



Determinación del caudal ecológico en el río llave, con la metodología IFIM-PHABSIM

Determination of the ecological flow in the llave River, using the IFIM-PHABSIM methodology

Determinação da vazão ecológica no rio llave, com a metodologia IFIM-PHABSIM

Dany Alexander Aguilar Mamani¹

Universidad Hipócrates, Acapulco - Guerrero, México

Universidad Nacional del Altiplano, Puno - Puno, Perú

 <https://orcid.org/0000-0001-7519-5453>

aguiladan82@gmail.com (correspondencia)

José Antonio Vargas Marón

Universidad Nacional del Altiplano, Puno - Puno, Perú

 <https://orcid.org/0000-0003-0842-5997>

josevargas@unap.edu.pe

Omar Luis Neira Cutipa

Universidad Nacional del Altiplano, Puno - Puno, Perú

 <https://orcid.org/0000-0002-3837-8266>

oneira@unap.edu.pe

Felipe Condori Chambilla

Universidad Nacional del Altiplano, Puno - Puno, Perú

 <https://orcid.org/0000-0002-6100-6786>

fcondori@unap.edu.pe

Howard Rivera Huacasi

Universidad Nacional del Altiplano, Puno - Puno, Perú

 <https://orcid.org/0009-0004-5966-2823>

howardrivera@unap.edu.pe

Gloria Arazola Mamani

Universidad Nacional del Altiplano, Puno - Puno, Perú

 <https://orcid.org/0009-0001-5982-5029>

arazolagloria@gmail.com

DOI: <https://doi.org/10.35622/j.rca.2026.02.002>

Recibido: 03/01/2026 Aceptado: 15/03/2026 Publicado: 10/04/2026

PALABRAS CLAVE

caudal ecológico, flujo ecológico, recurso hídrico, simulación hidrobiológica.

RESUMEN. El caudal ecológico es la cantidad mínima de agua requerida en un río para conservar la biota en este entorno. El presente estudio tuvo como objetivo determinar el caudal ecológico del río llave (en el sector Churo, provincia de El Collao, Puno, Perú) mediante la Metodología Incremental de Flujo Instantáneo (IFIM) y la simulación hidrobiológica de software libre PHABSIM, considerando como especie indicadora a la trucha arcoíris (*Oncorhynchus mykiss*). Se analizaron registros históricos de caudales medios mensuales correspondientes al periodo 2000 – 2025, complementados con mediciones de campo de velocidad de agua, profundidad, temperatura e índice de canal. Los resultados obtenidos indican que el caudal ecológico óptimo para la supervivencia de la trucha es de 3 m³/s, con condiciones adecuadas de temperatura entre 0 - 18

¹ Doctor en Ciencia, Tecnología y Ambiente por la Universidad Nacional del Altiplano, Perú.



°C, profundidad mínima de 0,2 m e índice de canal de 1 a 8. El análisis estadístico evidenció que en 11 meses de los últimos veintiséis años los caudales fueron inferiores a 3 m³/s, lo que refleja un deterioro progresivo del hábitat acuático para el pez en estudio. En conclusión, estos hallazgos evidencian que la disminución del caudal, principalmente por actividades antrópicas, compromete la sostenibilidad hidrobiológica del río llave y pone en riesgo la permanencia de su biota nativa y exótica. Se recomienda la implementación de políticas de gestión integrada del recurso hídrico orientadas a conservar el régimen natural del flujo del agua del río llave.

KEYWORDS

ecological flow, environmental flow, hydrobiological simulation, water resource.

ABSTRACT. Ecological flow is the minimum amount of water required in a river to preserve the biota in that environment. The aim of this study was to determine the ecological flow of the llave River (in the Churo sector, El Collao Province, Puno, Peru) using the Instream Flow Incremental Methodology (IFIM) and hydrobiological simulation with the open-source software PHABSIM, considering rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) as the indicator species. Historical records of mean monthly flows for the period 2000–2025 were analyzed, complemented by field measurements of water velocity, depth, temperature, and channel index. The results indicate that the optimal ecological flow for trout survival is 3 m³/s, with suitable temperature conditions ranging from 0 to 18 °C, a minimum depth of 0.2 m, and a channel index from 1 to 8. Statistical analysis showed that, in 11 months over the last twenty-six years, flows were below 3 m³/s, reflecting a progressive deterioration of the aquatic habitat for the fish under study. In conclusion, these findings show that the reduction in flow, mainly due to anthropogenic activities, compromises the hydrobiological sustainability of the llave River and endangers the persistence of its native and exotic biota. The implementation of integrated water resource management policies aimed at conserving the natural flow regime of the llave River is recommended.

PALAVRAS-CHAVE

fluxo ecológico, recurso hídrico, simulação hidrobiológica, vazão ecológica.

RESUMO. A vazão ecológica é a quantidade mínima de água necessária em um rio para conservar a biota nesse ambiente. O presente estudo teve como objetivo determinar a vazão ecológica do rio llave (no setor Churo, província de El Collao, Puno, Peru) por meio da Metodologia Incremental de Fluxo Instantâneo (IFIM) e da simulação hidrobiológica com o software livre PHABSIM, considerando a truta arco-íris (*Oncorhynchus mykiss*) como espécie indicadora. Foram analisados registros históricos de vazões médias mensais correspondentes ao período de 2000 a 2025, complementados com medições de campo de velocidade da água, profundidade, temperatura e índice de canal. Os resultados indicam que a vazão ecológica ideal para a sobrevivência da truta é de 3 m³/s, com condições adequadas de temperatura entre 0 e 18 °C, profundidade mínima de 0,2 m e índice de canal de 1 a 8. A análise estatística evidenciou que, em 11 meses dos últimos vinte e seis anos, as vazões foram inferiores a 3 m³/s, o que reflete uma deterioração progressiva do habitat aquático para o peixe em estudo. Em conclusão, esses achados evidenciam que a diminuição da vazão, principalmente em decorrência de atividades antrópicas, compromete a sustentabilidade hidrobiológica do rio llave e coloca em risco a permanência de sua biota nativa e exótica. Recomenda-se a implementação de políticas de gestão integrada dos recursos hídricos orientadas para conservar o regime natural do fluxo de água do rio llave.

1. INTRODUCCIÓN

El caudal ecológico se define como el caudal mínimo necesario en una fuente o curso fluvial para preservar la conservación de los ecosistemas (Gallo-Vélez, 2016), por otra parte, Caiola et al. (2014) señalan que el caudal ecológico establece cuánto del régimen hidrológico natural de un río debería seguir fluyendo aguas abajo de un proyecto. El caudal ecológico juega un papel esencial en la conservación del entorno ecológico (Weng et al. 2021). El caudal ecológico es un instrumento de gestión de los recursos hídricos que establece la calidad, cantidad y régimen del caudal de agua mínimo requerido para mantener a todo ser vivo en su entorno del río aguas adentro y aguas afuera (Izquierdo Santacruz & Madroñero Palacios, 2013), el cálculo del caudal ecológico es necesario para mantener los servicios ambientales de los diferentes tipos de cuenca en los ríos, una

reducción en los caudales medioambientales sería una decisión fatal (Chávez-Jiménez & González-Zeas 2015; De la Lanza Espino et al., 2014).

La Metodología Incremental de Flujo Instantáneo (IFIM) se basa en una variedad de aproximaciones que han sido desarrolladas para la evaluación de los efectos que origina la variación de caudales en los cauces (Bovee, 1998; Yi et al. 2017; Jung & Choi 2015). El modelo de simulación hidrobiológica de hábitat físico (IFIM-PHABSIM) se utiliza para cuantificar los requisitos hidrológicos de las especies de peces objetivo en diferentes etapas de vida (Wen et al. 2021; Mocq et al. 2013). El valor potencial de los hábitats acuáticos se evalúa cuantitativamente mediante un área utilizable ponderada (WUA) (Ma et al., 2020). Las actividades antropogénicas a lo largo de los arroyos y ríos pueden ser de gran preocupación para los ecosistemas fluviales (Ceola et al. 2018), como por ejemplo las instalaciones hidroeléctricas pueden alterar el régimen de flujo natural y dañar el ecosistema fluvial en diferentes niveles tróficos (Kuriqi et al. 2021), o también los cambios en el uso de la tierra en la cuenca superior puede alterar el flujo natural de un río (Miao et al. 2020). Las inversiones que hagan uso de los recursos no renovables deben basarse en la absoluta necesidad de protección del medio acuático (Operacz et al., 2018).

