



**UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL**

**APLICACIÓN DE TRAZADORES EN LA EVALUACIÓN HIDROGEOLÓGICA EN EL
SISTEMA PAMPA PEINETA**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

VÍCTOR ENRIQUE GÁLVEZ ORELLANA

PROFESOR GUÍA:

GABRIELA CASTILLO MORALES

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

LEONEL BARRA ORTEGA

LAURA VITORIA CODINA

SANTIAGO DE CHILE

ABRIL 2011

RESUMEN DE LA MEMORIA
PARA OPTAR AL TITULO DE
INGENIERO CIVIL
POR: VÍCTOR GÁLVEZ O.
FECHA: 14/03/2011
PROF. GUIA: GABRIELA CASTILLO M.

“APLICACIÓN DE TRAZADORES EN LA EVALUACIÓN HIDROGEOLÓGICA EN EL SISTEMA PAMPA PEINETA”

En Chile, las aguas subterráneas son una fuente de gran explotación, principalmente en las zonas áridas del norte, donde prácticamente no existen aguas superficiales. Por este motivo, su buen manejo juega un rol fundamental para un desarrollo sustentable.

El trabajo de Título propuesto tiene como objetivo principal analizar la factibilidad de uso de un trazador biológico, apoyado del análisis de un trazador químico. Este estudio se realizó en el Sistema Pampa Peineta, ubicado aproximadamente a 100 kilómetros al noreste de la ciudad de Calama. Con los resultados obtenidos se estimaron velocidades y direcciones de los flujos de aguas subterráneas; datos que permitieron reafirmar hipótesis de direcciones de flujo determinadas previamente por métodos clásicos, e indirectos, de la hidrogeología.

Para este estudio se utilizó un trazador biológico (Bacteriófago MS2) y un trazador químico (NaCl), describiendo los procedimientos de terreno, análisis, resultados, ventajas, desventajas y costos. Los resultados obtenidos fueron muy acordes al comportamiento que posee el acuífero, presentando pequeñas variabilidades en los resultados producidos por detalles que se mencionan en los capítulos de este informe.

Finalmente, a partir de la experiencia adquirida, se proponen una serie de pasos para realizar ensayos de similares características, que permita reforzar de manera más potente las hipótesis planteadas con resultados concretos, teniendo en cuenta todos los pormenores ocurridos en esta primera campaña. De este modo, con este trabajo se cuenta con antecedentes certeros para abordar un tema no muy recurrido en Chile, el uso de trazadores biológicos en aguas subterráneas.

Agradecimientos

En primer lugar a mis padres, Jaime y María Eugenia, que me han apoyado en este proceso incondicionalmente.

A la profesora Gabriela Castillo por su apoyo en mi formación académica y constante disposición.

Al profesor Leonel Barra por su gentil colaboración en todo momento.

A la señora Laura Vitoria por su asistencia y contribución.

A Geo-Aguas por brindar la oportunidad de desarrollar este tema y la entrega de información para el estudio.

A mis profesores de enseñanza media, Gustavo Lefort y Luis Pavez, por sus enseñanzas y motivación para ser ingeniero.

Y como no, a todos los amigos conocidos durante estos años de estudios, especialmente a los muchachos de la sección 1.

Índice

| | |
|--|----|
| CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN | 9 |
| 1.1 Aspectos generales | 9 |
| 1.2 Motivación | 9 |
| 1.3 Objetivo | 10 |
| 1.4 Resultados obtenidos..... | 10 |
| 1.5 Organización del informe..... | 11 |
| CAPÍTULO 2: REVISIÓN DE ANTECEDENTES..... | 12 |
| 2.1 Conceptos generales de aguas subterráneas y procesos de transportes de solutos. | 12 |
| 2.2 Procesos de transporte de solutos en aguas subterráneas. | 14 |
| 2.3 Trazadores en aguas subterráneas..... | 17 |
| 2.3.1 Tipos de trazadores en aguas subterráneas..... | 19 |
| 2.3.1 Tipos comunes de ensayos de trazadores..... | 19 |
| 2.3.3 Consideraciones sobre inyección, seguimiento y resultados..... | 24 |
| 2.3.4 Precauciones..... | 24 |
| 2.3.5 Marco legal..... | 25 |
| CAPÍTULO 3: DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA PAMPA PEINETA..... | 27 |
| 3.1 Características..... | 27 |
| 3.2 Balance hidrológico..... | 36 |
| 3.2.1 Aporte por precipitaciones..... | 36 |
| 3.2.2 Salida Subterránea hacia Inacaliri..... | 39 |
| 3.2.3 Salida Subterránea hacia la Cuenca de Turi..... | 42 |
| 3.2.4 Balance y Entrada desde el Altiplano..... | 49 |
| CAPÍTULO 4: APLICACIÓN DE TRAZADORES SISTEMA PAMPA PEINETA..... | 50 |
| 4.1 Aspectos generales..... | 50 |
| 4.2 Trazador biológico..... | 50 |
| 4.3 Trazador químico..... | 55 |
| 4.4 Resultados e interpretación de resultados en el balance hidrológico..... | 59 |
| CAPÍTULO 5: PROPUESTA DE ENSAYO EN TERRENO..... | 64 |
| 5.1 Aspectos generales..... | 64 |
| 5.2 Evaluación preliminar de la zona..... | 64 |
| 5.3 Pozos..... | 65 |

| | | |
|-------------------------------|---------------------|----|
| 5.4 | Procedimientos..... | 65 |
| CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES..... | | 68 |
| BIBLIOGRAFÍA..... | | 73 |

ANEXO A Perfiles de conductividad eléctrica y temperatura en pozos de aplicación trazador químico.

