff, NL; Richter, BD; Ward, S. 2018. The Brisbane Declaration and Global Action Agenda on Environmental Flows (2018). *Front. Environ. Sci.* 6:45. doi: 10.3389/fenvs.2018.00045.
- Barrios Ordoñez, JE; Sánchez Navarro, R; Salinas Rodríguez, SA; Rodríguez Pineda, JA; González Mora, I; Gómez Almaraz, R; Escobedo Quiñones, H; Reyes González, JA. 2011. Guía para la determinación de caudales ecológicos en México. México, D.F.: Fondo Mundial para la Naturaleza Fundación Gonzalo Río Arronte I.A.P.

- Barrios, E; Salinas-Rodríguez, S; Martínez, A; Pérez, M; Bracamonte, R; Ángeles, F. 2015. Programa Nacional de Reservas de Agua en México. Experiencias de caudal ecológico y la asignación de agua al ambiente. 10.13140/RG.2.2.29479.96163.
- Berkes, F. y Folke C. 1998. Linking Social and Ecological Systems: Management Practices and Social Mechanisms for Building Resilience. Cambridge, UK: Cambridge Univ. Press.
- Berkes, F. 2011. Restoring unity: the concept of social-ecological systems. World Fisheries: A Social- Ecological Analysis (eds R.E. Ommer, R.I. Perry, K. Cochrane & P. Cury), pp. 9-28. Wiley Blackwell, Oxford.
- CDM Smith. 2018c. Draft. Revised Desktop Reserve Model for Tanzania (TzDRM) Synthesis Report. CDM Smith for USAID/Tanzania. Disponible en <https://dec.usaid.gov/dec/home/Default.aspx>.
- Conallin, J., Campbell, J. y Baumgartner, L. 2018. Using Strategic Adaptive Management to Facilitate Implementation of Environmental Flow Programs in Complex Social-Ecological Systems. *Environmental Management* 62, 955–967.
- Dickens, C; Smakhtin, V; Biancalani, R; Villholth, KG; Eriyagama, N; Marinelli, M. 2019. Incorporating environmental flows into water stress indicator 6.4.2: guidelines for a minimum standard method for global reporting. Rome, Italy: FAO. 32p.
- Falkenmark, M. & Widstrand, C. 1992. Population and Water Resources: A Delicate Balance. *Population bulletin*. 47. 1-36.
- GWP TAC. 2000. Integrated Water Resources Management. Global Water Partnership - Technical Advisory Committee, Background Paper No.4.

- Gunderson, L.H., Holling, C.S. (Eds.), 2002. *Panarchy: Understanding Transformations in Human and Natural Systems*. Island Press, Washington, DC.
- Hassing, J., Ipsen, N., Clasen, T.J., Larsen, H. y P. Linaard-Jorgensen. 2009. *Integrated Water Quality Management in Action*. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO).
- Horne, A., Webb, J., O'Donnell, E., Arthington, A., McClain, M., Bond, N., Acreman, M., Hart, B., Stewardson, M., Richter, B. y Poff, N. 2017. Research Priorities to Improve Future Environmental Water Outcomes. *Frontiers of Environmental Science*. 5. 10.3389/fenvs.2017.00089.
- Hughes, DA; Münster, F. 2000. Hydrological information and techniques to support the determination of the water quantity component of the ecological reserve. *Water Research Commission Report TT 137/00*, Pretoria, South Africa. 91 pp.
- Hughes, DA; Hannart, P. 2003. A desktop model used to provide an initial estimate of the ecological instream flow requirements of rivers in South Africa. *Journal of Hydrology* 270: 167-181.
- Karimi, S; Yasi, M; Eslamian, S. 2012. Use of Hydrological Methods for Assessment of Environmental Flow in a River Reach. *International Journal of Environmental Science and Technology*. 9. 10.1007/s13762-012-0062-6.
- King, JM; Tharme, R; de Villiers, M. 2008. *Environmental Flow Assessments for Rivers: Manual for the Building Block Methodology* (updated Edition).
- Kleynhans, C.J. 1996. A qualitative procedure for the assessment of the habitat integrity status of the Luvuvhu River (Limpopo system, South Africa). *J Aquat Ecosyst Stress Recov* 5, 41–54.