Para el software PHABSIM se selecciona un organismo de evaluación a la cual lo llamamos especie objetivo, existen diferentes formas de seleccionar especies de evaluación caza, deporte o comerciales (Bovee, 1998), la trucha arcoíris se comporta de una forma muy particular (Espinosa-Pérez, 2013), y es por eso que para nuestro estudio se eligió a la trucha arcoíris (*Oncorhynchus mykiss*) por su amplia información y por ser una especie que hoy en día se convierte en fuente de negocio para muchas familias en el departamento de Puno. Las condiciones hidromorfológicas en los ríos pueden cambiar significativamente el hábitat de la biota (Knack et al. 2020), Si el río tiene una compleja estructura de la población de especies de peces el modelado se puede realizar por una sola especie objetivo (Yang et al., 2019).

El valor potencial de los hábitats acuáticos se evalúa cuantitativamente mediante un área utilizable ponderada (WUA) (Ma et al., 2020). La variabilidad del flujo es un factor importante para un ecosistema fluvial saludable (Suwal et al. 2020), es de importancia práctica estudiar y analizar el caudal ecológico de la sección del río deshidratado, mantener un determinado caudal ecológico se considera una solución eficaz (Yu et al. 2021).

Este estudio propone una herramienta integrada para la evaluación de la idoneidad del hábitat de los peces basada en parámetros sintéticos hidráulicos y de calidad del agua (Marsili-Libelli et al. 2013). Son varios los autores y países que vienen utilizando esta metodología como por ejemplo, Jakovljević et al. (2021) el objetivo de su estudio fue determinar el caudal necesario para que el río aplicando la metodología IFIM, este pueda mantener sus poblaciones de vida en su entorno, Andrade et al. (2018) aplicó PHABSIM en dos tramos de la cuenca del río Velhas, cuyas descargas a largo plazo son similares, pero están bajo diferentes grados de impacto, aplicando las curvas de idoneidad por métodos tradicionales, se simularon diferentes escenarios de descarga.

Diversos estudios han demostrado que las variables hidrodinámicas, como la profundidad y la velocidad del flujo, son determinantes en la disponibilidad y calidad del hábitat acuático, especialmente bajo escenarios de variabilidad hidrológica asociados a periodos secos y lluviosos. La aplicación de modelos ecohidráulicos ha permitido identificar rangos óptimos de caudal que maximizan la idoneidad del hábitat para especies ícticas sensibles, evidenciando que variaciones relativamente pequeñas del caudal pueden generar reducciones significativas en el área de hábitat disponible. En este contexto, metodologías como IFIM-PHABSIM han sido

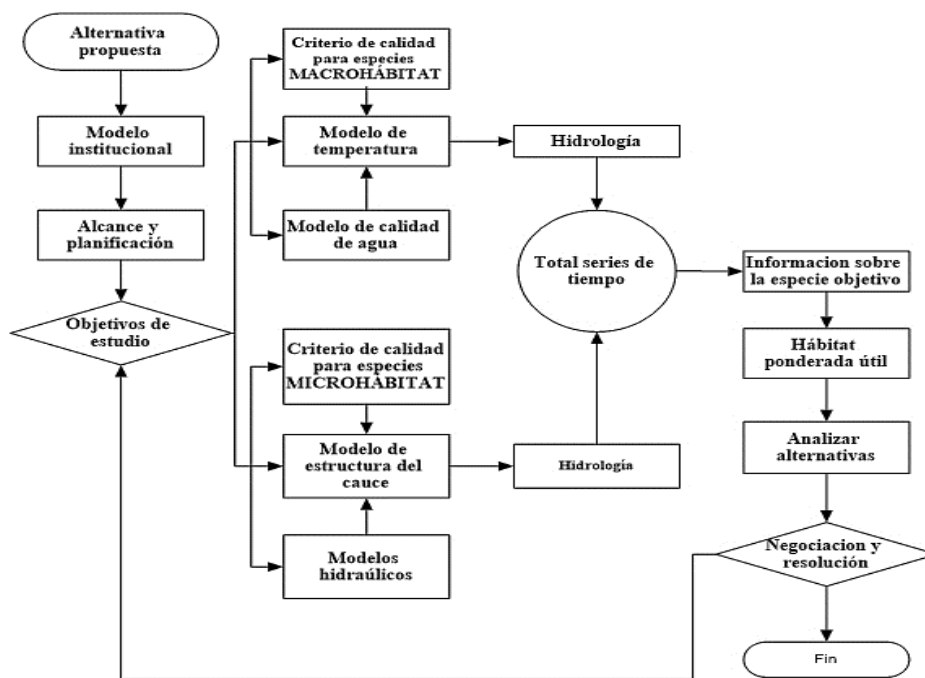
ampliamente utilizadas para evaluar la relación entre caudal, hábitat físico y respuesta biológica, mostrando su utilidad tanto en ríos regulados como en sistemas naturales con presiones antrópicas (Bovee, 1998; Maeda, 2013; Sanz-Ramos et al., 2019).

De manera complementaria, investigaciones recientes indican que derivaciones moderadas de caudal, cuando se mantienen dentro de límites técnicos definidos, pueden generar impactos leves o aceptables sobre la integridad hidrobiológica del sistema fluvial, siempre que se respeten los requerimientos ecológicos de las especies presentes. Sin embargo, en ríos sometidos a intervenciones directas sobre el cauce, como la extracción de agregados, los efectos sobre el régimen hidráulico y la conectividad del hábitat tienden a intensificarse, incrementando la vulnerabilidad del ecosistema. En este sentido, la determinación de caudales ecológicos se consolida como una herramienta fundamental para la conservación de la biota acuática y el mantenimiento de los procesos ecológicos, especialmente en ríos andinos que presentan una marcada reducción del caudal en los últimos años (Jakovljević et al., 2021; Cui et al., 2022; Caiola et al., 2014).

El primer objetivo de este estudio consistió en examinar los registros de caudales medios mensuales del río llave correspondientes a los últimos 26 años. El segundo objetivo fue estimar el caudal ecológico en el sector Churo del río llave mediante la aplicación del método hidrobiológico IFIM-PHABSIM, con la finalidad de evaluar la idoneidad del hábitat para la trucha arcoiris.

Figura 1

Diagrama de caudal ecológico de la metodología IFIM-PHABSIM



2. MÉTODO

Metodología en objetivos específicos

La investigación se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo de nivel aplicado. Según el diseño de estudio, para el primer objetivo se utilizó un análisis de carácter experimental, fundamentado en la comparación de registros históricos de caudales. Para el segundo objetivo, se empleó la Metodología Incremental de Flujo Instantáneo

(IFIM), la cual es reconocida como un marco teórico integral para evaluar los requerimientos de caudal ecológico en ecosistemas lóticos (Jakovljević et al., 2021).

La población de estudio se centró en la trucha arcoíris (*Oncorhynchus mykiss*) en sus fases de alevino, juvenil y adulto. La muestra física se delimitó a un tramo de 700 metros del río Ilave (sector Churo), subdividido en cuatro secciones. Como señalan Andrade et al., (2018) la selección de tramos representativos es crucial para la precisión de la modelación del hábitat físico.

