



Universidad de Concepción  
Dirección de Postgrado  
Facultad de Ingeniería - Programa de Magíster en Ciencias de la Ingeniería con Mención  
en Ingeniería Civil

# **BARRAS MEDIALES COMO UNIDADES FILTRADORAS EN RÍOS TRENZADOS CON LECHO DE GRAVA: ESTIMACIÓN DEL CAUDAL DE INFILTRACIÓN Y SU COMPORTAMIENTO DIARIO**

Tesis para optar al grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería con  
Mención en Ingeniería Civil

ÁLVARO JOAQUÍN OÑAT HERMOSILLA  
CONCEPCIÓN-CHILE  
2016

Profesor Guía: Alex Schwarz Kusch  
Dpto. de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería  
Universidad de Concepción

## RESUMEN

En las últimas décadas, diversos estudios hidrológicos, hidrogeológicos y biogeoquímicos, entre otros, han mostrado que las interacciones entre el agua subterránea y el agua superficial juegan una serie de roles importantes en los ecosistemas fluviales. Esta interface entre los sistemas superficial y subterráneo se denomina zona hiporreica, ocurriendo en ella la mezcla de ambos tipos de agua y desarrollándose fuertes gradientes físico – químicos.

En ríos trezados es común encontrar barras mediales e islas, unidades geomorfológicas que se enfrentan en forma directa al flujo del río, lo que produce fuertes gradientes hidráulicos, obligando a parte del caudal superficial a pasar a través de ellas, produciendo así flujos de intercambio hiporreico.

Muchos procesos biogeoquímicos que afectan a, y ocurren en los ríos se ven fuertemente controlados por los ciclos de luz solar y temperatura, por lo que la composición química del agua muestra fluctuaciones regulares y cíclicas durante una ventana diaria. Estos ciclos se encuentran interrelacionados debido a que sus variaciones periódicas comúnmente afectan a los demás. El caso de la filtración de agua por barras mediales no debiera ser excepción, debido a que también depende de variables que tienen comportamientos cíclicos a la escala diaria, tales como la conductividad hidráulica, que depende de la temperatura del agua, y los gradientes hidráulicos, afectados por el ciclo hidrológico del río.

A partir de mediciones en tres barras mediales instrumentadas con mallas de nidos de mini-piezómetros, dos en el río Ibáñez y una en el río Huiña, ambos ubicados al sur de la región de Aysén, se determinaron ciclos diarios de gradientes hidráulicos verticales, conductividad hidráulica y área de inundación de cada barra, con los cuales se estimó el caudal filtrado, así como su variabilidad a la escala diaria. Los resultados muestran que el caudal de filtración diario de una barra medial en los ríos Ibáñez y Huiña tiene un claro comportamiento cíclico, llegando a filtrar entre 620 y 148 l/s en el momento del *peak* de filtración, respectivamente.

## AGRADECIMIENTOS

Quisiera agradecer a mi familia y amigos, en especial a mis padres y abuela, por todo el apoyo y compañía entregados durante esta etapa de mi vida.

A los profesores Claudio Meier y Tomás Echaveguren les agradezco por su tiempo y apoyo durante la realización de esta tesis.

También agradezco a Héctor Palacios, Esteban Flores, Carlos Olivares y Omar Troncoso por su ayuda y buena compañía en la etapa de toma de datos necesarios para la realización de esta tesis.

Quisiera reconocer el apoyo de Conicyt que, a través del proyecto Fondecyt 11110293 adjudicado al Dr. Brian Reid (CIEP, Coyhaique) financió el estudio durante los primeros meses de investigación. Asimismo, agradezco al proyecto “Sensing the Americas’ Freshwater Ecosystem Risk (SAFER) from Climate Change”, del Inter-American Institute for Global Change Research, no sólo por el financiamiento, sino que también por las enriquecedoras experiencias que me permitió compartir.

No puedo dejar de expresar mi cariño a Brian Reid y a Anna Astorga, por toda la compañía y apoyo moral que me brindaron, así como a Eduardo Sánchez y a la familia Hepp Valenzuela, por su amistad y preocupación.

**ÍNDICE DE CONTENIDOS**

|                                                                          |           |
|--------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN .....</b>                                     | <b>1</b>  |
| 1.1 Motivación.....                                                      | 1         |
| 1.2 Objetivos .....                                                      | 2         |
| 1.3 Hipótesis de trabajo .....                                           | 3         |
| 1.4 Metodología de trabajo .....                                         | 3         |
| 1.5 Organización de la tesis .....                                       | 4         |
| <b>CAPÍTULO 2 INTERCAMBIO HIPORREICO Y SU COMPORTAMIENTO DIARIO ....</b> | <b>5</b>  |
| 2.1 Introducción.....                                                    | 5         |
| 2.2 Zona e intercambio hiporreico .....                                  | 5         |
| 2.3 Barras mediales como unidades de filtración .....                    | 8         |
| 2.4 Determinación de la conductividad hidráulica K .....                 | 12        |
| 2.5 Variación de K con la temperatura .....                              | 14        |
| 2.6 Ciclos diarios .....                                                 | 16        |
| 2.7 Ciclo diario de filtración por barras mediales .....                 | 17        |
| 2.8 Conclusiones .....                                                   | 19        |
| <b>CAPÍTULO 3 CONTROLADORES DEL INTERCAMBIO HIPORRÉICO .....</b>         | <b>20</b> |
| 3.1 Introducción.....                                                    | 20        |
| 3.2 Descripción del área de estudio .....                                | 20        |

|                                                                         |           |
|-------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 3.3 Instrumentación de las barras seleccionadas .....                   | 23        |
| 3.4 Metodología de medición y muestreo.....                             | 27        |
| 3.5 Análisis de sensibilidad .....                                      | 36        |
| 3.6 Conclusiones .....                                                  | 36        |
| <b>CAPÍTULO 4 CICLOS DIARIOS DE FILTRACIÓN EN BARRAS MEDIALES .....</b> | <b>38</b> |
| 4.1 Introducción.....                                                   | 38        |
| 4.2 Gradientes hidráulicos verticales .....                             | 38        |
| 4.3 Conductividad hidráulica vertical.....                              | 40        |
| 4.4 Área de inundación de las barras .....                              | 43        |
| 4.5 Ciclo diario de filtración de las barras .....                      | 45        |
| 4.6 Extrapolación temporal y espacial de los resultados .....           | 48        |
| 4.7 Análisis de sensibilidad .....                                      | 53        |
| 4.8 Conclusiones.....                                                   | 56        |
| <b>CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES .....</b>                                    | <b>58</b> |
| <b>REFERENCIAS.....</b>                                                 | <b>60</b> |
| <b>ANEXOS .....</b>                                                     | <b>63</b> |
| Anexo 4.2 Gradientes hidráulicos verticales para cada barra .....       | 63        |
| Anexo 4.3 Pruebas de infiltración para cada barra.....                  | 65        |
| Anexo 4.4 $K_r$ y $K_v$ para cada barra .....                           | 67        |

|           |                                           |    |
|-----------|-------------------------------------------|----|
| Anexo 4.5 | Áreas de influencia para cada barra ..... | 68 |
|-----------|-------------------------------------------|----|



**ÍNDICE DE TABLAS**

|           |                                                                                                                                                                                     |    |
|-----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 3.1 | Geometría de las barras seleccionadas. ....                                                                                                                                         | 25 |
| Tabla 3.2 | Resumen de mini-piezómetros instalados en cada barra. ....                                                                                                                          | 25 |
| Tabla 3.3 | Resumen de mediciones realizadas en cada barra. ....                                                                                                                                | 28 |
| Tabla 4.1 | Temperatura, $\rho/\eta$ y porcentaje de cambio de $\rho/\eta$ con respecto a la temperatura en que fue realizada la prueba de infiltración, para cada medición en cada barra. .... | 41 |
| Tabla 4.2 | Resultados de Barra N°1.....                                                                                                                                                        | 46 |
| Tabla 4.3 | Resultados de Barra N°2.....                                                                                                                                                        | 47 |
| Tabla 4.4 | Resultados de Barra N°3.....                                                                                                                                                        | 48 |
| Tabla 4.5 | Resumen de catastro de barras mediales en tramos de interés utilizando Google Earth y ArcGIS. ....                                                                                  | 50 |
| Tabla 4.6 | Resultados de extrapolación a tramo de río Ibáñez. ....                                                                                                                             | 50 |
| Tabla 4.7 | Resultados de extrapolación a tramo de río Huiña. ....                                                                                                                              | 51 |
| Tabla 4.8 | Resumen de resultados obtenidos por tramo en río Ibáñez y río Huiña. ....                                                                                                           | 53 |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|                                                                                                                                                                                               |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 2.1 Interacción de flujo entre la zona hiporreica y sistemas aledaños, a través del lecho y laderas. ....                                                                              | 6  |
| Figura 2.2 Ejemplo de posibles zonas de intercambio hiporreico y líneas de trayectoria en un tramo de río, producto de la interacción con singularidades en el cauce y formas del lecho. .... | 7  |
| Figura 2.3 Difusión turbulenta y flujo advectivo en lechos de grava. ....                                                                                                                     | 8  |
| Figura 2.4 Modelo conceptual idealizado de la influencia de barras mediales o islas en flujos de intercambio hiporreico. ....                                                                 | 9  |
| Figura 2.5 Esquema conceptual de etapas de intercambio hiporreico en una barra medial. ....                                                                                                   | 10 |
| Figura 2.6 Esquema de método CHIT. ....                                                                                                                                                       | 13 |
| Figura 2.7 Gráfico de variables adimensionales A y B para determinar el factor de forma P en la obtención de K, como función del radio efectivo $Re$ . ....                                   | 14 |
| Figura 2.8 Gráfico de variación del cociente entre densidad y viscosidad cinemática del agua con la temperatura. ....                                                                         | 15 |
| Figura 2.9 Distintos escenarios de cambio en el ciclo diario de temperatura del agua en un río, debido a su interacción con el ciclo diario de intercambio hiporreico. ....                   | 18 |
| Figura 3.1 Área en estudio con las cuencas de los ríos de interés delimitadas. ....                                                                                                           | 21 |
| Figura 3.2 Fotos de tramos de ríos en estudio, mirados hacia aguas arriba. ....                                                                                                               | 22 |
| Figura 3.3 Estratos sedimentarios en riberas del río Ibáñez, con presencia de tefra volcánica. ..                                                                                             | 22 |
| Figura 3.4 Fotografía de nido con cuatro mini-piezómetros, instalado en una de las barras del río Ibáñez. ....                                                                                | 24 |

|                                                                                                                                                                                          |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 3.5 Esquema de nido con cuatro mini-piezómetros, instalado en una de las barras del río Ibáñez. ....                                                                              | 24 |
| Figura 3.6 Vista en planta de las tres barras seleccionadas. El flujo va desde arriba hacia abajo en todos los casos. ....                                                               | 26 |
| Figura 3.7 Equipo realizando medición de niveles piezométricos en nido de mini-piezómetros en Barra N°1, la cual en este caso ya ha sido inundada por el pulso creciente de caudal. .... | 28 |
| Figura 3.8 Esquema conceptual del muestreo del gradiente hidráulico vertical propuesto por Baxter <i>et al.</i> ....                                                                     | 29 |
| Figura 3.9 Esquema del método utilizado para la estimación de los GHVs, con detalle de los últimos 10 cm de mini-piezómetro. ....                                                        | 30 |
| Figura 3.10 Instrumento utilizado para la prueba de infiltración. ....                                                                                                                   | 31 |
| Figura 3.11 Ejemplo de obtención de área de inundación; en rojo se muestra la parte inundada de la barra, y en azul la parte seca. ....                                                  | 32 |
| Figura 3.12 Comportamiento de los gradientes hidráulicos verticales promedio (izq.) y del área inundada (der.) con el nivel de agua en el río medido aguas arriba de cada barra. ....    | 34 |
| Figura 3.13 Análisis de barras mediales para el tramo de interés, en Google Earth; ejemplo del río Huiña; importación de barras mediales desde Google Earth a ArcGIS. ....               | 35 |
| Figura 4.1 GHVs promedio en cada barra, para las distintas mediciones. ....                                                                                                              | 39 |
| Figura 4.2 Ciclo de Kv promedio durante la ventana de medición para las barras en estudio. ...                                                                                           | 42 |
| Figura 4.3 Variación temporal del área inundada y nivel de agua en el río para la Barra N°1. ..                                                                                          | 44 |
| Figura 4.4 Barra 1: Caudal filtrado, nivel de agua en el río, GHV promedio, Kv, y área inundada, durante la ventana de medición. ....                                                    | 45 |
| Figura 4.5 Barra 2: Caudal filtrado, nivel de agua en el río, GHV promedio, Kv, y área inundada, durante la ventana de medición. ....                                                    | 46 |

|                                                                                                                                                                             |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 4.6 Barra 3: Caudal filtrado, nivel de agua en el río, GHV promedio, Kv, y área inundada, durante la ventana de medición.....                                        | 47 |
| Figura 4.7 Correlaciones del nivel del agua y su temperatura entre la Barra N°1 y la estación fluviométrica. ....                                                           | 49 |
| Figura 4.8 Nivel de agua y temperatura extrapolados a partir de correlación con datos de estaciones fluviométricas para tramo de río Ibáñez modelado. ....                  | 49 |
| Figura 4.9 Variación del caudal filtrado y sus controladores a lo largo del tramo de río Ibáñez en estudio. ....                                                            | 51 |
| Figura 4.10 Nivel de agua y temperatura medidos en terreno para el tramo de río Huiña. ....                                                                                 | 52 |
| Figura 4.11 Variación del caudal filtrado y sus controladores a lo largo del tramo de río Huiña en estudio. ....                                                            | 52 |
| Figura 4.12 Porcentaje de variación de: caudal filtrado por la Barra N°1; nivel de agua en el río; GHVs promedio; Kv; y área inundada, durante la ventana de medición. .... | 54 |
| Figura 4.13 Porcentaje de variación de: caudal filtrado por la Barra N°2; nivel de agua en el río; GHVs promedio; Kv; y área inundada, durante la ventana de medición. .... | 55 |
| Figura 4.14 Porcentaje de variación de: caudal filtrado por la barra N°3; nivel de agua en el río; GHVs promedio; Kv; y área inundada, durante la ventana de medición. .... | 55 |

## CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN

### 1.1 Motivación

En las últimas décadas, diversos estudios hidrológicos, hidrogeológicos y biogeoquímicos, entre otros, han mostrado que las interacciones entre el agua subterránea y el agua superficial juegan una serie de roles importantes en los ecosistemas fluviales. Esta interface entre los sistemas superficial y subterráneo se denomina zona hiporreica, en la cual ocurre mezcla de ambos tipos de agua, desarrollándose fuertes gradientes físico-químicos.

Los intercambios hiporreicos promueven numerosos servicios ecosistémicos: sirven de hábitat para organismos bénticos e intersticiales, actúan como atenuador de contaminantes por biodegradación o adsorción, modulan las fluctuaciones diarias de la temperatura del agua, etc. Sin embargo, las investigaciones se han enfocado principalmente en la caracterización y procesos químicos del agua subterránea, o en los invertebrados hiporreicos, centrándose en ríos de un solo cauce, generalmente meandriformes, a escalas de cuenca o tramo.

Muy pocos estudios han buscado explicar el intercambio hiporreico a la escala de la barra, documentando su magnitud. Esta investigación busca determinar la magnitud del intercambio hiporreico producido por la presencia de una barra medial en un río trenzado con lecho de grava, y comprender su comportamiento temporal a la escala diaria, para discutir su posible efecto sobre otros parámetros biogeoquímicos del río.

En ríos trezados es común encontrar barras mediales e islas, unidades geomorfológicas que se enfrentan en forma directa al flujo del río, lo que produce fuertes gradientes hidráulicos, obligando a una parte del caudal superficial a pasar a través de ellas. Dentro de la barra ocurre la mezcla y procesamiento de aguas provenientes de los distintos sistemas, resultando en cambios en sus propiedades físico-químicas. Por esto es que el fenómeno de intercambio hiporreico en ríos trezados está asociado a la capacidad de filtración de las barras mediales.

Muchos procesos biogeoquímicos que actúan en ríos se ven fuertemente afectados por el ciclo solar de luz y temperatura, por lo que la composición química del agua muestra fluctuaciones regulares, cíclicas, durante una ventana diaria. Estos ciclos se encuentran interrelacionados debido a que las variaciones cíclicas de algunos comúnmente afectan a los demás. El caso de la filtración de agua por barras mediales no debiera ser la excepción, debido a que también depende de variables que tienen fluctuaciones a la escala diaria, tales como la conductividad hidráulica, que depende de la temperatura del agua, y los gradientes hidráulicos, afectados por el ciclo hidrológico del río.

Con el fin de entender el comportamiento tanto espacial como temporal de la capacidad de filtración de una barra medial, se desarrolló un modelo conceptual simple de esta unidad filtradora, en el que se aborda el proceso de intercambio hiporreico y el ciclo diario de filtración de agua. A partir de mediciones en terreno de ciclos diarios de gradientes hidráulicos verticales, conductividad hidráulica y temperatura del agua, se estimó preliminarmente el caudal filtrado, su distribución durante una ventana diaria, y su relación con el nivel del agua y la temperatura en el río.

## 1.2 Objetivos

El objetivo general del presente trabajo es parametrizar el ciclo diario de filtración de agua superficial en barras de grava de los ríos Ibáñez y Huiña, determinando los factores que controlan la filtración durante el ciclo, con el fin de poder estimar el caudal promedio de filtración diario por barra medial, junto a su comportamiento temporal, para luego realizar una extrapolación de los resultados obtenidos, que permita estimar el caudal filtrado en un tramo de río.

Se consideran los siguientes objetivos específicos:

Estimar, en las distintas barras mediales instrumentadas, los ciclos diarios de: gradientes hidráulicos verticales, conductividad hidráulica vertical de los sedimentos saturados, y área de inundación.

Evaluar la importancia relativa, en sincronización y magnitud, que tienen los gradientes hidráulicos verticales, la conductividad hidráulica vertical de los sedimentos saturados, y el área de inundación de las barras mediales instrumentadas, durante un ciclo en el proceso de filtración.

Estimar la magnitud del caudal filtrado en cada una de las barras instrumentadas, así como su comportamiento durante una ventana diaria.

Evaluar el efecto relativo que tiene la filtración en barras mediales a la escala del tramo de río, realizando un catastro de barras mediales en los tramos de interés de los ríos muestreados, de manera de escalar los resultados obtenidos para barras individuales.

### 1.3 Hipótesis de trabajo

El proceso de filtración en barras mediales de un río trenzado con lecho de grava tiene un comportamiento diario, que depende de las magnitudes y fases de los ciclos de gradientes hidráulicos, conductividad hidráulica de los sedimentos, y área de inundación.

### 1.4 Metodología de trabajo

El trabajo se dividió en tres etapas. En la primera etapa, de revisión bibliográfica, se realizó una búsqueda con respecto a escurrimiento en medios porosos; aguas subterráneas y su interacción con cuerpos de agua superficial; conceptos de geomorfología fluvial, zona hiporreica, e hidráulica del flujo en ésta última; ciclos diarios en ríos, entre otros, con el fin de adquirir los conocimientos necesarios para abordar el estudio a realizar. La segunda etapa corresponde a la campaña de terreno en la cual, durante todo Febrero del 2013, el equipo de trabajo completó las etapas de: selección de las tres barras de estudio; instrumentación de las barras con nidos de piezómetros, hincados a profundidades distintas; y medición de las variables de interés a lo largo de un ciclo diario. Por último, la tercera etapa corresponde al análisis de los datos obtenidos en terreno.

## 1.5 Organización de la tesis

Esta tesis se organiza en cinco capítulos principales. El Capítulo 1, donde se introduce y motiva al lector acerca del trabajo realizado en esta tesis, se presentan sus objetivos e hipótesis, y un resumen de la metodología utilizada. El capítulo denominado “Marco Teórico” entrega al lector los conocimientos básicos necesarios para el completo entendimiento de la investigación realizada y resultados obtenidos. A continuación, el Capítulo 3, de Metodología, explica los métodos y materiales utilizados en el desarrollo de la investigación: dónde, cuándo y cómo se tomaron los datos en terreno, y con qué métodos, y cómo se analizaron. En el capítulo de Resultados se dan a conocer los análisis de los datos de campo, y por último en las Conclusiones, Capítulo 5, se muestran las principales conclusiones obtenidas del análisis, se discute el aporte de la investigación al conocimiento actual, y se dan a conocer futuras líneas de investigación referentes al tema de esta tesis.



## **CAPÍTULO 2 INTERCAMBIO HIPORREICO Y SU COMPORTAMIENTO DIARIO**

### **2.1 Introducción**

En este capítulo se le facilita al lector la teoría necesaria para entender los distintos aspectos tratados en esta tesis. Se parte definiendo la zona hiporreica, discutiendo la ocurrencia de intercambio hiporreico y sus principales controladores. Luego, se explica el concepto de barra medial como unidad filtradora, y su rol en los flujos de intercambio hiporreico en ríos trezados y su variación temporal. Luego, se habla del comportamiento cíclico de los distintos parámetros físico-químicos del agua en un río, sobre una ventana diaria, y su interconexión. Por último, se comenta acerca del ciclo diario de filtración de una barra medial, y de su posible interrelación con los ciclos diarios de otras variables en el río.

### **2.2 Zona e intercambio hiporreico**

El agua de un río aluvial proviene, en distintos porcentajes, de dos sistemas diferentes, en constante interacción: el agua superficial del río y el sistema de agua subterránea bajo éste, ambos con propiedades físico-químicas diferentes. El primero se conforma del agua proveniente principalmente de la escorrentía superficial de la cuenca, y se encuentra en contacto directo con el ambiente, siendo mucho más sensible a cambios en éste y, por ende, presentando un comportamiento mucho más dinámico que el sistema de agua subterránea. Por otra parte, el sistema de agua subterránea está conformado por agua que ha percolado anteriormente hacia el subsuelo de la cuenca, y se mueve por los intersticios de sus sedimentos y sistemas de flujo subterráneos. Entre ambos sistemas, en la sub-superficie del cauce, se encuentra una zona de transición, llamada zona hiporreica, donde ocurre la interacción entre el agua proveniente de los dos sistemas, a través de flujos de intercambio hiporreico.

Si bien se entiende que la zona hiporreica se encuentra en la sub-superficie, es difícil definir sus bordes con exactitud. Para ello, se han utilizado dos enfoques anteriormente: por una parte, se

pueden tratar de definir de acuerdo a la cantidad de agua en la sub-superficie proveniente del cauce, fijándose un umbral de un 10%, bajo el cual se asume que uno se encuentra ya en la zona de agua subterránea, bajo la zona hiporreica (Triska *et al.* 1989, en Wondzell y Gooseff, 2013). Otra alternativa es definirlos estimando la residencia del agua en el subsuelo. El tiempo de residencia del agua en la zona hiporreica es muy variable, tendiendo a ser altamente sesgado, con la mayoría del agua moviéndose a lo largo de recorridos cortos, y, por ende, con tiempos de residencia cortos (horas); sin embargo, una parte no despreciable del agua se mueve por recorridos más largos, o a través de regiones menos permeables, llegando a tiempos de residencia de semanas, meses o más. De esta manera, se puede definir un umbral de 24 h para el tiempo de residencia, bajo el cual se asume que el agua se encuentra en la zona hiporreica (Gooseff, 2010).

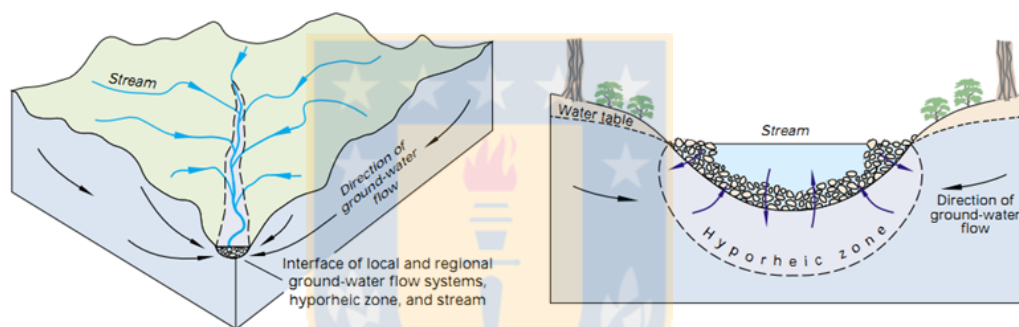


Figura 2.1 Interacción de flujo entre la zona hiporreica y sistemas adyacentes, a través del lecho y laderas (Winter *et al.*, 1998).