- Kleynhans, C. J. 2000. Desktop estimates of the ecological importance and sensitivity categories (EISC), default ecological management classes (DEMC), present ecological status categories (PESC), present attainable ecological management classes (present AEMC). Institute for Water Quality Studies, Department of Water Affairs and Forestry.
- Lagerblad, L. 2010. Assessment of environmental flow requirements in Buzi River basin, Mozambique (Dissertation). Disponible en <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:uu:diva-150870>.
- Leprieur, F., Beauchard, O., Blanchet, S., Oberdorff, T. & Brosse, S. 2008. Fish Invasions in the World's River Systems: When Natural Processes Are Blurred by Human Activities. *PLoS biology*. 6. e28
- Mccartney, M; Shiferaw, A; Seleshi, Y. 2009. Estimating environmental flow requirements downstream of the Chara Chara weir on the Blue Nile River. *Hydrological Processes*. 23. 3751 - 3758. 10.1002/hyp.7254.
- Ortega, H., Hidalgo, M., Correa, E., Espino, J., Chocano, L., Trevejo, G., Meza-Vargas, V., Cortijo, A. & Quispe, R. (2011). Lista anotada de los peces de aguas continentales del Perú: Estado actual del conocimiento, distribución, usos y aspectos de conservación.
- Overton, I. S., Dalton, J., Barchiesi, S., Acreman, M., Stromberg, J. y Kirby, M. 2014. Implementing environmental flows in integrated water resources management and the ecosystem approach. *Hydrological Sciences Journal*. 59. 10.1080/02626667.2014.897408.
- Pahl-Wostl, C.; Arthington, A.; Bogardi, J.; Bunn, S. E; Hoff, H.; Lebel, L.; Nikitina, E.; Palmer, M.; Poff, LeRoy N.; Richards, K.; Schlüter, M.; Schulze, R.; St-Hilaire, A.; Tharme, R.; Tockner, K.; Tsegai, D. 2013. Environmental flows and water governance: managing sustainable water uses. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 5(3-4), 341–351.

Poff, N. L., Allan, J. D., Bain, M. B., Karr, J. R., Prestegard, K. L., Richter, B. D., Sparks, R. E., y Stromberg, J. C. 1997. The Natural Flow Regime. *BioScience*, 47(11), 769–784. <https://doi.org/10.2307/1313099>.

Poff, N; Tharme, R; Arthington, A. 2017. Evolution of Environmental Flows Assessment Science, Principles, and Methodologies. 10.1016/B978-0-12-803907-6.00011-5.

Pringle, C. (2003), What is hydrologic connectivity and why is it ecologically important? *Hydrol. Process.*, 17: 2685-2689.

Richard T. K.; Harry C. B. y Sharon R. P. 2011. Strategic Adaptive Management in freshwater protected areas and their rivers. *Biological Conservation*, Volume 144, Issue 4.

Salinas-Rodríguez, SA, Barrios-Ordóñez, JE, Sánchez-Navarro, R, Wickel, AJ. 2018. Environmental flows and water reserves: Principles, strategies, and contributions to water and conservation policies in Mexico. *River Res Applic.* 2018; 34: 1057– 1084.

Smakhtin, Vladimir. (2000). Estimating daily flow duration curves from monthly streamflow data. *Water S.A.* 26.

Smakhtin, V; Anputhas, M. 2006. An assessment of environmental flow requirements of Indian river basins. Research Report. International Water Management Institute.

Smakhtin, V; Arunachalam, M; Behera, S; Chatterjee, A; Das, S; Gautam, P; Joshi, GD; Sivaramakrishnan, KG; Unni, KS. 2007. Developing procedures for assessment of ecological status of Indian river basins in the context of environmental water requirements. Colombo, Sri Lanka: International Water Management Institute. 40p. (IWMI Research Report 114).

- Sood, A; Smakhtin, V; Eriyagama, N; Villholth, KG; Liyanage, N; Wada, Y; Ebrahim, G; Dickens, C. 2017. Global environmental flow information for the sustainable development goals. Colombo, Sri Lanka: International Water Management Institute (IWMI). 37p. (IWMI Research Report 168). doi: 10.5337/2017.201
- Tennant DL. 1976. Instream flow regimens for fish, wildlife, recreation and related environmental resources. *Fisheries* 1:6–10
- The Brisbane Declaration. 2007. Environmental flows are essential for freshwater ecosystem health and human well-being, in 10th International River Symposium and International Environmental Flows Conference (Brisbane, QLD). Disponible en <https://www.conservationgateway.org/ConservationPractices/Freshwater/EnvironmentalFlows/MethodsandTools/ELOHA/Pages/Brisbane-Declaration.aspx>
- The United Nations. 2015. Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development. Disponible en <https://sdgs.un.org/2030agenda>.
- Vörösmarty, C.; Sharma, K.K.; Fekete, B.M.; Copeland, A.H.; Holden, J. & Marble, J.C. 1997. The storage and aging of continental runoff in large reservoir systems of the world.
- Vörösmarty, C; McIntyre, P; Gessner, M; Dudgeon, D; Prussevitch, A; Green, P; Glidden, S; Bunn, S; Sullivan, C; Reidy L; Reidy, C; Davies, P. 2010. Global Threats to Human Water Security and River Biodiversity. *Nature*. 468. 334. 10.1038/nature09549.
- Williams, B.K. y Brown, E.D. 2014. Adaptive Management: From More Talk to Real Action. *Environmental Management* 53, 465–479.