Técnicas e instrumentos

Las técnicas e instrumentos incluyeron la recopilación de datos secundarios del SENAMHI (2000-2025) y la recolección de datos primarios en campo durante el estiaje (noviembre de 2025). Se utilizaron instrumentos de precisión para medir la velocidad, profundidad, índice de canal y sustrato. Estos parámetros son esenciales para alimentar el software PHABSIM (*Physical Habitat Simulation*), el cual permite calcular el Área Útil Ponderada (WUA) para determinar la idoneidad del hábitat (Yu et al., 2021). Finalmente, se analizaron 12 parámetros físico-químicos en laboratorio para complementar la caracterización del estado del río.

Ámbito o lugar de estudio

El lugar de estudio se denomina Churo, este se encuentra al sur de la ciudad de Ilave a 1600 m del centro de la referida ciudad del departamento de Puno, Perú.

Figura 2

Sector Churo del río Ilave



Plan de recolección de datos

La información utilizada fue proporcionada por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) de la ciudad de Puno. Asimismo, los parámetros determinados en las aguas del río Ilave, en el sector Churo, fueron analizados mediante ensayos de laboratorio, cuyos resultados se presentan en la Tabla 1, mientras que los parámetros físicos asociados al caudal del río fueron medidos directamente en campo, tal como se indica en la Tabla 3.

Antes de la recolección de datos correspondiente al segundo objetivo, se realizó un análisis previo de la información que sería incorporada al programa PHABSIM. En este sentido, los datos presentados en la Tabla 1

Dany Alexander Aguilar Mamani; José Antonio Vargas Marón; Omar Luis Neira Cutipa; Felipe Condori Chambilla; Howard Rivera Huacasi; Gloria Arazola Mamani



proviene del SENAMHI, una fuente confiable que realiza mediciones diarias a lo largo del año mediante equipos debidamente calibrados. Por su parte, la información de la Tabla 3 corresponde a resultados emitidos por el laboratorio de la Universidad Nacional del Altiplano (UNA Puno), a partir de cinco muestras analizadas, en las que se evaluaron doce parámetros. Asimismo, los datos de la Tabla 4 fueron obtenidos directamente en campo durante el mes de noviembre, seleccionado por ser el periodo más crítico en términos de caudales bajos. Dichos muestreos se realizaron de manera semanal, en cuatro oportunidades, para posteriormente calcular un valor promedio.

Tabla 1

Variación del caudal medio del río llave (2000–2025) en la estación hidrométrica Puente llave

Año	Caudal promedio mensual de los últimos 25 años (Q m³/s)											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
2000	70,11	281,7	149,9	23,9	14,1	9,78	7,44	7,98	5,66	7,30	5,07	9,51
2001	258,4	311,7	287,2	66,6	20,4	13,6	12,2	11,0	10,1	8,53	7,92	8,89
2002	10,33	83,45	157,28	57,2	24,2	13,5	13,4	10,2	6,76	9,53	9,87	12,8
2003	26,47	41,55	90,95	28,6	9,86	7,03	6,10	8,72	5,37	4,82	4,29	5,90
2004	66,15	135,54	25,81	20,8	9,87	9,11	11,2	11,59	8,99	7,18	3,68	3,83
2005	17,32	92,07	23,72	17,87	7,91	6,00	5,49	4,94	5,18	5,00	6,00	11,30
2006	187,96	171,18	81,25	70,04	11,31	9,73	7,90	6,47	5,07	4,38	7,48	9,65
2007	27,80	24,17	81,40	35,71	11,50	6,64	6,16	5,38	5,53	5,19	6,25	8,75
2008	109,05	68,08	66,42	16,99	8,17	6,70	5,97	5,69	3,69	2,88	2,26	3,82
2009	6,22	13,97	42,56	31,80	8,45	4,47	3,56	3,24	2,68	2,63	5,01	22,39
2010	58,70	108,51	82,42	25,77	10,35	7,29	5,15	3,64	2,73	2,62	2,18	5,87
2011	41,46	216,04	126,53	55,91	14,14	7,85	7,61	5,99	5,03	5,23	5,56	26,15
2012	90,16	261,56	121,35	98,18	28,68	12,80	8,46	6,87	5,60	4,64	5,75	54,36
2013	113,39	115,33	87,37	16,71	10,40	8,89	7,00	5,62	4,40	4,08	5,52	14,77
2014	68,38	32,44	16,85	10,11	5,23	3,45	3,17	3,07	3,74	4,14	3,19	4,75
2015	12,10	26,33	41,48	33,24	13,15	10,79	6,28	5,26	4,15	3,83	4,05	3,86
2016	5,21	71,84	25,56	17,79	6,98	3,76	5,38	4,21	3,43	3,76	3,35	4,47
2017	81,20	78,68	113,38	76,76	19,83	8,82	6,16	4,98	4,73	4,77	3,59	4,84
2018	43,41	163,77	113,24	16,59	10,15	9,94	9,83	8,48	6,23	6,64	5,15	6,83
2019	39,58	234,78	55,94	33,38	13,82	8,39	6,34	5,89	5,05	4,62	4,00	6,00
2020	120,52	66,48	88,75	72,49	29,04	14,03	6,63	5,40	4,63	4,97	3,92	36,32
2021	94,16	128,55	74,43	24,28	6,73	6,35	6,42	6,40	2,21	2,76	2,67	3,47
2022	94,16	128,55	74,43	24,28	14,05	6,33	4,01	2,71	2,45	2,60	2,85	6,90
2023	42,87	173,16	224,80	48,42	12,70	7,87	5,85	4,43	3,75	4,02	3,68	9,12
2024	50,35	185,90	236,25	52,10	13,80	8,20	6,10	4,80	3,95	4,20	3,85	9,50
2025	47,80	178,60	228,10	49,00	13,10	7,95	5,75	4,55	3,80	4,05	3,70	9,00

Nota. Tomado de SENAMHI (2025).



VARIABLES ANALIZADAS

Como se puede observar en la Tabla 2 existen cuatro variables principales para la idoneidad de hábitat de la trucha arcoíris.

Tabla 2

VARIABLES ANALIZADAS PARA EL USO DE LA METODOLOGÍA IFIM-PHABSIM

Variable	Descripción	Unidad	Relación con el objetivo
Velocidad del agua	Mide la rapidez del flujo en cada punto del cauce; determina la idoneidad del hábitat para las distintas etapas de la trucha.	m/s	Es un parámetro clave para calcular el hábitat disponible (WUA) y simular condiciones hidráulicas para PHABSIM.
Profundidad del agua	Distancia vertical desde la superficie hasta el lecho; varía según el caudal y la morfología del río.	m	Define la estructura del hábitat acuático y permite caracterizar microhábitats para la modelación IFIM.
Temperatura del agua	Factor ambiental que influye en el metabolismo, reproducción y supervivencia de la trucha.	°C	Permite establecer rangos óptimos y críticos en las curvas de idoneidad térmica (HSC).
Índice de canal	Parámetro morfológico que describe la forma, rugosidad y estructura del cauce (1-8).	Valor adimensional	Ayuda a identificar zonas de hábitat físico y a delimitar las secciones transversales utilizadas en la simulación de PHABSIM.

PRUEBA DE ENSAYOS DE LABORATORIO

Tabla 3

Informe de 12 parámetros físico – químicos realizados para 5 muestras extraídas

Parámetros	Muestra					Unidades
	M-1	M-2	M-3	M-4	M-5	
T°	8,4	8,0	9,5	8,7	10,0	°C
pH	90	9,2	9,1	8,9	9,0	Mv
Conductividad eléctrica	671	845	862	858	853	µS/cm
Sólidos disueltos totales	460	590	600	590	590	mg/L
Sales disueltos totales	330	420	430	420	420	mg/L
Turbidez	47,3	1,12	4,59	9,21	4,44	NTU
Alcalinidad CaCO3	140	140	160	140	140	mg/L
Calcio Ca	59,73	55,8	55,18	55,40	56,20	mg/L
Cloruros Cl	439,86	499,85	459,86	439,86	479,85	mg/L
Dureza total CaCO	215,48	201,84	206,66	207,12	204,93	mg/L
Magnesio Mg	16,08	15,15	16,69	16,67	15,66	mg/L
Sulfatos SO4	84	108	96	104	100	mg/L

Nota. Laboratorio UNA Puno (2024).