ANEXO B Preparación del inóculo biológico

ANEXO C Interpretación de ensayo flujo paralelo y pozo único

Índice de tablas.

| | | |
|-----------|---|-----|
| Tabla 3.1 | Vértices de zona de exploración. | .28 |
| Tabla 3.2 | Listado de pozos. | .31 |
| Tabla 3.3 | Resultados Test de homogeneidad. | .38 |
| Tabla 3.4 | Resumen de caudales por precipitación. | .40 |
| Tabla 3.5 | Resumen de resultados de la función de transferencia. | .47 |
| Tabla 3.6 | Hipsometría cuenca río Toconce (antes represa Sendos). | .48 |
| Tabla 4.1 | Concentración, pH y turbiedad de trazador biológico. | .55 |
| Tabla 4.2 | Costos ensayo trazador biológico. | .56 |
| Tabla 4.3 | Características de inyección. | .58 |
| Tabla 4.4 | Costos ensayo trazador químico. | .60 |
| Tabla 4.5 | Datos para cálculo de velocidades con el trazador biológico. | .61 |
| Tabla 4.6 | Datos para cálculo de velocidades con el trazador químico. | .61 |
| Tabla 4.7 | Velocidad de flujo subterráneo con uso de trazador biológico. | .62 |
| Tabla 4.8 | Velocidad de flujo subterráneo con uso de trazador químico. | .62 |
| Tabla 4.9 | Analogía entre trazadores. | .64 |

Índice de figuras.

| | |
|--|-----|
| Figura 1.1 Ubicación general de la zona de estudio. | . 9 |
| Figura 1.2 Esquema de balance hidrológico sistema Pampa Peineta. | .10 |
| Figura 2.1 Velocidad de agua en medios porosos. | .16 |
| Figura 2.2 Dispersión hidrodinámica. | .16 |
| Figura 2.3 Ensayo de inyección/ extracción en pozo único. | .21 |
| Figura 2.4 Ensayo de dilución puntual en pozo único. | .21 |
| Figura 2.5 Ensayo de flujo uniforme o paralelo en pozos múltiples. | .22 |
| Figura 2.6 Ensayo de flujo radial en pozos múltiples: flujo divergente. | .23 |
| Figura 2.7 Ensayo de flujo radial: flujo convergente. | .24 |
| Figura 2.8 Ensayo de flujo radial: ensayo dipolar. | .25 |
| Figura 3.1 Cuenca Pampa Peineta. | .29 |
| Figura 3.2 Esquema del balance hidrológico. | .30 |
| Figura 3.3 Disposición de los pozos. y geología superficial del área en estudio. | .32 |
| Figura 3.4 Perfiles pozos PPX-6, PPE-10. PPX-3, PPE-5 y PPX-5.. . . . | .34 |
| Figura 3.5 Perfiles pozos PPX-2 y PPE-5. | .36 |
| Figura 3.6 Pozo PPX-3. | .37 |
| Figura 3.7 Pampa Peineta, Mayo 2010. | .39 |
| Figura 3.8 Gráfico Precipitación v/s cota. | .41 |
| Figura 3.9 Pozos de Pampa Peineta. | .42 |

| | | |
|--|-------|-----|
| Figura 3.10 Perfil geofísico TEM en el lugar de salida. | . . . | .42 |
| Figura 3.11 Test de Cooper – Jakob. | . . . | .42 |
| Figura 3.12 Diagrama de Portezuelos. | . . . | .44 |
| Figura 3.13 Autocorrelograma. | . . . | .45 |
| Figura 3.14 Cuenca río Toconce (antes represa Sendos). | . . . | .49 |
| Figura 3.15 Balance hidrológico. | . . . | .50 |
| Figura 4.1 Placas de bacteriófago MS2 sobre cultivo de <i>E. coli</i> 15597. | . . . | .52 |
| Figura 4.2 Inyección Pozo PPX5 en Pampa Peineta. | . . . | .53 |
| Figura 4.3 Bailer. | . . . | .54 |
| Figura 4.4 Muestra pozo PPE-9. | . . . | .54 |
| Figura 4.5 Muestra pozo PPX-2. | . . . | .54 |
| Figura 4.6 Concentración de fago MS2 en el tiempo. | . . . | .56 |
| Figura 4.7 Conductividad pozo PPE-9. | . . . | .59 |
| Figura 4.8 Conductividad pozo PPE-10. | . . . | .59 |
| Figura 4.9 Conductividad pozo PPX-5. | . . . | .60 |

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1 Aspectos generales

Esta memoria forma parte de un estudio sobre inyección de trazadores en aguas subterráneas realizado por la empresa Geo – Aguas Consultores en el norte del país; específicamente en la II región de Antofagasta al noreste de la ciudad de Calama. La intención de este estudio es aportar información hidrogeológica de detalle para realizar una gestión integral de los recursos hídricos en el sistema Pampa Peineta, ubicado en la cabecera del río Toconce, por el sur, y San Pedro de Inacaliri, por el norte; ambos afluentes del río Loa (ver figura 1.1).

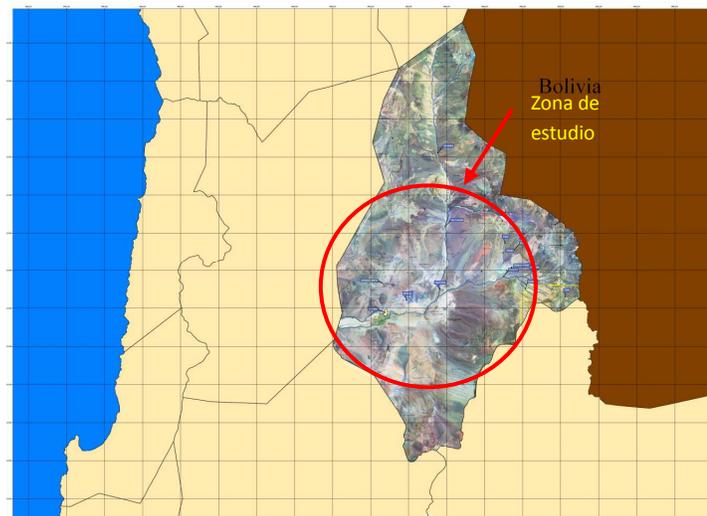


Figura 1.1 Ubicación general de la zona de estudio.

En este informe se presentan los pasos que se siguieron en terreno para la realización del presente estudio, los resultados obtenidos y su análisis, cuyo objetivo fue el de realizar un ensayo de trazadores que permitiera corroborar hipótesis de direcciones de flujos surgidas previamente.