El flujo de intercambio hiporreico resulta de gradientes hidráulicos que fuerzan aguas provenientes de ambos sistemas a través de los sedimentos del lecho. Así, la cantidad de agua que ingrese en la zona hiporreica dependerá tanto de la magnitud de tales gradientes, como de la conductividad hidráulica saturada de los sedimentos del lecho y acuífero bajo éste.

Las condiciones y procesos que producen gradientes hidráulicos sobre el lecho, induciendo flujos de intercambio hiporreico, varían a diferentes escalas espaciales, y dependen fuertemente de la morfología del cauce e hidrología del río. A escala de un tramo de río, el intercambio se ve controlado por cambios en la topografía del lecho, tales como la presencia de barras o residuos

leñosos, que pueden dar lugar a secuencias de rápido – pozón, o la presencia de parches de sedimentos con diferente conductividad hidráulica saturada.

La Figura 2.2. muestra ejemplos de posibles zonas de intercambio hiporreico y líneas de trayectoria en un tramo de río, producto de la interacción con singularidades en el cauce y formas del lecho (en ésta, S corresponde a saltos y rápidos, R a rápidos someros, M a meandros, B a canales secundarios, I a barras o islas, y T a llegada de tributarios).

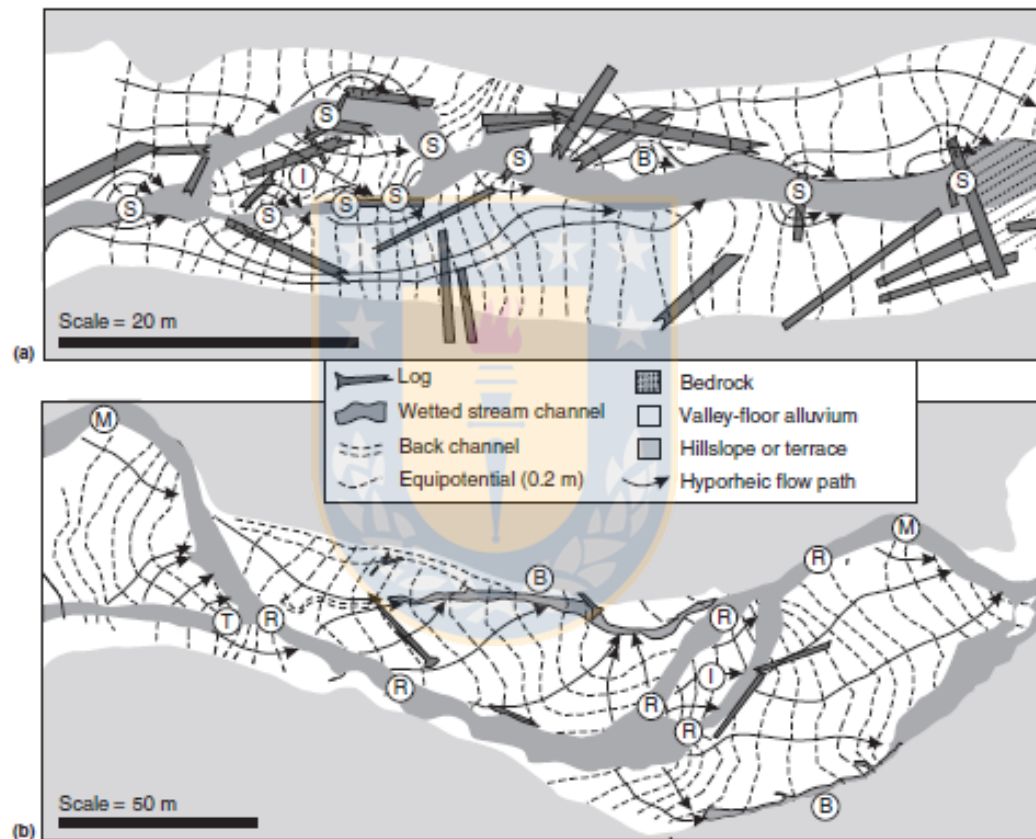


Figura 2.2 Ejemplo de posibles zonas de intercambio hiporreico y líneas de trayectoria en un tramo de río, producto de la interacción con singularidades en el cauce y formas del lecho (Wondzell y Gooseff, 2013).

A menor escala, Packman y Salehin (2004) encontraron que el intercambio hiporreico en ríos con lecho de grava se desarrolla principalmente por dos procesos: (1) difusión turbulenta, que domina en la región más próxima a la corriente; y (2) flujo advectivo, que domina en zonas más profundas

del lecho, donde el número de Reynolds es menor a 1 (Figura 2.15). Determinaron que el intercambio de flujo puede representarse mediante un coeficiente proporcional al cuadrado del número de Reynolds. En flujo laminar advectivo, este coeficiente refleja el rol de la altura de velocidad en el control de las variaciones de presión sobre el lecho (Cisternas, 2011).

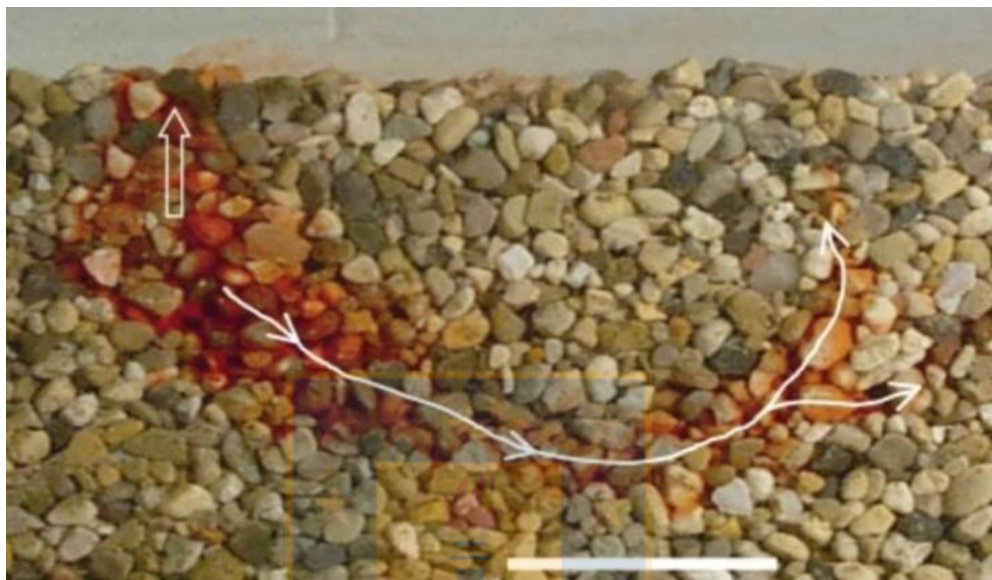


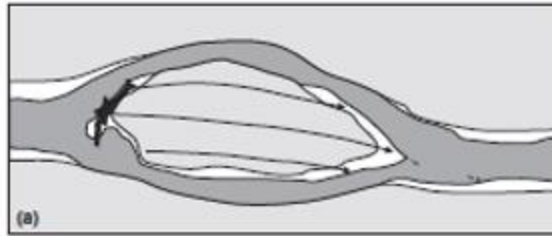
Figura 2.3 Difusión turbulenta y flujo advectivo en lechos de grava (Packman y Salehin, 2004).

### 2.3 Barras mediales como unidades de filtración

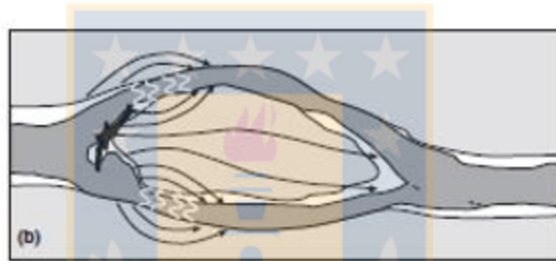
Las barras mediales e islas son unidades geomorfológicas del lecho de un río que generan un brazo secundario al principal, con escurrimiento permanente (Wondzell y Gooseff, 2013). Ya que son geoformas muy comunes en ríos trenzados, es necesario estudiarlas para entender los mecanismos de intercambio hiporreico en tales ríos. La hidrología de barras mediales e islas no ha sido estudiada extensivamente; los pocos estudios al respecto se basan en que la elevación del agua superficial alrededor de la isla determina condiciones de borde para la carga total, la cual controla el intercambio hiporreico a través de la isla (Dent *et al.*, 2007; Francis *et al.*, 2010).

Hasta el momento, pocos autores han indagado detallada el flujo hiporreico en barras de grava; destaca el trabajo de Derx *et al.* (2010), donde se estudia el patrón de flujo de intercambio

hiporreico en una barra medial de grava en el Danubio, al este de la ciudad de Viena. Calibrando un modelo numérico con datos de gradientes hidráulicos y estimando la conductividad hidráulica saturada del lecho, calcularon magnitudes de flujo y velocidades de intercambio hiporreico, encontrando flujos de infiltración de entre 6 y 82 l/s, y de exfiltración de entre -5 y -35 l/s.



(a) Gradientes longitudinales que producen trayectorias en sentido longitudinal a la isla



(b) Presencia de rápidos someros en los brazos aledaños a la barra, cercanos a su cabeza produciendo trayectorias paralelas a éstos



(c) Rápidos someros a distintas alturas en brazos alrededor de la isla, produciendo trayectorias más cortas y tiempos de residencia menores

Figura 2.4 Modelo conceptual idealizado de la influencia de barras mediales o islas en flujos de intercambio hiporreico (Wondzell y Gooseff, 2013).

Por otra parte, de acuerdo a lo presentado por Cisternas (2011) y Oñat (2014), quienes observaron el comportamiento de la napa freática en barras mediales de ríos con lecho de grava, y la variación

de los niveles piezométricos a distintas profundidades, respectivamente, el intercambio hiporreico producido por una barra medial se puede resumir conceptualmente en tres etapas (Figura 2.5): una primera, en la cual ocurre la filtración de aguas desde el sistema de agua superficial hacia la barra, que llamaremos etapa de entrada; ésta ocurre en la cabeza de la barra, donde se observan los mayores gradientes hidráulicos verticales (GHV) positivos, indicativos de *downwelling*; una segunda etapa, en la cual ocurre la mezcla de aguas desde los tres sistemas, agua superficial, zona hiporreica y agua subterránea, que llamaremos etapa de mezcla, la que ocurre a lo largo de toda la barra, bajo su superficie freática, resultando en cambios de las propiedades físico químicas del caudal entrante a la barra; y una última etapa, que llamaremos de salida, en la cual se devuelven las aguas desde la zona hiporreica hacia el flujo de aguas superficial, la que ocurre principalmente en la cola de la barra, donde se observan GHV negativos, indicativos de *upwelling*.

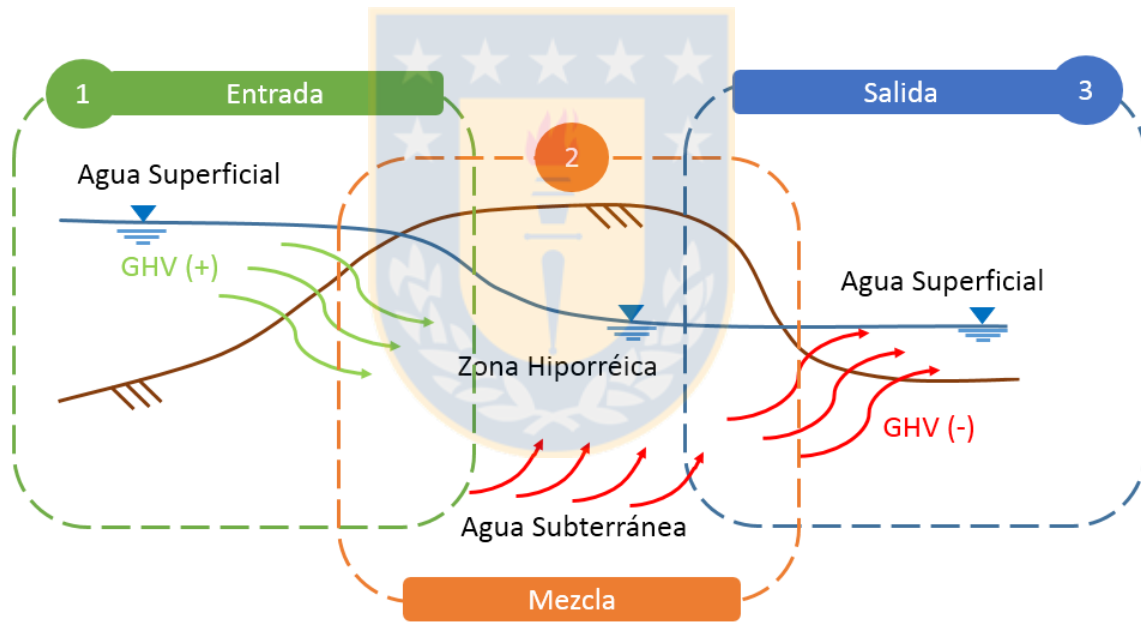


Figura 2.5 Esquema conceptual de etapas de intercambio hiporreico en una barra medial.

Esta tesis se centra en la primera etapa del modelo conceptual de intercambio hiporreico en barras mediales propuesto anteriormente, la etapa de entrada, donde ocurre la filtración de cierto porcentaje del caudal de agua superficial del cauce, producto de su paso bajo barras mediales, y cómo tal proceso puede afectar al hidrograma de un tramo de río y a los ciclos diarios de sus propiedades físico-químicas.

Debido a que el caudal entrante a la barra viaja por ésta a una velocidad mucho menor que el agua superficial, y no es devuelto al cauce sino hasta después de haber transcurrido un tiempo de residencia, se puede decir que está ocurriendo una detención temporaria de una parte del caudal, el cual está siendo filtrado por la barra.

Ya que el flujo en la barra corresponde a escurrimiento a través de un medio poroso (el sedimento del lecho), puede calcularse con la Ley de Darcy (Ecuación 2.1), la cual dice que velocidad promedio del flujo es proporcional al gradiente hidráulico en la dirección del movimiento:

$$V = K \frac{\Delta h}{\Delta l} , \quad (2.1)$$

Donde  $V$  es la velocidad aparente,  $K$  es la conductividad hidráulica saturada y  $\Delta h/\Delta l$  es el valor absoluto del gradiente hidráulico en la dirección del flujo (siendo  $\Delta h$  la pérdida de carga o energía y  $\Delta l$  la distancia sobre la cual se disipa tal energía). Así, para el cálculo del caudal de filtración en una barra medial, se puede adaptar la ley de Darcy bajo los siguientes supuestos:

- Al momento de entrar el agua a la barra lo hace en dirección perpendicular a su superficie; debido a que la barra es mucho más extensa que alta, se puede decir que es prácticamente plana y, por ende, que el agua percola en dirección vertical, por lo que el gradiente hidráulico en la Ecuación 2.2. correspondería al gradiente hidráulico vertical (GHV).
- De igual manera, la conductividad hidráulica requerida para la Ecuación 2.1 correspondería a la conductividad hidráulica vertical de los sedimentos saturados ( $K_v$ ).

De esta manera, si se conocen los valores de  $K_v$  y GHV asociados a cierta unidad de área de barra, el caudal filtrado por ésta ( $q_f$ ) puede expresarse como:

$$q_f = K_v \text{ GHV} , \quad (2.2)$$

## 2.4 Determinación de la conductividad hidráulica K

Numerosos estudios han demostrado que las propiedades hidráulicas del lecho de un río juegan un rol considerable en la interacción agua superficial – agua subterránea. Desde fines de los años 80, diversas investigaciones se han centrado en la determinación y heterogeneidad de la conductividad hidráulica de los sedimentos del lecho fluvial (Cardenas y Zlotnik, 2003). Calver (2001) hace un resumen de los valores de K encontrados, los que muestran un amplio rango, entre 0.001 a 100 m/día.

Existen diversos métodos para la obtención de K, desde pruebas en laboratorio a ensayos *in-situ*, incluyendo el ensayo tipo “slug”, hasta pruebas de extracción a carga constante, pruebas de permeabilidad con descenso de carga o carga constante, etc. Si bien éstos han dado buenos resultados, tienen el problema de requerir mucha indumentaria y tiempo para su realización, ya que la mayoría involucra deprimir la napa en el lugar de medición. A raíz de esto, Cardenas y Zlotnik (2003) desarrollaron un método simple de determinación de K en terreno, llamado CHIT (*Constant-Head Injection Test for streambed hydraulic conduction estimation*, es decir, prueba de inyección a carga constante para la estimación de la conductividad hidráulica de lechos fluviales). Este permite la determinación en terreno del K de los sedimentos aledaños a un piezómetro previamente instalado, a partir de una prueba de infiltración a carga constante (Figura 2.6). El método fue desarrollado en arenas, pero tiene un rango de aplicabilidad entre 0.001 y 100 m/día. En éste, K se calcula según:

$$K_r = \frac{Q}{(2 \pi L P y)} , \quad (2.3)$$

Donde Q corresponde al caudal para el cual se realiza la prueba, L al largo de la pantalla de filtración del piezómetro utilizado, y a la altura de carga a la cual se realiza la prueba, y P a un factor de forma el cual a su vez se calcula según:

$$P = \frac{1.1}{\ln\left(\frac{1+L}{r_w}\right)} + \frac{A + B \cdot \ln\left(\frac{b - (1+L)}{r_w}\right)}{L/r_w}, \quad (2.4)$$

En que  $l$  es la profundidad a la cual mide el piezómetro con respecto al lecho,  $b$  el espesor del acuífero hacia una base impermeable, y  $A$  y  $B$  son constantes adimensionales graficadas por Bouwer y Rice (1976; Figura 2.7), en función del radio efectivo ( $R_e$ ) del piezómetro, dado por:

$$R_e = \frac{L}{r_w}, \quad (2.5)$$

en que  $r_w$  corresponde al radio interno del piezómetro.

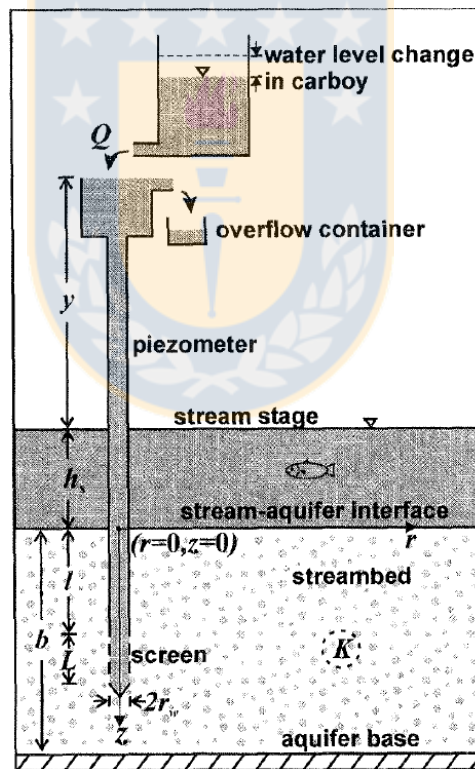


Figura 2.6 Esquema de método CHIT (Cardenas y Zlotnik, 2003).

Es importante notar que, debido a que la pantalla de filtración de los piezómetros es vertical,  $K$  obtenido con el método CHIT corresponde a la conductividad hidráulica horizontal (radial),  $K_r$ , de los sedimentos aledaños al piezómetro. Sin embargo, para calcular el caudal de filtración de una

barra según la Ecuación 2.2, es necesario conocer su conductividad hidráulica vertical ( $K_v$ ). El valor de la conductividad hidráulica en un lecho de río depende del tamaño, geometría y orientación de los granos que lo conforman. Debido a que, en un río aluvial, el lecho está conformado por distintas capas de sedimentación depositadas por diferentes eventos de crecida, por lo general se encuentra más homogeneidad en sentido horizontal que vertical; además, los granos tienden a direccionarse en sentido horizontal, alineándose con el flujo. Por estas razones puede ocurrir anisotropía, teniéndose que  $K_v$  sea (levemente) menor que  $K_r$ . En el presente estudio, siguiendo los resultados de Burger y Belitz (1997), asumiremos sedimentos fluviales isotrópicos, de modo que  $K_v = K_r$ .

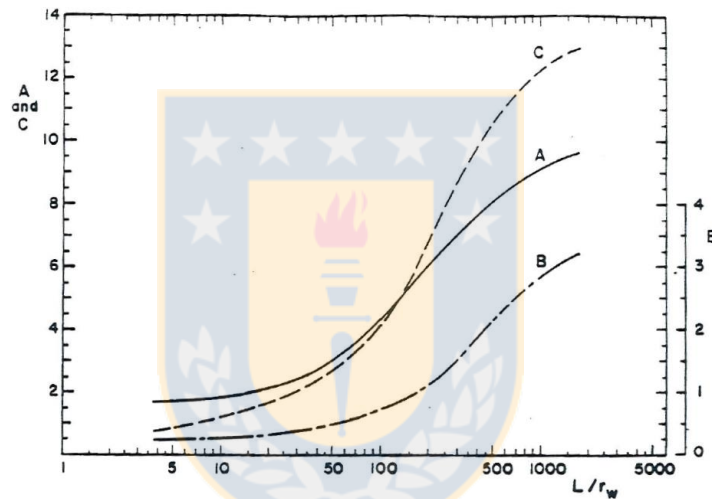


Fig. 3. Curves relating coefficients A, B, and C to  $L/r_w$ .

Figura 2.7 Gráfico de variables adimensionales A y B para determinar el factor de forma P en la obtención de K, como función del radio efectivo  $R_e$  (Bouwer y Rice, 1976).

## 2.5 Variación de K con la temperatura

La temperatura de las aguas de un río es de gran importancia para muchas áreas del conocimiento, como la biología acuática, química del agua superficial y subterránea, transporte de sedimentos, transporte y difusión de contaminantes, entre otros. Debido a que la temperatura es una variable primaria en una amplia gama de temas, desde definir el hábitat para las distintas especies de peces y afectar la productividad dentro del cauce, hasta determinar la variabilidad del microclima en los

alrededores del río, se cuenta con amplia literatura acerca de los patrones y tendencias de la temperatura de un río, tanto en medios naturales como alterados (ver por ejemplo la revisión de Caissie (2006), y en el caso chileno, Link *et al.* (2013)).

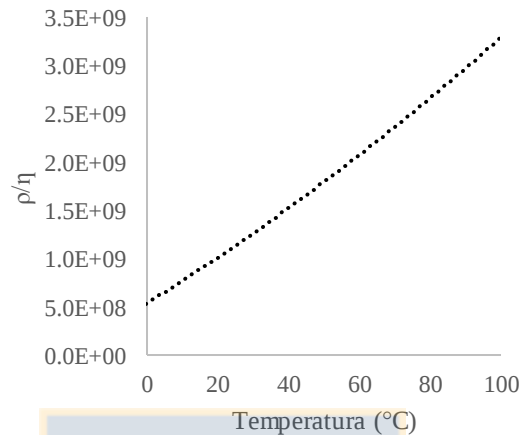


Figura 2.8 Gráfico de variación del cociente entre densidad y viscosidad cinemática del agua con la temperatura.

El intercambio hiporreico se ve afectado por la dinámica de la temperatura del agua en el río. Cartwright (1974) demostró que las zonas de intercambio en un río se pueden localizar mediante la observación de anomalías en los patrones de temperatura de los sedimentos del lecho. Lapham (1989) analizó la temperatura de numerosos esteros en el este de Estados Unidos, encontrando que puede variar entre 0°C y 25°C durante el año, y que esta variación influye en la temperatura del agua subterránea hasta 10 m de profundidad. Sus predicciones muestran que en lugares donde ocurren flujos de agua subterránea ascendentes, la profundidad de influencia de la variabilidad de la temperatura del río es menor que en lugares con flujo descendentes.

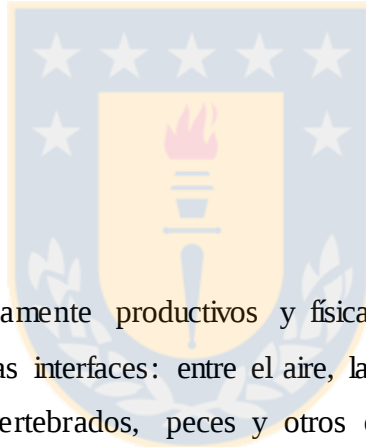
Junto a Lapham (1989), diversas investigaciones (Taniguchi, 1993; Stallman, 1963; Bundschum, 1993; Voss, 1984; Silliman y Booth, 1993, entre otros) muestran que existe una clara relación entre la temperatura del agua y los flujos de intercambio hiporreico. Luego, Constantz *et al.* (1994) demostraron el efecto de la temperatura en la variabilidad de la conductividad hidráulica de los sedimentos de un río, encontrando que ésta puede doblarse en un rango de temperatura de 0°C a

25°C. Tal variación de  $K$  se explica según la siguiente ecuación, presentada por Muskat (en Constantz *et al.*, 1994) en 1937:

$$K = k \, g \, \frac{\rho}{\eta} (T^\circ) \quad (2.6)$$

Donde  $K$  es la conductividad hidráulica saturada,  $k$  la permeabilidad intrínseca,  $g$  la aceleración de gravedad, y  $\rho$  y  $\eta$  la densidad y viscosidad cinemática del agua, respectivamente, ambas sensibles a la temperatura, por lo cual se indica la dependencia funcional de su razón,  $\rho/\eta$ .