3. RESULTADOS

Resultado del primer objetivo específico: Resultado de registros de caudales medios mensuales del río llave. Durante los últimos 26 años se ha registrado una marcada variabilidad en los caudales del río. Un caso representativo ocurrió en febrero del año 2001, cuando se alcanzó un caudal de 311,78 m³/s, lo que provocó diversos daños en las riberas del río y, en particular, en la provincia de El Collao. Entre las principales consecuencias se registraron inundaciones, desbordes y, de manera significativa, el colapso del antiguo puente de la ciudad de llave. En contraste, también se evidencian periodos de estiaje severo, siendo uno de los más críticos el ocurrido en noviembre de 2010, cuando el caudal descendió hasta 2,18 m³/s. Esta situación generó impactos negativos como la falta de agua para el ganado, el retraso en el inicio de las actividades agrícolas y, aspecto central para el presente estudio, la reducción del caudal del río llave, condición determinante para la supervivencia de la trucha arcoíris. Por ello, el análisis de estos caudales resulta fundamental para el desarrollo de la investigación.

Tabla 4

Caudales por año y meses que no superan el caudal ecológico los 3 m³/s del río llave de los años 2000-2025

Años	Meses	Caudal m ³ /s
2009	Septiembre	2.68
2010	Septiembre	2.73
2008	Octubre	2.88
2009	Octubre	2.63
2010	Octubre	2.62
2008	Noviembre	2.26
2010	Noviembre	2.18
2021	Setiembre - Noviembre	2.21
2022	Agosto - Noviembre	2.45

Se puede verificar en los resultados que existen 11 meses durante los últimos 26 años que no están dentro del límite del caudal ecológico mínimo para una supervivencia de la trucha (que es 3 m³/s), al igual que la trucha necesita un caudal mínimo para la supervivencia de esta especie (Bjørnås et al., 2021). Asimismo, Esquivel-Arriaga et al. (2019) señala que se tiene que realizar un análisis temporal para las sequías tal como lo hizo en los años 1922-2016 y nosotros lo realizamos en el presente trabajo de investigación en los años 2000-2025 en un periodo de más de 20 años tal como señala la Ley de Recursos Hídricos N° 29338.

Grado de significancia para los 3 meses críticos (setiembre, octubre y noviembre)

La Tabla 5 muestra la existencia de diferencias significativas en los caudales del mes de setiembre en comparación con los otros once meses, considerando un intervalo de confianza del 95 % y un periodo de análisis de 26 años. En general, se observa que casi todos los meses presentan diferencias significativas respecto a setiembre; sin embargo, esta diferencia no se evidencia al comparar los meses de setiembre con octubre y noviembre. Los valores estadísticos obtenidos para estas comparaciones (Set-Oct = 0,601 y Set-Nov = 0,631), al ser superiores a 0,05, indican que no existen diferencias significativas entre dichos meses. Esto

sugiere que durante este periodo los caudales se mantienen en niveles muy bajos y similares, cercanos a los 3 m³/s, valor considerado como caudal ecológico mínimo para la supervivencia de la trucha arcoíris.

Tabla 5

Diferencias significativas del caudal del río Ilave en septiembre frente a los demás meses del año (2000–2025)

Pruebas de muestras pareadas						
Pares	Diferencias emparejadas					
	Media	Error media	95% de intervalo de confianza		t	Sig.
			Inferior	Superior		
Setiembre - Enero	-61.46550	14.08135	-90.93810	-31.99290	-4.365	.000
Setiembre - Febrero	-121.43400	20.38199	-164.09400	-78.77400	-5.958	.000
Setiembre - Marzo	-84.32850	13.80170	-113.21580	-55.44120	-6.110	.000
Setiembre - Abril	-32.49900	5.37595	-43.75100	-21.24700	-6.045	.000
Setiembre - Mayo	-7.72150	1.22743	-10.29055	-5.15245	-6.291	.000
Setiembre - Junio	-3.22000	.49384	-4.25361	-2.18639	-6.520	.000
Setiembre - Julio	-2.03450	.33162	-2.72858	-1.34042	-6.135	.000
Setiembre - Agosto	-1.25100	.25079	-1.77591	-.72609	-4.988	.000
Setiembre - Octubre	.12000	.22573	-.35245	.59245	.532	.601
Setiembre - Nov.	.20000	.40967	-.65745	1.05745	.488	.631
Setiembre - Dic.	-6.23000	2.66836	-11.81494	-6.64506	-2.335	.031

En la Tabla 6 se observa la prueba *t* para muestras pareadas, el cual muestra diferencias significativas entre octubre y los meses de enero a agosto y diciembre ($p < 0,05$), evidenciando variación mensual del caudal. No se hallan diferencias estadísticamente significativas con setiembre y noviembre ($p > 0,05$), lo que indica comportamientos similares en dichos meses. Esto indica que durante estos meses los caudales se mantienen en niveles muy bajos y similares entre sí, aproximándose a los 3 m³/s, valor considerado como el caudal ecológico necesario para la supervivencia de la trucha arcoíris.

Tabla 6

Significancia estadística entre el caudal medio de octubre y los demás meses del año en el río Ilave (2000–2025)

Pruebas de muestras pareadas						
Pares	Diferencias emparejadas					
	Desviación estándar	Error media	95% de intervalo de confianza		t	Sig.
			Inferior	Superior		
Octubre - Enero	63.4507	14.18802	-91.28137	-31.88963	-4.34	.000
Octubre - Febrero	91.2865	20.41229	-164.27741	-78.83059	-5.95	.000
Octubre - Marzo	61.6462	13.78452	-113.29982	-55.59718	-6.12	.000
Octubre - Abril	24.1501	5.40014	-43.92163	-21.31637	-6.04	.000
Octubre - Mayo	5.35376	1.19714	-10.34714	-5.33586	-6.55	.000
Octubre - Junio	2.19896	.49170	-4.36915	-2.31085	-6.79	.000

Octubre - Julio	1.40837	.31492	-2.81364	-1.49536	-6.84	.000
Octubre - Agosto	1.34068	.29979	-1.99846	-.74354	-4.57	.000
Octubre - Setiembre	1.00949	.22573	-.59245	.35245	-.532	.601
Octubre - Noviembre	1.52816	.34171	-.63520	.79520	.234	.817
Octubre - Diciembre	11.9883	2.68068	-11.96074	-.73926	-2.36	.029

En la Tabla 7 se identifica la prueba *t* para muestras pareadas, el cual evidencia diferencias estadísticamente significativas entre noviembre y la mayoría de los meses comparados ($p < 0,05$), especialmente de enero a julio. No se observan diferencias significativas con septiembre y octubre ($p > 0,05$), indicando similitud estadística en esos periodos.

Tabla 7

Significancia estadística entre los caudales del mes de noviembre y los demás meses del año en el río llave (2000–2025)

Pruebas de muestras pareadas							
Pares	Diferencias emparejadas					t	Sig.
	Desviación estándar	Error media	95% de intervalo de confianza				
			Inferior	Superior			
Noviembre - Enero	63.34493	14.16436	-91.31184	-32.01916	-4.35	.000	
Noviembre - Febrero	91.57610	20.47704	-164.49294	-78.77506	-5.94	.000	
Noviembre - Marzo	61.74819	13.80731	-113.42754	-55.62946	-6.12	.000	
Noviembre - Abril	23.64676	5.28758	-43.76602	-21.63198	-6.18	.000	
Noviembre - Mayo	5.26742	1.17783	-10.38673	-5.45627	-6.72	.000	
Noviembre - Junio	2.33705	.52258	-4.51377	-2.32623	-6.54	.000	
Noviembre - Julio	2.03727	.45555	-3.18797	-1.28103	-4.90	.000	
Noviembre - Agosto	2.27459	.50861	-2.51554	-.38646	-2.85	.010	
Noviembre - Set.	1.83211	.40967	-1.05745	.65745	-.488	.631	
Noviembre - Octubre	1.52816	.34171	-.79520	.63520	-.234	.817	
Noviembre - Dic.	11.34819	2.53753	-11.74112	-1.11888	-2.53	.020	