VIII. ANEXOS

Anexo 1. Código en lenguaje Python para calcular el Índice de Amenaza Ecohidrológica (IAEH)

```
# -*- coding: utf-8 -*-
# -----
# IAEH.py
# Created on: 2022-08-10 22:30:06.00000
# (generated by ArcGIS/ModelBuilder)
# Description:
# -----

# Import arcpy module
import arcpy

# Local variables:
W1 = "0.25"
w_1_ = "0.3"
drive_riverfrag_ras_tif__2_ = "drive_riverfrag_ras.tif"
c1b = "c:\\Users\\egeog\\OneDrive\\documents\\ArcGIS\\Default.gdb\\c1b"
w_2_ = "0.25"
drive_dwet_ras_tif = "drive_dwet_ras.tif"
c2b = "c:\\Users\\egeog\\OneDrive\\documents\\ArcGIS\\Default.gdb\\c2b"
w_3_ = "0.22"
drive_IHE_ras_tif = "drive_IHE_ras.tif"
c3b = "c:\\Users\\egeog\\OneDrive\\documents\\ArcGIS\\Default.gdb\\c3b"
w_4_ = "0.04"
drive_IEHH_ras_tif = "drive_IEHH_ras.tif"
c4b = "c:\\Users\\egeog\\OneDrive\\documents\\ArcGIS\\Default.gdb\\c4b"
w_5_ = "0.07"
drive_IEHA_ras_tif = "drive_IEHA_ras.tif"
c5b = "c:\\Users\\egeog\\OneDrive\\documents\\ArcGIS\\Default.gdb\\c5b"
w_6_ = "0.12"
drive_IFluj_ras_tif = "drive_IFluj_ras.tif"
c6b = "c:\\Users\\egeog\\OneDrive\\documents\\ArcGIS\\Default.gdb\\c6b"
Tema_1 = "c:\\Users\\egeog\\OneDrive\\documents\\ArcGIS\\Default.gdb\\fact_wrb"
W4 = "0.25"
w_1__4_ = "1"
drive_ppolut_ras_tif = "drive_ppolut_ras.tif"
c7b = "c:\\Users\\egeog\\OneDrive\\documents\\ArcGIS\\Default.gdb\\c7b"
Tema_2 = "c:\\Users\\egeog\\OneDrive\\documents\\ArcGIS\\Default.gdb\\fact_pollb"
W2 = "0.5"
w_1__2_ = "0.53"
drive_nespec_ras_tif = "drive_nespec_ras.tif"
c8b = "c:\\Users\\egeog\\OneDrive\\documents\\ArcGIS\\Default.gdb\\c8b"
```

```

w_2__2_ = "0.47"
drive_pacui_ras_tif = "drive_pacui_ras.tif"