Tanto  $\rho$  como  $\eta$  decrecen con el aumento de la temperatura, pero  $\eta$  lo hace a una tasa muchísimo mayor, lo que resulta en un aumento del cociente  $\rho/\eta$  con la temperatura, el que se grafica en la Figura 2.8.



## 2.6 Ciclos diarios

Los ríos son sistemas biológicamente productivos y físicamente dinámicos en los que ocurre constante interacción de diversas interfaces: entre el aire, la columna de agua, la zona hiporreica, sólidos suspendidos, macroinvertebrados, peces y otros organismos. La determinación de la relación entre tales interfaces es crítica para el entendimiento de los procesos biogeoquímicos que controlan el equilibrio ecosistémico en el río.

Muchos procesos biogeoquímicos que afectan a, y ocurren en los ríos se ven fuertemente controlados por los ciclos de luz solar y temperatura, por lo que la composición química del agua muestra fluctuaciones regulares y cíclicas durante una ventana diaria. En muchos casos, la amplitud del cambio de algunas de estas variables durante el ciclo diario puede llegar a valores cercanos a los que se dan a escala de tiempo anual.

Algunos procesos biogeoquímicos, tales como los que producen ciclos diarios de concentración de oxígeno disuelto (DO) y pH, han sido ampliamente estudiados debido a su importancia como

indicadores de calidad de agua en ecosistemas fluviales. Sin embargo, es en las últimas décadas, gracias al avance de la tecnología, que ha sido posible el muestreo y monitoreo que permita el entendimiento de otros parámetros que exhiben variabilidad horaria, con ciclos diarios.

Un ejemplo de lo anterior es la conductividad eléctrica (EC) del agua de un río, correlacionada con la concentración de iones disueltos, que es frecuentemente utilizada en estudios hidrológicos para estimar la tasa de mezcla de aguas de fuentes distintas (Hayashi *et al.*, 2012). Ocurren fluctuaciones diarias de EC en ríos con alta interacción con agua subterránea, o fuerte presencia mineral en los sedimentos de su lecho. Por ejemplo, Drysdale *et al.* (2003), monitorearon un estero con depositación de tufa (material de origen volcánico) en el sur este de Australia, encontrando un claro comportamiento diario en la EC y la concentración de  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{HCO}_3^-$ , con valores decrecientes durante el día y crecientes durante la noche. Esto último se atribuyó a las fluctuaciones de temperatura del agua, que cambiaba la solubilidad del  $\text{CO}_2$  en el agua.

El ejemplo anterior demuestra que los ciclos biogeoquímicos en un río están interrelacionados, debido a que las variaciones cíclicas de algunos de ellos comúnmente afectan a los demás, comportándose como un sistema donde cada variable interactúa con las demás.

## 2.7 Ciclo diario de filtración por barras mediales

El caso de la filtración de agua por barras mediales no es la excepción, debido a que depende de variables que tienen comportamientos cíclicos en ventanas diarias tales como la conductividad hidráulica, que depende de la temperatura del agua, y los gradientes hidráulicos, afectados por el ciclo hidrológico del río, que también presenta un ciclo diario en el caso de sistemas afectados por regímenes nivales o glaciales. A su vez, se espera que la detención temporánea del caudal que está siendo filtrado por la barra tenga un efecto en los otros ciclos diarios que están ocurriendo en el sistema fluvial.

Por ejemplo, Arrigoni *et al.* (2008) presentan la idea que el flujo de intercambio hiporreico puede afectar al ciclo diario de temperatura del agua en el río, debido a la diferencia de temperatura del

agua proveniente de la zona hiporreica con respecto a la del agua del cauce. Dado el caso, presentan cuatro posibles escenarios de acuerdo a la coordinación de los ciclos diarios de temperatura del agua proveniente de ambas fuentes (Figura 2.8): un primer escenario en el que se está enfriando la temperatura del agua en el cauce (a), un segundo escenario en el que se ve disminuida la amplitud del ciclo diario de temperatura debido a la cancelación de las crestas de ambos ciclos de temperatura (b), un tercer escenario en que la señal del ciclo diario de temperatura del agua en el río se ve desfasada con respecto a la original (c), y por último un escenario en el que ocurre una combinación de los anteriores, cuando los ciclos de las temperaturas del agua proveniente de ambos sistemas no tienen una clara coordinación (d).

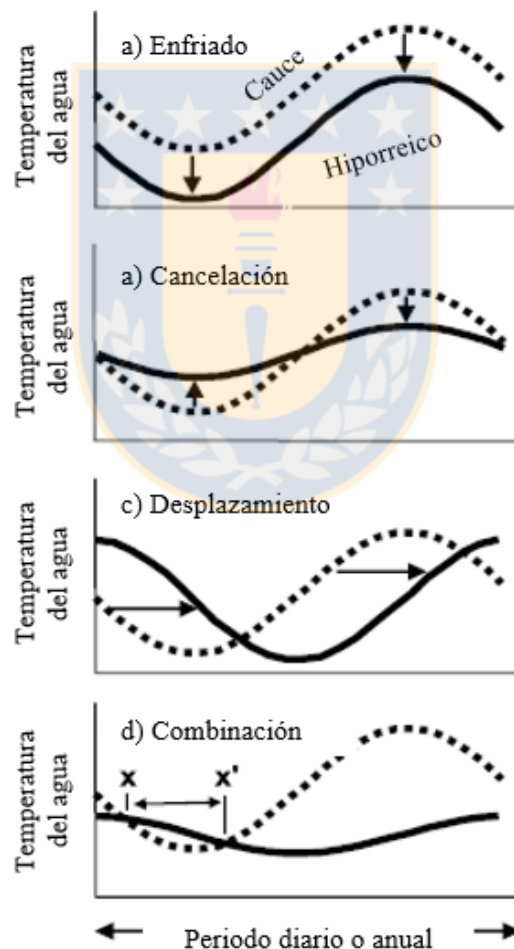


Figura 2.9 Distintos escenarios de cambio en el ciclo diario de temperatura del agua en un río, debido a su interacción con el ciclo diario de intercambio hiporreico (Arrigoni *et al.*, 2008).

## 2.8 Conclusiones

El agua de un río está conformada en distintos porcentajes por agua proveniente del sistema de agua superficial y agua proveniente del sistema de agua subterránea. Ambos sistemas están en constante interacción a través de los flujos de intercambio hiporreico.

La ocurrencia de flujos de intercambio hiporreico está controlada principalmente por la topografía del lecho, cuyos accidentes producen gradientes hidráulicos, y por la variabilidad espacial de la permeabilidad de los sedimentos a lo largo del lecho (la cual, en conjunto con la temperatura del agua, determina la conductividad hidráulica). Estos controladores pueden variar en el tiempo debido al dinamismo propio de los ríos aluviales y al efecto del ambiente. En ríos trezados, puede plantearse que los principales puntos donde ocurre intercambio hiporreico son las barras mediales; sin embargo, el flujo hiporreico bajo tales geoformas no ha sido estudiado en detalle hasta la fecha.

Conceptualmente, el intercambio hiporreico inducido por la presencia de una barra medial se puede resumir en tres etapas: una de entrada (o *downwelling*), otra de mezcla y, por último, una de salida (o *upwelling*). La etapa de entrada se ve controlada por la ocurrencia de gradientes hidráulicos y por la conductividad hidráulica de los sedimentos en el área inundada en torno a la cabeza de la barra. Estas variables presentan cambios temporales debido a su dependencia respecto de los ciclos diarios de nivel y temperatura del agua, respectivamente. A raíz de lo anterior es que se hipotetiza que la entrada de flujo hacia la barra (filtración), también podría comportarse de forma cíclica en una ventana diaria.

## CAPÍTULO 3 CONTROLADORES DEL INTERCAMBIO HIPORRÉICO

### 3.1 Introducción

En éste capítulo, tras describir el área de estudio, se presentan las metodologías generales empleadas para monitorear el flujo de intercambio hiporreico en barras mediales. Luego se da a conocer el método de fabricación y manejo de los instrumentos utilizados, y se explica la metodología de instrumentación de, y medición en, cada barra seleccionada. Por último, se explica cómo se calculó el caudal de filtración de las barras, su comportamiento durante la ventana de medición, y la posterior extrapolación espacial a un tramo de cada uno de los ríos en estudio, asumiendo igual comportamiento de todas las barras mediales en el tramo.

### 3.2 Descripción del área de estudio

El área de estudio corresponde a la parte alta de las cuencas de los Ríos Ibáñez y Huiña (Figura 3.1), ubicados en la hoya del Lago General Carrera, Región de Aysén. El Río Ibáñez nace de los glaciares del volcán Hudson (Figura 3.2.a) desde donde se extiende 92 km, drenando una cuenca de 2530 km<sup>2</sup> para luego desembocar al Lago General Carrera. El Río Huiña (Figura 3.2.b), por otra parte, corresponde a un tributario del Murta, que recorre 20.5 km aproximadamente, desde su nacimiento hasta su confluencia, desagando un área de 223 km<sup>2</sup>. Ambos ríos presentan un régimen de caudales pluvio-nival, con cimas de caudales tanto en invierno como en primavera, debido a ciclos de deshielo y a la ocurrencia de lluvias. En cuanto a información fluviométrica, la DGA opera dos estaciones en el río Ibáñez, una antes de su confluencia con el río Cajón, que sólo cuenta con información de nivel de agua, y otra antes de su desembocadura, la cual, además de disponer de información de nivel de agua, tiene datos de caudal y temperatura del aire. No se cuenta con información fluviométrica histórica para el río Huiña.

Morfológicamente, ambos ríos son de lecho de grava, siendo el Huiña trenzado en su totalidad, y el Ibáñez divagante hasta aguas arriba del Cajón, desde donde tiene un comportamiento trenzado.

Ambos presentan barras mediales como unidades morfológicas y han sido afectados, en distinto grado, por las repetidas erupciones del volcán Hudson. El río Ibáñez fue fuertemente impactado por la deposición de cenizas (tamaños de arena a grava) y piedra pómez, resultado de las erupciones de 1971 y 1991, encontrándose depósitos de tefra entre sus sedimentos (Figura 3.3). Este material tiene una densidad baja con respecto al material original del río, lo que probablemente tiene un efecto directo en las propiedades hidráulicas y físico-químicas del lecho, tales como su porosidad, permeabilidad, morfología de barras y concentración de distintos elementos. En promedio, el río Huiña tiene una granulometría más gruesa que el Ibáñez, y casi no presenta cenizas en sus sedimentos debido a que estuvo más alejado de la pluma de depositación de las erupciones del volcán. De esta manera, el estudio de estos ríos tiene como propósito secundario la comparación entre dos sistemas, uno fuertemente afectado por las erupciones y otro sin mayores efectos.

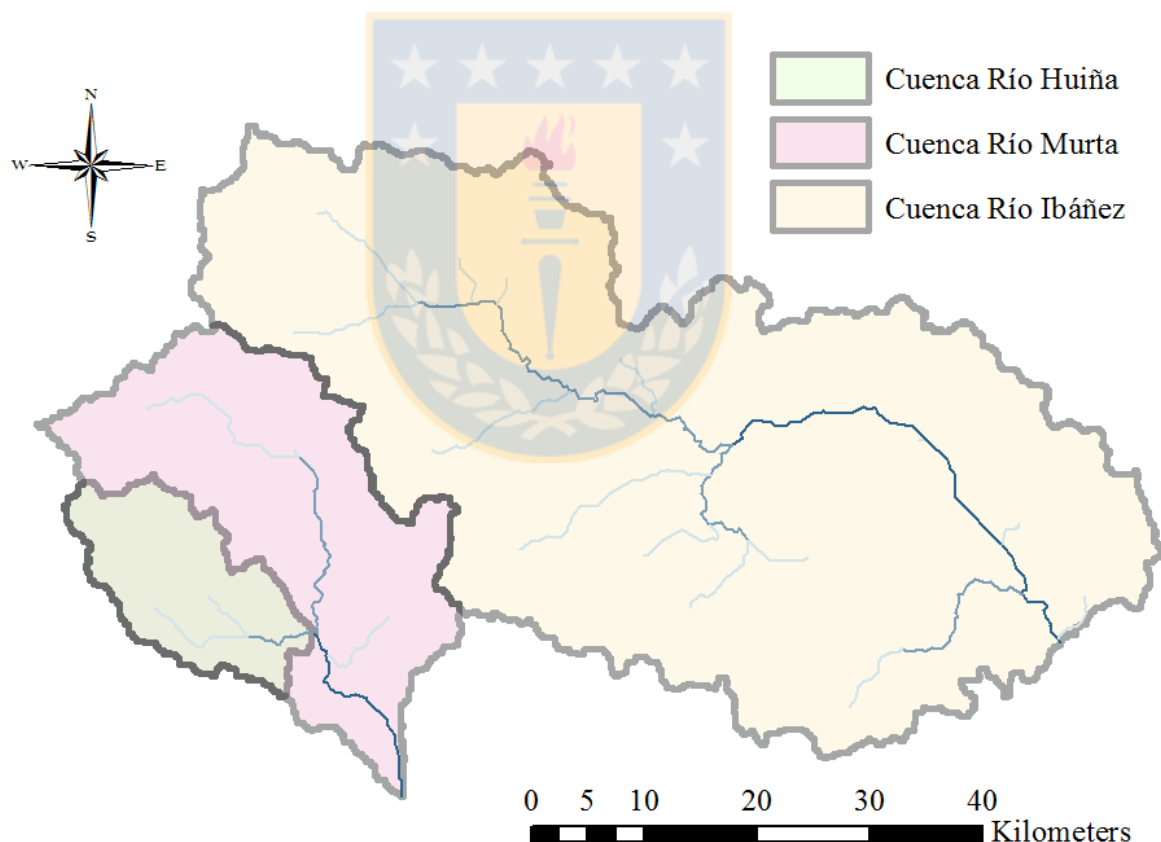
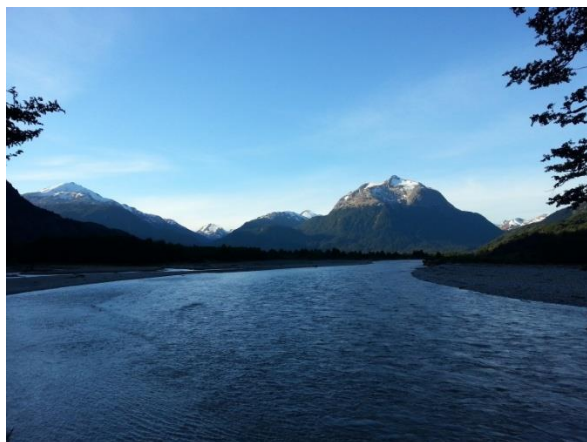


Figura 3.1 Área en estudio con las cuencas de los ríos de interés delimitadas.



(a) Río Ibáñez



(b) Río Huiña

Figura 3.2 Fotos de tramos de ríos en estudio, mirados hacia aguas arriba.

Para el estudio, se seleccionaron dos barras mediales en el río Ibáñez, una de un tamaño representativo de las barras en el río, y otra más pequeña, que fuese claramente unitaria, es decir, formada durante un solo evento de crecida, y por ende de deposición. Por otra parte, se escogió una barra en el río Huiña, que representase las condiciones promedio para ese cauce. Las tres barras se instrumentaron para la medición de sus propiedades hidráulicas y físico-químicas, y su posterior comparación.



Figura 3.3 Estratos sedimentarios en riberas del río Ibáñez, con presencia de tefra volcánica.

### 3.3 Instrumentación de las barras seleccionadas

Se determinó que los principales controladores del flujo de intercambio hiporreico producido por el efecto de una barra medial son: (1) los gradientes hidráulicos verticales (GHV), (2) la conductividad hidráulica saturada de los sedimentos de la barra ( $K_v$ ) y (3) el área de inundación de la barra ( $A_a$ ), los cuales se pueden determinar a partir de la medición de las siguientes variables: (1) la posición del nivel freático y de los niveles piezométricos a distintas profundidades, así como (2) la permeabilidad, en distintas ubicaciones de las barras seleccionadas, (3) la cota del agua en el río aguas arriba de las barras instrumentadas, (4) la temperatura del agua en el río y (5) la topografía de cada barra, así como (6) el comportamiento del área inundada.

Las tres primeras variables se midieron en mini-piezómetros a distintas profundidades, agrupados en nidos (Figura 3.4), en una malla que cubrió uniformemente la superficie de cada barra.

#### 3.3.1 Fabricación e hincado de los mini-piezómetros

Los mini-piezómetros fueron fabricados a partir de tubos de PVC de 2.5 cm de diámetro interno, cuyos últimos 10 cm fueron perforados con 36 orificios de 0.5 cm de diámetro, y su fondo tapado. Se utilizaron distintos largos de tubos para medir a las profundidades previstas, dejando 25 cm sobre la superficie de la barra para evitar que les entrase agua superficial o sedimentos transportados por el río, en caso de ocurrir una crecida (Figura 3.5).

Su hincado se realizó utilizando el dispositivo propuesto por Baxter *et al* (2003), que consiste en una barra interna de acero de  $\frac{3}{4}$  pulgadas de diámetro y de 150 cm de largo y un tubo o camisa de acero de igual longitud, con una argolla soldada en su extremo superior y una cabeza de acero macizo. El proceso de hincado se muestra en la Figura 3.5: mediante martilleo manual se hincó el tubo de acero con la barra en su interior hasta la profundidad deseada (A), luego se extrae la barra interna (B), se inserta el piezómetro (C), y finalmente se extrae la camisa (D). El hincado se realizó martillando con mazos de 8 y 10 libras, trabajando entre 5 y 30 min por mini-piezómetro.



Figura 3.4 Fotografía de nido con cuatro mini-piezómetros, instalado en una de las barras del río

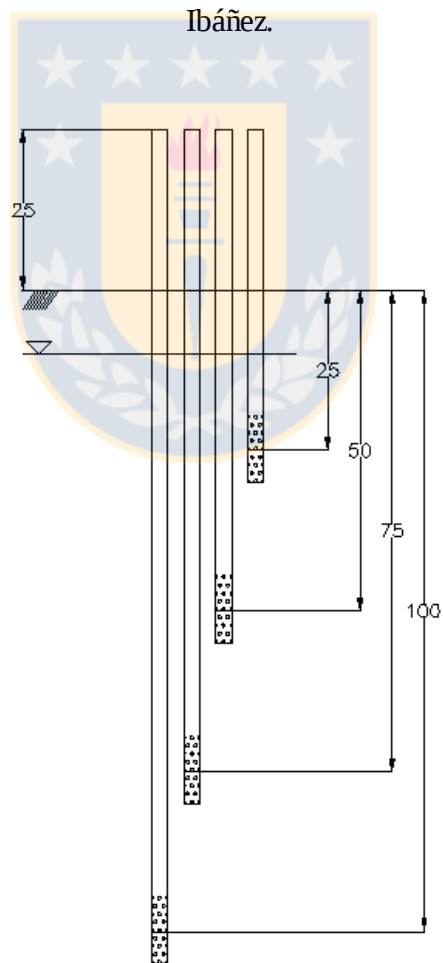


Figura 3.5 Esquema de nido con cuatro mini-piezómetros, instalado en una de las barras del río Ibáñez (distancias en cm).

### 3.3.2 Ubicación de los nidos de mini-piezómetros

Se seleccionaron dos barras mediales en el río Ibáñez (Barras N°1 y N°2) y una en el río Huiña (Barra N°3), las que fueron muestreadas con una malla de nidos, cada uno ya sea con tres, cuatro o cinco mini-piezómetros instalados a 25, 50, 75, 100 o 125 cm con respecto a la superficie de terreno de cada barra. Los detalles de la geometría de cada barra se encuentran en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1 Geometría de las barras seleccionadas

| <b>Geometría</b>       | <b>Barra N°1</b> | <b>Barra N°2</b> | <b>Barra N°3</b> |
|------------------------|------------------|------------------|------------------|
| Largo máximo (m)       | 187              | 40               | 151              |
| Ancho máximo (m)       | 32               | 12               | 37               |
| Área (m <sup>2</sup> ) | 5135             | 377              | 4583             |

En el caso de la Barra N°1, se instalaron 12 nidos, los que se distribuyeron divididos en una malla fina, de seis nidos en la cabeza de la barra, distanciados a 7.5 m aproximadamente en sentido transversal, y a 10 m en sentido longitudinal a la barra, y otros seis nidos en una malla más gruesa, cada 10 m en sentido transversal y cada 30 m en sentido longitudinal a la barra (Figura 3.6.a). Todos los nidos de esta barra quedaron conformados por cuatro mini-piezómetros, salvo los tres primeros, en su cabeza, que contienen cinco.

Tabla 3.2 Resumen de mini-piezómetros instalados en cada barra.

| <b>Nidos y profundidad</b>                                  | <b>Barra N°1</b> | <b>Barra N°2</b> | <b>Barra N°3</b> |
|-------------------------------------------------------------|------------------|------------------|------------------|
| Número de nidos                                             | 12               | 38               | 20               |
| Número de mini-piezómetros por nido                         | 5 o 4            | 4                | 3                |
| Número de piezómetros en total                              | 51               | 148              | 60               |
| Profundidades de medición c/r a superficie del terreno (cm) | 25/50/75/100/125 | 25/50/75/100     | 25/50/75         |
| Malla fina (x/y) (m)                                        | 7/10             | 1/2.5            | 4/7              |
| Malla gruesa (x/y) (m)                                      | 10/30            | 2.5/5            | 7/27             |

La Barra N°2 se cubrió con 38 nidos, distribuidos en una malla gruesa de aproximadamente 5 m por 2 m, en los sentidos longitudinal y transversal, respectivamente. La grilla se afinó en los

primeros 10 m de la barra (en su cabeza, aguas arriba), resultando una malla fina de nidos de piezómetros ubicados aproximadamente cada 2.5 por 1.0 m, en los sentidos longitudinal y transversal a la barra, respectivamente (Figura 3.6.b). Todos los nidos de esta barra contienen cuatro mini-piezómetros, midiendo la carga hidráulica a 25, 50, 75 y 100 cm de profundidad con respecto a la superficie de la barra (tal como se muestra en la Figura 3.5).

