

DISEÑO HIDRÁULICO DE UN CAUCE ARTIFICIAL OPTIMIZADO PARA DESOVE Y CRIANZA DE TRUCHAS ARCOIRIS

ALEX GARCÍA Y CLAUDIO MEIER

Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Concepción
Casilla 160-C Correo 3, Concepción, Chile
Teléfono: (41) 204446; Fax: (41)207089
e-mail: cmeier@udec.cl

RESUMEN

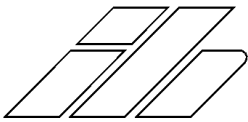
Se diseña un cauce artificial que optimiza el hábitat disponible para desove y crianza de alevines y juveniles de trucha arcoiris, teniendo a la vez características naturales, el que se proyectó para mejorar la pesca deportiva en un río cercano a Coyhaique. Tras definir los aspectos generales que debe considerar el diseño, se detalla los requerimientos de hábitat de los distintos estadios vitales de esta especie en cuanto a la granulometría del sustrato y a la velocidad y profundidad de la corriente. Para distintas alternativas de trazado, se modela los ejes hidráulicos de modo de conocer las distribuciones espaciales de velocidades y profundidades, y poder verificar la estabilidad del material del lecho. Luego, se evalúa cuantitativamente el hábitat generado para cada estadio vital con cada una de las alternativas.

Este trabajo muestra cómo la Ingeniería Hidráulica puede ser relevante en temas alejados de su campo cotidiano de acción. Con un enfoque interdisciplinario, se entrega aquí una respuesta fundamentada a un problema biológico, basándose en modelación hidráulica y ecológica, esto es, en conceptos de la ecohidráulica.

ABSTRACT

An artificial channel optimising available habitat for spawning and juvenile rearing of rainbow trout, but maintaining a natural shape, is designed in order to improve the sport fishery in a river near Coyhaique, southern Chile. The main design constraints are first defined. Then, the habitat needs of the different life stages are specified in terms of bed material size and flow depth and velocity. Flow profiles are computed for different layouts in order to obtain the spatial distributions of depths and velocities, and the stability of the bed material is checked in each case. Then, available habitat for each life stage is quantitatively assessed for the the different alternatives.

This article shows how Hydraulic Engineering can be involved in topics that seem to be quite away from its usual endeavours. In this interdisciplinary project, a sensible answer was found to a biological problem through hydraulic and ecological modelling, i.e., by applying concepts of ecohydraulics.



1 Introducción

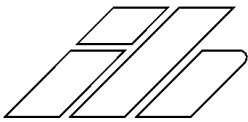
Dos especies de trucha, la café y la arcoiris, han sido introducidas en ríos y lagos de Chile desde fines del siglo XIX, siendo muy apreciadas por los pescadores deportivos. En el sistema fluvio-lacustre del río Paloma y sus tributarios (Aysén), se introdujeron ambas hace unos 50 años, pero en la actualidad la trucha café es la dominante, pescándose arcoiris sólo ocasionalmente. Ecológicamente, las dos especies son muy similares en cuanto a sus preferencias de hábitat y alimento, pero tienen dos diferencias relevantes en el presente contexto. En primer lugar, la trucha café desova en otoño, mientras que la arcoiris lo hace en primavera. Se plantea que ésta última ha ido desapareciendo del río Paloma por coincidir su época de desove e incubación con las crecidas máximas anuales, ya que el Paloma tiene régimen nivopluvial (caudales fuertes arrastran el material del lecho, destruyendo los nidos de salmónidos y matando huevos y alevines). En segundo lugar, se sabe que la trucha arcoiris es mucho más confiada que la café, picando con mayor facilidad. Varios estudios han mostrado que, a igualdad de condiciones, se pescan entre siete y ocho truchas arcoiris por cada café, lo que implica que, en un tramo donde haya sólo trucha café, el introducir arcoiris podría mejorar notoriamente las capturas. Por ejemplo, si se lograra reemplazar un 10% de las café existentes por arcoiris, las capturas aumentarían en un 65%, mientras que si se cambiara un 30% de las café, la tasa de captura se triplicaría.

Con tal motivación, Meier (2000) presentó un proyecto Fontec para mejorar la pesca deportiva en las aguas del río Paloma. El proyecto se ha llevado a cabo en dos etapas: sembrando alevines en los tributarios, y creando zonas protegidas de las crecidas primaverales, de manera que las arcoiris adultas puedan lograr un exitoso desove. En particular, se desea construir un cauce artificial para el desove de adultos y crianza de alevines y juveniles, aislado de las crecidas, que optimice el hábitat para cada estadio vital. Se presenta en este trabajo el diseño preliminar de este cauce.