1.2 Motivación

Tras la importancia del recurso agua y el evidente incremento en la dificultad de explotarlo en forma sustentable, se hace necesario realizar evaluaciones más precisas que permitan evitar pérdidas, ya sean económicas, daños ambientales, entre otras. En el norte del país el agua superficial es escasa y presenta en general altas salinidades (lagos, lagunas y salares). Es por

esto que el agua subterránea, mucho más abundante, pero que sustenta muchas veces los sistemas superficiales, es un bien muypreciado; ya sea para el consumo humano, aunque suele también presentar problemas su calidad; o para procesos industriales, que principalmente se enfocan al desarrollo de la minería, siendo ésta la principal actividad económica en el país.

Por esta razón, las aguas subterráneas juegan un rol fundamental en el desarrollo, siendo pieza clave en casi todas las actividades que se llevan a cabo en el sector. Este trabajo de título permitirá conocer metodologías adecuadas para realizar evaluaciones para obtener el recurso por medio de trazadores, de manera que en futuros estudios se puedan obtener resultados mucho más certeros.

1.3 Objetivo.

El objetivo general es conocer la factibilidad del trazador biológico y químico en los ensayos de trazadores de aguas subterráneas mediante su aplicación en el sistema Pampa Peineta.

Tras esto, como objetivos específicos en este trabajo, están conocer las velocidades y direcciones de los flujos de aguas subterráneas en el sistema Pampa Peineta y con estos resultados, corroborar la hipótesis de direcciones de agua y balance hidrológico que posee la cuenca. A continuación se detalla un esquema de éste.



Figura 1.2 Esquema del balance hidrológico sistema Pampa Peineta.

1.4 Resultados obtenidos.

Al término de esta memoria se han obtenido los resultados necesarios para obtener velocidades y direcciones de los flujos de aguas subterráneas, dando a conocer las ventajas y desventajas de los diferentes métodos utilizados

Del análisis de los resultados se propone el desarrollo de un modelo experimental que sirva para conocer de manera más detallada el uso de los trazadores.

1.5 Organización del informe.

El presente informe se divide en seis capítulos que se presentan a continuación:

Capítulo 1: Introducción.

Se presenta por medio de una descripción general el problema a abordar, motivación, objetivos, resultados esperados y la estructura del presente informe.

Capítulo 2: Revisión de antecedentes.

En este capítulo se presentan los conceptos básicos asociados a las aguas subterráneas y los fenómenos que rigen cada proceso. Luego se describen los distintos trazadores que pueden utilizarse en aguas subterráneas, indicando sus características y dando a conocer el estado de arte en esta materia, el que permite estudiar el funcionamiento de los trazadores empleados.

Capítulo 3: Descripción del sistema Pampa Peineta.

Este capítulo se refiere a la descripción del acuífero a estudiar, presentando además la geología del lugar, pozos de estudio y el balance hidrológico de la zona.

Capítulo 4: Aplicación de trazadores en el sistema Pampa Peineta.

En este capítulo se describen los trazadores a utilizados, sus características y aplicabilidad. Además se detallan los procedimientos aplicados en terreno y sus fundamentos. También, se presentan los costos involucrados en dichos procesos.

Posteriormente se dan a conocer los resultados obtenidos y su análisis, los que se interpretan en el balance hidrológico del sistema, permitiendo corroborar o no las hipótesis planteadas, mencionadas en los objetivos.

Finalmente se presenta una analogía de los trazadores utilizados.

Capítulo 5: Propuesta de ensayo en terreno.

En este capítulo se plantea un modelo experimental similar a la experiencia realizada en esta memoria, tomando en cuenta la experiencia, las ventajas, desventajas y limitaciones; con el objetivo de potenciar las conclusiones de este informe y obtener resultados de mejor calidad.

Capítulo 6: Conclusiones.

En este capítulo se analizan los resultados obtenidos en la memoria y las hipótesis planteadas previamente; se presentan y se discuten las limitaciones, proponiendo recomendaciones para estudios futuros.

CAPÍTULO 2: REVISIÓN DE ANTECEDENTES.

2.1 Conceptos generales de aguas subterráneas y procesos de transportes de solutos.

Se denominan aguas subterráneas a las existentes entre los intersticios del terreno. El agua se introduce a la tierra por infiltración en las zonas de recarga, alimentando las napas natural y artificialmente, debido a la lluvia, derretimiento de nieve, recarga proveniente de regadíos o infiltración de aguas superficiales (ríos, lagos, humedales, etc.).

Producto de la gravedad el agua fluye internamente a través del suelo desde la zona no saturada, alcanzando el nivel freático, como el punto más alto en la zona saturada; el cual aumenta o disminuye en razón a la cantidad de agua infiltrada. De esta manera el nivel freático en ciertos casos aflora sobre el nivel de la tierra formando lagos y humedales, mientras que en otros casos puede estar una gran cantidad de metros bajo la superficie del terreno.

La zona saturada, formada por distintos tipos de suelos como arcillas, limos, arenas, entre otros, presenta diferentes propiedades de almacenamiento y transmisividad en función de sus características físicas (por ejemplo: porosidad, granulometría). Estos sectores se conocen como acuíferos, donde se satisfacen condiciones para extraer agua. En otros casos, la capacidad de transmisión es baja, denominándose estas zonas como acuitardos. Finalmente la unidad geológica que es incapaz de almacenar o transmitir agua se conoce como acuífugo (Custodio – Llamas, 1975).

En relación a los acuíferos, existen de dos tipos:

Acuífero libre: Formaciones permeables que van desde unos pocos metros a cientos de metros, ubicados entre el nivel freático y un límite inferior de la zona saturada menos permeable, generalmente compuesto por rocas o arcillas. El agua recarga el acuífero producto de la infiltración a través de la zona no saturada. La superficie del nivel de agua se encuentra a presión atmosférica.

Acuífero confinado: Son acuíferos cubiertos por capas de sedimentos y rocas, de manera que el agua contenida se encuentra bajo presión (mayor a la atmosférica). La recarga de estos acuíferos se produce generalmente a través de grandes zonas como lagos o humedales. Comúnmente la descarga se hace en cuerpos de agua de menor envergadura a varios kilómetros de distancia de la recarga; Los manantiales y vertientes son popularmente reconocidos como zonas de descarga. En estos acuíferos la superficie piezométrica puede

encontrarse por encima de la cota del terreno, por lo que en estas ocasiones si se perforara un pozo en este tipo de acuíferos, es posible que el agua brote por sí sola debido a la diferencia de presiones entre la superficie y el acuífero.