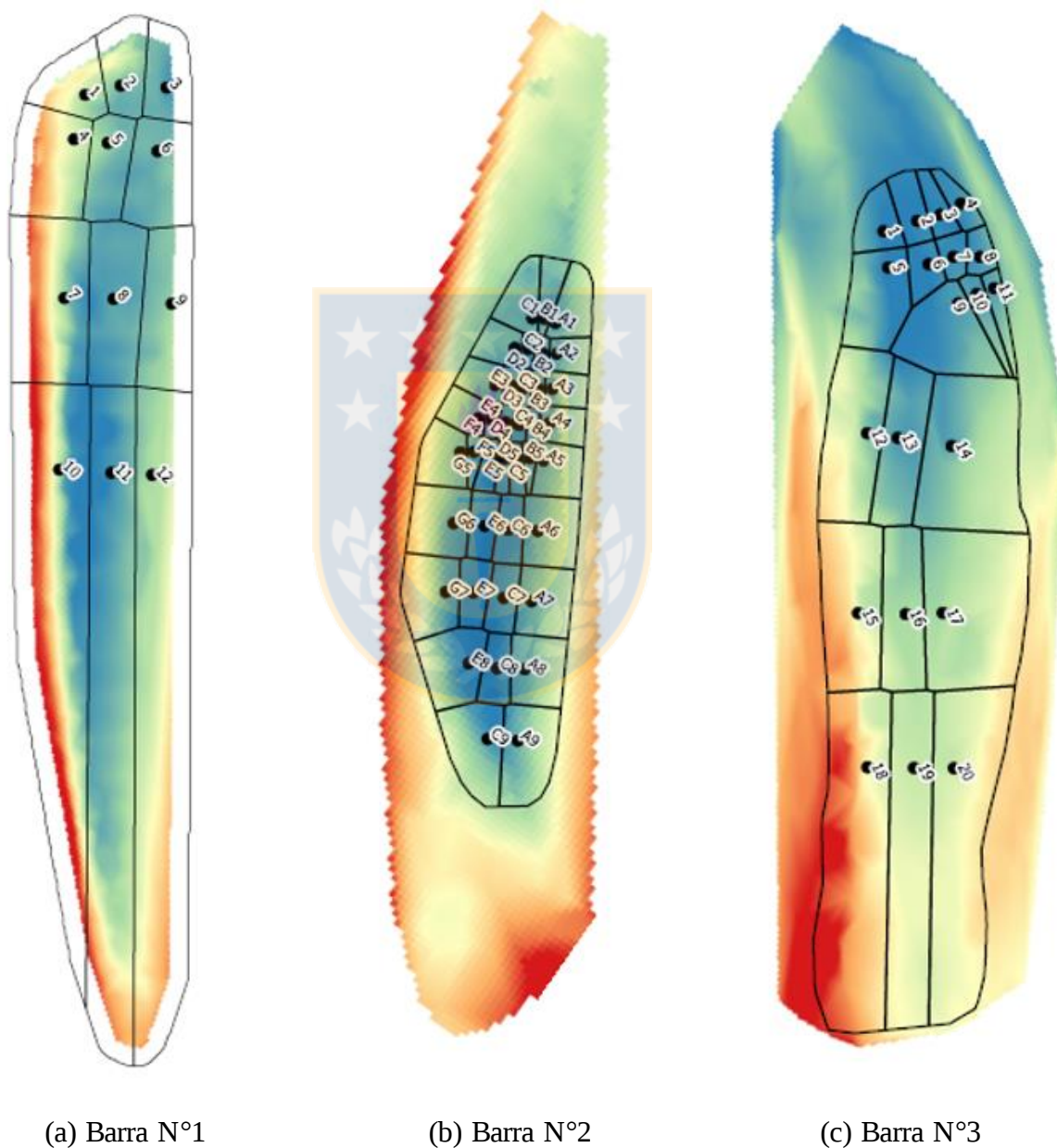


Figura 3.6 Vista en planta de las tres barras seleccionadas. El flujo va desde arriba hacia abajo en todos los casos.

En la Barra N°3 se instalaron 20 nidos de 3 piezómetros cada uno, hincados a 25, 50 y 75 cm de profundidad con respecto a la superficie de la barra. Al igual que en las barras anteriores, la malla se afinó en la cabeza de la barra, en donde se encuentran los primeros 11 nidos distanciados 6 y 8 m en sentidos transversal y longitudinal a la barra respectivamente. Los 9 nidos restantes se instalaron a 8 y 30 m de distancia entre ellos, transversal y longitudinalmente a la barra, respectivamente.

### 3.4 Metodología de medición y muestreo

La medición de la napa freática en cada nido se realizó utilizando una cinta métrica, con la cual se midió desde la cabeza (esto es, el tope superior) de cada piezómetro, por fuera de éste, hasta la superficie freática observada en el pozo excavado al centro de cada nido. Por ejemplo, para el nido mostrado en la Figura 3.4, se habría medido la distancia vertical desde el tope de cada piezómetro hasta la cota de la superficie de agua libre. Por otra parte, la altura piezométrica en cada tubo se midió utilizando un dispositivo creado por el equipo de trabajo, el cual consistió en un “tester” eléctrico, al cual se conectaron dos cables semirrígidos a sus extremos, enrollados uno sobre el otro y separados por un cm en sus extremos libres, de manera de formar un circuito abierto que se cerrase al contacto con el agua, dentro del piezómetro a medir (Figura 3.7).

Las distintas mediciones efectuadas en cada barra a lo largo del ciclo diario se resumen en la Tabla 3.3, en la que se muestra el número de mediciones por barra, como también la fecha y hora en que se inició cada ronda de medición.

Cabe mencionar que en el caso de la Barra N°2, muestreada con el mayor detalle espacial, se dispone de una ventana de medición de sólo 15 h, debido a la ocurrencia de una crecida mayor de lo previsto, la cual obligó al equipo a abandonar las mediciones, por motivos de seguridad, no pudiendo registrarse el ciclo diario completo.



Figura 3.7 Equipo realizando medición de niveles piezométricos en nido de mini-piezómetros en Barra N°1, la cual en este caso ya ha sido inundada por el pulso creciente de caudal.

Tabla 3.3 Resumen de mediciones realizadas en cada barra.

| Medición                     | Barra N°1      | Barra N°2       | Barra N°3     |
|------------------------------|----------------|-----------------|---------------|
| Número de mediciones         | 5              | 6               | 9             |
| Ventana de medición (h)      | 34.5           | 15              | 29            |
| Período entre mediciones (h) | 4.5 a 18.5     | 3               | 2.5 a 6       |
| Medición N°1                 | 2/4/2013 20:00 | 2/10/2013 11:00 | 2/20/13 15:00 |
| Medición N°2                 | 2/5/2013 0:30  | 2/10/2013 14:00 | 2/20/13 21:00 |
| Medición N°3                 | 2/5/2013 10:00 | 2/10/2013 17:00 | 2/20/13 23:30 |
| Medición N°4                 | 2/5/2013 17:00 | 2/10/2013 20:00 | 2/21/13 2:30  |
| Medición N°5                 | 2/6/2013 11:30 | 2/10/2013 23:00 | 2/21/13 8:30  |
| Medición N°6                 | -              | 2/11/2013 2:00  | 2/21/13 11:00 |
| Medición N°7                 | -              | -               | 2/21/13 14:30 |
| Medición N°8                 | -              | -               | 2/21/13 18:30 |
| Medición N°9                 | -              | -               | 2/21/13 20:00 |

### 3.4.1 Cálculo de los gradientes hidráulicos verticales

Teniendo el registro, para cada medición, de la ubicación de la napa freática en cada nido y los distintos niveles piezométricos para cada piezómetro del nido, se obtuvieron los gradientes hidráulicos verticales (GHV) en cada uno de éstos, calculados como los cuocientes entre la

diferencia de altura piezométrica entre profundidades sucesivas y la diferencia entre las profundidades que se están comparando. De igual forma, conociendo el signo para el GHV entre el nivel freático y la cota piezométrica a la profundidad de interés, se puede determinar si está ocurriendo infiltración desde el agua superficial a la zona hiporreica (*downwelling*) o, al contrario, está exfiltrando desde la zona hiporreica hacia el agua superficial (*upwelling*, véase la Figura 3.8).

Para la determinación del caudal entrante a la barra, desde el agua superficial del río, se utiliza el GHV entre la superficie de agua en el río, o nivel de la napa freática en la barra, según esté inundada o no la superficie de la barra, respectivamente, y el mini-piezómetro más superficial en cada nido (ubicado a 25 cm de profundidad con respecto a la superficie de la barra). En la Figura 3.9 se esquematiza el método utilizado para la estimación de los GHV a partir de los datos tomados en terreno; en ésta, NT corresponde al nivel del terreno en pozo (elevación de la superficie de la barra en el fondo del pozo excavado para medir el nivel freático), NM corresponde al nivel de medición (profundidad a la cual fue instalado el mini-piezómetro), NF corresponde al nivel de la napa freática en el nido, y NP al nivel piezométrico registrado en el mini-piezómetro. Teniendo estos datos, el GHV se puede calcular según:

$$\text{GHV} = \frac{\Delta h}{\Delta l} = \frac{\text{NF} - \text{NP}}{\text{NT} - \text{NM}}, \quad (3.1)$$

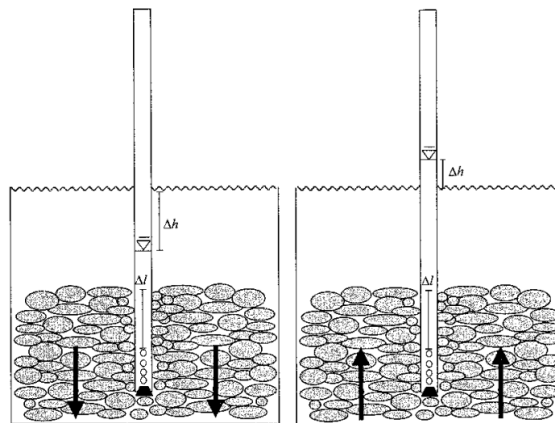


Figura 3.8 Esquema conceptual del muestreo del gradiente hidráulico vertical propuesto por Baxter *et al* (2003).

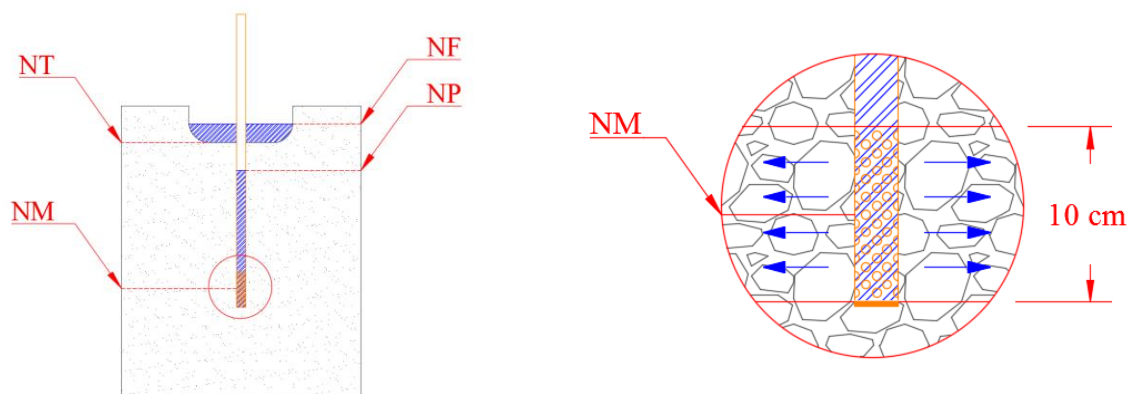


Figura 3.9 Esquema del método utilizado para la estimación de los GHVs, con detalle de los últimos 10 cm de mini-piezómetro.

### 3.4.2 Obtención de la conductividad hidráulica vertical

La conductividad hidráulica horizontal ( $K_r$ ) de los sedimentos aledaños a la camisa de cada mini-piezómetro se calculó utilizando la ecuación CHIT, propuesta por Cardenas y Zlotnik (2003). Ésta permite determinar  $K_r$  mediante una prueba *in-situ* de infiltración a carga constante, tal cual se desarrollaron los ensayos en la campaña de terreno.

Una vez obtenido  $K_r$ ,  $K_v$  fue estimado asumiendo isotropía, o sea  $K_v = K_r$ , tal como sugieren Burger y Belitz (1997).

Se realizaron pruebas de infiltración a carga constante, midiéndose repetidas veces el tiempo que demoraban en pasar  $900 \text{ cm}^3$  de agua a través de cada mini-piezómetro, hasta que tal tiempo tendiera a un valor constante, asegurando la saturación de los sedimentos y descontando la posible influencia de burbujas de aire atrapadas entre ellos (Figura 3.10). Para esto se construyó un instrumento consistente en un recipiente cilíndrico más ancho que el piezómetro, en el cual se vertió poco a poco los  $900 \text{ cm}^3$  de agua, medidos anteriormente en otro recipiente, cuidando de mantener la cota de agua constante dentro del recipiente. Esta prueba de infiltración se realizó para las Barras N°1 y N°3. De esta manera, se contó con un valor de  $K_v$  para cada una de las ubicaciones en estas barras.



Figura 3.10 Instrumento utilizado para la prueba de infiltración.

El ciclo diario de  $K_v$  se obtuvo midiendo la variación de la temperatura del agua en el río, conocidos sus efectos sobre la densidad y la viscosidad cinemática del agua (Figura 2.7).

Para disponer de un registro continuo de la temperatura del agua y otras variables de interés, se instaló una estación fluviométrica temporal, inmediatamente aguas arriba de cada barra, equipada con sensores capaces de medir: temperatura del agua, presión de la columna de agua, oxígeno disuelto y conductividad eléctrica, en intervalos de 10 minutos.

### 3.4.3 Obtención del área de inundación de la barra

Para determinar el caudal que está siendo filtrado por la barra es necesario determinar un área de aporte a la barra, es decir, aquella área por la cual habría ingreso de agua superficial desde el cauce hacia la zona hiporreica, donde se desarrollen gradientes hidráulicos verticales que impulsen el *downwelling*. Lo lógico sería asumir que el área aportante corresponda al área inundada de la barra, donde según lo encontrado por Oñat (2014), se desarrollan los gradientes hidráulicos verticales que dan lugar al intercambio hiporreico. Sin embargo, mediciones realizadas en terreno por Cisternas (2011) y Meier *et al.* (2012, 2014), observaron gradientes hidráulicos verticales significativos hasta un 15% del largo de la barra hacia aguas arriba. A raíz de esto, se definió que el área aportante corresponde al área en planta sumergida de la superficie de la barra, más un “*buffer*” de un 15%

hacia afuera de ésta. Esto se muestra en la Figura 3.11, en la cual el área coloreada corresponde a la topografía de la barra, el sector rojo corresponde al área inundada, y el azul al área seca de la barra, para cada medición. Por otra parte, el área encerrada por el polígono de borde negro corresponde al área aportante a la barra, la cual incluye el “buffer” discutido anteriormente.

Una vez determinada el área total de aporte para cada barra, se utilizaron polígonos de Thiessen para dividirla, asignándole un área de influencia a cada nido de mini-piezómetros ( $A_p$ ), y así poder calcular el caudal filtrado en cada una de éstas, utilizando la Ecuación 3.2.

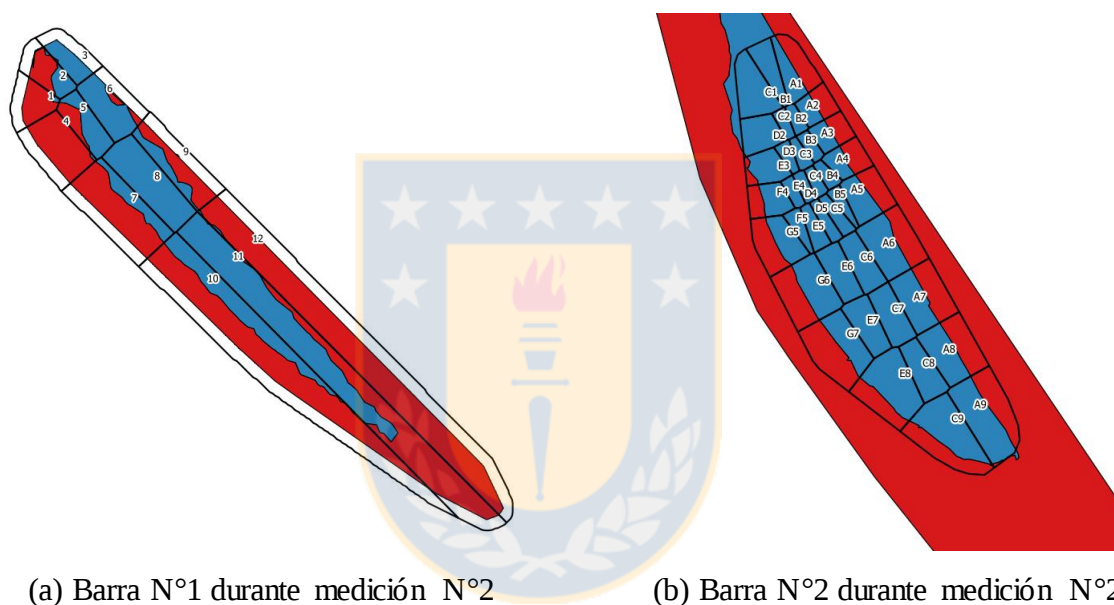


Figura 3.11 Ejemplo de obtención de área de inundación; en rojo se muestra la parte inundada de la barra, y en azul la parte seca.

### 3.4.4 Cálculo del caudal de filtración de cada barra en estudio

Una vez obtenidos GHV,  $K_v$  y  $A_p$  para cada nido y medición, asumiendo que la infiltración ocurre verticalmente desde el sistema de agua superficial hacia la barra (lo cual es razonable, debido a que la barra es prácticamente plana), el caudal de filtración sobre el área de influencia de cada nido ( $Q_p$ ) puede calcularse según:

$$Q_p = K_v \text{ GHV } A_p , \quad (3.2)$$

Luego, el caudal total filtrado por la barra, para cada medición, se obtiene como la sumatoria de los caudales filtrados por cada una de las áreas de influencia que conforman el área aportante a la barra, siempre que éstas estén contribuyendo:

$$Q_b = \sum_{i=1}^{i=n} Q_{p_i} , \quad (3.3)$$

Donde  $Q_b$  corresponde al caudal filtrado por la barra,  $Q_{p_i}$  al caudal filtrado por el área aportante asociada a cada nido  $i$  de la barra, y  $n$  es el número de nidos inundados y con GHV positivo para la medición respectiva.

### 3.4.5 Extrapolación temporal de los resultados obtenidos

Relacionando las variables de control, se encontró que tanto los valores de los gradientes hidráulicos verticales promedio ( $\text{GHV}_{\text{prom}}$ ), es decir, el promedio de los GHVs superficiales de todos los piezómetros con GHV positivo dentro del área inundada de la barra para cada medición, así como el área sumergida o inundada de cada barra ( $A_i$ ), pueden estimarse con muy buenos coeficientes de determinación  $R^2$  como funciones lineales del nivel de agua en el río, medido aguas arriba de la barra (WL).

La Figura 3.12 muestra que para las Barras N°1 y N°2, los GHV promedio tienden a decrecer en forma lineal con el aumento del nivel de agua en el río (WL), mientras que para la barra N°3 tienden a aumentar. Para todas las barras se observa que el área inundada aumenta linealmente con la cota del agua en el río.

Usando estas ecuaciones de regresión, en las que se explica el GHV promedio y el área inundada en función del nivel del agua, los resultados obtenidos durante cada ventana de medición pueden

ser extrapolados a otros instantes en los que no se midió directamente estas variables, pero se cuenta con datos del nivel de agua en el río (WL) y temperatura del agua.

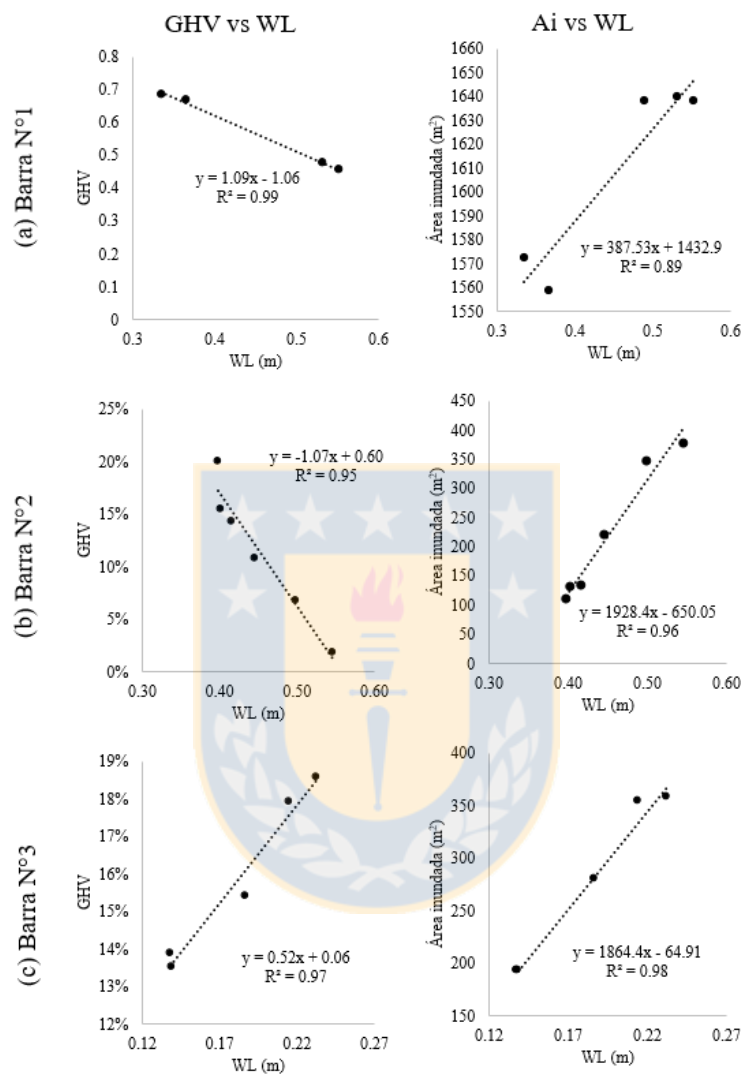


Figura 3.12 Comportamiento de los gradientes hidráulicos verticales promedio (izq.) y del área inundada (der.) con el nivel de agua en el río medido aguas arriba de cada barra (WL).

### 3.4.6 Extrapolación espacial a un tramo de río

Para extrapolar los resultados obtenidos en una barra a un tramo de río, se realizó un análisis utilizando GoogleEarth, en el cual se identificaron las barras mediales, así como el área de la

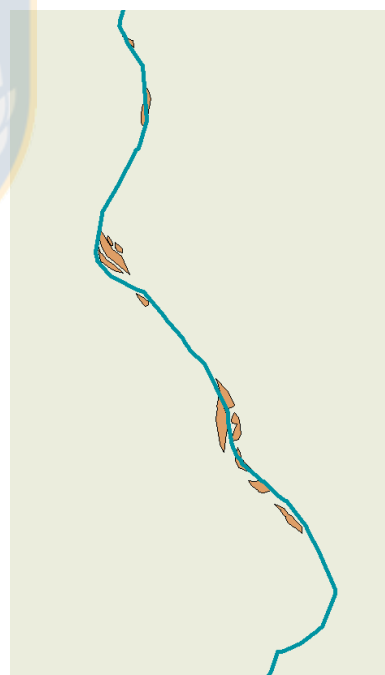
planicie de inundación del río en el tramo, las que luego fueron demarcadas y exportadas a ArcGIS para su procesamiento (Figura 3.13). Una vez georreferenciadas, se obtuvo el tamaño promedio de las barras mediales en el tramo, el área total de barras mediales en el tramo, y qué porcentaje de la planicie de inundación del tramo corresponde a barras mediales, entre otros aspectos de interés.

Ahora, asumiendo:

1. Que todas las barras mediales consideradas para la extrapolación se inundan de manera similar a la barra de referencia medida en terreno, y que además el área inundada varía en el tiempo en función del nivel de agua en el río.
2. Un mismo valor de  $K_v$  para todas las barras mediales en el tramo de interés, igual al  $K_v$  promedio de todos los piezómetros más superficiales de la barra instrumentada en el tramo.
3. Que el comportamiento de los GHVs superficiales es igual en todas las barras mediales consideradas para la extrapolación, y varía según la relación entre GHVs y el nivel de agua en el río encontrada para la barra de referencia medida en terreno.



(a) Selección de barras mediales en Google Earth



(b) Importación de barras mediales seleccionadas a ArcGIS

Figura 3.13 Análisis de barras mediales para el tramo de interés, en Google Earth; (a) ejemplo del río Huiña; (b) importación de barras mediales desde Google Earth a ArcGIS.

Se tendrá que el caudal total de agua filtrado por las barras mediales en el tramo de río en estudio puede calcularse como:

$$Q_t = GHV_t(WL) K_{v_t}(T) A_{b_t}(WL) , \quad (3.4)$$

Donde  $A_{b_t}$  corresponde al área total aportante de barras mediales en el tramo de interés en un cierto momento, la que se calcula como:

$$A_{b_t} = A_i(\%) A_t , \quad (3.5)$$

En que  $A_t$  es el área total de barras mediales consideradas en el tramo, y  $A_i$  (%) es el porcentaje de área aportante (inundada) en función del nivel de agua en el río en cierto momento, calculado de acuerdo a lo observado en la barra de referencia.

### 3.5 Análisis de sensibilidad

Para evaluar la importancia individual de cada una de las variables que controlan el proceso de filtración en barras mediales, se realizó un análisis de sensibilidad, analizando el efecto que tiene la variación normal de temperatura y de nivel de agua en el río, en una ventana diaria, sobre los valores de  $K_v$ ,  $GHV$  y  $A_i$ , así como en el caudal de filtración final. Esto se hizo para cada una de las variables por separado, asumiendo que las demás se mantienen constantes.

### 3.6 Conclusiones

Se instrumentaron tres barras mediales, dos en el río Ibáñez, y una en el río Huiña, las cuales se cubrieron con mallas de 12, 38 y 20 nidos de mini-piezómetros, respectivamente, cada uno de ellos con 3, 4 o 5 mini-piezómetros.