2 Consideraciones de diseño

Para lograr el objetivo se construirá un cauce con meandros y secuencias pozón-rápido, asemejando un estero natural. En efecto, las truchas usualmente desovan en el montículo de grava ubicado al final de cada pozón, mientras que los alevines prefieren los tramos de rápidos. En estos cauces los rápidos se ubican en las zonas rectas, presentando secciones relativamente simétricas, los pozones se ubican en curvas con secciones asimétricas, y las secuencias pozón-rápido se siguen a una distancia típica de entre cinco y siete anchos de cauce (Cowx y Welcomme, 1998). Tales esteros conforman un hábitat óptimo para truchas, además de ser estéticamente agradable.

Un levantamiento topográfico del terreno de 3 ha donde se ubicará el cauce resultó en un plano con curvas de nivel cada 25 cm. También se tomaron las cotas del agua a lo largo del río, así como las de la alcantarilla que drena el sector, puesto que el caudal deberá cruzar el camino por esta obra antes de ser devuelto al río (figura 2). El



terreno se ubica sobre la planicie de inundación del río Paloma, entre el camino y un escarpe de cerro, existiendo en él varios paleocauces. Como una de las restricciones es minimizar los movimientos de tierra, y además se prefiere estar alejado del camino, se eligió el trazado en planta que bordea el escarpe (definido por los tramos 0, 1, 4, 6 y 7), el cual mide 884 m, de los cuales 253 m corresponden al último tramo, aguas abajo de la alcantarilla. Además, este trazado recibe unos 20 L/s en filtraciones desde el cerro.

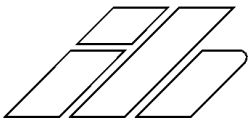
Se debe conocer la cota menor de las aguas del río en el sector de la toma, ya que el desnivel será la variable que controle el diseño hidráulico. Para ello, un lugareño marcó regularmente el menor nivel durante el invierno. Después de la bocatoma, se cruza bajo el camino con una tubería, y allí se inicia el cauce artificial. Unos 620 m aguas abajo, se vuelve a cruzar el camino por la alcantarilla existente, para devolver luego las aguas al Paloma, con un desnivel total de unos 3.3 m.

El diseño del cauce considera su trazado en planta, perfil longitudinal y secciones transversales típicas, a lo cual debe sumarse la especificación del substrato, así como el diseño de la obra de aducción (toma, tubería bajo el camino, y vertedero), que se detalla en García (2002). Para generar un hábitat idóneo se requiere construir pozones para el desove de adultos, seguidos de rápidos para los alevines y juveniles. Un pozón se crea embalsando agua con un montículo de grava (figura 1). En cauces naturales se produce aquí el desove, ya que ocurre infiltración a través de la grava, además de una adecuada velocidad y profundidad de escurrimiento. Los rápidos van desde la cresta de cada montículo hasta el pozón siguiente.



Figura 1. Sección longitudinal y transversal de un montículo de desove.

El caudal de diseño debe ser tal de, por un lado, mantener en los rápidos un hábitat adecuado para alevines, lo que se logra con un caudal pequeño, y por otro, de generar en los pozones condiciones que permitan el éxito en el desove de los adultos y en la incubación de los huevos, lo que requiere un caudal mayor. A mayores caudales y anchos de diseño, mayor sería la cantidad de hábitat que podría obtenerse. Sin embargo, hay algunas restricciones: El caudal queda acotado por el tamaño de la alcantarilla existente, y sobre todo por el ancho de los paleocauces elegidos para el trazado. Sabiendo que los alevines y los adultos en desove requieren rangos específicos de velocidades y profundidades (capítulo 3), lo que determine el caudal de diseño será entonces el ancho del cauce, que se desea mantener entre 3 y 7 m. Por ejemplo, para entregar condiciones óptimas de hábitat a los alevines, se requieren velocidades en torno a 10 cm/s, con profundidades entre 20 y 25 cm. Para un ancho de 7 m, esto se logra con un caudal de unos 150 a 200 L/s. Por otro lado, adultos en



desove requieren velocidades medias de unos 50 cm/s con profundidades de unos 40 cm, que se logran con 600 L/s para un ancho de unos 3 m. Esto resalta la necesidad de variar el caudal durante el año, a fin de satisfacer los requerimientos de la especie en sus diferentes estadios vitales.