c9b = "c:\\Users\\egeog\\OneDrive\\documents\\ArcGIS\\Default.gdb\\c9b"
Tema_3 = "c:\\Users\\egeog\\OneDrive\\documents\\ArcGIS\\Default.gdb\\fact_bdb"
IAEH = "c:\\Users\\egeog\\OneDrive\\documents\\ArcGIS\\Default.gdb\\IAEH"

# Process: RC1
arcpy.gp.RasterCalculator_sa("%W1% * %w(1)% * \"%drive_riverfrag_ras.tif (2)%\"", c1b)

# Process: RC2
arcpy.gp.RasterCalculator_sa("%W1% * %w(2)% * \"%drive_dwet_ras.tif\"", c2b)

# Process: RC3
arcpy.gp.RasterCalculator_sa("%W1% * %w(3)% * \"%drive_IHE_ras.tif\"", c3b)

# Process: RC4
arcpy.gp.RasterCalculator_sa("%W1% * %w(4)% * \"%drive_IEHH_ras.tif\"", c4b)

# Process: RC5
arcpy.gp.RasterCalculator_sa("%W1% * %w(5)% * \"%drive_IEHA_ras.tif\"", c5b)

# Process: RC6
arcpy.gp.RasterCalculator_sa("%W1% * %w(6)% * \"%drive_IFluj_ras.tif\"", c6b)

# Process: Raster Calculator (5)
arcpy.gp.RasterCalculator_sa("\"%c1b%\" + \"%c2b%\" + \"%c3b%\" + \"%c4b%\" + \"%c5b%\" + \"%c6b%\"", Tema_1)

# Process: RC7
arcpy.gp.RasterCalculator_sa("%W4% * %w(1) (4)% * \"%drive_ppolut_ras.tif\"", c7b)

# Process: Raster Calculator (14)
arcpy.gp.RasterCalculator_sa("\"%c7b%\" * 1", Tema_2)

# Process: RC8
arcpy.gp.RasterCalculator_sa("%W2% * %w(1) (2)% * \"%drive_nespec_ras.tif\"", c8b)

# Process: RC9
arcpy.gp.RasterCalculator_sa("%W2% * %w(2) (2)% * \"%drive_pacui_ras.tif\"", c9b)

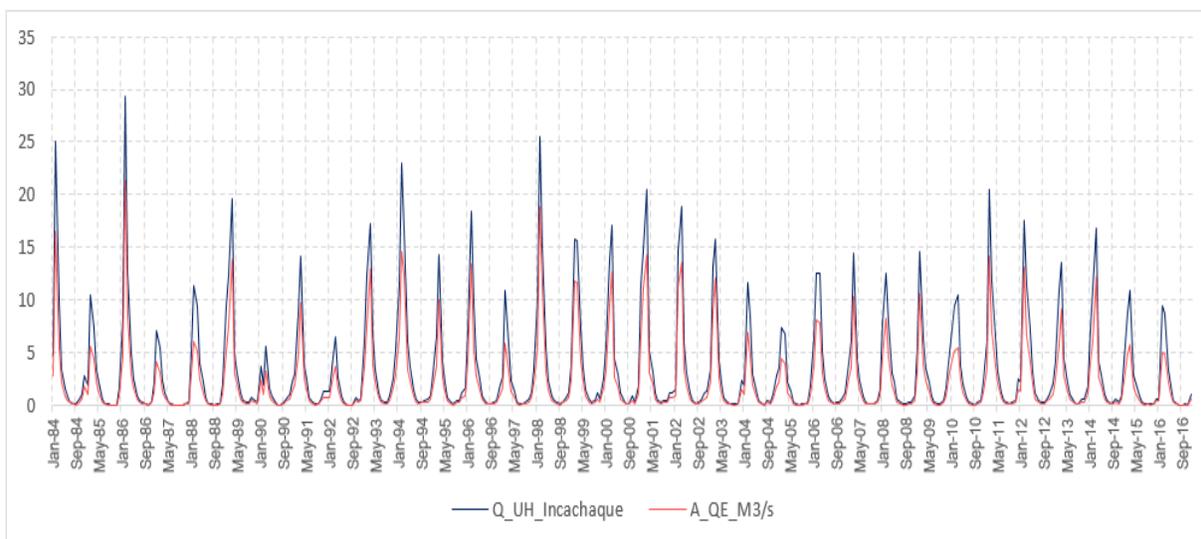
# Process: Raster Calculator (10)
arcpy.gp.RasterCalculator_sa("\"%c8b%\" + \"%c9b%\"", Tema_3)

# Process: Raster Calculator (15)
arcpy.gp.RasterCalculator_sa("\"%Tema_1%\" + \"%Tema_2%\" + \"%Tema_3%\"", IAEH)

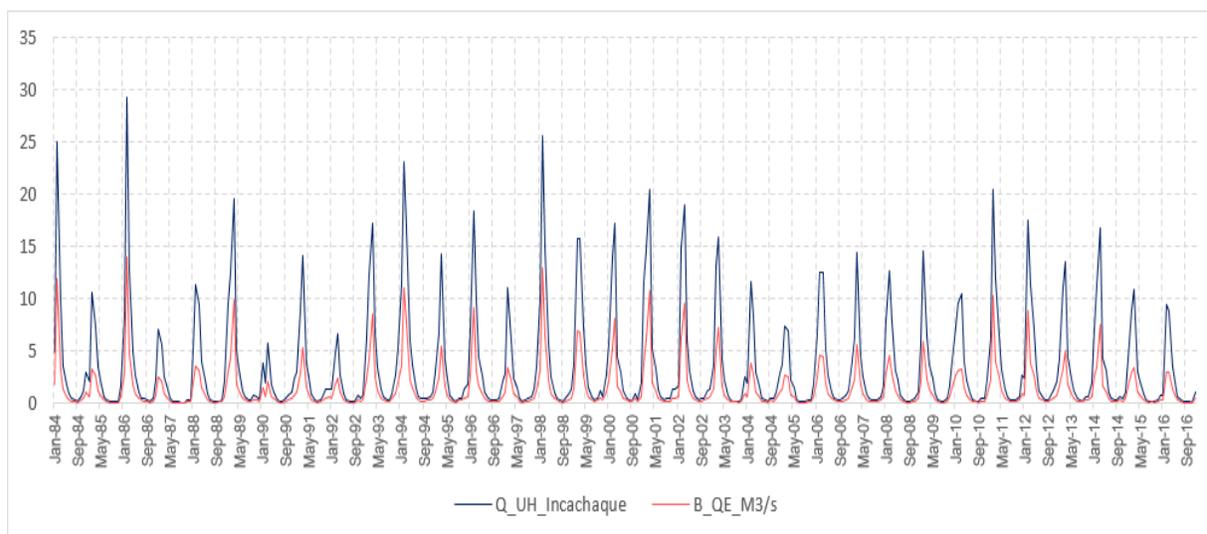
```