En la segunda mitad del siglo XIX, el ingeniero francés, Henry Darcy, encontró que la tasa o velocidad a la cual el agua fluye a través del medio poroso es directamente proporcional a la diferencia de altura entre los dos extremos del lecho filtrante, e inversamente proporcional a la longitud del lecho. De esta manera llegó a la siguiente relación (Custodio – Llamas, 1975):

$$Q = -K * A * \frac{dh}{dl} \quad (2.1)$$

Donde:

Q : Flujo, [L³/T]

K : Coeficiente de permeabilidad, [L/T]

A : Área perpendicular al escurrimiento, [L²].

$\frac{dh}{dl}$: Gradiente hidráulico [-].

2.2 Procesos de transporte de solutos en aguas subterráneas.

Advección: Se define como el proceso mediante el cual el agua “arrastra” las partículas recorriendo la dirección definida por las líneas de flujo. La relación 2.1 establece que la velocidad de Darcy es proporcional al gradiente hidráulico, donde la constante de proporcionalidad es el coeficiente de permeabilidad K . La velocidad real entre los poros es determinada mediante la definición de flujo volumétrico por unidad de área; para eso se define una tasa que incluye la proporción volumétrica del fluido en movimiento.

$$v = \frac{q}{n_e} = \frac{K*i}{n_e} \quad (2.2)$$

Donde:

v : Velocidad de poros [L/T].

q : Caudal específico [L/T].

n_e : Porosidad [-].

En un sistema de flujo uniforme, la velocidad de poros corresponde a la velocidad en la dirección de flujo principal y la porosidad efectiva hace relación al porcentaje de poros interconectados donde el fluido escurre (FCIHS, 2009).

$$M_A = v * c \quad (2.3)$$

Donde:

M_A : Flujo másico [M/L²/T].

c : Concentración del soluto en el agua [M/L³].

Difusión molecular: Producto del choque entre las partículas dentro del fluido, estas poseen un movimiento que parece aleatorio. Esto se origina a partir del segundo principio de la termodinámica tendiendo el sistema a un estado de mayor entropía, produciendo un flujo de masa de los puntos de mayor concentración hacia los de menor concentración. Esto se denomina movimiento Browniano y viene dado por la primera ley de Fick definida como (FCIHS, 2009):

$$M_{DM} = -D_m * \nabla c \quad (2.4)$$

Donde:

M_{DM} : Flujo másico [M/L²/T].

D_m : Coeficiente de difusión molecular que depende del tipo de soluto y de las características del disolvente [L²/T].

∇c : Gradiente de concentración en el soluto [M/L³/L].

El signo negativo indica que el transporte va desde la mayor a la menor concentración y aunque las partículas se mueven igualmente, lo hacen de forma que el número de estas dentro del mismo volumen permanece constante por no haber gradiente de concentraciones, ya que los flujos en distintas direcciones se compensan entre sí.

Dispersión hidrodinámica: Corresponde a la variación de velocidad producto de los siguientes factores (FCIHS, 2009):

- Dentro de un poro existe variación de velocidad entre las sección de los granos (Fig 2.1).

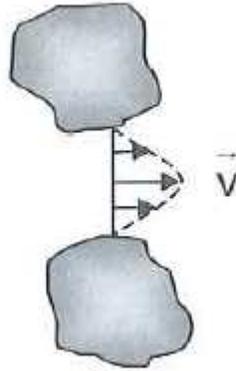


Figura 2.1 Velocidad de agua en medios porosos (Fuente: Hidrogeología-FCIHS)

- Diferencia de tamaño y orientación entre poros.
- Variación de granulometría y material entre un punto y otro.

Físicamente no representa un nuevo mecanismo, sino el resultado de la enorme variabilidad de velocidades puntuales en el flujo subterráneo conjuntamente con la advección y la difusión molecular (FCIHS, 2009) (Fig. 2.2).

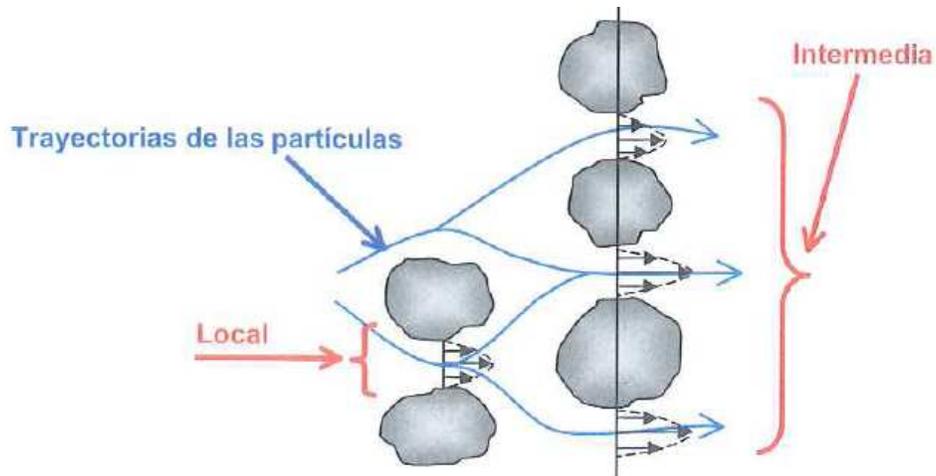


Figura 2.2 Dispersión hidrodinámica (Fuente: Hidrogeología-FCIHS).

Experimentalmente se ha determinado que el flujo másico de dispersión hidrodinámica es:

$$M_D = -\frac{|q|}{n_e} \left(\alpha_L \frac{\partial y}{\partial x}, \alpha_T \frac{\partial y}{\partial y}, \alpha_T \frac{\partial y}{\partial z} \right) \quad (2.5)$$

Donde:

M_D : Flujo másico [M/L²/T].