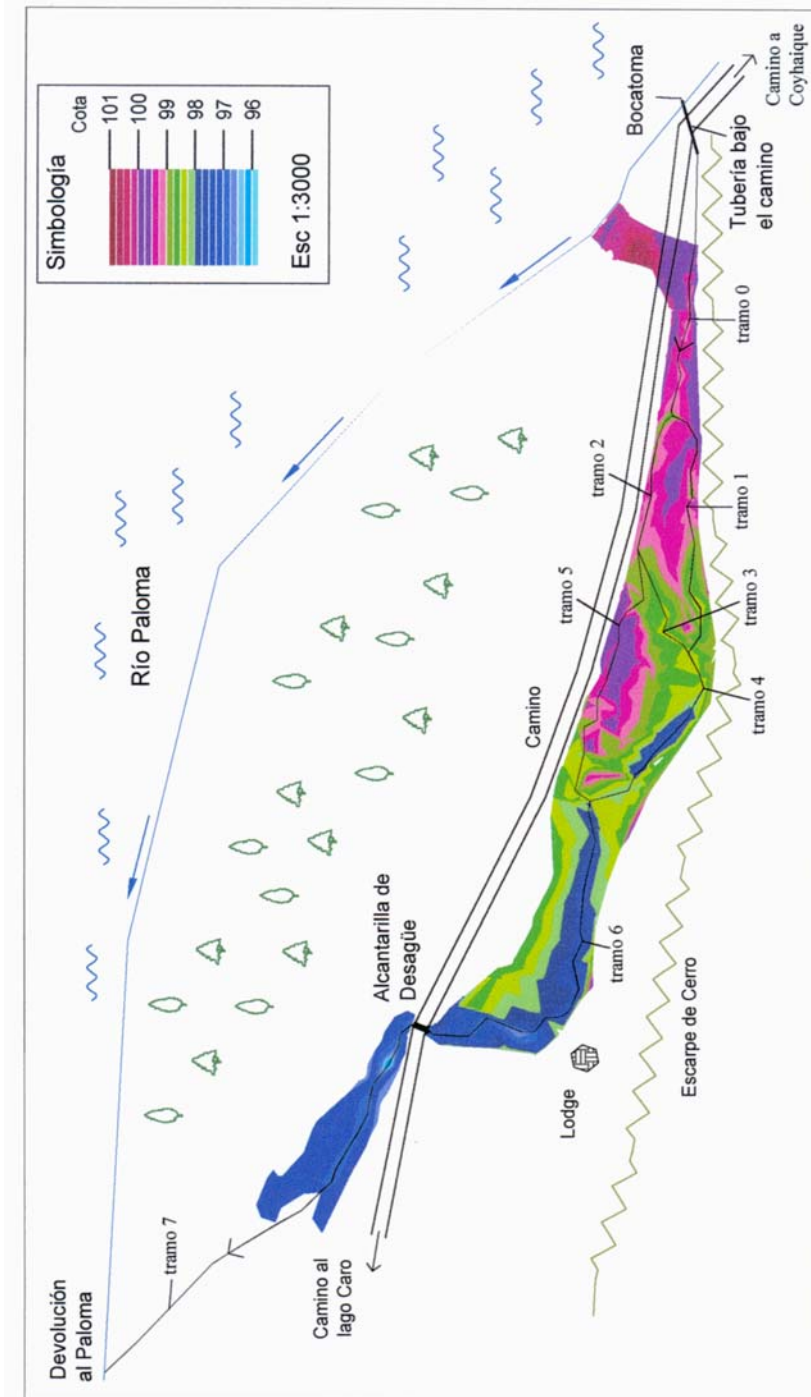
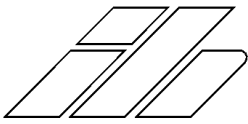


Figura 2. Plano del sector con relieve y alternativas de trazado.



Debe determinarse tres tamaños de partículas del lecho: uno que posibilite a la hembra excavar su nido y permita infiltración suficiente hacia las ovas, otro adecuado para alevines y juveniles, y un tercero que genere aislamiento visual entre los individuos, ya que éstos son territoriales. Es importante destacar que no debe crearse hábitat que posibilite la presencia de truchas adultas durante todo el año (como pozas profundas o grandes bolones) ya que éstas son caníbales y atacarían a los alevines.

3 Requerimientos de hábitat de la trucha arcoiris

La ocurrencia de truchas depende de innumerables factores que afectan su desarrollo, comportamiento, expectativas de vida y reproducción. Entre estos se cuentan el alimento disponible, la velocidad y profundidad, el substrato, la temperatura, la turbidez, la concentración de oxígeno disuelto, la presencia de cobertura para guarecerse de predadores, y la presencia de otras especies (Behnke, 1992; Elliott, 1994). El ciclo de vida de una trucha arcoiris consta de cuatro estadios vitales:

i. El desove: se inicia con la migración de los adultos y termina cuando la hembra construye el nido y deposita sus ovas. El tipo de substrato, y la temperatura, velocidad y profundidad del agua son esenciales para el desove. Para desovar, las truchas buscan la transición entre pozones y rápidos, en especial la parte anterior del montículo, con lecho cóncavo y formado por gravas limpias, produciéndose allí mayor infiltración.