Anexo 2. Hidrogramas de caudales ecológicos usando la metodología CMEH-CDC en las UH Incachaque, Medio Bajo Pisco y Bajo Pisco para las cuatro CMEH posibles

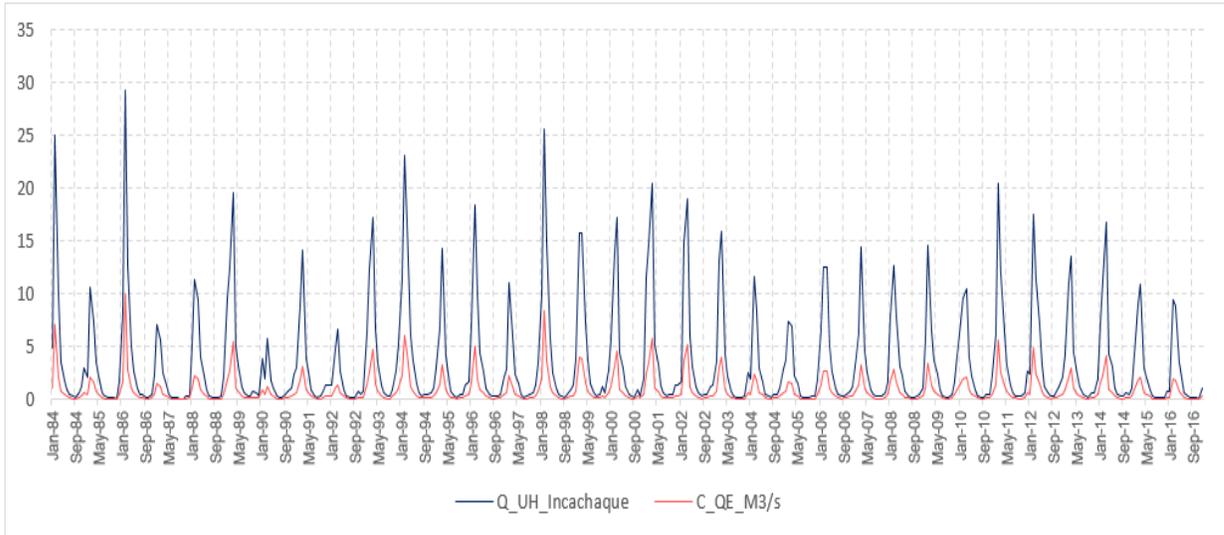
Hidrograma UH Incachaque – CMEH A