α_L : Dispersividad longitudinal en la dirección paralela al flujo [L].

α_T : Dispersividad transversal en las direcciones perpendiculares al flujo [L].

Luego con el balance de flujos másicos en función de los procesos mencionados se llega de esta forma a la siguiente relación:

$$\frac{\partial}{\partial t}(n_e c) = -\nabla(n_e(M_A + M_D + M_{DM})) + M' \quad (2.6)$$

Donde:

M' : Entradas externas de flujo másico [M/L²/T].

Se pueden realizar ciertas soluciones particulares a la relación general de transporte, añadiendo también otros procesos de retardo como la adsorción instantánea reversible. Para el fin de este informe (ensayo de trazadores) no es necesario desarrollar dichas soluciones particulares, si no comprender el movimiento de los solutos en el agua (FCIHS, 2009).

2.3 Trazadores en aguas subterráneas.

Un trazador se define como la materia o energía que transportada por las aguas subterráneas, permite entregar información sobre la dirección y/o velocidad del movimiento del agua, y por consiguiente de un contaminante potencial que pudiera ser transportado por ésta. La información que entrega el trazador se puede complementar con información adicional permitiendo obtener parámetros del acuífero, información sobre la permeabilidad, porosidad, dispersividad o el coeficiente de distribución química. Existen trazadores naturales y artificiales, estos últimos pueden ser añadidos accidental o controladamente (Custodio – Llamas, 1975).

En determinadas ocasiones es de esencial importancia conocer si existe conexión entre dos puntos de un acuífero. Para ello se han llevado a cabo, desde el siglo antepasado, experimentos consistentes en mezclar, en el agua de un aprovechamiento subterráneo localizado aguas arriba, una sal o un tinte, el cual puede ser reconocido en otro aprovechamiento aguas abajo. A esta técnica se le conoce como trazadores en aguas subterráneas. Los puntos más comunes de inyección son cavernas y para muestreo en manantiales, pozos, norias, drenes lagos, presas (Lesser, 1978).

El trazador ideal es el que se mueve a similar velocidad que el agua, por esta razón debe poseer ciertas características:

- No se debe degradar, es decir, tener un comportamiento conservativo. Por este motivo se debe tener muy en cuenta la interacción que posee con el terreno, principalmente sobre el intercambio iónico, adsorción, etc. Se debe tener en cuenta también la separación o incorporación a la fase acuosa en relación a la precipitación, disolución y filtración. Finalmente debe ser estable biológica y químicamente, controlando el pH, potencial Red-Ox y los fenómenos de descomposición.
- No debe alterar las propiedades físico-químicas del agua al ser añadido (densidad, viscosidad).
- No debe alterar las propiedades físico-químicas del acuífero (permeabilidad, porosidad).
- Por ningún motivo debe causar efectos nocivos que pudiesen repercutir sobre las personas, el medio ambiente, prestando simultáneamente atención a los problemas de persistencia.
- Otras consideraciones de interés son el uso de pequeñas cantidades, alta solubilidad, fácil de detectar a bajas concentraciones, fácil manejo, no tóxico ni molesto, barato de fácil obtención y manipulación; y que no exista ni en el agua ni en el terreno (FCIHS, 2009).

Lamentablemente el trazador ideal no existe, por consiguiente el trazador real debe tener mucha consideración con todo lo mencionado, teniendo en cuenta principalmente: Costos, interacción con el terreno, duración, detección, problemas sanitarios, interacción con otros trazadores y lógicamente la experiencia.

En los ensayos de trazadores se recomienda siempre utilizar más de un trazador. De este modo, se pueden obtener resultados cuantitativos mucho más cercanos a la realidad (Custodio – Llamas, 1975).

2.3.1 Tipos de trazadores en aguas subterráneas.

Entre los principales trazadores se encuentra:

- Temperatura: Se utiliza principalmente en fugas en los embalses, conociendo el perfil de temperaturas en éste se puede determinar aproximadamente el lugar de donde proviene la fuga. De este modo no representa valores de velocidades ni dirección (Custodio-Llamas, 1975).
- Sales: Son el trazador artificial más antiguo que se conoce, los más comunes son cloruro de sodio y cloruro de potasio. Se disuelve en agua y posteriormente se incorporan al acuífero. Muchas veces se requieren grandes volúmenes mediante este método, haciendo su uso limitado. Son muy fáciles de detectar y en ciertas ocasiones presentan interacción con el terreno dependiendo del tipo de suelo (Custodio-Llamas, 1975).
- Microorganismos: Son los más recientemente investigados, entregan uno de los mejores resultados con respecto a la calidad, debido al tamaño de las partículas, pero a la vez pueden presentar interacción con el terreno y retenerse en éste en el caso que se encuentre alimento para su supervivencia. Por esta misma razón tienen una duración limitada y deben ser detectados bajo análisis de laboratorio. Entre los más aplicados están los virus y las bacterias (Custodio-Llamas, 1975), siendo las bacterias de mayor uso debido a su crecimiento y factibilidad, en ciertos casos también levaduras (Gerba, 1984).
- Colorantes orgánicos: Destacan entre los más usados la eosina, fluoresceína y rodamina. Algunas sustancias tienen la propiedad de emitir luz fluorescente y otros funcionan como tintes, a medida que ésta decae, se estima la velocidad del flujo. Tienen costos mayores a los ya mencionados, puede presentar interacción con otros trazadores y uno de los principales problemas es que el color puede causar alarma, por lo que no son aplicables en aguas que se usan para consumo (Custodio-Llamas, 1975) (Lesser, 1978).
- Isótopos y gases: Entre los isótopos se encuentran radioactivos y estables; y entre los gases hay inertes y radioactivos. En el caso de los radioactivos están prohibidos en algunos países. Presentan costos muy altos para su operación con una duración variable dependiendo del tipo de isótopo. La interacción con el terreno es nula. Finalmente para la detección se hacen análisis en laboratorio y por su composición tiene complicaciones en el muestreo y manipulación (Custodio-Llamas, 1975).