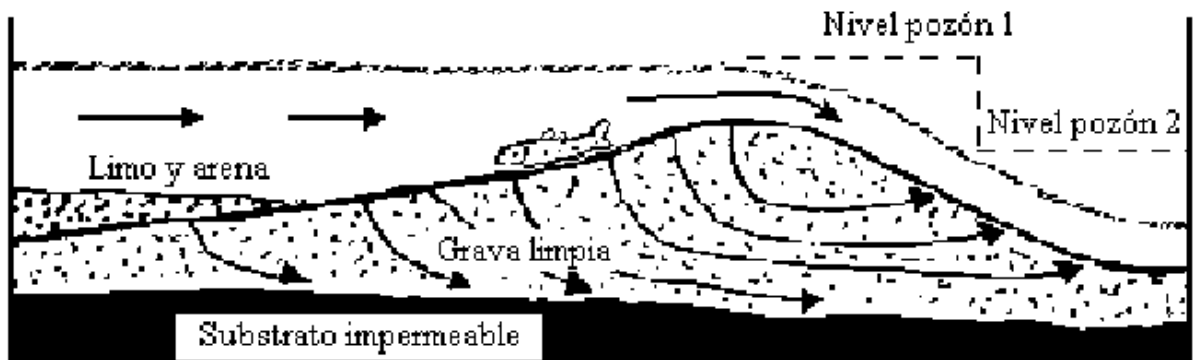
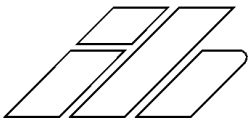


Figura 3. Hembra sobre su nido, ubicado en el montículo al final de un pozón.

ii. La incubación: se inicia con la puesta de las ovas y termina con el emerger de los alevines desde la grava. Su éxito depende de la concentración de OD, temperatura del agua, DBO del material depositado, tamaño de las partículas del lecho (cantidad de finos, particularmente), pendiente y configuración del lecho, profundidad del agua sobre e inmediatamente aguas abajo del nido (que determinan la carga hidráulica sobre éste), permeabilidad y porosidad de la grava, y velocidad del agua a través del nido. La ocurrencia de una crecida extrema durante la incubación o las primeras semanas de vida puede causar la pérdida completa de una cohorte. La trucha no podrá colonizar sistemas fluviales donde esto sea frecuente, como es el caso en el río Paloma.



iii. Alevín: Período entre el emerger de la grava y los 6 meses de vida (10 cm de longitud). Es el más crítico, porque el alevín requiere ganar un territorio para sobrevivir, lo que regula la población de truchas. Prefiere agua claras y someras, con baja velocidad (para no ser arrastrado) y cobertura para huir de predadores. Tal hábitat ocurre en las márgenes de los ríos, y en cauces laterales y pequeños tributarios.

iv. Juvenil: Período entre los 6 meses de vida y la madurez sexual. La abundancia de juveniles es función de factores como la cantidad de alevines emergidos ese año, la disponibilidad de hábitat apropiado, y la abundancia de alimento.

Aquí se considera sólo aquellos factores controlables en el proyecto, que son la velocidad media, la profundidad y la granulometría del substrato, asumiéndose que la calidad del agua es más que adecuada. Se sabe que las truchas no se distribuyen al azar en un río, sino que prefieren ciertas combinaciones de velocidad, profundidad y material del lecho. Esto define informalmente la noción de hábitat. Cada lugar en un cauce tiene una combinación de estas variables que lo hace más o menos idóneo para un cierto estadio vital, lo que se refleja en la probabilidad de encontrar un individuo ahí.

Las truchas prefieren un flujo lento, para no cansarse nadando, pero cerca de aguas veloces, de manera que exista aporte de presas. La figura 4, obtenida de Bovee (1978), resume información útil para este proyecto, permitiendo optimizar el hábitat para juveniles y adultos en desove. La velocidad mencionada es el promedio en una vertical. Los alevines requieren velocidades menores a 10 cm/s, y se debe considerar que los adultos migrantes tienen que remontar la alcantarilla y los montículos, por lo que la velocidad máxima no puede superar 1.22 m/s (Bjornn y Reiser, 1991).

Las truchas tienen preferencias definidas respecto a la profundidad, resumidas en la figura 5 (Bovee, 1978). Los alevines requieren profundidades menores a 25 cm, y los migrantes requieren más de 12 cm de agua para remontar los montículos. La altura máxima que puede saltar una trucha es de 30 cm, por lo que el extremo de aguas abajo de la alcantarilla no puede estar a mayor distancia por sobre el agua. Además, en su interior la profundidad del agua debe ser mayor a 15 cm.