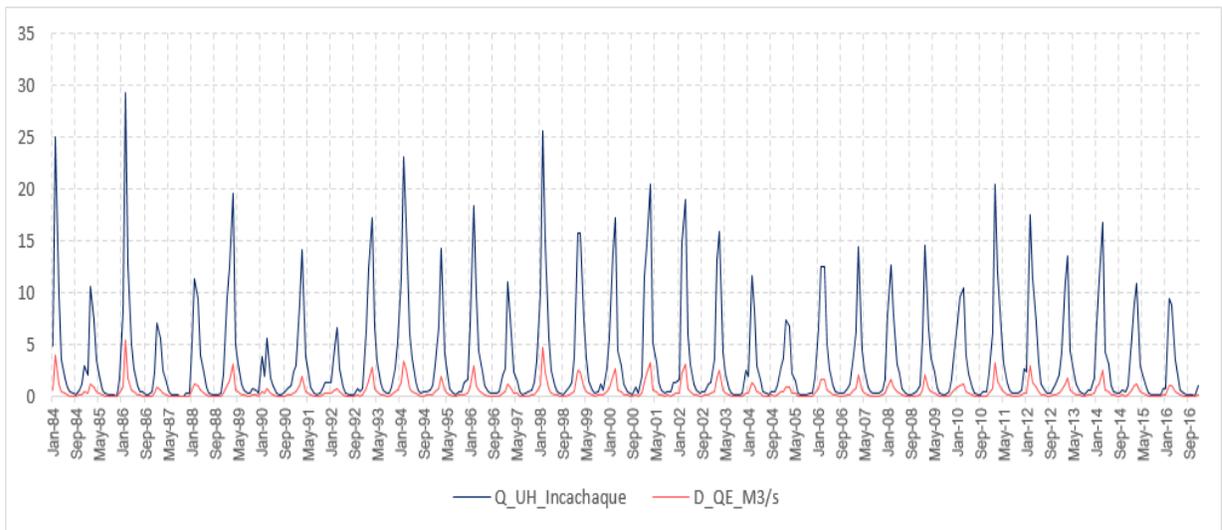
Hidrograma UH Incachaque – CMEH B



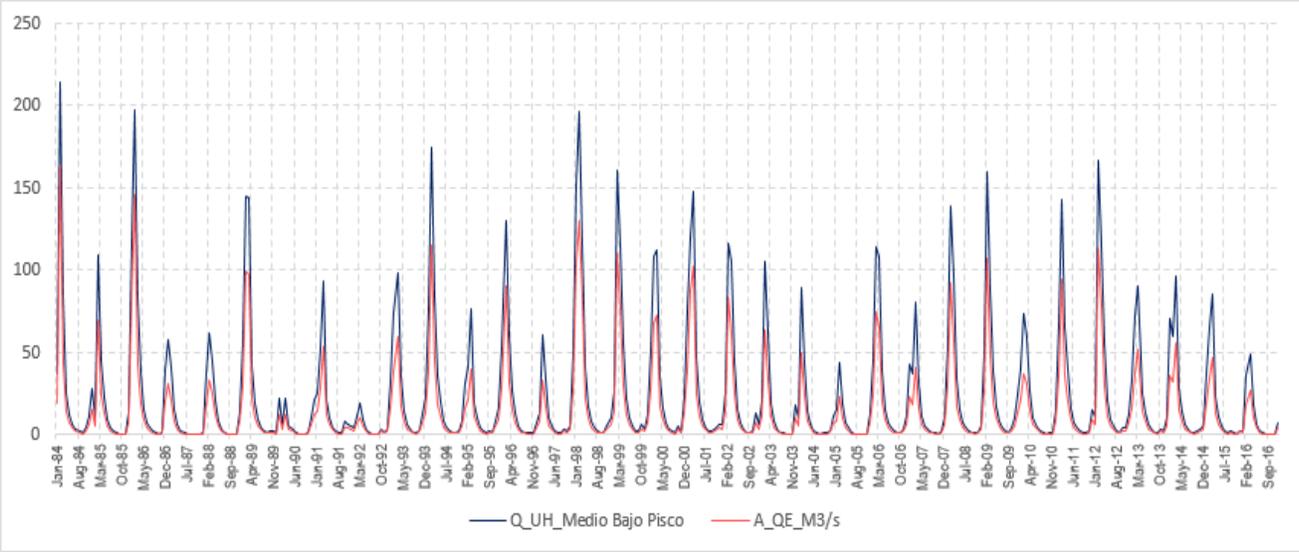
Hidrograma UH Incachaque – CMEH C



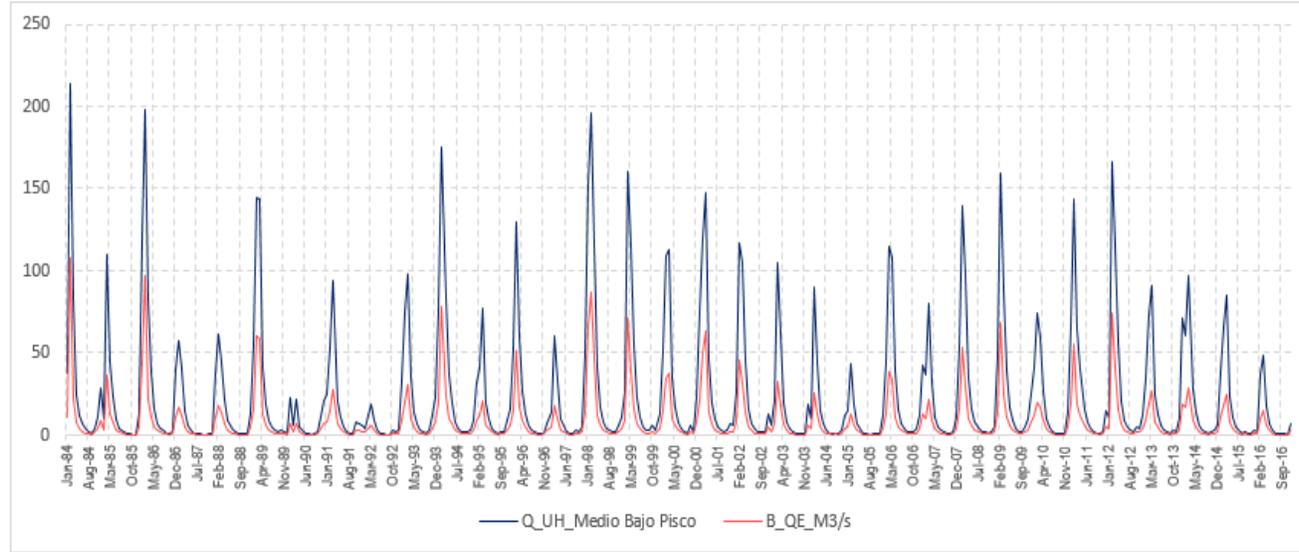
Hidrograma UH Incachaque – CMEH D



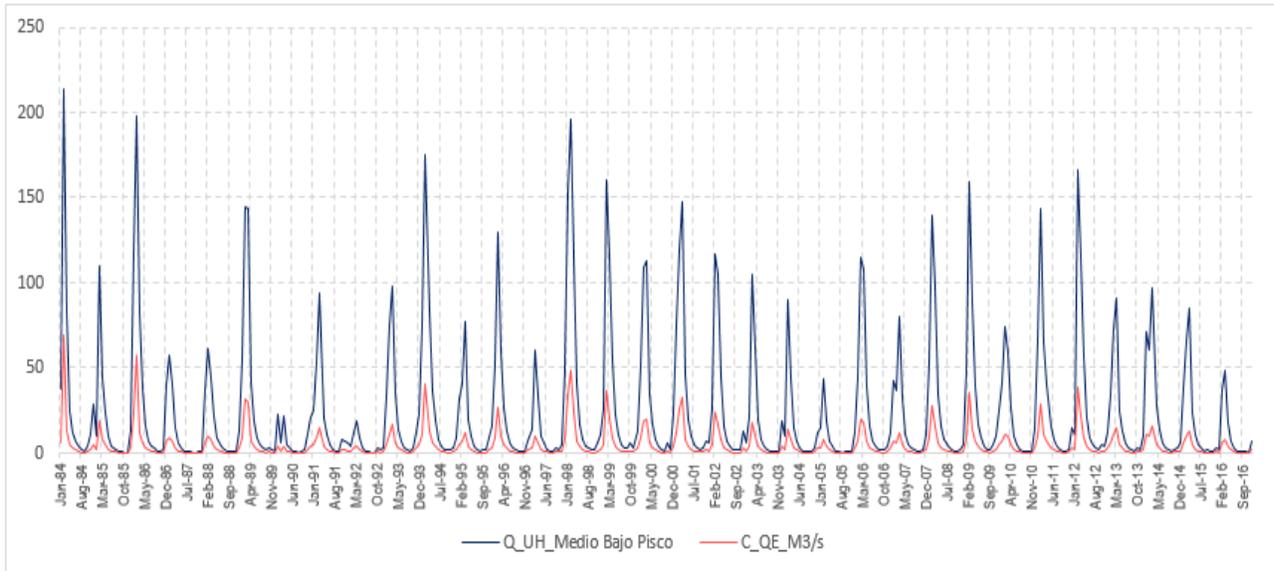