2.3.1 Tipos comunes de ensayos de trazadores.

En general se clasifican en 2 tipos de ensayos según el número de pozos involucrados:

- Pozo único: Se realiza una inyección instantánea, haciendo luego una extracción o simplemente una dilución puntual que luego es monitoreada.
- Múltiples pozos: Inyección instantánea o continua. Para flujos paralelos y radiales; donde la inyección se hace en uno y la medición en otro.

Existen también otros ensayos para medios fracturados o acuíferos kársticos, pero no serán descritos en este informe.

Técnicas de pozo único:

Ensayo de inyección/extracción:

Se introduce un volumen determinado de trazador en el pozo. A continuación se introduce un volumen de agua dos a tres veces el volumen que se ha introducido del trazador, para asegurar que penetre al acuífero. En un tiempo T el trazador se habrá desplazado una distancia R como consecuencia de su flujo natural. Finalmente se bombea y se mide la concentración del trazador en función del tiempo (FCIHS, 2009) (Fig. 2.3).

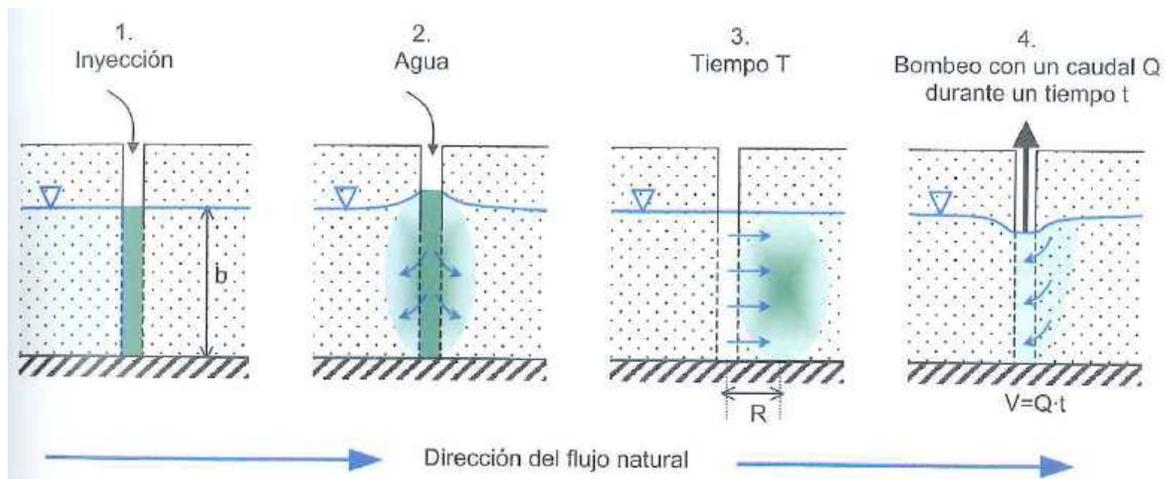


Figura 2.3 Ensayo de inyección/ extracción en pozo único (Fuente: Hidrogeología-FCIHS).

Ensayo de dilución puntual:

Se introduce un volumen determinado de trazador en el pozo. Posteriormente se mide la evolución de la concentración en el mismo pozo, a intervalos de tiempo determinados (FCIHS, 2009) (Fig. 2.4).

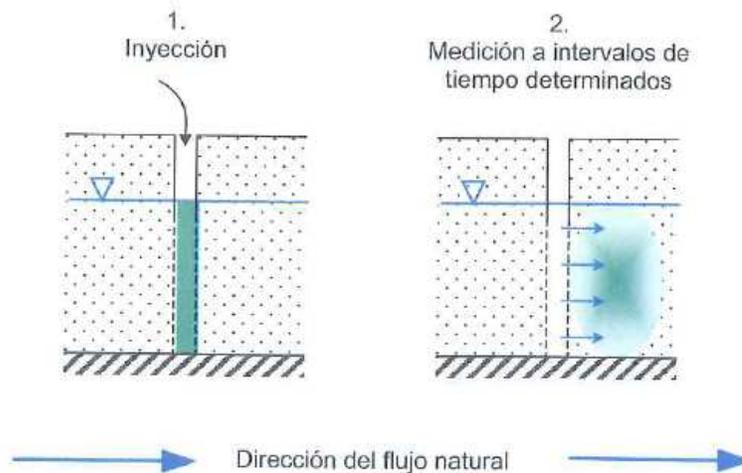


Figura 2.4 Ensayo de dilución puntual en pozo único (Fuente: Hidrogeología-FCIHS).

Técnicas de pozos múltiples:

Ensayo de flujo uniforme o paralelo:

Debe existir flujo natural paralelo, el medio debe ser homogéneo e isotrópico, la velocidad de flujo constante al igual que el espesor del acuífero. Por último no deben existir fenómenos de absorción ni degradación.

El ensayo consiste en inyectar el trazador en un pozo y luego en otro cercano, y en dirección del flujo natural aguas abajo del pozo de inyección, se mide la evolución temporal de la concentración de trazador que llega (FCIHS, 2009) (Fig. 2.5).

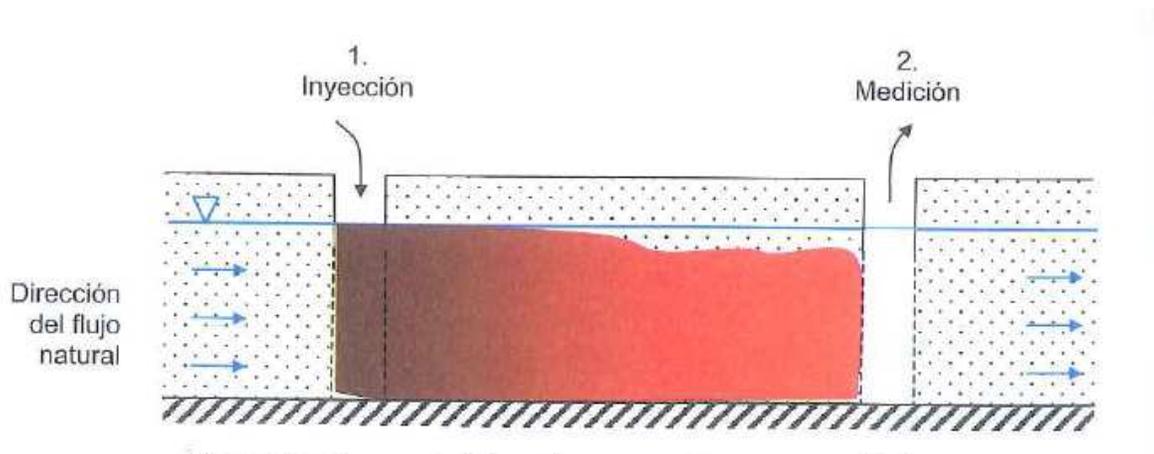


Figura 2.5 Ensayo de flujo uniforme o paralelo en pozos múltiples (Fuente: Hidrogeología-FCIHS).