Una trucha excava su nido en gravas en el rango de 0.5 a 7.5 cm, dependiendo de su tamaño (Coble, 1961). Los alevines recién emergidos buscan lechos arenosos y al crecer migran hacia lugares con partículas mayores. Los juveniles prefieren fondos de grava gruesa. Para el lecho de desove, cumpliendo una serie de criterios relacionados con el porcentaje de material fino y la velocidad de infiltración del agua, así como el diámetro de las partículas, se eligió gravas con diámetro entre 1.3 y 1.8 cm, que puedan mover hembras pequeñas. Estas tienen un $d_g = 1.5$ cm, no contienen material fino, y presentan una conductividad hidráulica $K = 8,76$ cm/s, determinada en laboratorio. Los rápidos, el hábitat para alevines y juveniles, estarán compuestos por grava entre 5 y 8 cm. Por ser los juveniles territoriales, es necesario proveerles aislamiento, segregando los individuos. Para lograrlo, basta disponer bolones de entre 25 y 30 cm de diámetro en el cauce (Elliott, 1994), en forma aleatoria (por estética).

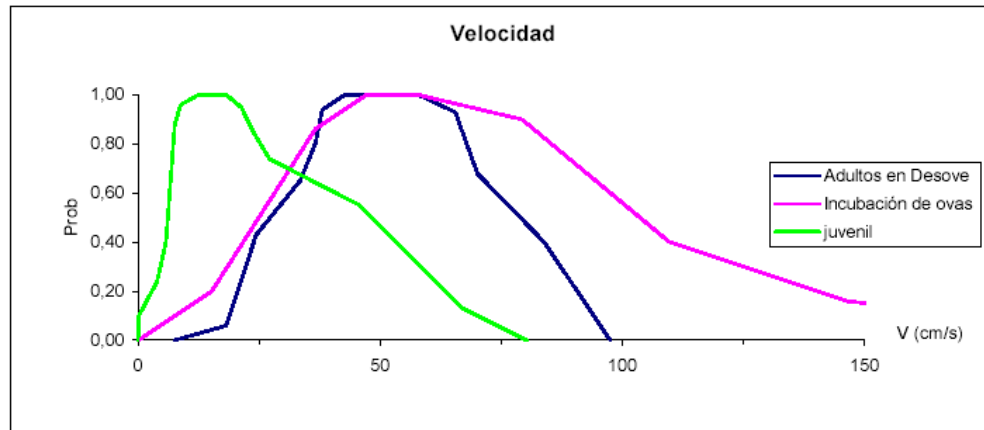
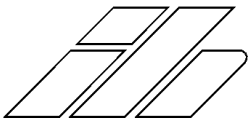


Figura 4. Probabilidad de encontrar truchas arcoiris como función de la velocidad.

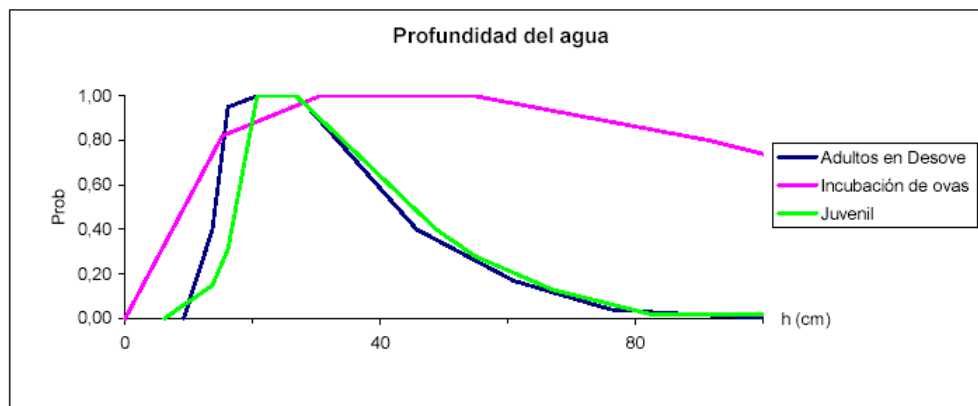


Figura 5. Probabilidad de encontrar truchas arcoiris en función de la profundidad.

4 Modelación hidráulica y de hábitat

Elegido el trazado en planta debe escogerse un perfil longitudinal, ya que el relieve actual no es apropiado (pozones profundos, faltan montículos de desove, etc.). Tras muchas pruebas, se dejaron tres perfiles para modelarlos en detalle. Cada uno queda descrito por una secuencia típica de pozón y rápido (figura 6) y lo único que varía entre ellos es la separación y el desnivel entre secuencias. A su vez, cada secuencia pozón-rápido se fija con ocho secciones transversales, requeridas para modelar correctamente los ejes hidráulicos. La figura 7 muestra la sección transversal de pozón.