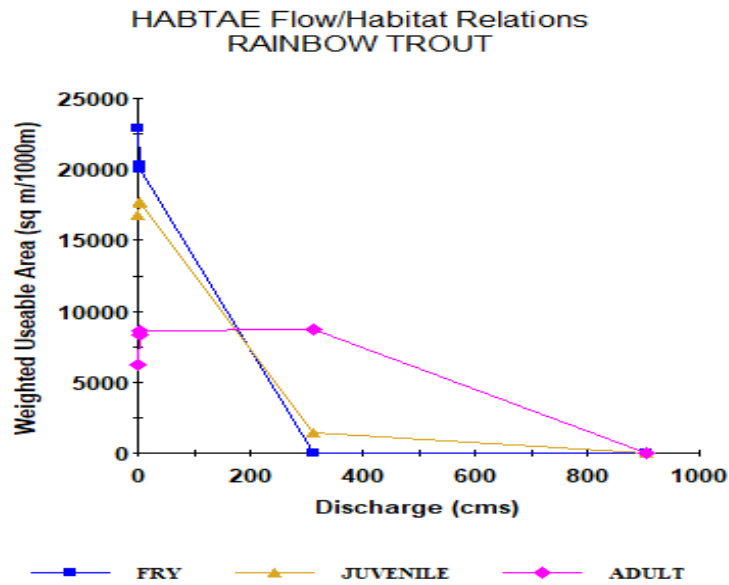
Resultados de los caudales ecológicos óptimos y del Área Ponderada Útil para la trucha arcoíris

En la Figura 3 se muestran los resultados del Área Ponderada Útil (WUA) estimados mediante el software PHABSIM para una población de 1 000 individuos de trucha arcoíris. En la fase de alevino, se registró un WUA de 20 000 m²/1 000 m, correspondiente a un caudal mínimo de 3 m³/s. Durante la etapa juvenil, el WUA alcanzó los 17 500 m²/1 000 m, asociado a un caudal mínimo de 9 m³/s y con un punto de inflexión ubicado en 3 m³/s. En cuanto a la etapa adulta, el WUA fue de 8 000 m²/1 000 m, igualmente vinculado a un caudal mínimo de 9 m³/s y con un punto de quiebre en 3 m³/s. En términos generales, se evidencia una relación inversa entre el WUA y el caudal del río llave, observándose mayores áreas ponderadas útiles a caudales más bajos.



Figura 3

Área ponderada útil para la especie trucha arcoíris en sus 3 periodos de vida



Resultados de Curvas HSC (Criterios de idoneidad de hábitat)

En las Figuras 4, 5 y 6 se tiene información obtenida del programa para las tres etapas de la trucha arcoíris (alevino, juvenil y adulto), el caudal de entrada y salida fue el mismo. Las simulaciones hidrobiológicas en PHABSIM para 1000 individuos permitieron obtener curvas de idoneidad de hábitat considerando velocidad del agua, profundidad, índice de canal y temperatura. En la etapa alevino se identificaron preferencias de bajas velocidades, profundidades moderadas, amplio índice de canal y temperaturas frías. En la etapa juvenil, las preferencias se ampliaron hacia mayores rangos de velocidad, profundidad y temperatura.

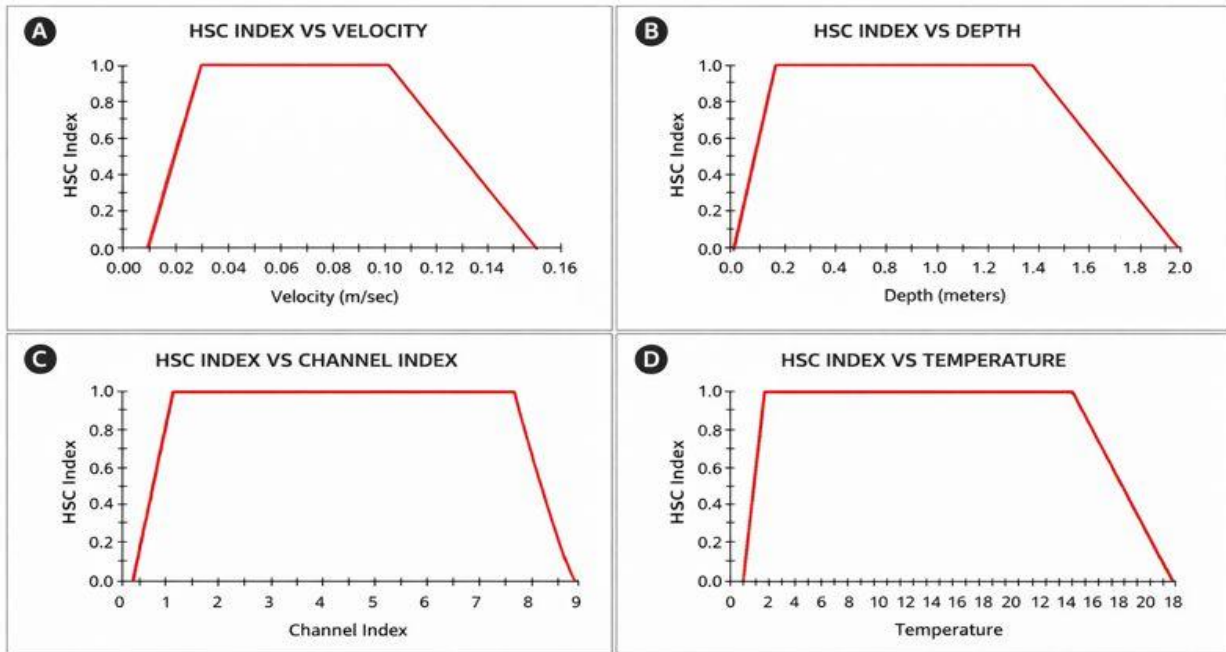
En la etapa adulta, la trucha mostró tolerancia a velocidades y profundidades más elevadas, manteniendo un rango térmico similar al juvenil. El caudal ecológico se determinó mediante la relación $Q = V \times A$, considerando un área transversal de 37 m² y una velocidad promedio de 0,081 m/s correspondiente al mes de noviembre, obteniéndose un valor de 3 m³/s como caudal mínimo necesario para garantizar la supervivencia de la trucha en etapas juvenil y adulta.

$$Q = V * A = 0.081 \frac{m}{s} * 37 m^2 = 2.997 \frac{m^3}{s} = 3 \frac{m^3}{s} \dots\dots\dots \text{CAUDAL ECOLÓGICO}$$