Se muestreó la posición de la napa freática y de los niveles piezométricos en cada nido y sus piezómetros, cada tres horas aproximadamente, durante una ventana diaria. Con estos datos se

calcularon los gradientes hidráulicos verticales (GHV) en la cabeza de cada barra (área inundada de la barra).

La conductividad hidráulica vertical ( $K_v$ ) se asumió igual a la conductividad hidráulica horizontal ( $K_r$ ), la cual a su vez se obtuvo mediante la aplicación de la fórmula CHIT de Cardenas y Zlotnik (2003) a los datos obtenidos de una prueba de infiltración a carga constante, realizada en cada piezómetro.

Mediante la diferencia el nivel de agua sobre la superficie de la barra, con la superficie de terreno, se determinó el área inundada ( $A_i$ ) de cada barra para cada medición, con respecto a la cual se definió un área de aporte de cada barra ( $A_b$ ) y nido de piezómetros ( $A_p$ ).

Con el GHV,  $K_v$  y  $A_p$  de cada nido de piezómetros, se calculó el caudal de filtración para cada nido y su área de influencia, para cada medición, utilizando una adaptación de la ecuación que describe la ley de Darcy. Luego, el caudal de filtración de cada barra ( $Q_b$ ) se obtuvo mediante la sumatoria de los  $Q_p$  contribuidos por cada piezómetro dentro del área aportante de cada barra.

Se descubrió que el nivel de agua en el río (WL) explica en buena medida la variabilidad de GHV y  $A_b$ . Mediante regresiones se realizó entonces la extrapolación temporal de estas variables fuera de la ventana de medición, para la cual se contaba con datos de WL.

De igual manera, fue posible extrapolar espacialmente los resultados obtenidos en cada barra, escalándolos a un tramo de río, mediante la determinación del área total de barras mediales en el tramo, y el supuesto de que éstas presentan un comportamiento similar a la barra estudiada, perteneciente al tramo.

## CAPÍTULO 4 CICLOS DIARIOS DE FILTRACIÓN EN BARRAS MEDIALES

### 4.1 Introducción

En este capítulo se muestran los resultados con respecto a: los gradientes hidráulicos verticales (GHV) calculados para cada nido de piezómetros; la conductividad hidráulica vertical ( $K_v$ ); el área aportante de cada barra ( $A_b$ ); y el caudal de filtración calculado para cada barra ( $Q_b$ ). De igual manera, se demuestra que estas variables tienen un comportamiento cíclico durante el día, y se grafica la relación entre los ciclos diarios de GHV y  $A_b$  y el nivel de agua en el río (WL), con las cuales se realiza una extrapolación de los resultados fuera de la ventana de medición. Con la ayuda de los *softwares* GoogleEarth y ArcGIS, se logra la extrapolación espacial de los resultados obtenidos para cada barra a sus respectivos tramos de río.

### 4.2 Gradientes hidráulicos verticales

Con motivo de estimar el caudal que están filtrando las barras mediales, se determinó que los gradientes hidráulicos de interés serían los calculados entre el agua superficial en el río y el piezómetro más superficial de cada nido (instalado a 25 cm con respecto a la superficie de terreno de la barra). Ya que en esta tesis el concepto de filtración por barras mediales corresponde al caudal de entrada hacia la barra, desde el cuerpo de agua superficial (lo que corresponde a fenómeno de *downwelling*), el valor de GHV promedio correspondiente a cada medición fue calculado utilizando sólo los nidos dentro del área inundada de la barra, sin considerar los GHVs negativos (que describirían casos de *upwelling*).

Los GHVs observados en la Barra N°1 se mueven entre un mínimo de 3% en el nido N°4 durante la segunda medición, y un máximo de 111% en el nido N°6 durante la tercera medición. En esta barra se observa que todos los GHVs son positivos, y además que ocurren valores mayores al 100%,

lo que implica que, en algunos nidos, la diferencia de elevación entre el nivel de agua y el nivel piezométrico fue mayor a los 25 cm de profundidad a los que fue instalado el piezómetro. Estudiando el comportamiento de los GHVs promedio en las distintas mediciones, observamos que se mueven entre un 45% para la primera medición y un 68% para la tercera medición, realizada 14 horas después.

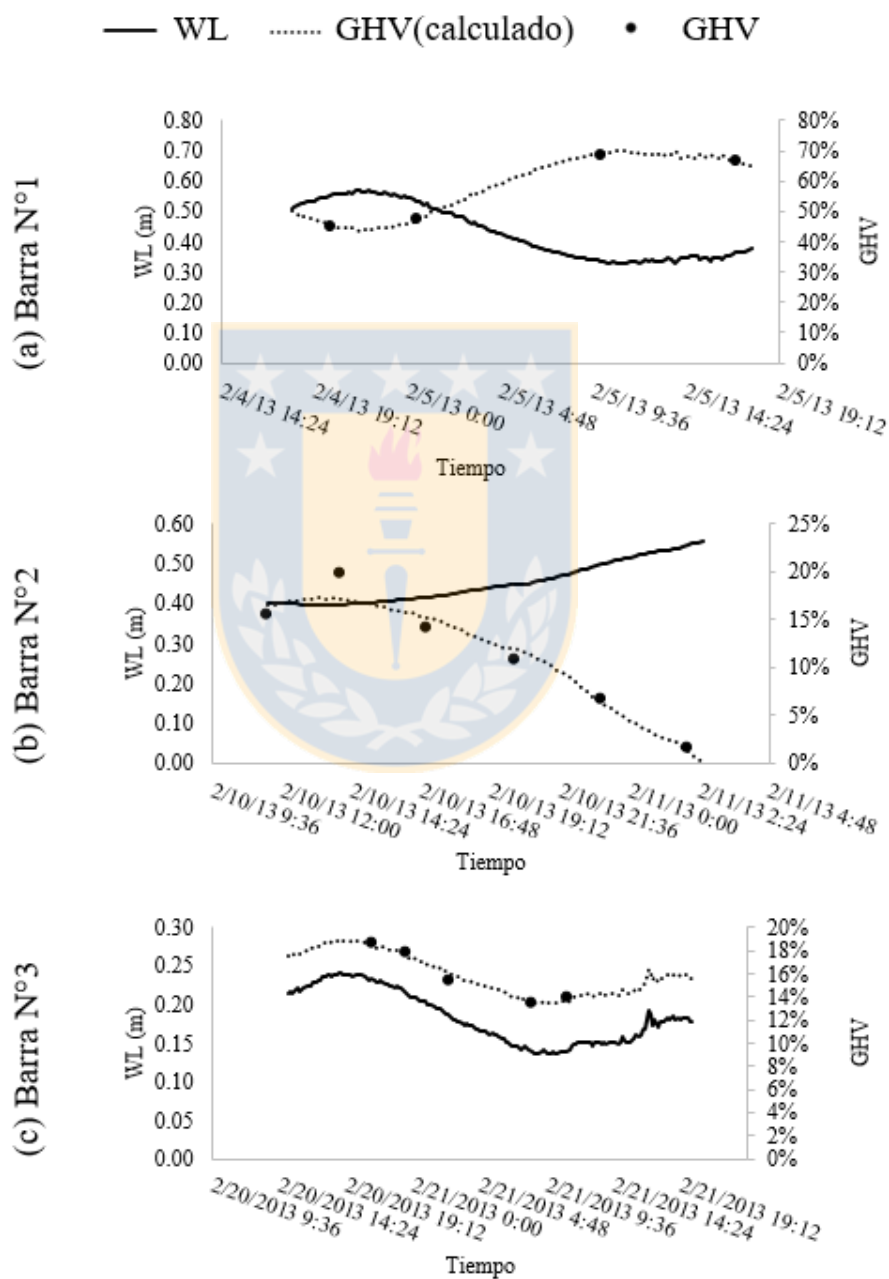


Figura 4.1 GHVs promedio en cada barra, para las distintas mediciones.

La Figura 4.1 muestra la variación temporal de los GHVs promedio medidos en terreno (mostrados con puntos), los GHVs promedio calculados en función de WL (mostrados con línea punteada) y del nivel de agua en el río (WL, mostrado con línea continua), durante la ventana de medición, para cada una de las tres barras.

La Barra N°2 es de dimensiones mucho menores que la N°1; en este caso, los GHVs observados fluctúan entre valores negativos en los nidos ubicados en la cola de la barra, indicando que son zonas de exfiltración o *upwelling*, donde hay un caudal saliente desde la barra hacia el agua superficial del río, y un máximo de 46% en el nido A1 durante la medición N°2, ubicado en la cabeza de la barra. El GHV promedio en esta barra varía entre un 2% durante la última medición, y un 20% durante la segunda medición. El caso de esta barra es particular, debido a que las mediciones se realizaron durante una crecida que terminó cubriéndola totalmente, situación por la que no se pudo medir el receso de la crecida, ya que la barra tuvo que abandonarse por motivos obvios de seguridad.

En el caso de la Barra N°3 también se registraron GHVs negativos, pero de magnitudes muy pequeñas, principalmente en la cola de la barra, la cual nunca se inundó. Se registró un GHV máximo de 30% durante la última medición en el nido N°3, localizado en la cabeza de la barra. Los GHVs promedio fluctúan entre un 14 y un 20% durante la ventana de medición.

### 4.3 Conductividad hidráulica vertical

Las pruebas de infiltración para determinar la conductividad se hicieron sólo en las Barras N°1 y N°3. Tanto los tiempos de infiltración como el caudal correspondiente, así como los valores de conductividad hidráulica calculados para los piezómetros más superficiales de cada nido se presentan en las Tablas A.4.3.1 a A.4.3.5 en el anexo de tablas, al final de esta tesis.

En la Tabla A.4.3.2, se observa que para el caso de la Barra N°3 hay ciertos nidos sin datos, ya que la prueba de infiltración no se pudo realizar exitosamente. En estos piezómetros, el agua demoraba mucho en bajar, lo que pudo deberse a la obstrucción de sus orificios, o a la presencia de algún estrato impermeable justo en el lugar de instalación del mini-piezómetro. En esta investigación se decidió rellenar los datos faltantes con los valores promedio de  $K_r$  observados en cada barra.

Los valores encontrados en la Barra N°1 fluctúan entre 0.05 y 0.06 cm/s, correspondientes a 44.5 m/día y 54.9 m/día respectivamente, con un promedio de 0.06 cm/s equivalentes a 49.1 m/día, mientras que en la Barra N°3 se encontraron valores de  $K_v$  entre 0.12 y 0.16 cm/s, correspondientes a 108 y 139 m/día, con un promedio de 0.14 cm/s, equivalente a 122 m/día. Como no se realizaron pruebas de infiltración en la Barra N°2, se utilizó el promedio de  $K_v$  obtenido para la Barra N°1, ubicada en el mismo río Ibáñez, de 0.06 cm/s.

Tabla 4.1 Temperatura,  $\rho/\eta$  y porcentaje de cambio de  $\rho/\eta$  con respecto a la temperatura en que fue realizada la prueba de infiltración, para cada medición en cada barra.

| Medición | Barra N°1 |                   |                       | Barra N°2 |                   |                       | Barra N°3 |                    |                       |
|----------|-----------|-------------------|-----------------------|-----------|-------------------|-----------------------|-----------|--------------------|-----------------------|
|          | T (°C)    | $\rho/\eta$       | cambio de $\rho/\eta$ | T (°C)    | $\rho/\eta$       | cambio de $\rho/\eta$ | T (°C)    | $\rho/\eta$        | cambio de $\rho/\eta$ |
| M1       | 12.96     | $7.67 \cdot 10^8$ | 100%                  | 7.9       | $6.61 \cdot 10^8$ | 94%                   | 13.06     | $7.69 \cdot 10^8$  | 104%                  |
| M2       | 9.79      | $7.00 \cdot 10^8$ | 91%                   | 8.7       | $6.78 \cdot 10^8$ | 96%                   | 9.88      | $7.02 \cdot 10^8$  | 95%                   |
| M3       | 7.02      | $6.42 \cdot 10^8$ | 84%                   | 9.5       | $6.94 \cdot 10^8$ | 99%                   | 7.87      | $6.60 \cdot 10^8$  | 89%                   |
| M4       | 10.39     | $7.13 \cdot 10^8$ | 93%                   | 10        | $7.05 \cdot 10^8$ | 100%                  | 6.62      | $6.35 \cdot 10^8$  | 86%                   |
| M5       | 8         | $6.63 \cdot 10^8$ | 86%                   | 9.6       | $6.96 \cdot 10^8$ | 99%                   | 5.63      | $6.14 \cdot 10^8$  | 83%                   |
| M6       | -         | -                 | -                     | 8.9       | $6.82 \cdot 10^8$ | 97%                   | 7.1       | $6.44 \cdot 10^8$  | 87%                   |
| M7       | -         | -                 | -                     | -         | -                 | -                     | 9.77      | $7.00 \cdot 10^8$  | 94%                   |
| M8       | -         | -                 | -                     | -         | -                 | -                     | 11.76     | $7.42 \cdot 10^8$  | 100%                  |
| M9       | -         | -                 | -                     | -         | -                 | -                     | 10.13     | $7.076 \cdot 10^8$ | 95%                   |

Con estos resultados se dispone de un dato instantáneo de  $K_v$  asociado al área de influencia de cada nido en las distintas barras. Luego, la variación diaria de la conductividad se determina a partir de la influencia de la variación de temperatura sobre  $K_v$ , como se explicó en detalle en el Acápite 2.5. La Tabla 4.1 muestra la temperatura en el agua del río, medida inmediatamente aguas arriba de

cada barra, el cuociente entre densidad y la viscosidad específica y su respectivo cambio con la temperatura, para cada una de las mediciones.

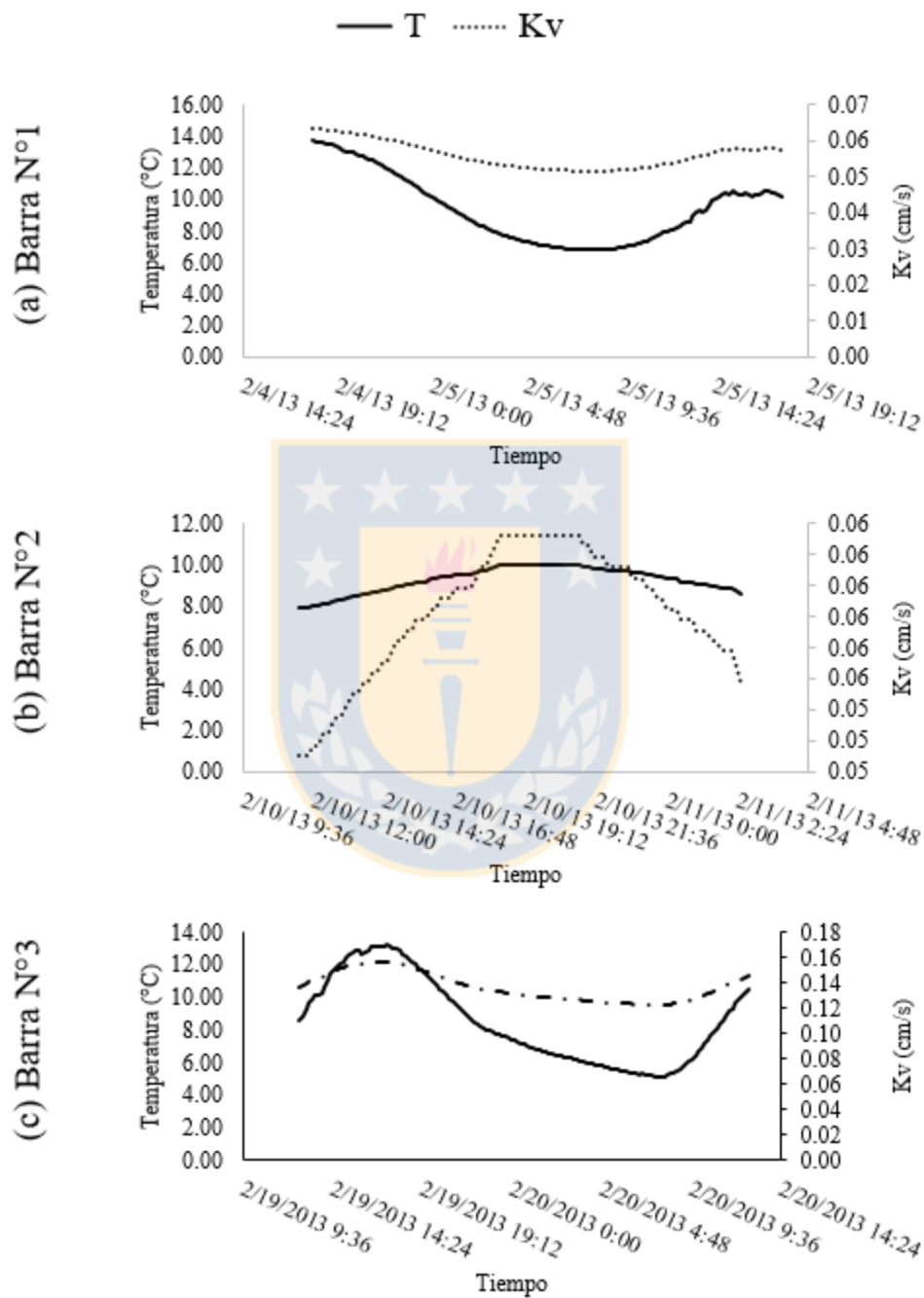


Figura 4.2 Ciclo de  $K_v$  promedio durante la ventana de medición para las barras en estudio.

La Figura 4.2 grafica el ciclo de variación de  $K_v$  promedio para cada barra, en función de la variación temporal de la temperatura aguas arriba de cada barra. Se puede apreciar que sus máximos ocurren en torno a las 18:00 horas, momento en que el agua en el cauce alcanza su mayor temperatura, y sus mínimos se alcanzan de madrugada, aproximadamente a las 5:00 horas.

#### 4.4 Área de inundación de las barras

El cálculo del caudal de filtración se realizó mediante un sistema agregado, en el que se suma el caudal filtrado por cada área de influencia, en torno a cada nido en la barra. Para esto, utilizando el método de los polígonos de Thiessen, se dividió el área total de aporte de cada barra en estudio en áreas de influencia para cada nido instalado en ellas ( $A_p$ ), para luego considerar como área aportante sólo la parte sumergida o inundada ( $A_i$ ) de cada una de estas áreas de influencia por nido.

La Barra N°1 tiene un área total de 5135 m<sup>2</sup>, de la cual se sumergió entre un mínimo de 30% durante la medición N°4 y un máximo de 32% durante la medición N° 2, obteniendo un área aportante total de entre 1558 y 1640 m<sup>2</sup>, respectivamente. La Barra N°2 tiene un área total mucho más pequeña que las otras dos, de sólo 377 m<sup>2</sup>; de este total, se sumergió entre un 29% durante la medición N°2 y un 100% durante la medición N°6, con un área aportante total que fluctúa entre 110 m<sup>2</sup> y la totalidad de su área. En el caso de Barra N°3, situada en el río Huiña, cuenta con un área total de 5271 m<sup>2</sup>, la cual se sumergió entre un 1% durante las dos últimas mediciones y un 7% durante la segunda medición, variando el área aportante total entre 43 m<sup>2</sup> y 357 m<sup>2</sup>, respectivamente. La Figura 4.3 grafica la variación del área total de inundación para las tres barras.

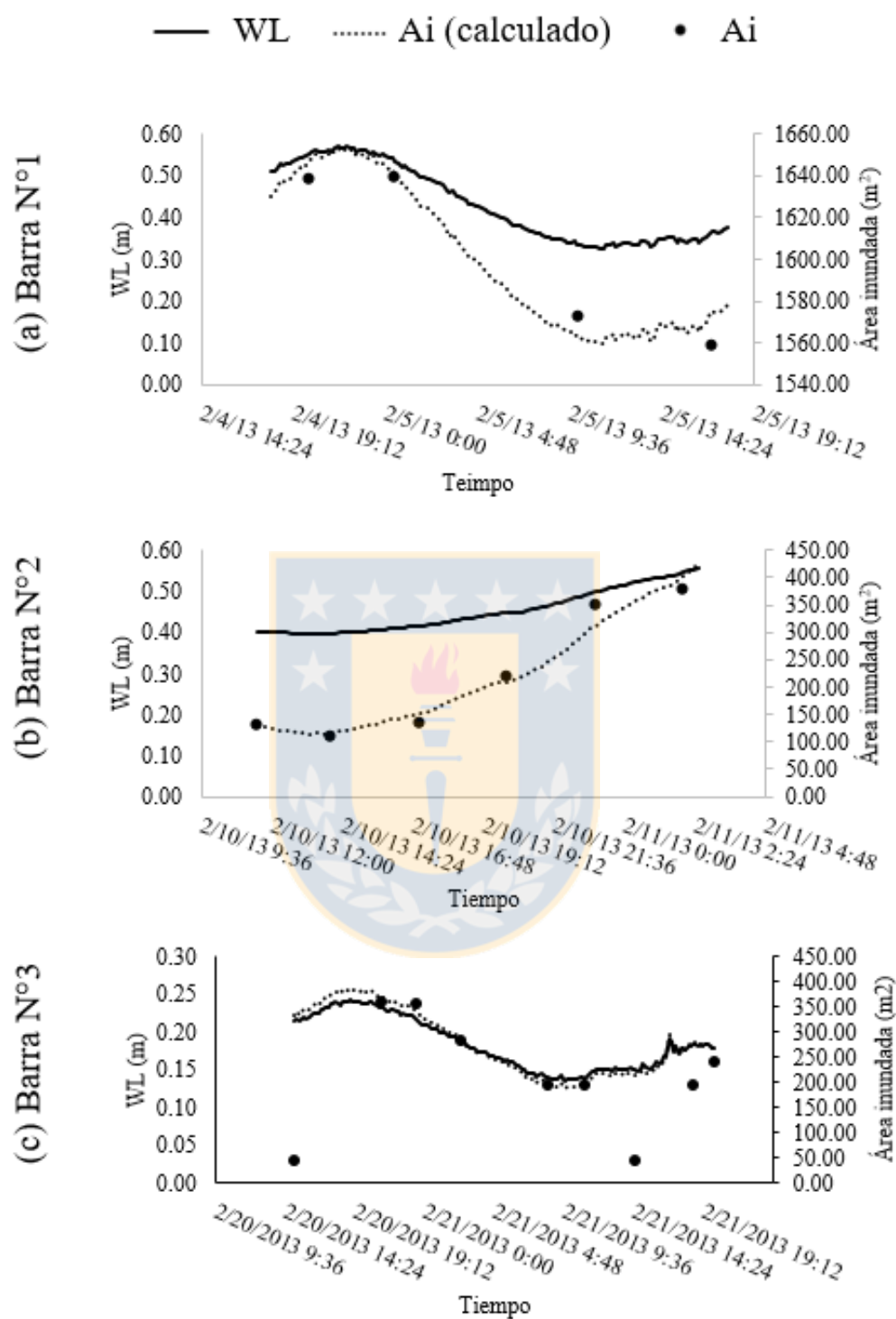


Figura 4.3 Variación temporal del área inundada y nivel de agua en el río para la Barra N°1.

#### 4.5 Ciclo diario de filtración de las barras

Una vez obtenidos los gradientes hidráulicos verticales (GHV), la conductividad hidráulica vertical y el área sumergida, asociados a cada uno de los nidos en cada barra, el caudal filtrado en cada medición se estimó mediante la Ecuación 3.4.

Las Figuras 4.4, 4.5 y 4.6 muestran de manera superpuesta el ciclo diario del caudal filtrado y de sus controladores (GHV,  $K_v$  y  $A_i$ ), normalizados mediante sus valores promedios y desviación estándar, para visualizarse.  $Z(X)$ , el valor normalizado para la variable  $X$ , se calcula según:

$$Z(X) = \frac{(X - \bar{X})}{\sigma}, \quad (4.1)$$

Dónde  $\bar{X}$  corresponde al promedio, y  $\sigma$  a la desviación estándar, de la variable  $X$ .