Definidos perfiles y secciones, se trazó ejes hidráulicos usando el método del paso estándar. Para régimen permanente y con un n de Manning de 0.45, se modeló un caudal de $0.65 \text{ m}^3/\text{s}$ para desove, y cuatro caudales menores para crianza de alevines, verificándose escurrimiento de río en todos los casos. La figura 8 muestra el relieve del terreno y uno de los perfiles evaluados, así como el eje hidráulico resultante de portear 650 L/s . Así, se obtuvieron los ejes para 15 combinaciones de caudal y perfil.

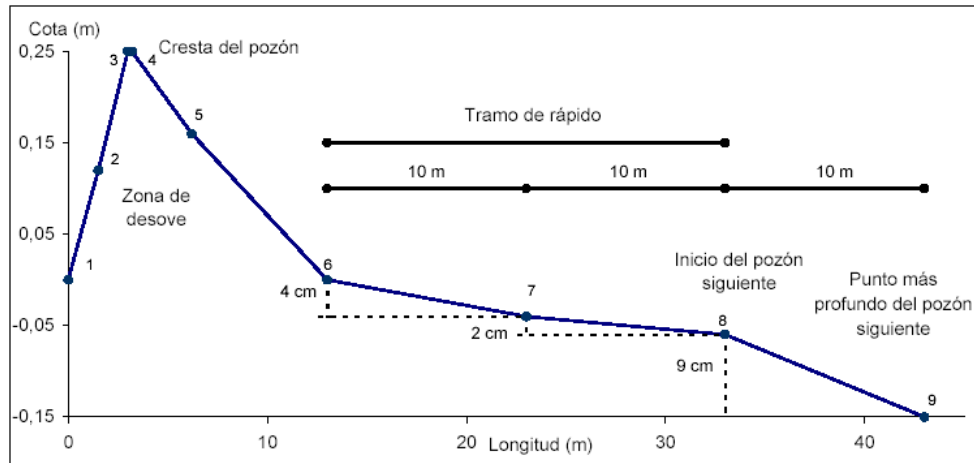
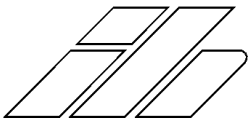


Figura 6. Típica secuencia de pozón y rápido.

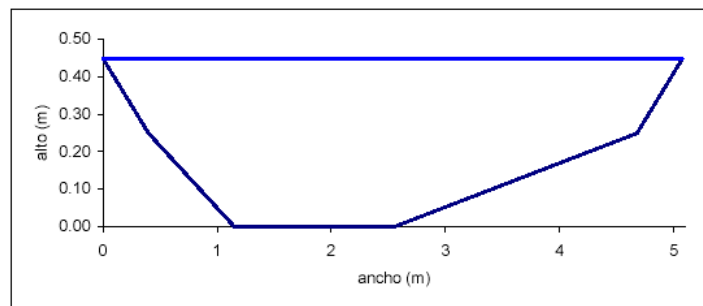


Figura 7. Sección transversal en parte más profunda de pozo.

Luego, se verificó la estabilidad del lecho. Como la mayor velocidad de corte ocurre en la cresta de los montículos, para el caudal de $0,65 \text{ m}^3/\text{s}$, se verificó en estos lugares que la tensión no produjese arrastre de material con $d_g = 6.5 \text{ cm}$. Según el criterio de Shields, tales partículas no sufrirán movimiento incipiente, por lo que se puede asegurar que el lecho es estable en todo el cauce, para cualquier caudal menor.

Al conocer el eje hidráulico para cada perfil, se puede calcular la profundidad y velocidad en todo el cauce, y determinar el hábitat aportado a cada estadio vital. Si miramos la evaluación de hábitat en toda su complejidad, resulta que cada lugar del cauce ofrece una cierta idoneidad de hábitat, que es una función complicada de la profundidad y velocidad en ese punto, y del sustrato. El hábitat total disponible se evalúa entonces como la integral de esta función sobre el tramo, considerando la variabilidad espacial de las tres variables, lo que es una tarea muy complicada. No sólo es difícil estimar hábitat de forma multivariada, sino que además se debería obtener la hidráulica del tramo con un modelo bidimensional de flujo. Por ello, se simplifica la evaluación, considerando por separado las dos variables, y un modelo hidráulico 1-D. Se asume entonces que limita la variable más restrictiva, velocidad o profundidad, sin considerar una respuesta de los peces frente al comportamiento bivariado de ambas.