Figura 4

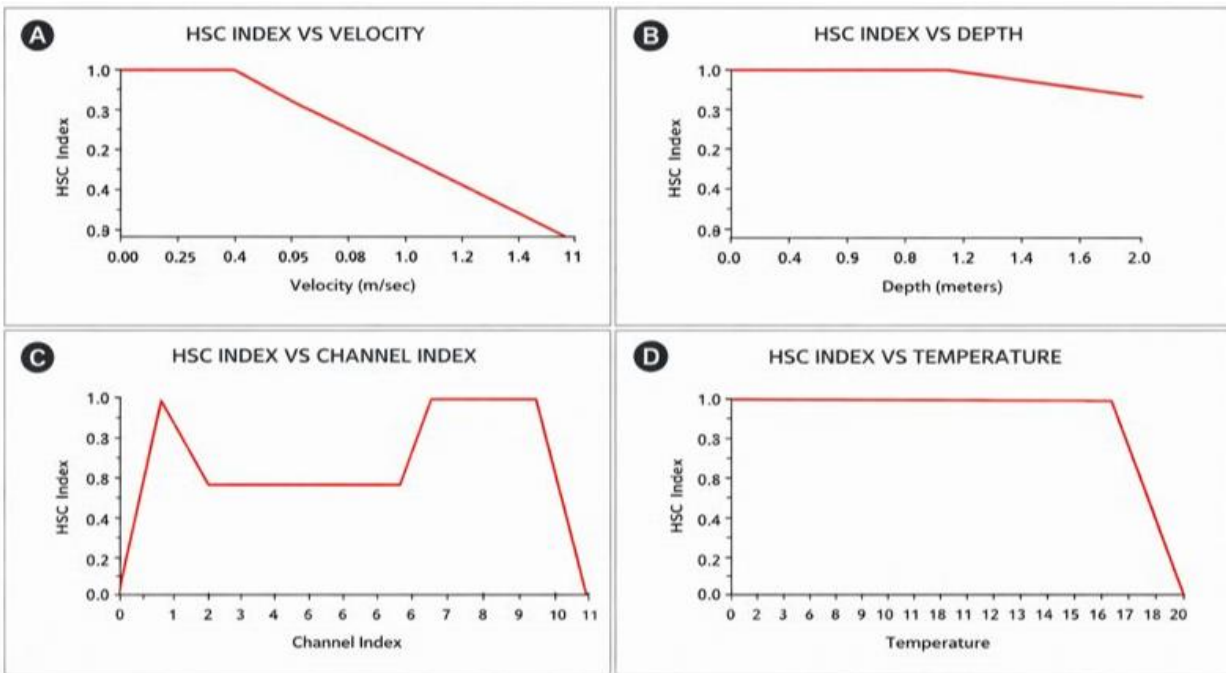
*Curvas de idoneidad de hábitat (HSC) para la trucha *Oncorhynchus mykiss* en la etapa alevino*



Nota. (A) relación entre el índice HSC y la velocidad de flujo, (B) relación entre el índice HSC y el índice de canal y (C) relación entre el índice HSC y el índice de canal y (D) relación entre el índice de canal y la temperatura del agua.

Figura 5

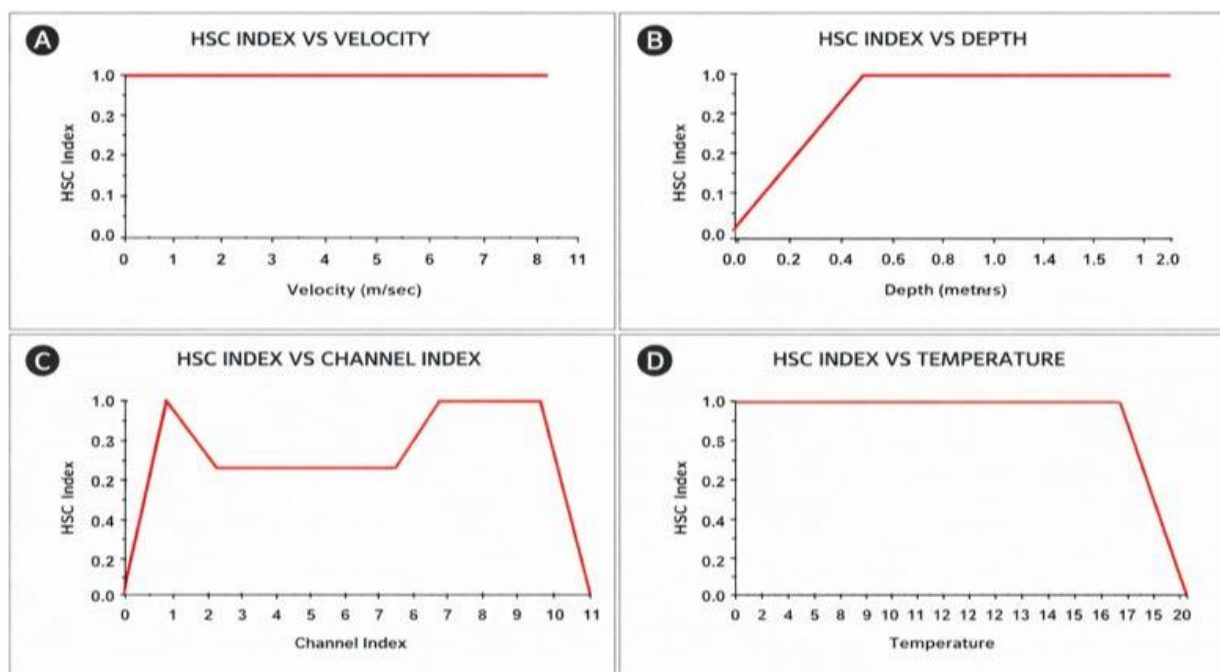
*Curvas de idoneidad de hábitat (HSC) para la especie trucha *Oncorhynchus mykiss* en la etapa juvenil*



Nota. (A) relación entre el índice HSC y la velocidad del flujo, (B) relación entre el índice HSC y la profundidad del agua, (C) relación entre el índice HSC y el índice de canal, y (D) relación entre el índice HSC y la temperatura.

Figura 6

*Curvas de aptitud del hábitat (HSC) para la trucha *Oncorhynchus mykiss* en su etapa adulta.*



Nota. (A) relación entre el índice HSC y la velocidad del flujo, (B) relación entre el índice HSC y la profundidad del agua, (C) relación entre el índice HSC y el índice de canal, y (D) relación entre el índice de canal y la temperatura del agua.

Tabla 8

Resultados de la evaluación de la idoneidad del hábitat para la trucha arcoíris en el tramo Churo del río llave

Etapas trucha arcoíris	Velocidad m/s	Profundidad m	Índice de canal	Temperatura °C	Caudal m³/s
Alevino	0.03 - 0.1	0.2 - 1.4	1 - 8	0 - 14	0.3 - 3
Juvenil	0.1 - 3	0.4 - 1.4	1 - 8	0 - 18	3 - 87
Adulto	0.1 - 10.39	0.6 - 2	1 - 8	0 - 18	3 - 311.7

Resultados para el Modelo Hábitat (HABTAM)

En las figuras siguientes se muestran los resultados del modelamiento de hábitat realizado en los cuatro tramos analizados del área de estudio, considerando a la trucha arcoíris en sus etapas de alevino, juvenil y adulto. Para el modelamiento se utilizaron caudales de 2,18 m³/s, correspondiente al valor mínimo registrado durante los últimos 26 años; 2,37 m³/s, medido en el mes de noviembre; y 311,8 m³/s, que representa el caudal máximo del mismo periodo, de acuerdo con los datos del SENAMHI presentados en la Tabla 1. A partir de estos resultados, se procede a la interpretación de las figuras obtenidas.