Ensayo de flujo radial:

Impone agua al acuífero, por bombeo o inyección, una velocidad muy superior a la velocidad natural de flujo. Debe haber medio homogéneo e isotrópico, velocidad radial constante, espesor de acuífero prácticamente igual entre los puntos de inyección y medición. El trazador no se debe afectar por absorción, degradación.

Se inyecta un caudal Q hasta llegar a flujo estacionario, con una cantidad determinada de trazador de forma puntual o continua. Luego se muestrea el agua en uno o más puntos alrededor, midiendo la evolución temporal de la concentración del trazador (FCIHS, 2009) (Fig. 2.6).

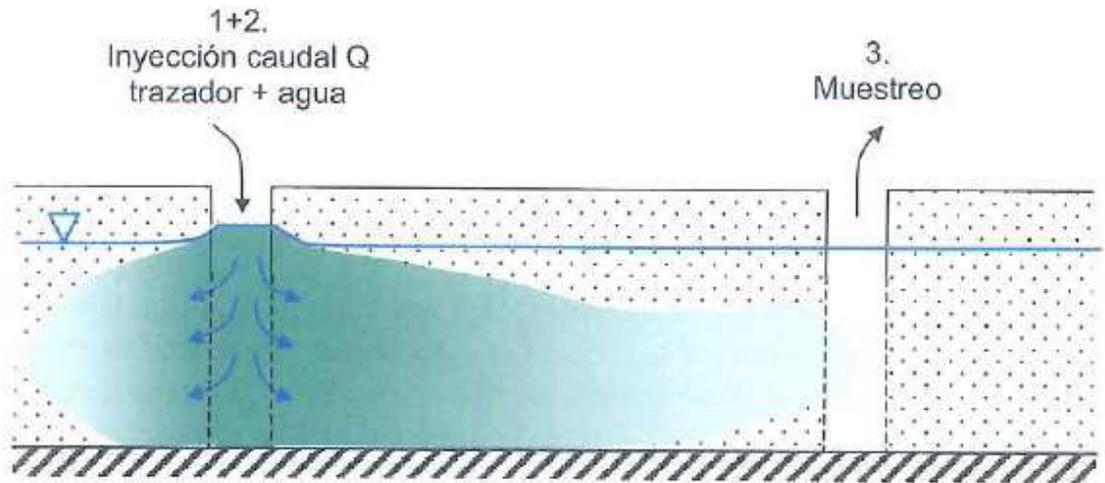


Figura 2.6 Ensayo de flujo radial en pozos múltiples: flujo divergente (Fuente: Hidrogeología-FCIHS).

Flujo convergente:

Se bombea en un pozo añadiendo el trazador posteriormente, de forma puntual o continua, en uno o varios cercanos hasta llegar a flujo estacionario. Se mide la evolución temporal de concentración del trazador (FCIHS, 2009) (Fig. 2.7).

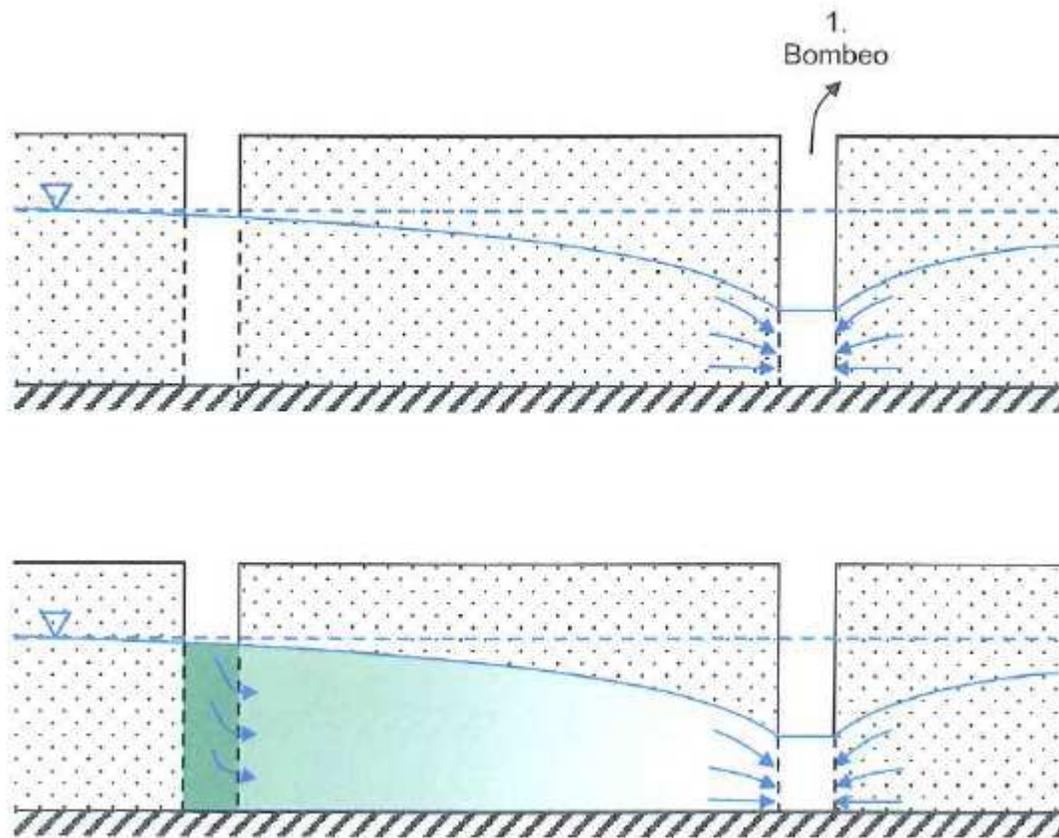


Figura 2.7 Ensayo de flujo radial: flujo convergente (Fuente: Hidrogeología-FCIHS).