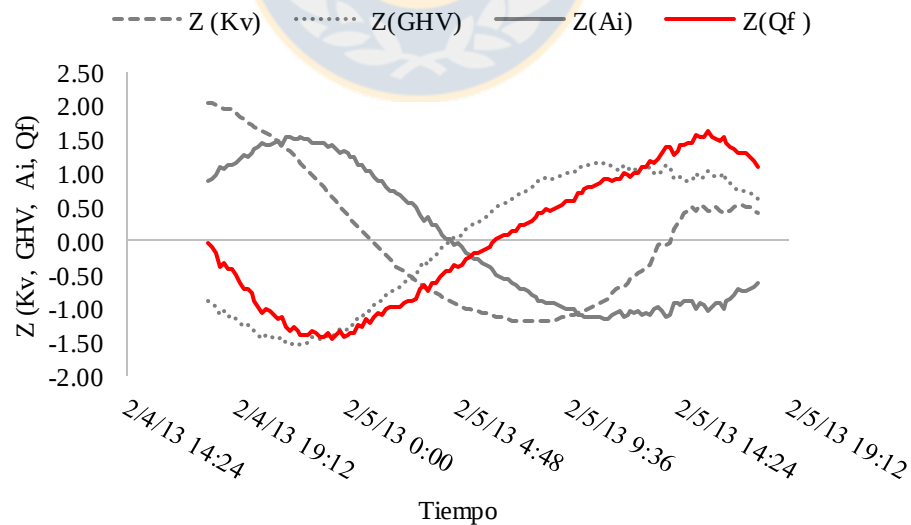


Figura 4.4 Barra 1: Caudal filtrado, nivel de agua en el río, GHV promedio,  $K_v$ , y área inundada, durante la ventana de medición.

Las Tablas 4.2, 4.3 y 4.4 resumen tanto los valores del caudal de filtración encontrados para las Barras N°1, N°2 y N°3, respectivamente, durante sus respectivas ventanas de medición, así como sus promedios y desviaciones estándar correspondientes.

Tabla 4.2 Resultados de Barra N°1

| Valor               | WL   | T     | Kv   | GHV | Ai      | Qf     |
|---------------------|------|-------|------|-----|---------|--------|
|                     | m    | °C    | cm/s | m/m | m2      | l/s    |
| Mínimo              | 0.33 | 6.77  | 0.05 | 44% | 1559.77 | 429.89 |
| Promedio            | 0.43 | 9.33  | 0.06 | 59% | 1600.05 | 519.85 |
| Máximo              | 0.57 | 13.71 | 0.06 | 70% | 1653.66 | 620.03 |
| Desviación estándar | 0.09 | 2.14  | 0.00 | 10% | 34.59   | 61.87  |

El caudal filtrado por la Barra N°1 fluctúa entre 430 y 620 l/s, con un promedio de 520 l/s. En el caso de la Barra N°2, el caudal filtrado fluctúa entre 0.1 y 14.4 l/s, con una media de 11 l/s. Por último, la Barra N°3 filtró entre 50 y 148 l/s, con un promedio de 95 l/s.

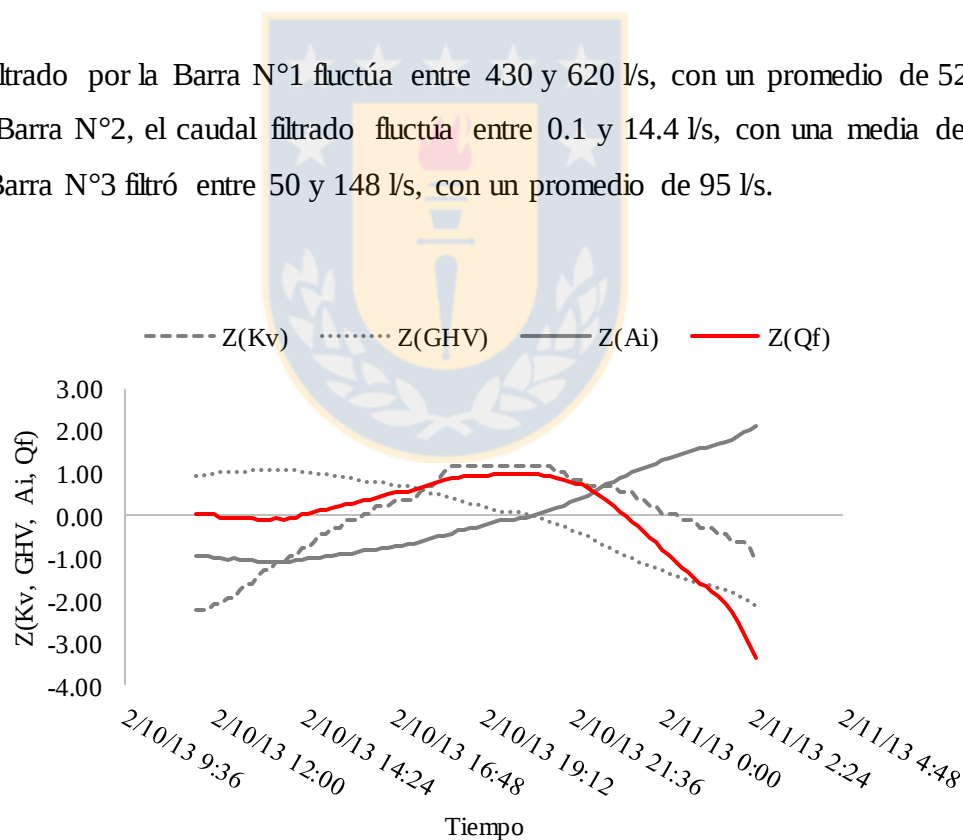


Figura 4.5 Barra 2: Caudal filtrado, nivel de agua en el río, GHV promedio, Kv, y área inundada, durante la ventana de medición

Tabla 4.3 Resultados de Barra N°2

| Valor               | WL   | T     | Kv   | GHV | Ai             | Qf    |
|---------------------|------|-------|------|-----|----------------|-------|
|                     | m    | °C    | cm/s | m/m | m <sup>2</sup> | l/s   |
| Mínimo              | 0.40 | 7.90  | 0.05 | 0%  | 114.71         | 0.08  |
| Promedio            | 0.45 | 9.27  | 0.06 | 11% | 220.04         | 11.18 |
| Máximo              | 0.56 | 10.00 | 0.06 | 17% | 424.74         | 14.41 |
| Desviación estándar | 0.05 | 0.61  | 0.00 | 5%  | 97.45          | 3.33  |

La barra en la que mayor filtración ocurre es la N°1, perteneciente al río Ibáñez, con un promedio de filtración de 520 l/s, frente a 95 l/s de la Barra N°3, en el río Huiña. La Barra N°2 filtra un promedio 11 l/s, valor muy inferior a las otras dos, lo que se debe principalmente a que es de mucho menor tamaño, y que las mediciones se realizaron durante la fase creciente de una crecida, por lo que se observaron GHVs bajos, y mucha presencia de GHVs negativos.

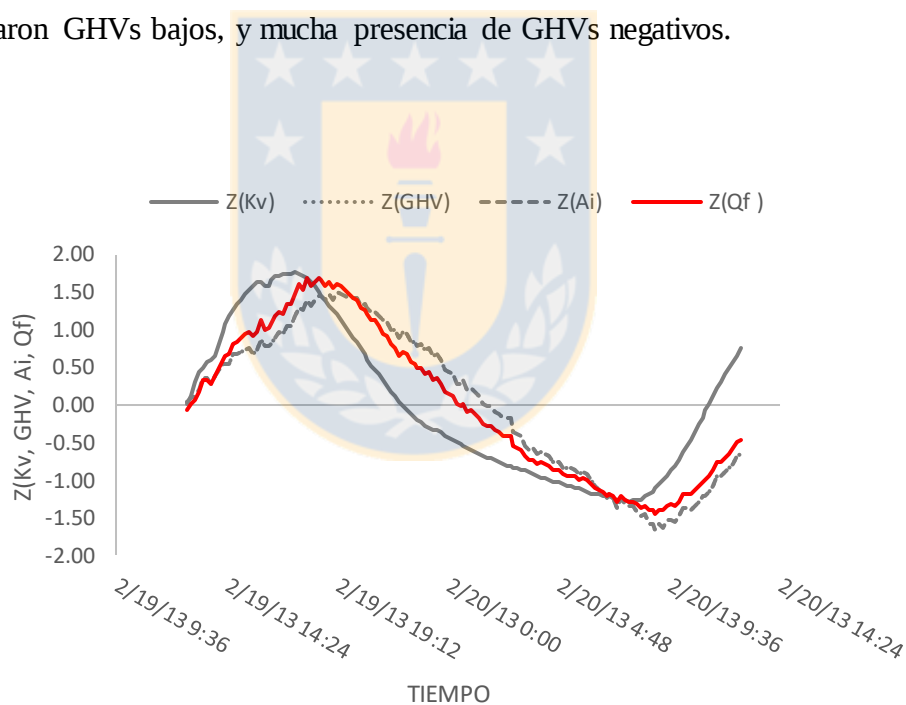


Figura 4.6 Barra 3: Caudal filtrado, nivel de agua en el río, GHV promedio,  $K_v$ , y área inundada, durante la ventana de medición

La Figura 4.5 corresponde a los ciclos diarios medidos en la Barra N°2, en el río Ibáñez, cuya particularidad consiste en que fue medida sólo durante la fase creciente de una crecida un ciclo diario de deshielo, que resultó ser mayor a lo esperado. Si bien no se alcanzó a registrar la recesión

de la crecida, por lo que no se tiene el ciclo entero de nivel de agua, en ésta se observa que sí existe un claro y marcado ciclo del caudal filtrado por la barra, el que presenta su máximo poco antes de la media noche, y su mínimo alrededor del mediodía, unas horas después de los valores máximos y mínimos registrados para  $K_v$ .

Tabla 4.4 Resultados de Barra N°3

| Valor               | WL   | T     | $K_v$ (T) | GHV (WL) | $A_i$ (WL)     | $Q_f$  |
|---------------------|------|-------|-----------|----------|----------------|--------|
|                     | m    | °C    | cm/s      | m/m      | m <sup>2</sup> | l/s    |
| Mínimo              | 0.17 | 5.12  | 0.12      | 15%      | 260.33         | 49.94  |
| Promedio            | 0.23 | 8.53  | 0.14      | 18%      | 366.01         | 95.13  |
| Máximo              | 0.28 | 13.17 | 0.16      | 21%      | 460.85         | 147.75 |
| Desviación estándar | 0.03 | 2.65  | 0.01      | 2%       | 63.77          | 31.40  |

#### 4.6 Extrapolación temporal y espacial de los resultados

En el caso del río Ibáñez, la extrapolación se realizó para un tramo de 72 km aproximadamente, utilizando los datos obtenidos para la Barra N°1, los cuales se extrapolaron a una ventana de 3 días mediante su correlación con datos de dos estaciones fluviométricas de la Dirección General de Aguas (DGA): una ubicada pocos kilómetros aguas abajo de la Barra N°1 (Estación Fluviométrica N°1) la que registra datos de nivel de agua, y para la cual se dispone de una curva de descarga; y otra en la desembocadura del río Ibáñez en el Lago General Carrera (Estación Fluviométrica N°2), la que cuenta además con datos de temperatura ambiental. La correlación de las variables se puede observar en la Figura 4.7, mientras que los resultados de la extrapolación en las Figura 4.8 y Tabla 4.6.

La conductividad hidráulica vertical ( $K_v$ ) en la ventana de extrapolación de tres días se determinó mediante una regresión lineal entre la temperatura del agua en el río, aguas arriba de la barra, y la temperatura ambiental registrada en la Estación Fluviométrica N°2 (Figura 4.7).

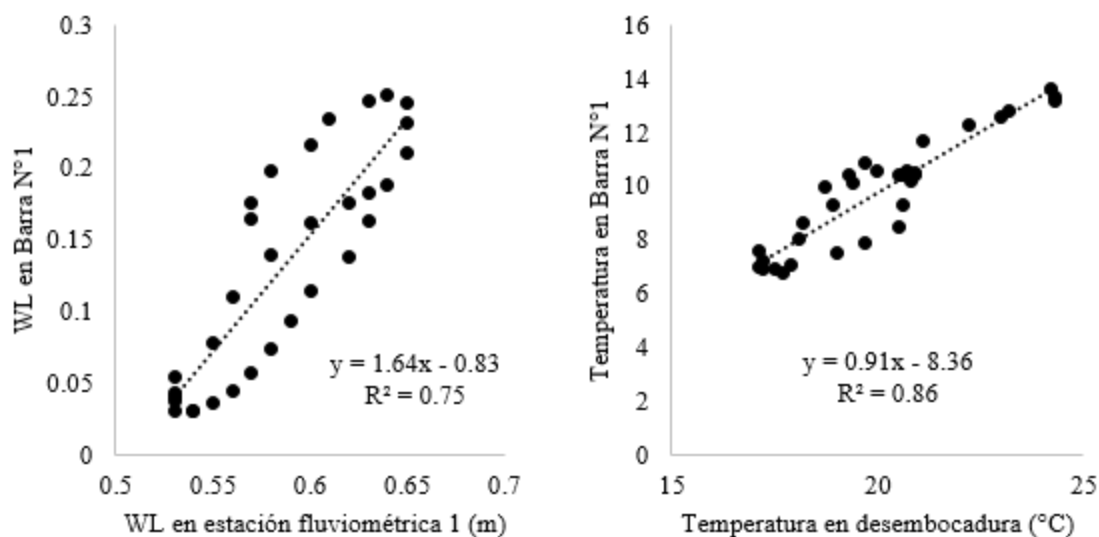


Figura 4.7 Correlaciones del nivel del agua (izq.) y su temperatura (der.) entre la Barra N°1 y la estación fluviométrica.

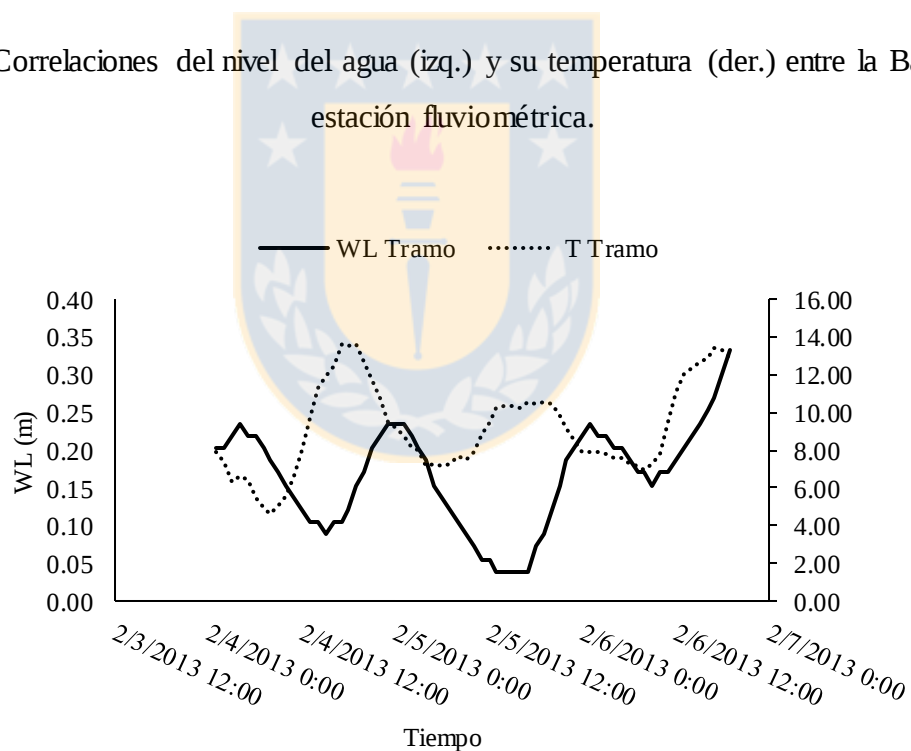


Figura 4.8 Nivel de agua y temperatura extrapolados a partir de correlación con datos de estaciones fluviométricas para tramo de río Ibáñez modelado.

Para la extrapolación espacial de los resultados obtenidos se realizó un catastro de barras mediales en los tramos de interés de cada río, utilizando Google Earth y ArcGIS, cuyos resultados se muestran en la Tabla 4.5.

Tabla 4.5 Resumen de catastro de barras mediales en tramos de interés utilizando Google Earth y ArcGIS.

| <b>Río</b>                                                     | <b>Ibáñez</b> | <b>Huiña</b> |
|----------------------------------------------------------------|---------------|--------------|
| Longitud de tramo (km)                                         | 72.05         | 9.34         |
| Número de barras mediales en tramo                             | 162           | 96           |
| Área total de barras mediales en tramo (km <sup>2</sup> )      | 14.49         | 0.70         |
| Área de planicie de inundación (km <sup>2</sup> )              | 354.47        | 38.43        |
| Área total de barras mediales / Área de planicie de inundación | 4.09%         | 1.82%        |

En el caso del río Huiña, la extrapolación se hizo en base a los resultados obtenidos en la Barra N°3. Debido a que no se cuenta con estaciones fluviométricas en este río, se utilizó una ventana de tiempo entre el 19 de Febrero del 2013 a las 12:40 horas, hasta el 21 de Febrero del 2013 a las 22:10 horas, con duración de 3 días aproximadamente, en la cual se cuenta con datos de nivel de agua y temperatura, tomados durante la campaña de terreno (Figura 4.10).

Tabla 4.6 Resultados de extrapolación a tramo de río Ibáñez.

| Valor               | WL   | T     | Kv   | GHV  | Ai             | Qf                |
|---------------------|------|-------|------|------|----------------|-------------------|
|                     | m    | °C    | cm/s | m/m  | m <sup>2</sup> | m <sup>3</sup> /s |
| Mínimo              | 0.04 | 4.59  | 0.05 | 175% | 408529.85      | 174.85            |
| Promedio            | 0.17 | 9.16  | 0.06 | 102% | 422339.04      | 207.77            |
| Máximo              | 0.33 | 13.65 | 0.06 | 6%   | 440742.38      | 250.61            |
| Desviación estándar | 0.07 | 2.42  | 0.00 | 39%  | 7410.19        | 21.05             |

Para el área de barras mediales de 14.5 km<sup>2</sup>, en el tramo de 72 km en el río Ibáñez, se obtuvo un caudal máximo de filtración de 250.61 m<sup>3</sup>/s, un mínimo de 174.85 m<sup>3</sup>/s y un promedio de 207.77

$\text{m}^3/\text{s}$ , lo que implica un volumen promedio diario de  $17951328 \text{ m}^3/\text{día}$  por km (Figura 4.9 y Tabla 4.6).

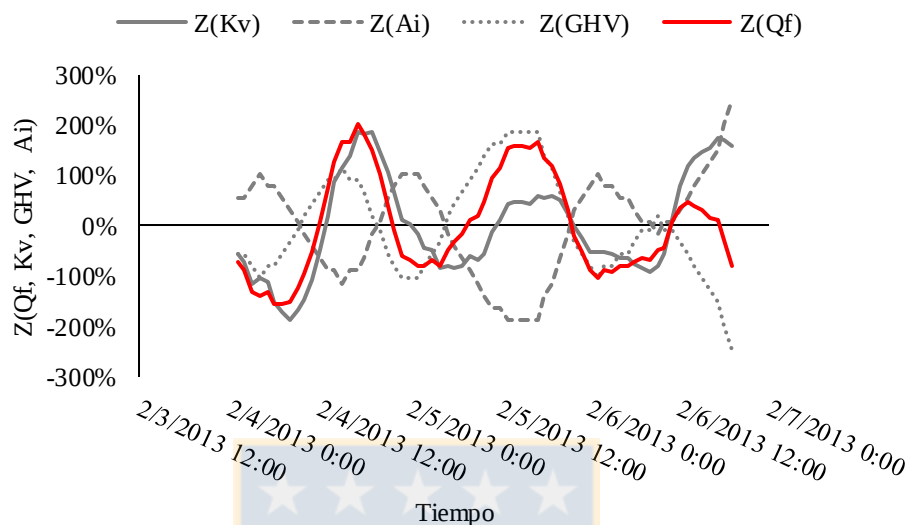


Figura 4.9 Variación del caudal filtrado y sus controladores a lo largo del tramo de río Ibáñez en estudio.

Para el área de  $0.7 \text{ km}^2$  de barras mediales en el tramo de  $9.34 \text{ km}$  del río Huiña se obtuvo un caudal máximo de filtración de  $1.95 \text{ m}^3/\text{s}$ , un mínimo de  $0.42 \text{ m}^3/\text{s}$ , y un promedio de  $1.03 \text{ m}^3/\text{s}$ , lo que implica un volumen promedio diario de  $88992 \text{ m}^3/\text{día}$  por km (Figura 4.11 y Tabla 4.7).

Tabla 4.7 Resultados de extrapolación a tramo de río Huiña.

| Valor               | WL   | T                  | Kv            | GHV          | Ai           | Qf                    |
|---------------------|------|--------------------|---------------|--------------|--------------|-----------------------|
|                     | m    | $^{\circ}\text{C}$ | $\text{cm/s}$ | $\text{m/m}$ | $\text{m}^2$ | $\text{m}^3/\text{s}$ |
| Mínimo              | 0.14 | 5.12               | 0.12          | 13%          | 2501.55      | 0.42                  |
| Promedio            | 0.20 | 8.91               | 0.14          | 17%          | 4199.03      | 1.03                  |
| Máximo              | 0.28 | 13.66              | 0.16          | 21%          | 6104.53      | 1.95                  |
| Desviación estándar | 0.04 | 2.58               | 0.01          | 2%           | 995.76       | 0.41                  |

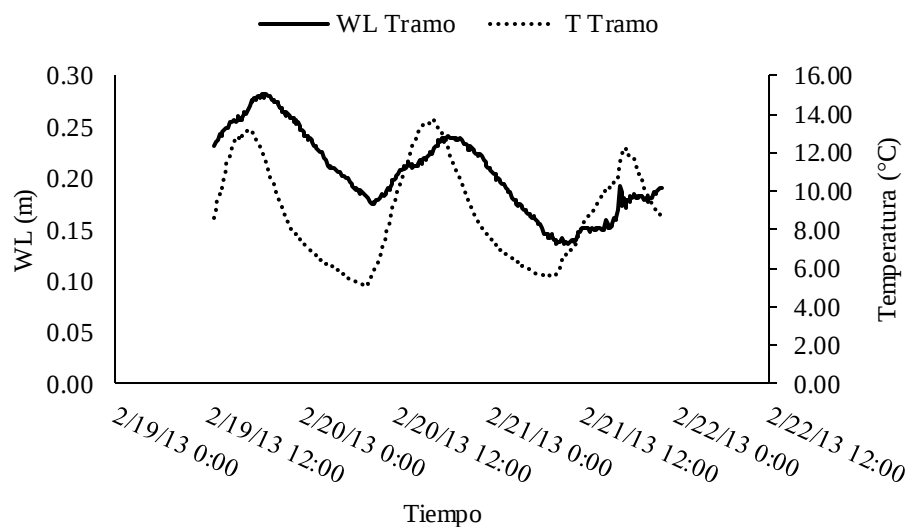


Figura 4.10 Nivel de agua y temperatura medidos en terreno para el tramo de río Huiña.

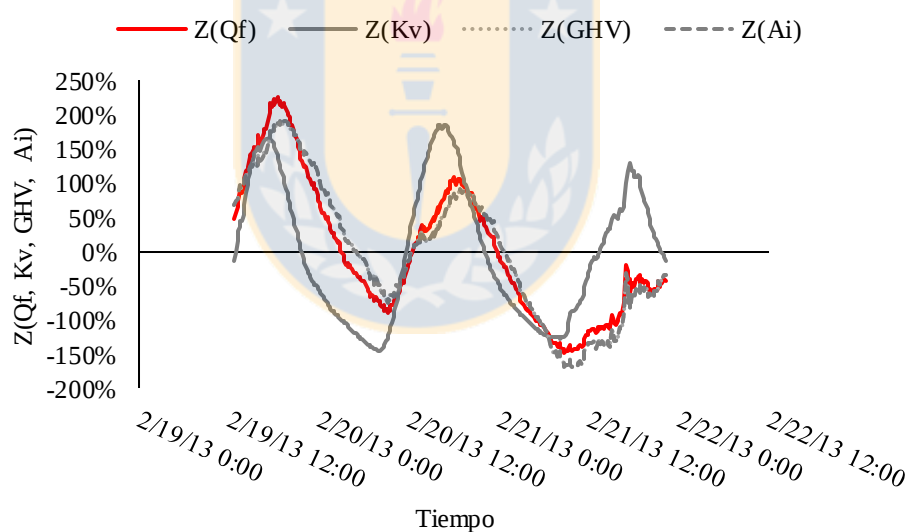


Figura 4.11 Variación del caudal filtrado y sus controladores a lo largo del tramo de río Huiña en estudio.

Los resultados de la extrapolación en ambos ríos indican que el caudal de filtración por kilómetro de río es mayor en el río Ibáñez, con un promedio de  $207.77 \text{ m}^3/\text{s}$  versus  $1.03 \text{ m}^3/\text{s}$  en el río Huiña.

Esto se debe a la mayor cantidad de barras mediales por kilómetro de cauce en el río Ibáñez (Tabla 4.8).