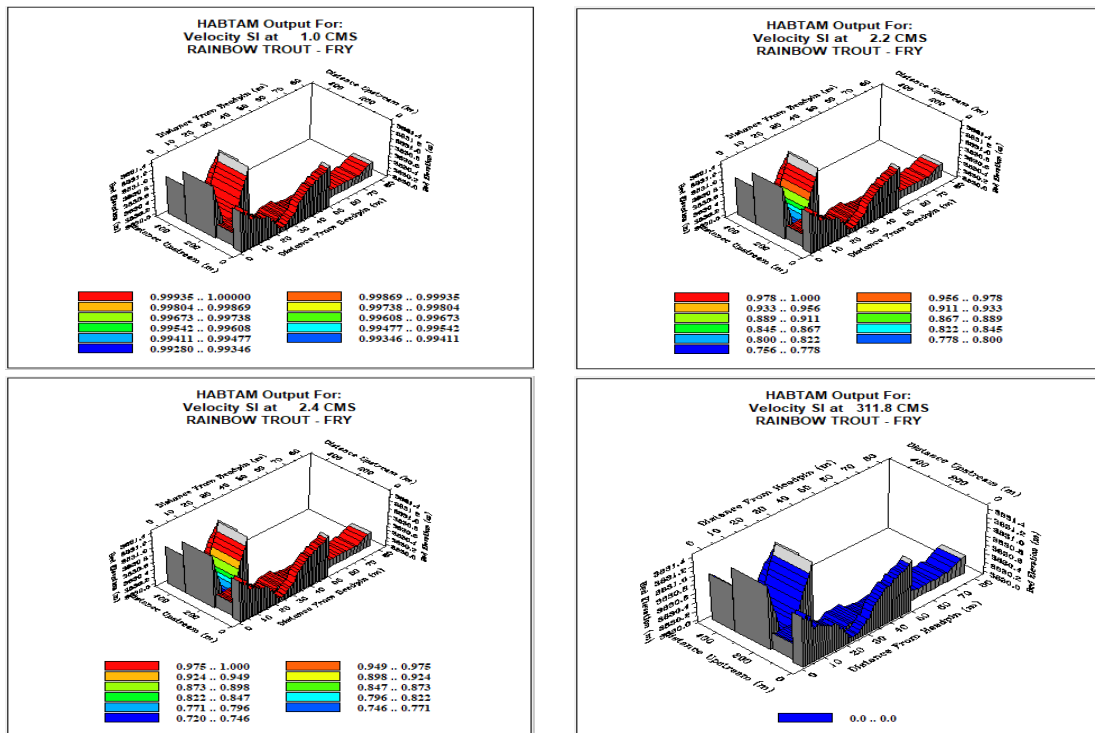
En la Figura 7 se ingresó inicialmente al programa PHABSIM (modelamiento HABTAM) un caudal simulado de 1 m³/s, con el propósito de representar condiciones extremas de hábitat. Posteriormente, se incorporó un caudal de 2,18 m³/s para la trucha arcoíris en la etapa de alevino (fry), observándose que las áreas representadas en



color rojo indican condiciones inadecuadas para la existencia de la especie en esta fase de desarrollo. De manera similar, al simular un caudal de 2,37 m³/s para la misma etapa, las áreas transversales continúan predominando en color rojo, lo que evidencia que dicho caudal aún no permite un desarrollo adecuado del hábitat; no obstante, en el área transversal N.º 3 se aprecia una coloración azul, lo cual sugiere el inicio de condiciones favorables para la vida de la especie en ese sector. Finalmente, al modelar un caudal de 311,8 m³/s, se observa que las áreas transversales presentan una coloración azul generalizada, lo que indica que bajo estas condiciones de caudal es posible la existencia y desarrollo de la trucha arcoíris en su etapa de alevino.

Figura 7

Modelamiento del hábitat de la trucha arcoíris en el río llave, etapa alevino (fry), considerando caudales de 1 m³/s (simulado), 2,18 m³/s, 2,37 m³/s y 311,78 m³/s



4. DISCUSIÓN

El análisis de los registros de caudales medios mensuales del río llave para el ciclo 2000 – 2025 revela una marcada inestabilidad hidrológica. Se identificaron picos máximos de 311,78 m³/s (febrero 2001) con efectos erosivos en riberas, y periodos de estiaje severo entre septiembre y noviembre, donde los niveles cayeron por debajo del límite ecológico de 3 m³/s. Esta recurrencia de caudales mínimos críticos entre los años 2008 y 2010 valida la importancia de los análisis temporales de largo plazo propuestos por Esquivel-Arriaga et al. (2019) para detectar amenazas a la integridad de sistemas fluviales. La homogeneidad estadística de los caudales en el trimestre de estiaje ($p > 0,05$) confirma que este periodo es el más vulnerable para la disponibilidad del recurso hídrico.

Al aplicar la metodología IFIM-PHABSIM, se determinó que un caudal de 3 m³/s es el requerimiento mínimo para sostener el hábitat de la trucha arcoíris (*Oncorhynchus mykiss*). Este valor guarda una estrecha relación con lo reportado por Maeda (2013), quien sitúa el rango de máxima idoneidad entre 2.7 m³/s y 3.3 m³/s No

obstante, el presente estudio supera la limitación de Maeda (2013) al proporcionar valores exactos de superficie útil (WUA) por etapa biológica, permitiendo una gestión más precisa que la basada en simples estimaciones porcentuales.

En cuanto a las curvas de idoneidad de hábitat (HSC), los resultados para juveniles y adultos destacan que la profundidad y la velocidad son factores determinantes. Esto permite explicar por qué Sanz-Ramos et al. (2019) proponen caudales menores (0,5 m³/s a 2,2 m³/s): su modelo omitió la variable de profundidad del flujo y no evaluó la etapa de alevino, la cual es la más restrictiva. En el sector Churo, la profundidad es una limitante física que exige caudales superiores a los sugeridos por Sanz-Ramos para evitar la pérdida de conectividad y hábitat efectivo.

Finalmente, la integración de las variables físicas mediante el modelado HBTAM confirma que cualquier flujo inferior a 3 m³/s degrada severamente el entorno, especialmente para los alevinos. Como señalan Izquierdo Santacruz y Madroñero Palacios (2013), el régimen natural de caudales es el motor que estructura la biodiversidad; por tanto, el respeto al caudal ecológico aquí definido es imperativo para mitigar los impactos de las actividades antrópicas y asegurar la permanencia de la especie en el río Ilave, superando los enfoques combinados de Toledo y Muñoz (2018) al centrarse en la supervivencia real por estadios de vida.

5. CONCLUSIONES

El análisis de los caudales medios mensuales del río Ilave para el periodo 2000–2025 evidencia una alta variabilidad hidrológica, con valores extremos que oscilan entre 2,18 m³/s y 311,78 m³/s. Asimismo, se identificó que, en once meses correspondientes a septiembre, octubre y noviembre de los años 2008, 2009, 2010, 2021 y 2022 los caudales registrados no alcanzaron el caudal ecológico mínimo de 3 m³/s, lo que refleja periodos críticos de déficit hídrico.

De acuerdo con la metodología IFIM-PHABSIM, el caudal ecológico requerido en el sector Churo del río Ilave para garantizar la idoneidad del hábitat de la trucha arcoíris en sus etapas de alevino, juvenil y adulto es de 3 m³/s. Los resultados muestran que, durante los meses en los que no se supera dicho caudal ecológico, se compromete la disponibilidad de hábitat adecuado, afectando potencialmente la sostenibilidad ecológica de la especie en el tramo evaluado.

Conflicto de intereses/Competing interests:

Los autores declaran que no incurren en conflicto de intereses.

Rol de los autores/Authors roles:

Dany Alexander Aguilar Mamani: Conceptualización, metodología, cuantificación de datos, investigación, recursos, escritura: preparación del borrador original, visualización, supervisión, administración del proyecto y adquisición de fondos grupal.

José Antonio Vargas Marón: Metodología, validación, análisis formal, investigación, recursos, escritura: revisión y edición, visualización y supervisión.

Omar Luis Neira Cutipa: Conceptualización, metodología, investigación, recursos, escritura: preparación del borrador original, escritura: revisión y edición y validación.

Felipe Condori Chambilla: Análisis formal, investigación, recursos, escritura: revisión y edición, conceptualización y administración del proyecto.

Howard Rivera Huacasi: Investigación, recursos, escritura: revisión y edición, validación, visualización y análisis formal.

Gloria Arazola Mamani: Investigación, recursos, escritura: revisión y edición, supervisión, validación y administración del proyecto.

Fuentes de financiamiento/Funding:

Los autores declaran que no recibieron un fondo específico para esta investigación.

Aspectos éticos/legales/Ethics/legals:

Los autores declaran no haber incurrido en aspectos antiéticos, ni haber omitido aspectos legales en la realización de la investigación.