Hydrograma UH Medio Bajo Pisco – CMEH A



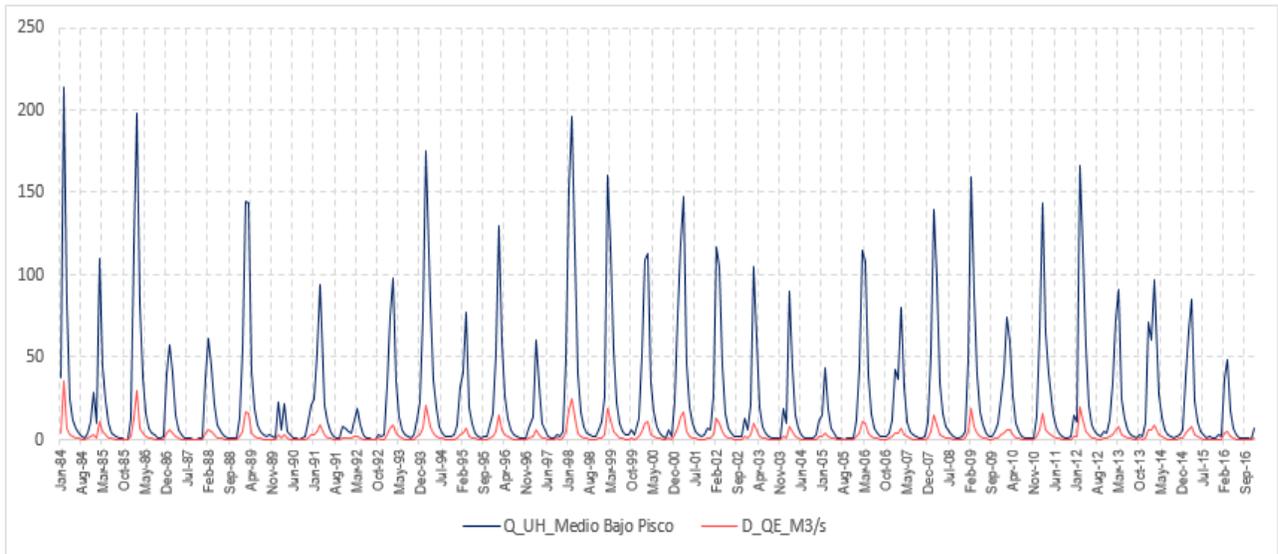
Hydrograma UH Medio Bajo Pisco – CMEH B



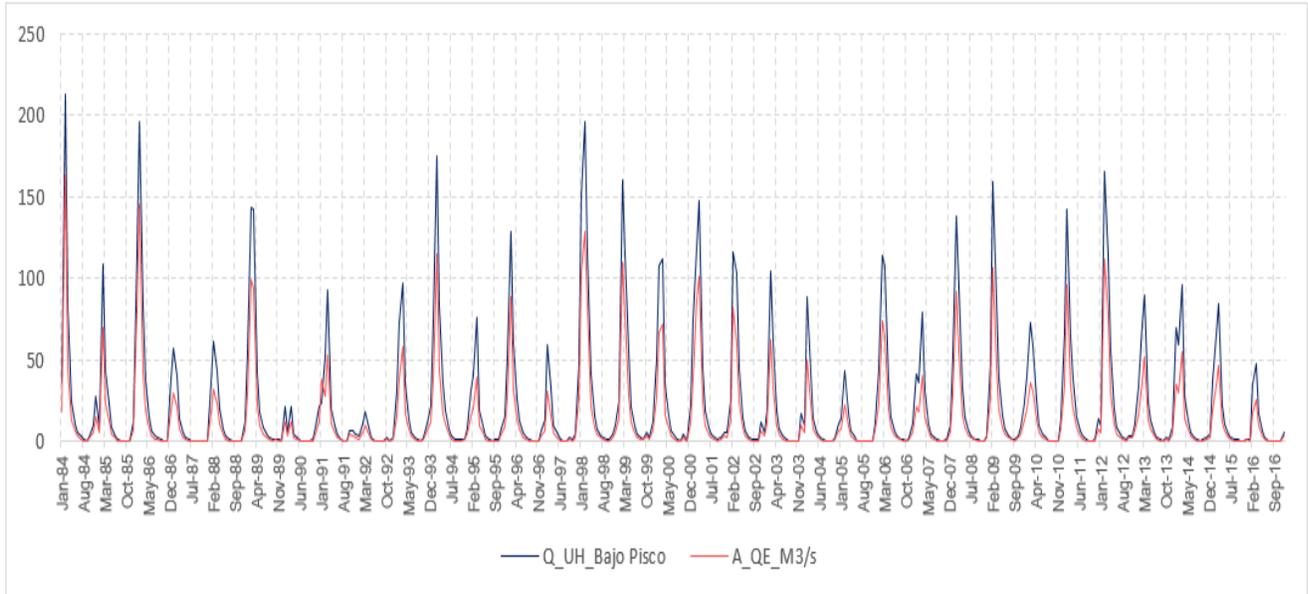
Hydrograma UH Medio Bajo Pisco – CMEH C



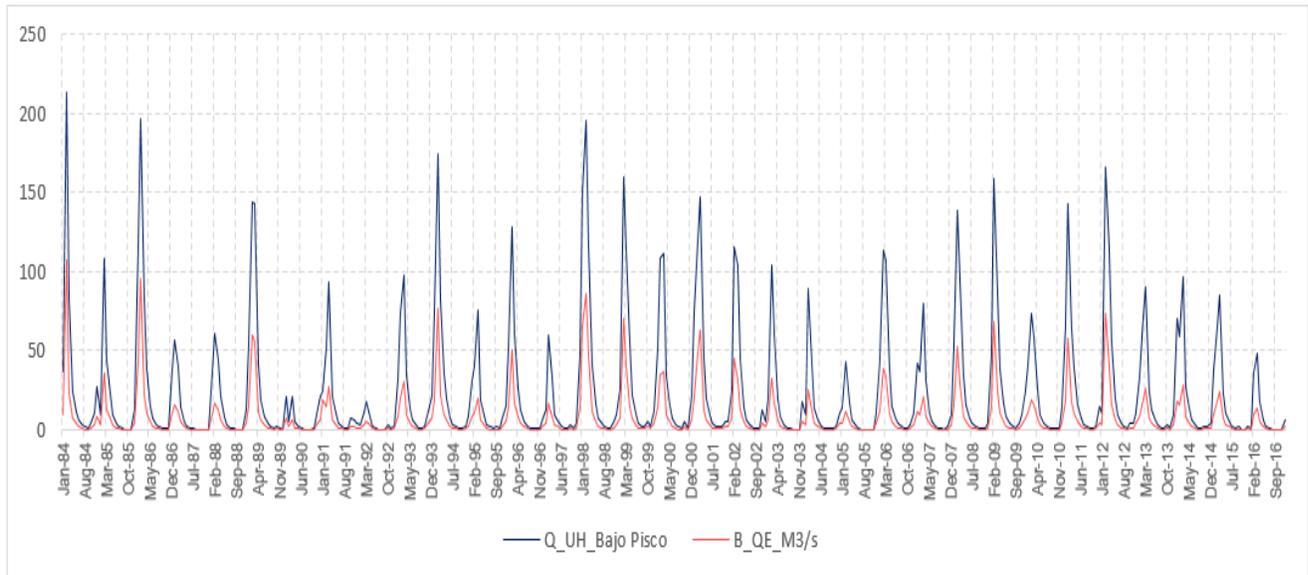