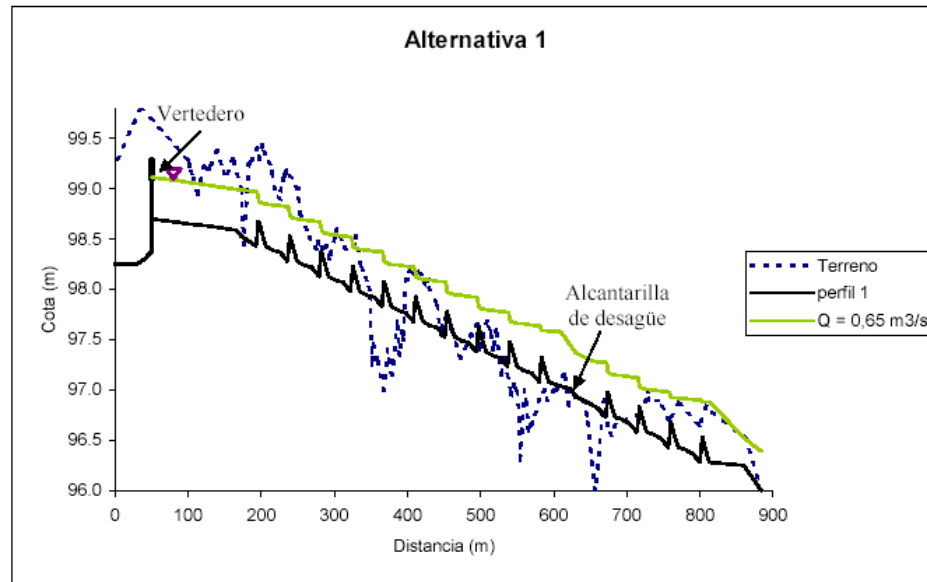
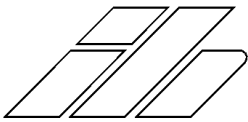


Figura 8. Ejemplo de eje hidráulico para uno de los perfiles longitudinales.

Para desove, los tres perfiles presentan velocidad y profundidad óptimas, con valores de 50 cm/s y 41 cm, respectivamente. Como el caudal y la forma de los montículos son iguales para las tres alternativas, el hábitat total dependerá sólo de la cantidad de montículos. La profundidad es de 19 cm sobre el montículo, y 43 cm en la alcantarilla, superando ampliamente los 12 y 15 cm requeridos para el paso de adultos. La velocidad es de 1.14 m/s en los montículos y 1.1 m/s en la alcantarilla, menores a los 1.22 m/s que puede desarrollar la trucha. Se verifica que la alcantarilla tiene forma, tamaño y material adecuados para el paso de peces migratorios (Clay, 1995).

Para incubación, se supera lejos la velocidad aparente recomendada por Coble (1961). Además, el caudal que infiltra es muy pequeño comparado con el pasante, lo que asegura que el cálculo de ejes es adecuado y no es necesario ajustar el caudal.

Para crianza de alevines, el hábitat disponible es el área de cauce que satisfaga sus requerimientos de velocidad y profundidad. Como la velocidad promedio máxima para alevines es de 0.1 m/s, se debe determinar a qué distancia de la orilla, se alcanza tal valor. Asumiendo un perfil de Prandtl en la vertical, se determinó la profundidad necesaria para tener el valor permisible; luego, geoméricamente, se obtuvo la distancia desde la orilla asociada a esta profundidad, constituyendo tal franja el hábitat útil.

La distancia desde la orilla a la cual se alcanzan los 25 cm de profundidad máxima permisible para alevines se obtiene con la geometría de la sección. Dado que ambos factores limitantes (velocidad y profundidad) se expresan como profundidades permisibles, basta con considerar el menor para calcular los anchos de sección adecuados para alevines. Nótese que en una orilla podría controlar la profundidad y en la otra la velocidad, lo que no ocurrió en las secciones elegidas para este diseño. El resultado para uno de los perfiles y dos caudales se muestra a continuación:



Tabla 1. Hábitat disponible para alevines (perfil 1).

Caudal (L/s)	Área mojada (m ²)	Área útil (m ²)	% útil
300	4441	637	14.3
100	3886	2119	54.5

Los juveniles prefieren mayores velocidades medias que los alevines, entre unos 15 y 45 cm/s (figura 4), para profundidades entre unos 20 y 45 cm (figura 5). Estos valores son menos restrictivos que para alevines. Para caudales de 100 a 300 L/s, tienen asociado un hábitat útil mayor, llegando a un 85 % de la superficie inundada para 300 L/s, en los tres perfiles. Se verifica entonces que el cuello de botella en el desarrollo de los peces, en este proyecto tal como en la naturaleza, se produce en el período de alevín. Por ende, basta elegir la alternativa que optimice el hábitat para alevines, y se obtendrá un hábitat aún mayor para juveniles.