REFERENCIAS

- Andrade, H. De, Leal, C. G., Pompeu, P. S., Chaves, C., & Cunha, S. F. (2018). Physical habitat simulation for small-sized characid fish species from tropical rivers in Brazil. *Neotropical Ichthyology*, *16*, e180003. <https://doi.org/10.1590/1982-0224-20170003>
- Bjørnås, K. L., Railsback, S. F., Calles, O., & Piccolo, J. J. (2021). Modeling Atlantic salmon (*Salmo salar*) and brown trout (*S. trutta*) population responses and interactions under increased minimum flow in a regulated river. *Ecological Engineering*, *162*, 106182. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2021.106182>
- Bovee, K. D., Lamb, B. L., Bartholow, J. M., Stalnaker, C. B., Taylor, J., & Henriksen, J. (1998). *Stream habitat analysis using the instream flow incremental methodology* (Information and Technology Report 1998-0004). U.S. Geological Survey. <https://cutt.ly/btFkbu7C>
- Caiola, N., Ibáñez, C., Verdú, J., & Munné, A. (2014). Effects of flow regulation on the establishment of alien fish species: A community structure approach to biological validation of environmental flows. *Ecological Indicators*, *45*, 598-604. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.05.012>
- Ceola, S., Pugliese, A., Ventura, M., Galeati, G., Montanari, A., & Castellarin, A. (2018). Hydro-power production and fish habitat suitability: Assessing impact and effectiveness of ecological flows at regional scale. *Advances in Water Resources*, *116*, 29-39. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2018.04.002>
- Chávez-Jiménez, A., & González-Zeas, D. (2015). El impacto de los caudales medioambientales en la satisfacción de la demanda de agua bajo escenarios de cambio climático. *Ribagua*, *2*(1), 3-13. <https://doi.org/10.1016/j.riba.2015.04.001>
- Cui, P. Y., Wang, J. Q., Yang, F., Zhao, Q. X., Huang, Y. D., Yang, Y., & Tao, W. Q. (2022). Effects of radiant floor heating integrated with natural ventilation on flow and dispersion in a newly decorated residence. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *19*(24), 16889. <https://doi.org/10.3390/ijerph192416889>
- De la Lanza Espino, G., Salinas Rodríguez, S. A., & Carbajal Pérez, J. L. (2014). Cálculo del flujo ambiental como sustento para la reserva de agua al ambiente del río Piaxtla, Sinaloa, México. *Investigaciones Geográficas*, (87). <https://doi.org/10.14350/rig.35269>
- Espinosa-Pérez, H. S. (2013). Biodiversidad de peces en México. *Revista Mexicana De Biodiversidad*, *85*, 450-459. <https://doi.org/10.7550/rmb.32264>



- Esquivel-Arriaga, G., Cerano-Paredes, J., Sánchez-Cohen, I., Velásquez-Valle, M. A., Flores-López, F., & Bueno-Hurtado, P. (2019). Temporal analysis of droughts (1922–2016) in the upper Nazas River Basin using SPI and its relationship with ENSO. *Tecnología Y Ciencias Del Agua*, 10(5), 126–153. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2019-05-05>
- Gallo-Vélez, D. (2016). Consideraciones para la aplicación del método hidráulico R2CROSS para estimar caudales ecológicos en Colombia. *Intropica*, 11(1), 111–126. <https://revistas.unimagdalena.edu.co/index.php/intropica/article/view/1867>
- Izquierdo Santacruz, M. L., & Madroñero Palacios, S. M. (2013). Régimen de caudal ecológico, herramienta de gestión para conservar la biota acuática. *Ciencia e ingeniería neogranadina*, 23(2), 77–94. <https://doi.org/10.18359/rcin.224>
- Jakovljević, O. S., Popović, S. S., Živić, I. M., Stojanović, K. Z., Vidaković, D. P., Naunovic, Z. Z., & Krizmanić, J. Ž. (2021). Epilithic diatoms in environmental bioindication and trout farm's effects on ecological quality assessment of rivers. *Ecological Indicators*, 128, 107847. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107847>
- Jung, S. H., & Choi, S. U. (2015). Prediction of composite suitability index for physical habitat simulations using the ANFIS method. *Applied Soft Computing*, 34, 502–512. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2015.05.028>
- Knack, I. M., Huang, F., & Shen, H. T. (2020). Modeling fish habitat condition in ice affected rivers. *Cold Regions Science and Technology*, 176, 103086. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2020.103086>
- Kuriqi, A., Pinheiro, A. N., Sordo-Ward, A., Bejarano, M. D., & Garrote, L. (2021). Ecological impacts of run-of-river hydropower plants—Current status and future prospects on the brink of energy transition. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 142, 110833. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110833>
- Ma, B., Dong, F., Peng, W. Q., Liu, X. B., Huang, A. P., Zhang, X. H., & Liu, J. Z. (2020). Evaluation of impact of spur dike designs on enhancement of aquatic habitats in urban streams using 2D habitat numerical simulations. *Global Ecology and Conservation*, 24, e01288. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2020.e01288>
- Maeda, S. (2013). A simulation-optimization method for ecohydraulic design of fish habitat in a canal. *Ecological Engineering*, 61, 182–189. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2013.09.026>
- Marsili-Libelli, S., Giusti, E., & Nocita, A. (2013). A new instream flow assessment method based on fuzzy habitat suitability and large scale river modelling. *Environmental Modelling & Software*, 41, 27–38. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2012.10.005>
- Miao, Y., Li, J., Feng, P., Dong, L., Zhang, T., Wu, J., & Katwal, R. (2020). Effects of land use changes on the ecological operation of the Panjiakou-Daheiting Reservoir system, China. *Ecological Engineering*, 152, 105851. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2020.105851>
- Mocq, J., St-Hilaire, A., & Cunjak, R. A. (2013). Assessment of Atlantic salmon (*Salmo salar*) habitat quality and its uncertainty using a multiple-expert fuzzy model applied to the Romaine River (Canada). *Ecological Modelling*, 265, 14–25. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2013.05.020>

- Operacz, A., Wałęga, A., Cupak, A., & Tomaszewska, B. (2018). The comparison of environmental flow assessment-The barrier for investment in Poland or river protection? *Journal of Cleaner Production*, 193, 575-592. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.05.098>
- Sanz-Ramos, M., Bladé Castellet, E., Palau Ibars, A., Vericat Querol, D., & Ramos-Fuertes, A. (2019). IberHABITAT: evaluación de la Idoneidad del Hábitat Físico y del Hábitat Potencial Útil para peces. Aplicación en el río Eume. *Ribagua*, 6(2), 158-167. <https://doi.org/10.1080/23863781.2019.1664273>
- Suwal, N., Huang, X., Kuriqi, A., Chen, Y., Pandey, K. P., & Bhattarai, K. P. (2020). Optimisation of cascade reservoir operation considering environmental flows for different environmental management classes. *Renewable Energy*, 158, 453-464. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.05.161>
- Toledo, S., & Muñoz, E. (2018). Determinación de un régimen de caudal ambiental para el río Ñuble considerando actividades recreacionales y requerimientos de hábitat de peces. *Obras y Proyectos*, 24, 71-80. <https://doi.org/10.4067/s0718-28132018000200071>
- Wen, X., Lv, Y., Liu, Z., Ding, Z., Lei, X., Tan, Q., & Sun, Y. (2021). Operation chart optimization of multi-hydropower system incorporating the long-and short-term fish habitat requirements. *Journal of Cleaner Production*, 281, 125292. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125292>
- Weng, X., Jiang, C., Yuan, M., Zhang, M., Zeng, T., & Jin, C. (2021). An ecologically dispatch strategy using environmental flows for a cascade multi-sluice system: A case study of the Yongjiang River Basin, China. *Ecological Indicators*, 121, 107053. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.107053>
- Yang, Z., Hu, P., Wang, J., Zhao, Y., & Zhang, W. (2019). Ecological flow process acknowledging different spawning patterns in the Songhua River. *Ecological engineering*, 132, 56-64. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2018.12.034>
- Yi, Y., Cheng, X., Yang, Z., Wieprecht, S., Zhang, S., & Wu, Y. (2017). Evaluating the ecological influence of hydraulic projects: A review of aquatic habitat suitability models. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 68, 748-762. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.138>
- Yu, Z., Zhang, J., Zhao, J., Peng, W., Fu, Y., Wang, Q., & Zhang, Y. (2021). A new method for calculating the downstream ecological flow of diversion-type small hydropower stations. *Ecological Indicators*, 125, 107530. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107530>