Tabla 4.8 Resumen de resultados obtenidos por tramo en río Ibáñez y río Huiña.

| Resultados por tramo de río                                                        | Río Ibáñez | Río Huiña |
|------------------------------------------------------------------------------------|------------|-----------|
| Área de barras mediales por km de tramo ( $\text{km}^2/\text{km}$ )                | 0.2        | 0.08      |
| Caudal mínimo filtrado por tramo ( $\text{m}^3/\text{s}$ )                         | 174.85     | 0.42      |
| Caudal máximo filtrado por tramo ( $\text{m}^3/\text{s}$ )                         | 250.61     | 1.95      |
| Caudal promedio filtrado por tramo ( $\text{m}^3/\text{s}$ )                       | 207.77     | 1.03      |
| Caudal promedio filtrado por km de largo ( $\text{m}^3/\text{s}/\text{km}$ )       | 2.89       | 0.11      |
| Caudal máximo filtrado por km de largo ( $\text{m}^3/\text{s}/\text{km}$ )         | 3.48       | 0.21      |
| Volumen promedio filtrado por km en 24 horas ( $\text{m}^3/\text{km}/\text{día}$ ) | 17951328   | 88992     |

#### 4.7 Análisis de sensibilidad

El análisis de sensibilidad tiene como objetivo el determinar cuál de los controladores del intercambio hiporreico, identificados en este estudio, tiene mayor efecto sobre el caudal de filtración de una barra medial. Esto se analizó desde dos perspectivas: primero, se hizo variar cada controlador por separado, en un rango típico de variación diaria para tal controlador, asumiendo los demás como constantes, y se vio cuál de ellos tenía mayor efecto sobre el caudal de filtración.

Se observó que en el río Ibáñez, durante un día de verano, la temperatura varía hasta en  $8\text{ }^{\circ}\text{C}$ , aumentando desde  $5.4$  a  $13\text{ }^{\circ}\text{C}$ , lo que resulta en un aumento de un 26% en  $K_v$ . Asumiendo GHV y  $A_i$  constantes, lo anterior implicaría un aumento del caudal de filtración en el mismo porcentaje. En el caso del río Huiña, la temperatura fluctúa diariamente entre  $5$  y  $14\text{ }^{\circ}\text{C}$ , traduciéndose en un aumento de  $K_v$  y  $Q_f$  en un 30% (asumiendo GHV y  $A_i$  constantes, en sus valores medios).

Así mismo, en un día de verano promedio en el río Ibáñez, el nivel de agua puede variar hasta en 40 cm, lo que implica un aumento de un 115% en base al mínimo diario. Esto resulta en una

disminución de los GHVs en un 80% y en un aumento del área de inundación de 21%, lo que, asumiendo un  $K_v$  constante, resulta en una disminución de  $Q_f$  en un 76%. El caso del río Huiña es más extremo, debido a que presenta mayor variación en su nivel de agua durante el día, de hasta 508%, lo que se refleja en la disminución de sus GHVs en un 86%, y el aumento de su  $A_i$  de 5%, resultando en la disminución de  $Q_f$  en 77%.

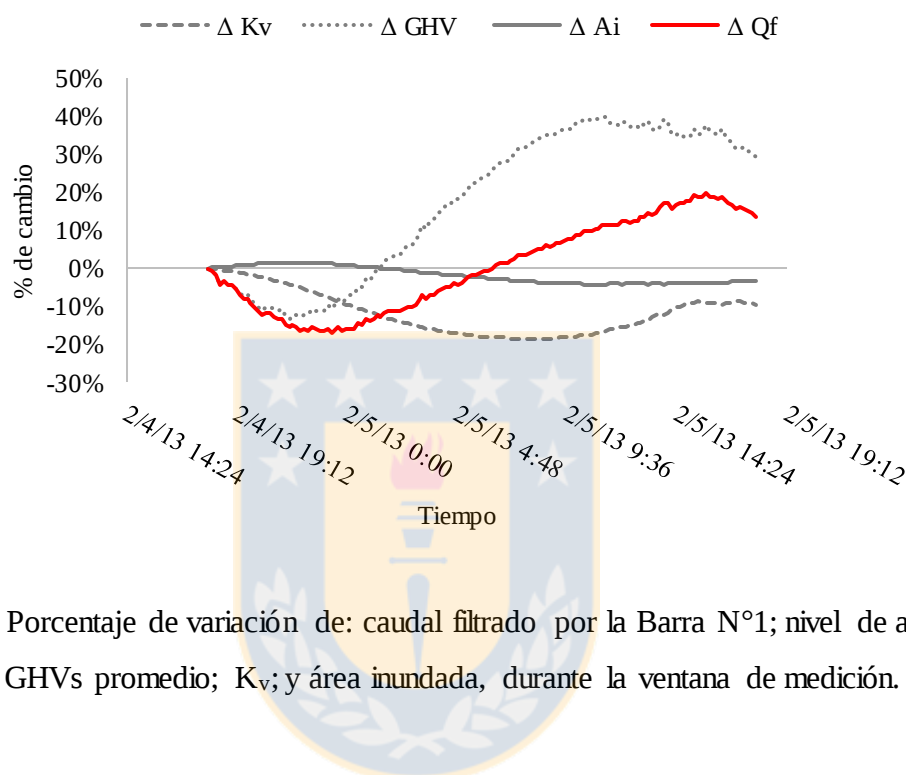


Figura 4.12 Porcentaje de variación de: caudal filtrado por la Barra N°1; nivel de agua en el río; GHVs promedio;  $K_v$ ; y área inundada, durante la ventana de medición.

Por otro lado, se graficó la variación diaria, en porcentaje, registrada de cada controlador, como la del caudal de filtración calculada con respecto al inicio de la variación, obteniendo lo que se observa en las Figuras 4.12, 4.13 y 4.14.

En el caso de la Barra N°1, se observa un aumento del caudal de filtración de un 20% cercano a las 16 hrs aproximadamente, con respecto al comienzo de la medición, unas cinco horas después del *peak* de aumento de GHVs en un 40%, y *peak* de disminución de  $A_i$ , que ocurren cercano a las 11 hrs.

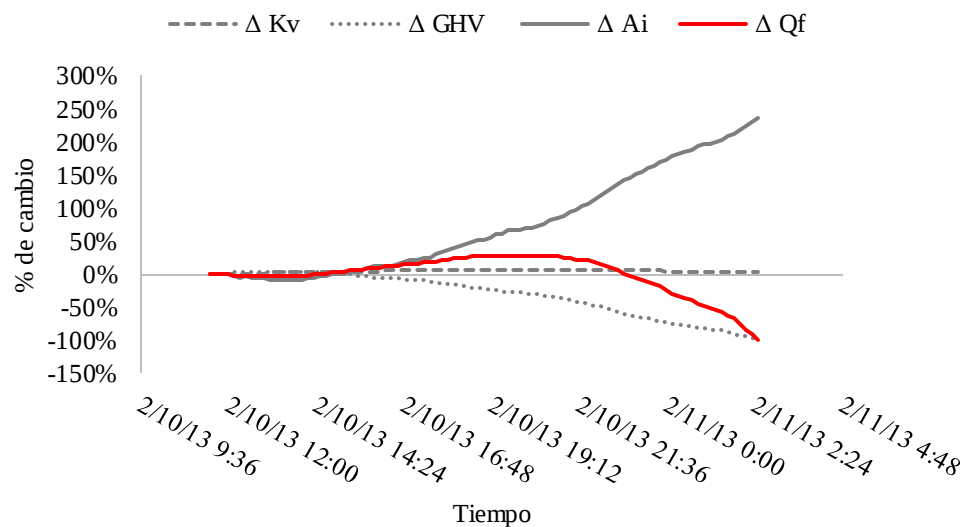


Figura 4.13 Porcentaje de variación de: caudal filtrado por la Barra N°2; nivel de agua en el río; GHVs promedio;  $K_v$ ; y área inundada, durante la ventana de medición.

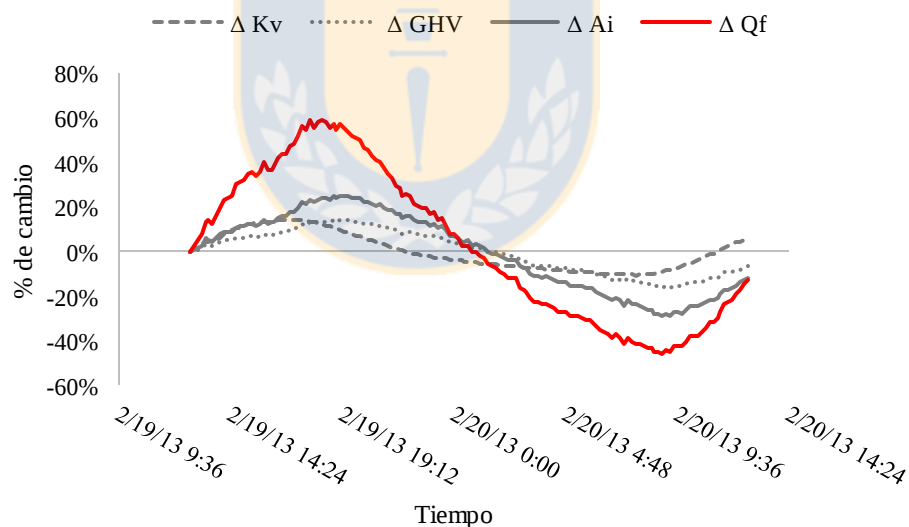


Figura 4.14 Porcentaje de variación de: caudal filtrado por la barra N°3; nivel de agua en el río; GHVs promedio;  $K_v$ ; y área inundada, durante la ventana de medición.

En el caso de la Barra N°2 no se tiene registro de un ciclo diario normal, debido a que las mediciones se realizaron durante una crecida, sin registro de su recesión, sin embargo, en la Figura

4.15 se puede observar un comportamiento cíclico de  $Q_f$ , debido a la influencia de  $K_v$ , el que se comporta cíclicamente.

El caso de la Barra N°3 es especial debido a que en esta ocurre la sincronización de los 3 controladores, resultando en la variación máxima de  $Q_f$  de 59%, siendo el controlador más importante  $A_i$ , con una influencia de un 25%.

#### 4.8 Conclusiones

Utilizando el promedio de los GHVs positivos registrados en cada medición para todos los nidos dentro del área inundada de la barra, se construyó un ciclo diario de GHV promedio para cada barra. Los  $GHV_{prom}$  fluctúan entre 45 y 68% para la Barra N°1, entre 2 y 20% para la Barra N°2, y entre 14 y 20% para la Barra N°3. Los bajos valores observados en la Barra N°2 se deben a que las mediciones en esa barra fueron realizadas sólo durante la fase creciente de una crecida.

Se encontraron valores de  $K_v$  entre 0.052 y 0.064 cm/s, con un promedio de 0.057 cm/s para la Barra N°1, y entre 0.13 y 0.16 cm/s, con un promedio de 0.14 cm/s, para la Barra N°3. El que  $K_v$  promedio sea mayor en la Barra N°3 que en la Barra N°1 concuerda con lo esperado, debido a que el río Huiña presenta una granulometría más gruesa, y con menor presencia de finos que el río Ibáñez.

Los ciclos diarios de  $K_v$  promedio fueron calculados en función del ciclo diario de temperatura del agua en cada río. Estos presentan su máximo valor en la tarde, cerca de las 18:00 horas, asociado al máximo en la temperatura, y su mínimo en la madrugada, en torno a las 05:00 horas.

En su ciclo diario, el caudal filtrado fluctúa entre 430 y 620 l/s, con un promedio de 520 l/s para la Barra N°1, entre 0.1 y 14.4 l/s, con un promedio de 11.1 l/s para la Barra N°2, y entre 50 y 148 l/s, con un promedio de 95 l/s para la Barra 3.

Se realizó la extrapolación de los resultados obtenidos en las barras instrumentadas en cada río, a un tramo de 72 y 9.34 km de los ríos Ibáñez y Huiña respectivamente. Para esto se realizó un catastro de barras mediales en cada tramo, encontrando un área efectiva de barras mediales de 14.5 km<sup>2</sup> y 0.7 km<sup>2</sup> para los ríos Ibáñez y Huiña respectivamente. Los resultados de la extrapolación muestran que el río Ibáñez filtra un caudal mayor por km de río que el Huiña, con un máximo de filtración de 250.61 m<sup>3</sup>/s en el río Ibáñez vs un máximo de 1.95 m<sup>3</sup>/s para el río Huiña.



## CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES

Se comprobó que todas las variables que controlan el flujo de intercambio hiporreico a través de una barra medial (los gradientes hidráulicos verticales GHV, la conductividad hidráulica vertical  $K_v$ , y las áreas infiltrantes  $A_i$ ) tienen efectivamente un comportamiento cíclico a la escala diaria, en ríos con pulsos diarios de caudal y temperatura del agua. La variable con mayor peso en este proceso son los GHVs, siendo menor el efecto de la fluctuación en la temperatura del agua. Por lo anterior, se espera que los ciclos de filtrado diario sean más notorios en ríos con un régimen hidrológico con componente nival y/o glacial, ya que en éstos ocurrirán marcados pulsos diarios de caudal, durante la temporada de deshielo.

Se encontró que tanto el ciclo diario de GHVs como el de  $A_i$  pueden ser estimados en base a una relación lineal con el nivel de agua en el cauce (WL), con coeficientes de determinación  $R^2$  significativos. Así también, el ciclo de variación diaria de  $K_v$  puede determinarse a partir del ciclo diario de temperatura del agua en el río, cuyas variaciones afectan cambiando la densidad, pero sobre todo la viscosidad cinemática del agua. Debido a esto, es que la sincronía entre las señales de  $K_v$  con GHVs y  $A_i$ , depende de la sincronía entre los ciclos diarios de temperatura y nivel de agua en el río

Debido a la interdependencia entre las variables en estudio, el estudiar por separado los efectos que tiene cada una de ellas sobre la filtración no refleja completamente el comportamiento del sistema, pero sí da una primera aproximación de lo que puede estar ocurriendo. Así, se puede concluir que la variable con mayor peso en la determinación del caudal de filtración son los GHVs, y también que los momentos de mayor filtración coinciden con los de menor caudal en el río. Es importante notar que la tasa de filtración podría verse amplificada aún más si éstos coincidieran con los de mayor temperatura.

Si comparamos los resultados obtenidos en cada barra, notamos que hay grandes diferencias entre el caudal filtrado por cada una, asumiendo las barras 1 y 3 como barras representativas de los ríos Ibáñez y Huiña respectivamente, se puede concluir que una barra medial del río Ibáñez filtraría en promedio cerca de 6 veces más agua que una barra medial del río Huiña (520 l/s vs 95 l/s, respectivamente). El caso de la Barra N°2 es especial, presentando valores muy inferiores a los de las otras dos barras en estudio; esto se debe en mayor parte a su menor tamaño en comparación a las otras dos barras y a que en ésta, las mediciones se realizaron sólo durante la fase creciente de un evento de crecida en el río, sin registro de su receso, por lo que se observaron GHVs muy bajos, negativos muchos casos.

En el Río Ibáñez, se determinó un tramo de interés de 72 km de largo, donde se reconocieron 162 barras mediales, completando un área total de barras mediales de 14.5 km<sup>2</sup>, correspondiente a un 4% del área de la planicie de inundación del río en el tramo. En el caso de río Huiña, el tramo en estudio tuvo un largo de 9.34 km, con 96 barras mediales, cubriendo 0.7 km<sup>2</sup> de área total, correspondiente a un 1.82% del área de inundación del río en el tramo.

Los resultados de la extrapolación muestran un caudal de filtración promedio por km de largo de 208 m<sup>3</sup>/s/km para el río Ibáñez, frente a 1 m<sup>3</sup>/s/km para el río Ibáñez aproximadamente, y un máximo de 251 m<sup>3</sup>/s/km para el río Ibáñez y 2 m<sup>3</sup>/s/km para el río Huiña, aproximadamente. Esta gran diferencia en magnitud se debe a la suma de distintos factores: La mayor presencia de barras mediales en el tramo del río Ibáñez que en el río Huiña, lo que implica una mayor área aportante; y a que según el análisis realizada por barras individuales, una barra del río Ibáñez filtra más que una del río Huiña.

**REFERENCIAS**

Arrigoni A., Poole G., Mertes L., O'Daniel S., Woessner W., y Thomas S. (2008) Buffered, lagged or cooled? Disentangling hyporheic influences on temperature cycles in stream channels. **Water Resources Research**, 44, W09418, doi:10.1029/2007WR006480.

Baxter, C., F.R. Hauer, y W.W. Woessner (2003) Measuring groundwater-stream water exchange: new techniques for installing minipiezometers and estimating hydraulic conductivity. **Transactions of the American Fisheries Society**, 132. 493–502.

Bouwer H. y Rice R. (1976) A slug test for determining hydraulic conductivity of unconfined aquifers with completely or partially penetrating wells. **Water Resources Research**. 12(3), 423-428.

Bundschuh J. (1993) Modeling annual variations of spring and groundwater temperatures associated with shallow aquifer systems. **Journal of Hydrology**, 142(4), 427-444.

Burger R. y Berlitz K. (1997) Measurement of anisotropic hydraulic conductivity in unconsolidated sand: A case of study from a shoreface deposit, Oyster, Virginia. **Water Resources Research**, 33 (6), 1515-1522.

Caissie D. (2006). The thermal régime of rivers: a review. **Freshwater Biology**, 51, 1389-1406.

Calver A. (2001) Riverbed permeabilities: Information from pooled data. **Ground Water** 39(4), 546-553.

Cardenas M. y Zlotnik V. (2003) A simple constant-head injection test for streambed hydraulic conductivity estimation. **Ground Water**, 41 (6), 867-871.

Cartwright K. (1974) Tracing shallow groundwater systems by soil temperatures. **Water Resources Research**, 10(4), 847-855.

Cisternas R. (2011) Comportamiento Espacial del Nivel Freático y de la Conductividad Hidráulica en Barras de Grava. Memoria de Título de Ingeniería Civil. Facultad de Ingeniería. Universidad de Concepción. Concepción.

- Constantz J., Thomas C. y Zellweger G. (1994) Influence of diurnal variations in stream temperature on streamflow loss and groundwater recharge. **Water Resources Research**, 30(12), 3253-3264.
- Dent C., Grimm N., Marti E, Edmonds J., Henry J., y Welter J. (2007) Variability in surface-subsurface hydrologic interactions and implications for nutrient retention in an arid-land stream. **Journal of Geophysical Research**, 112, G04004.
- Derx J., Blaschke A. y Blöschl G. (2010) Three-dimensional flow patterns at the river-aquifer interface – a case study at the Danube. **Advances in Water Resources**, 33, 1375–1387.
- Drysdale R., Lucas S. y Carthew K. (2003) The influence of diurnal temperature on the hydrochemistry of tufa-depositing stream. **Hydrological Processes**. 17, 3421-3441.
- Francis B., Francis L., y Cardenas M. (2010) Water table dynamics and groundwater-surface water interactions during filling and draining of a large fluvial island due to dam-induced river stage fluctuations. **Water Resources Research** 46, W07513.
- Gooseff M. (2010) Defining hyporheic zones: Advancing our conceptual and operational definitions of where stream water and groundwater meet. **Geography Compass**, 2, 1-11.
- Hayashi M., Vogt T., Mächler L. y Schimer M. (2012) Diurnal fluctuations of electrical conductivity in a pre-alpine river: effects of photosynthesis and groundwater exchange. **Journal of Hydrology**, 450-451, 93-104.
- Lapham W. (1989) Use of temperature profiles beneath streams to determine rates of vertical groundwater flow and vertical hydraulic conductivity. **U.S. Geological Survey Water Supply Paper 2337**, 1-35.
- Link, O., Huerta, A., Stehr, A., Monsalve, A., Meier, C. y Aguayo, M. (2013), The solar-to-stream power ratio: a dimensionless number explaining diel fluctuations of temperature in mesoscale rivers. **River Research and Applications**, 29, 792–803.
- Meier, C.I., R. Cisternas, y A. Schwarz. 2012. Spatial behavior of the water table under medial unit bars in a wandering gravel-bed river. **9<sup>th</sup> International Symposium on Ecohydraulics**, Vienna, Austria.

Meier, C.I., R. Cisternas, A. Oñat, y B. Reid. 2014. Spatio-temporal behaviour of the phreatic and piezometric levels in a medial, unit, gravel bar, during a flood. **10<sup>th</sup> International Symposium on Ecohydraulics**, Trondheim, Norway.

Oñat A. (2014) Comportamiento espacial y temporal de los niveles freáticos y piezométricos en una barra medial de grava durante una crecida. Memoria de Título de Ingeniería Civil. Facultad de Ingeniería. Universidad de Concepción. Concepción.

Packman, A.I., y M. Salehin (2004) Relative roles of stream flow and sedimentary conditions in controlling hyporheic exchange. **Hydrobiologia**, 494. 291-297.

Silliman S. y Booth D. (1993) Analysis of time-series measurements of sediment temperature for identification of gaining vs. losing portions of Juday Creek, Indiana. **Journal of Hydrology**, 146, 1-4.

Stallman R., (1963) Computation of groundwater velocity from temperature data. En *Methods of Collecting and Interpreting Groundwater Data*, edited by R. Bentall, **U.S. Geological Survey Water Supply Paper 1544-H**, 26-46.

Taniguchi M. (1993) Evaluation of vertical groundwater fluxes and thermal properties of aquifer based on transient temperature-depth profiles. **Water Resources Research**, 29(7), 2021-2026.

Triska F.J., V.C Kennedy, R.J. Avanzino, G.W. Zellweger, y K.E. Bencala (1989) Retention and transport of nutrients in a third-order stream in northwestern California. **Hyporheic processes. Ecology** 70(6), 1893-1905.

Voss C. (1984) A finite-element simulation model for saturated-unsaturated, fluid-density dependent groundwater flow with energy transport or chemically-reactive single-species solute transport. **U.S. Geological Survey Water Resources Investigation Report 84-4369**, 409.

Winter, T.C., J.W. Harvey, O.L. Franke y W.M. Alley (1998) Ground Water and Surface Water: A Single Resource. **U.S. Geological Survey Circular**, 1139. Denver. Colorado.

Wondzell S.M. y Gooseff M.N. (2013) Geomorphic controls on hyporheic exchange across scales: watersheds to particles. **Treatise on Geomorphology**, 9, 203-2018.