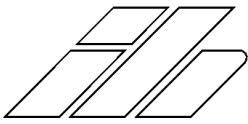
Para comparar el hábitat generado por cada alternativa, se presenta un resumen de resultados en la tabla 2, en la que se observa que el perfil 1 presenta iguales valores en los períodos de desove, incubación y juvenil que la alternativa 3, pero la primera genera un área útil para alevines mucho mayor. Más difícil es elegir entre el perfil 1, que presenta más zonas de desove, y el perfil 2, que genera más hábitat para alevines. Se prefiere el primero, ya que dos montículos más pueden incubar muchos embriones, y la cantidad adicional de hábitat para alevines que presenta el perfil 2 es pequeña.

Tabla 2. Hábitat generado por cada alternativa.

Estadio vital	Desove		Incubación	Alevín		Juvenil	
	Cantidad Montículos	Condiciones (V, Prof.)		Área útil (m ²)	% útil	Área útil (m ²)	% útil estimado
Q _{diseño} (m ³ /s)	0,65		0,65	0,10		0,30	
Indicador de hábitat	Cantidad Montículos	Condiciones (V, Prof.)	Infiltración en el montículo	Área útil (m ²)	% útil	Área útil (m ²)	% útil estimado
Alternativa 1	14	Óptimo	Óptima	2119	54,5	3.900	85
Alternativa 2	12	Óptimo	Óptima	2259	57,5	4.000	85
Alternativa 3	14	Óptimo	Óptima	1939	45,1	4.000	85

5 Conclusiones

Usando conceptos y métodos de la ecología, morfología, e hidráulica, y haciendo algunos supuestos simplificadorios, es posible diseñar un cauce optimizado para el desove y crianza de truchas arcoiris. Es necesario destacar que no habría podido hacerse el estudio para una especie nativa, puesto que no hay información científica suficiente acerca de sus requerimientos de hábitat.



En países desarrollados las obras hidráulicas se diseñan bajo el concepto de desarrollo sustentable. Esto implica usar un enfoque integrado, considerando sus impactos ambientales y cómo estos se pueden evitar o mitigar, tal como se presenta en Meier (1998). En Chile, lamentablemente, esto no es aún así. En tal sentido, este proyecto sienta precedentes en el ámbito nacional, entregando algunos criterios básicos que pueden servir para el diseño y recuperación de cauces naturales.

6 Referencias

Behnke, R.J. (1992). Native Trout of Western North America. American Fisheries Society, Monograph 6. Bethesda, Maryland.

Bjornn, T.C., y D.W. Reiser (1991). Habitat requirements of salmonids in streams. Pp. 83-138 en: W.R. Meehan (ed.). Influences of Forest and Rangeland Management on Salmonid Fishes and their Habitats. American Fisheries Society Special Publication 19.

Bovee, K.D. (1978). Probability of Use Criteria for the Family Salmonidae. Instream Flow Inf. Paper N° 4. U. S. Fish and Wildlife Service Report FWS/OBS-78/07.

Clay, C.H. (1995). Design of Fishways and other Facilities. 2nd Edition, Lewis Publishers. Boca Raton, Florida.

Coble, D.W. (1961). Influence of water exchange and dissolved oxygen in redds on survival of steelhead embryos. *Trans. American Fisheries Society*, 90(4): 469-474.

Cowx, I.G. y R.L. Welcomme (eds.) (1998). Rehabilitation of Rivers for Fish. European Inland Fisheries Advisory Commission of FAO. Fishing News Books.

Elliott, J.M. (1994). Quantitative Ecology and the Brown Trout. Oxford U.P.

García, A. 2002. Diseño Hidráulico de un Cauce Artificial Optimizado para Desove y Crianza de Alevines de Trucha Arcoiris. Informe de Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Concepción.

Meier, C.I. (1998). The Ecological Basis of River Restoration: 1. River Ecology for Hydraulic Engineers, y 2. Defining Restoration from an Ecological Perspective, en Engineering Approaches to Ecosystem Restoration, Proceedings of the Conference. American Society of Civil Engineers. Reston, Virginia.

Meier, C.I. (2000). Propuesta de proyecto FONTEC "Mejoramiento de la pesca deportiva en el sistema hídrico de Paloma Lodge", aprobado por CORFO XI región.

7 Agradecimientos

Se agradece a Carlos Muñoz de "Paloma Lodge", por haber posibilitado este trabajo y financiado los viajes a Coyhaique, así como a Ricardo Briones, del Laboratorio de Mecánica de Suelos de la U. de Concepción por el análisis de conductividad.