Hydrograma UH Medio Bajo Pisco – CMEH D



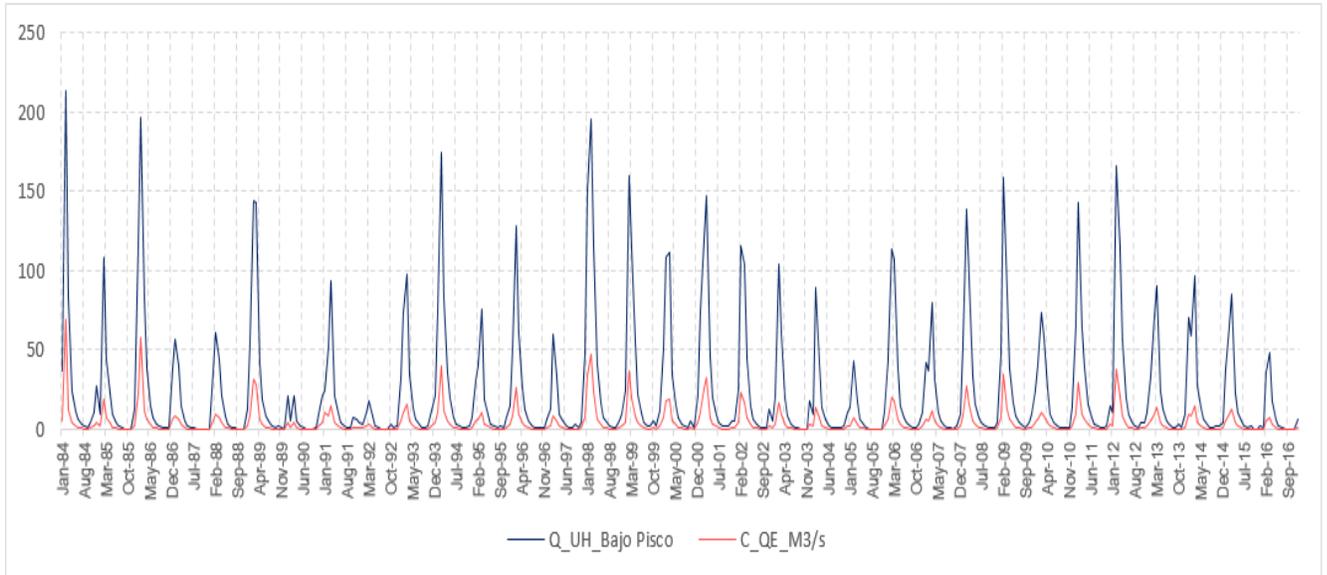
Hidrograma UH Bajo Pisco – CMEH A



Hidrograma UH Bajo Pisco – CMEH B



Hidrograma UH Bajo Pisco – CMEH C



Hidrograma UH Bajo Pisco – CMEH D