## ANEXOS

## Anexo 4.2 Gradientes hidráulicos verticales para cada barra

Tabla A4.2.1 Gradientes hidráulicos verticales calculados en la Barra N°1, entre el nivel de agua sobre la barra y 25 cm bajo la superficie de la misma, para nidos en área de inundación.

| Nido     | GHVs en Barra N°1 |     |      |      |     |
|----------|-------------------|-----|------|------|-----|
|          | M1                | M2  | M3   | M4   | M5  |
| 1        | 12%               | 16% | 34%  | 56%  | 40% |
| 2        | 40%               | 55% | 79%  | 65%  | 69% |
| 3        | 65%               | 70% | 128% | 127% | 86% |
| 4        | 5%                | 2%  | 32%  | 26%  | 6%  |
| 5        | 60%               | 62% | 98%  | 91%  | 72% |
| 6        | 77%               | 75% | 113% | 94%  | 82% |
| 7        | 46%               | 48% | 79%  | 79%  | 59% |
| 8        | 46%               | 48% | 79%  | 79%  | 59% |
| 9        | 57%               | 52% | 66%  | 70%  | 60% |
| 10       | 46%               | 48% | 79%  | 79%  | 59% |
| 11       | 46%               | 48% | 79%  | 79%  | 59% |
| 12       | 49%               | 49% | 84%  | 87%  | 55% |
| Promedio | 45%               | 48% | 68%  | 67%  | 59% |

Tabla A4.2.2 Gradientes hidráulicos verticales calculados entre el nivel de agua sobre la barra y 25 cm bajo la superficie de la misma en Barra N°2 (parte 1).

| Nido | GHVs en Barra N°2 (nidos A1 a B4) |      |     |     |     |     |
|------|-----------------------------------|------|-----|-----|-----|-----|
|      | M1                                | M2   | M3  | M4  | M5  | M6  |
| A1   | 22%                               | 46%  | 19% | 22% | 17% | 8%  |
| A2   | 11%                               | 12%  | 17% | 11% | 9%  | 6%  |
| A3   | 13%                               | 13%  | 9%  | 9%  | 8%  | 6%  |
| A4   | 8%                                | 7%   | 6%  | 12% | 12% | 10% |
| A5   | 4%                                | 1%   | -1% | 6%  | 6%  | -1% |
| A6   | -5%                               | -10% | -1% | 6%  | 3%  | 1%  |
| A7   | 29%                               | 21%  | 17% | 23% | 19% | 17% |
| A8   | 9%                                | -5%  | -2% | -1% | 0%  | 1%  |
| A9   | 4%                                | 5%   | 2%  | 5%  | 6%  | 7%  |
| B1   | 16%                               | 17%  | 15% | 14% | 10% | 3%  |

Tabla A4.2.3 Gradientes hidráulicos verticales calculados entre el nivel de agua sobre la barra y 25 cm bajo la superficie de la misma en Barra N°2 (parte 2).

| Nido     | GHVs en Barra N°2 (nidos B5 a G7) |      |      |     |     |     |
|----------|-----------------------------------|------|------|-----|-----|-----|
|          | M1                                | M2   | M3   | M4  | M5  | M6  |
| B2       | 17%                               | 17%  | 13%  | 16% | 13% | 4%  |
| B3       | -2%                               | -2%  | -5%  | 7%  | 5%  | 4%  |
| B4       | 2%                                | 3%   | 4%   | 10% | 10% | 4%  |
| B5       | 4%                                | 5%   | 2%   | 1%  | 6%  | 3%  |
| C1       | 9%                                | 11%  | 6%   | 9%  | 8%  | -1% |
| C2       | 20%                               | 8%   | 17%  | 17% | 13% | 3%  |
| C3       | 1%                                | 0%   | 1%   | 6%  | 6%  | 4%  |
| C4       | 5%                                | 3%   | -5%  | 9%  | 10% | 4%  |
| C5       | 1%                                | 1%   | -1%  | 1%  | 9%  | 2%  |
| C6       | 4%                                | 5%   | -1%  | 0%  | 1%  | 6%  |
| C7       | 0%                                | -16% | -4%  | -1% | -2% | 4%  |
| C8       | -4%                               | -1%  | -6%  | -3% | -2% | -2% |
| C9       | 2%                                | -3%  | -4%  | 1%  | -1% | -1% |
| D2       | 13%                               | 17%  | 12%  | 11% | 10% | 0%  |
| D3       | 6%                                | 7%   | 1%   | 16% | 12% | 8%  |
| D4       | -2%                               | -1%  | 0%   | 1%  | 4%  | -4% |
| D5       | -6%                               | -4%  | -5%  | -4% | 7%  | -1% |
| E3       | -4%                               | -6%  | -6%  | -1% | -2% | -7% |
| E4       | -5%                               | -6%  | -10% | -2% | 2%  | -4% |
| E5       | 3%                                | -3%  | -3%  | 1%  | 4%  | -4% |
| E6       | 1%                                | -2%  | 0%   | 0%  | 2%  | -5% |
| E7       | -5%                               | -3%  | -10% | -1% | -2% | -1% |
| E8       | -2%                               | -3%  | -3%  | 2%  | 0%  | 1%  |
| F4       | -2%                               | -5%  | -1%  | 2%  | 1%  | -3% |
| F5       | 3%                                | 0%   | 1%   | 1%  | 3%  | -2% |
| G5       | 3%                                | 0%   | 0%   | 0%  | 0%  | -1% |
| G6       | 2%                                | -2%  | -3%  | -2% | -1% | -4% |
| G7       | 54%                               | -1%  | -5%  | -3% | -2% | -3% |
| Promedio | 15%                               | 20%  | 14%  | 12% | 7%  | 2%  |

Tabla A4.2.4 Gradientes hidráulicos verticales calculados entre el nivel de agua sobre la barra y 25 cm bajo la superficie de la misma en Barra N°3 (parte 2)

| Nido     | GHVs en Barra N°3 (nidos 1 a 20) |      |      |      |      |      |      |      |      |
|----------|----------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|          | M1                               | M2   | M3   | M4   | M5   | M6   | M7   | M8   | M9   |
|          | 1%                               | 4%   | 4%   | 2%   | -1%  | 1%   | 1%   | 1%   | 1%   |
|          | -                                | -23% | -21% | -20% | -17% | -18% |      | -25% | -25% |
|          | -                                | -26% | -26% | -24% |      |      |      |      | -30% |
|          | -16%                             | -13% | -15% | -16% | -17% | -17% | -17% | -17% | -16% |
|          | 0%                               | -3%  | -4%  | -4%  | -7%  | -4%  | -5%  | -4%  | -3%  |
| 6        | -1%                              | -18% | -17% | -9%  | -1%  | 3%   | -3%  | 1%   | -1%  |
| 7        | -                                | -17% | -16% | -14% | -13% | -16% | -9%  | -24% | -23% |
| 8        | -1%                              | -12% | -12% | -3%  | -2%  | -3%  | -3%  | -3%  | -4%  |
| 9        | -12%                             | -5%  | -5%  | -4%  | -6%  | -5%  |      | -10% | -9%  |
| 10       | -                                | -27% | -25% | -29% | -    | -    | -    | -    | -    |
| 11       | -                                | -19% | -18% | -    | -    | -    | -    | -    | -    |
| 12       | 4%                               | 4%   | 2%   | 3%   | 2%   | 2%   | 1%   | 4%   | 4%   |
| 13       | -7%                              | -6%  | -7%  | -8%  | -6%  | -10% | -7%  | -7%  | -7%  |
| 14       | 2%                               | 16%  | 0%   | 4%   | 2%   | 3%   | 5%   | 3%   | 2%   |
| 15       | 7%                               | 7%   | 7%   | 8%   | 7%   | 9%   | 7%   | 6%   | 7%   |
| 16       | 5%                               | 2%   | 2%   | 4%   | 4%   | 3%   | 4%   | 5%   | 3%   |
| 17       | 1%                               | 0%   | -1%  | 1%   | 0%   | 0%   | 1%   | 1%   | -1%  |
| 18       | 7%                               | 2%   | 2%   | 3%   | 3%   | 3%   | 2%   | 2%   | 1%   |
| 19       | 16%                              | -4%  | -2%  | -1%  | -1%  | 0%   | -1%  | 0%   | -2%  |
| 20       | -1%                              | -2%  | 0%   | -1%  | 1%   | 1%   | 0%   | 1%   | 1%   |
| Promedio | 16%                              | 19%  | 18%  | 15%  | 14%  | 14%  | 17%  | 19%  | 20%  |

### Anexo 4.3 Pruebas de infiltración para cada barra

Tabla A4.3.1 Resultados de pruebas de infiltración, Kr y Kv para la Barra N°1 (parte 1).

| Nido | Pruebas de infiltración en Barra N°1 (nidos 1 a 4) |                             |           |           |
|------|----------------------------------------------------|-----------------------------|-----------|-----------|
|      | Tiempo (s)                                         | Caudal (cm <sup>3</sup> /s) | Kr (cm/s) | Kv (cm/s) |
| 1    | 16.3                                               | 55.21                       | 2.51E-02  | 2.51E-02  |
| 2    | 24.3                                               | 37.04                       | 1.28E-02  | 1.28E-02  |
| 3    | 13.1                                               | 68.7                        | 3.89E-02  | 3.89E-02  |
| 4    | 34.7                                               | 25.94                       | 2.49E-02  | 2.49E-02  |

Tabla A4.3.2 Resultados de pruebas de infiltración, Kr y Kv para la Barra N°1 (parte 2).

| Nido     | Pruebas de infiltración en Barra N°1 (nidos 4 a 12) |                             |           |           |
|----------|-----------------------------------------------------|-----------------------------|-----------|-----------|
|          | Tiempo (s)                                          | Caudal (cm <sup>3</sup> /s) | Kr (cm/s) | Kv (cm/s) |
| 5        | 8.6                                                 | 104.65                      | 1.07E-01  | 1.07E-01  |
| 6        | 14.9                                                | 60.4                        | 7.05E-02  | 7.05E-02  |
| 7        | 56.5                                                | 15.93                       | 1.82E-02  | 1.82E-02  |
| 8        | 13.7                                                | 65.69                       | 7.52E-02  | 7.52E-02  |
| 9        | 9.4                                                 | 95.74                       | 9.63E-02  | 9.63E-02  |
| 10       | 27.5                                                | 32.73                       | 3.75E-02  | 3.75E-02  |
| 11       | 6.5                                                 | 138.46                      | 1.45E-01  | 1.45E-01  |
| 12       | 10.7                                                | 84.11                       | 9.40E-02  | 9.40E-02  |
| Promedio | 19.68                                               | 65.38                       | 6.21E-02  | 6.21E-02  |

Tabla A4.3.3 Resultados de pruebas de infiltración, Kr y Kv para la Barra N°3.

| Nido     | Pruebas de infiltración en Barra N°3 |                             |           |           |
|----------|--------------------------------------|-----------------------------|-----------|-----------|
|          | Tiempo (s)                           | Caudal (cm <sup>3</sup> /s) | Kr (cm/s) | Kv (cm/s) |
| 1        | 3.27                                 | 275.51                      | 1.25E-01  | 1.25E-01  |
| 2        | 10.4                                 | 86.54                       | 2.99E-02  | 2.99E-02  |
| 3        | 4.9                                  | 183.67                      | 1.04E-01  | 1.04E-01  |
| 4        | 9.6                                  | 93.75                       | 9.02E-02  | 9.02E-02  |
| 5        | -                                    | -                           | -         | -         |
| 6        | 46.33                                | 19.42                       | 2.27E-02  | 2.27E-02  |
| 7        | 6.7                                  | 134.33                      | 1.54E-01  | 1.54E-01  |
| 8        | 37.17                                | 24.22                       | 2.77E-02  | 2.77E-02  |
| 9        | 6.6                                  | 136.36                      | 1.37E-01  | 1.37E-01  |
| 10       | 3.3                                  | 272.73                      | 3.13E-01  | 3.13E-01  |
| 11       | 5.58                                 | 161.43                      | 1.69E-01  | 1.69E-01  |
| 12       | 4.16                                 | 216.35                      | 2.42E-01  | 2.42E-01  |
| 13       | 7.2                                  | 125                         | 1.40E-01  | 1.40E-01  |
| 14       | 5.5                                  | 163.64                      | 1.83E-01  | 1.83E-01  |
| 15       | 5.3                                  | 169.81                      | 1.90E-01  | 1.90E-01  |
| 16       | 4.25                                 | 211.76                      | 2.37E-01  | 2.37E-01  |
| 17       | 6.9                                  | 130.43                      | 1.46E-01  | 1.46E-01  |
| 18       | 4.85                                 | 185.57                      | 2.07E-01  | 2.07E-01  |
| 19       | -                                    | -                           | -         | -         |
| 20       | 14.7                                 | 61.22                       | 6.84E-02  | 6.84E-02  |
| Promedio | 10.37                                | 147.32                      | 1.44E-01  | 1.44E-01  |

#### Anexo 4.4 $K_r$ y $K_v$ para cada barra

Tabla A4.4.1 Conductividad hidráulica vertical de sedimentos aledaños al primer mini-piezómetro de cada nido en la Barra N°1, para cada medición realizada

| Nido     | Kv (cm/s) en Barra N°3 |      |      |      |      |
|----------|------------------------|------|------|------|------|
|          | M1                     | M2   | M3   | M4   | M5   |
| 1        | 0.03                   | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 |
| 2        | 0.01                   | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 |
| 3        | 0.04                   | 0.04 | 0.03 | 0.04 | 0.04 |
| 4        | 0.02                   | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 |
| 5        | 0.11                   | 0.10 | 0.09 | 0.10 | 0.10 |
| 6        | 0.07                   | 0.06 | 0.06 | 0.07 | 0.06 |
| 7        | 0.02                   | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 |
| 8        | 0.08                   | 0.07 | 0.06 | 0.07 | 0.07 |
| 9        | 0.10                   | 0.09 | 0.08 | 0.09 | 0.09 |
| 10       | 0.04                   | 0.03 | 0.03 | 0.03 | 0.03 |
| 11       | 0.14                   | 0.13 | 0.12 | 0.14 | 0.13 |
| 12       | 0.09                   | 0.09 | 0.08 | 0.09 | 0.09 |
| Promedio | 0.06                   | 0.06 | 0.05 | 0.06 | 0.06 |

Tabla A4.4.2 Conductividad hidráulica vertical de sedimentos en la Barra N°2 para cada medición realizada (calculado como  $K_v$  promedio de Barra N°1, variado según la temperatura en cada medición en Barra N°2).

| Kv (cm/s) en Barra N°2 |      |      |      |      |      |
|------------------------|------|------|------|------|------|
| M1                     | M2   | M3   | M4   | M5   | M6   |
| 0.05                   | 0.05 | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.06 |

Tabla A4.4.3 Conductividad hidráulica vertical de sedimentos aledaños al primer mini-piezómetro de cada nido en la Barra N°3 para cada medición realizada (parte 1)

| Nido | Kv (cm/s) para Barra N°3 (nidos 1 a 4) |      |      |      |      |      |      |      |      |
|------|----------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|      | M1                                     | M2   | M3   | M4   | M5   | M6   | M7   | M8   | M9   |
| 1    | 0.13                                   | 0.11 | 0.11 | 0.10 | 0.10 | 0.10 | 0.11 | 0.12 | 0.11 |
| 2    | 0.03                                   | 0.03 | 0.03 | 0.02 | 0.02 | 0.03 | 0.03 | 0.03 | 0.03 |
| 3    | 0.10                                   | 0.10 | 0.09 | 0.09 | 0.08 | 0.09 | 0.09 | 0.10 | 0.10 |
| 4    | 0.09                                   | 0.08 | 0.08 | 0.07 | 0.07 | 0.08 | 0.08 | 0.09 | 0.08 |

Tabla A4.4.4 Conductividad hidráulica vertical de sedimentos aledaños al primer mini-piezómetro de cada nido en la Barra N°3 para cada medición realizada (parte 2)

| Nido     | Kv (cm/s) para Barra N°3 (nidos 5 a 20) |      |      |      |      |      |      |      |      |
|----------|-----------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|          | M1                                      | M2   | M3   | M4   | M5   | M6   | M7   | M8   | M9   |
| 5        |                                         | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 6        | 0.02                                    | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 |
| 7        | 0.15                                    | 0.14 | 0.13 | 0.13 | 0.12 | 0.13 | 0.14 | 0.15 | 0.14 |
| 8        | 0.03                                    | 0.03 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.03 | 0.03 | 0.03 |
| 9        | 0.14                                    | 0.13 | 0.12 | 0.11 | 0.11 | 0.11 | 0.12 | 0.13 | 0.13 |
| 10       | 0.31                                    | 0.29 | 0.27 | 0.26 | 0.25 | 0.26 | 0.28 | 0.30 | 0.29 |
| 11       | 0.17                                    | 0.15 | 0.15 | 0.14 | 0.13 | 0.14 | 0.15 | 0.16 | 0.16 |
| 12       | 0.24                                    | 0.22 | 0.21 | 0.20 | 0.19 | 0.20 | 0.22 | 0.23 | 0.22 |
| 13       | 0.14                                    | 0.13 | 0.12 | 0.12 | 0.11 | 0.12 | 0.13 | 0.13 | 0.13 |
| 14       | 0.18                                    | 0.17 | 0.16 | 0.15 | 0.15 | 0.15 | 0.17 | 0.18 | 0.17 |
| 15       | 0.19                                    | 0.17 | 0.16 | 0.16 | 0.15 | 0.16 | 0.17 | 0.18 | 0.17 |
| 16       | 0.24                                    | 0.22 | 0.20 | 0.20 | 0.19 | 0.20 | 0.22 | 0.23 | 0.22 |
| 17       | 0.15                                    | 0.13 | 0.13 | 0.12 | 0.12 | 0.12 | 0.13 | 0.14 | 0.13 |
| 18       | 0.21                                    | 0.19 | 0.18 | 0.17 | 0.17 | 0.17 | 0.19 | 0.20 | 0.19 |
| 19       |                                         | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 20       | 0.07                                    | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.05 | 0.06 | 0.06 | 0.07 | 0.06 |
| Promedio | 0.14                                    | 0.12 | 0.11 | 0.11 | 0.10 | 0.11 | 0.12 | 0.12 | 0.12 |

#### Anexo 4.5 Áreas de influencia para cada barra

Tabla A4.5.1 Áreas de influencia (Thiessen) e inundadas para cada nido en Barra N°1, para cada medición realizada (parte 1).

| Nido | Áreas de Influencia e inundadas (m2) para Barra N°1 (nidos 1 a 8) |         |         |         |         |         |
|------|-------------------------------------------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
|      | Thiessen                                                          | M1      | M2      | M3      | M4      | M5      |
| 1    | 132.984                                                           | 82.477  | 82.477  | 82.477  | 82.477  | 82.477  |
| 2    | 134.059                                                           | 99.766  | 99.766  | 99.766  | 99.766  | 99.766  |
| 3    | 133.757                                                           | 66.375  | 68.018  | 48.317  | 45.864  | 66.205  |
| 4    | 247.49                                                            | 183.67  | 183.67  | 183.67  | 183.67  | 183.67  |
| 5    | 135.771                                                           | 135.771 | 135.771 | 111.261 | 106.391 | 135.771 |
| 6    | 212.981                                                           | 156.245 | 156.245 | 133.114 | 127.082 | 156.245 |
| 7    | 408.08                                                            | 0       | 0       | 0       | 0       | 0       |
| 8    | 275.268                                                           | 0       | 0       | 0       | 0       | 0       |

Tabla A4.5.2 Áreas de influencia (Thiessen) e inundadas para cada nido en Barra N°1, para cada medición realizada (parte 2).

| Nido  | Áreas de Influencia e inundadas (m2) para Barra N°1 (nidos 9 a 12) |          |         |          |          |          |
|-------|--------------------------------------------------------------------|----------|---------|----------|----------|----------|
|       | Thiessen                                                           | M1       | M2      | M3       | M4       | M5       |
| 9     | 257.577                                                            | 166.199  | 166.199 | 166.199  | 165.774  | 166.199  |
| 10    | 1085.761                                                           | 0        | 0       | 0        | 0        | 0        |
| 11    | 982.789                                                            | 0        | 0       | 0        | 0        | 0        |
| 12    | 1128.91                                                            | 747.424  | 747.424 | 747.424  | 747.424  | 747.424  |
| TOTAL | 5135.427                                                           | 1637.927 | 1639.57 | 1572.228 | 1558.448 | 1637.757 |
| %     | 100%                                                               | 32%      | 32%     | 31%      | 30%      | 32%      |

Tabla A4.5.3 Áreas de influencia e inundadas para cada nido en Barra N°2 (parte 1).

| Nido | Áreas de Influencia e inundadas (m2) para Barra N°1 (nidos A1 a D4) |        |       |        |        |        |        |
|------|---------------------------------------------------------------------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|
|      | Thiessen                                                            | M1     | M2    | M3     | M4     | M5     | M6     |
| A1   | 12.851                                                              | 8.125  | 6.723 | 8.302  | 12.603 | 12.851 | 12.851 |
| A2   | 7.277                                                               | 4.573  | 3.952 | 4.647  | 7.074  | 7.277  | 7.277  |
| A3   | 7.412                                                               | 4.6    | 3.757 | 4.705  | 5.599  | 7.412  | 7.412  |
| A4   | 8.296                                                               | 5.11   | 4.624 | 5.115  | 5.686  | 8.228  | 8.296  |
| A5   | 12.829                                                              | 5.978  | 5.683 | 6.062  | 9.444  | 12.829 | 12.829 |
| A6   | 19.861                                                              | 9.659  | 7.817 | 9.831  | 14.532 | 19.861 | 19.861 |
| A7   | 19.108                                                              | 10.259 | 8.754 | 10.483 | 15.833 | 19.108 | 19.108 |
| A8   | 19.198                                                              | 10.091 | 8.7   | 10.199 | 15.883 | 19.198 | 19.198 |
| A9   | 25.976                                                              | 12.947 | 9.838 | 12.843 | 21.61  | 25.976 | 25.976 |
| B1   | 7.537                                                               | 0      | 0     | 0      | 5.858  | 7.537  | 7.537  |
| B2   | 2.554                                                               | 0      | 0     | 0      | 0.487  | 2.554  | 2.554  |
| B3   | 2.768                                                               | 0      | 0     | 0      | 0      | 2.774  | 2.768  |
| B4   | 2.674                                                               | 0      | 0     | 0      | 0      | 1.752  | 2.674  |
| B5   | 2.978                                                               | 0      | 0     | 0      | 0      | 2.978  | 2.978  |
| C1   | 12.705                                                              | 0      | 0     | 0.024  | 12.229 | 12.705 | 12.705 |
| C2   | 2.441                                                               | 0      | 0     | 0      | 1.158  | 2.441  | 2.441  |
| C3   | 2.683                                                               | 0      | 0     | 0      | 0      | 2.683  | 2.683  |
| C4   | 2.56                                                                | 0      | 0     | 0      | 0      | 1.712  | 2.56   |
| C5   | 3.842                                                               | 0      | 0     | 0      | 0      | 3.842  | 3.842  |
| C6   | 9.484                                                               | 0      | 0     | 0      | 0      | 3.38   | 9.484  |
| C7   | 10.427                                                              | 0      | 0     | 0      | 0      | 7.424  | 10.427 |
| C8   | 10.289                                                              | 0      | 0     | 0      | 0      | 7.132  | 10.289 |
| C9   | 25.479                                                              | 12.365 | 9.248 | 13.094 | 17.598 | 23.49  | 25.479 |
| D2   | 8.876                                                               | 0.754  | 0.028 | 0.872  | 7.612  | 8.876  | 8.876  |
| D3   | 2.698                                                               | 0      | 0     | 0      | 0      | 2.698  | 2.698  |
| D4   | 2.576                                                               | 0      | 0     | 0      | 0      | 2.576  | 2.576  |

Tabla A4.5.4 Áreas de influencia e inundadas para cada nido en Barra N°2 (parte 2).

| Nido  | Áreas de Influencia e inundadas (m2) para Barra N°1 (nidos D5 a G7) |         |         |         |         |        |         |
|-------|---------------------------------------------------------------------|---------|---------|---------|---------|--------|---------|
|       | Thiessen                                                            | M1      | M2      | M3      | M4      | M5     | M6      |
| D5    | 3.52                                                                | 0       | 0       | 0       | 0       | 3.452  | 3.52    |
| E3    | 8.317                                                               | 1.974   | 1.176   | 2.036   | 5.148   | 8.317  | 8.317   |
| E4    | 2.66                                                                | 0       | 0       | 0       | 0       | 2.66   | 2.66    |
| E5    | 4.572                                                               | 0       | 0       | 0       | 0       | 4.579  | 4.572   |
| E6    | 9.541                                                               | 0       | 0       | 0       | 0       | 7.117  | 9.541   |
| E7    | 10.198                                                              | 0       | 0       | 0       | 0       | 2.834  | 10.198  |
| E8    | 22.692                                                              | 7.725   | 6.799   | 7.827   | 10.34   | 19.894 | 22.692  |
| F4    | 8.599                                                               | 4.038   | 3.067   | 4.119   | 6.671   | 8.599  | 8.599   |
| F5    | 3.63                                                                | 0       | 0       | 0       | 0.458   | 3.63   | 3.63    |
| G5    | 14.64                                                               | 9.29    | 7.588   | 9.515   | 14.468  | 14.64  | 14.64   |
| G6    | 21.069                                                              | 10.475  | 9.436   | 10.6    | 13.563  | 21.069 | 21.069  |
| G7    | 22.245                                                              | 13.678  | 12.834  | 13.837  | 16.562  | 22.245 | 22.245  |
| TOTAL | 377.062                                                             | 131.641 | 110.024 | 134.111 | 220.416 | 348.33 | 377.062 |
| %     | 100%                                                                | 35%     | 29%     | 36%     | 58%     | 92%    | 100%    |

Tabla A4.5.5 Áreas de influencia e inundadas para cada nido en Barra N°3 (parte 1).

[illegible]

Tabla A4.5.6 Áreas de influencia e inundadas para cada nido en Barra N°3 (parte 2).

| Nido      | Áreas de Influencia e inundadas (m2) Barra N°3 (nidos 19 y 20) |       |        |        |        |        |        |       |        |        |
|-----------|----------------------------------------------------------------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|--------|--------|
|           | Thiessen                                                       | M1    | M2     | M3     | M4     | M5     | M6     | M7    | M8     | M9     |
| 19        | 460.8                                                          | 0.00  | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00  | 0.00   | 0.00   |
| 20        | 690.66                                                         | 0.00  | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00  | 0.00   | 0.00   |
| Total     | 5271.02                                                        | 43.29 | 357.00 | 354.00 | 280.38 | 193.09 | 193.09 | 43.29 | 193.09 | 238.47 |
| Total (%) | 100%                                                           | 1%    | 7%     | 7%     | 5%     | 4%     | 4%     | 1%    | 4%     | 5%     |