Ensayo dipolar:

Se inyecta un caudal Q_1 en un pozo. Se bombea con caudal Q_2 en otro cercano midiendo la concentración del trazador en el pozo de bombeo (FCIHS, 2009) (Fig. 2.8).

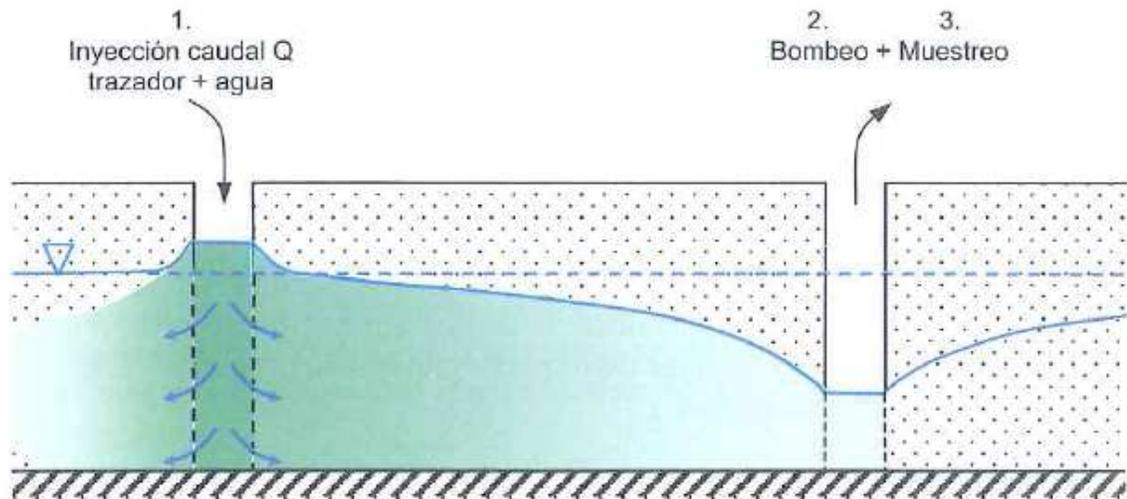


Figura 2.8 Ensayo de flujo radial: ensayo dipolar (Fuente: Hidrogeología-FCIHS).

2.3.3 Consideraciones sobre inyección, seguimiento y resultados.

Inyección: Existen diferentes instrumentos para realizarla, generalmente se recurre a la instalación de un tubo o manguera con el volumen de trazador dentro de ésta y un lastre en la parte inferior (FCIHS, 2009). Se sube el tubo a velocidad constante a lo largo del sondeo, obteniendo una concentración uniforme en el pozo. La concentración a inyectar debe ser entre 100 a 1000 veces superior al mayor de los valores de concentración correspondientes a la concentración mínima detectable o concentración de fondo natural.

Seguimiento: Es conveniente que la duración de un ensayo de trazadores sea lo suficientemente prolongada, para obtener una curva completa, por lo general se estima entre 3 a 4 veces el tiempo medio de llegada del trazador (FCIHS, 2009). En métodos como ensayos de dilución puntual, se recomienda que la última medida del ensayo sea al menos un 10% de la concentración inicial. Existen instrumentos de toma de muestra simultánea a distintas alturas y otros de medición a una altura constante. Lo importante que durante la medición, exista una congruencia con los lugares de medición dentro del pozo.

2.3.4 Precauciones.

Generalmente al realizar estos ensayos surgen complicaciones que dificultan su operación, por lo que cabe tomar nota sobre las siguientes precauciones (Custodio-Llamas, 1975):

- Equipos: Traslado, manipulación y puesta en marcha.
- Acuífero bien caracterizado: Conocer flujos, penetración de sondeo y tramos aislados.
- Inyección correcta: Mezclar bien el trazador en la columna de agua del pozo.
- Flujo constante: Que posea un régimen estacionario, prestando atención al aumento de las velocidades de flujo producto del bombeo.
- Muestreo incorrecto: Tomar un número de muestras suficientes que permita caracterizar detalladamente la curva de concentración del trazador para así, obtener resultados correctos.

Frecuentemente existen 2 tipos de errores a la hora de hacer un ensayo de trazadores. Por mala elección del trazador o por desconocimiento del sistema hidrogeológico (Custodio-Llamas, 1975).

Por mala elección de trazador:

- Problemas de adsorción con el terreno.
- Capacidad de detección por concentraciones bajas.
- Aumento de viscosidad o densidad del agua en concentraciones demasiado elevadas.

Por desconocimiento del sistema hidrogeológico:

- Por direcciones de flujo mal estimadas, se obtienen mediciones parciales o totalmente nulas.
- Si se estiman equivocadamente los parámetros del acuífero, lógicamente el plan de medidas establecido será incorrecto, y por lo tanto los resultados no serán válidos.

2.3.5 Marco legal.

Con respecto a la normativa a seguir en Chile para la inyección de trazadores, se sugiere la jurisdicción de la federal "Underground Injectio Control" (UIC), administrado por "Enviromental Protection Agency" (EPA) en los Estados Unidos (Holmbeck-PelHam, 2000). Divide a los tipos de trazadores en 3 categorías

- A: Incluye trazadores que no producen daños adversos al ser humano ni al medio ambiente. (Por ejemplo: Potasio, Magnesio, Cloruro)
- B: Esta categoría incluye trazadores que actualmente no están aprobados del todo, pero pueden ser aprobados tras una revisión adicional (Por ejemplo: colorantes, bacterias).

- C: Trazadores no adecuados para la inyección en aguas subterráneas, salvo justificadas razones y un estricto control. (Por ejemplo: Isótopos radioactivos).

CAPÍTULO 3: DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA PAMPA PEINETA.

3.1 Características.

El sistema Pampa Peineta se encuentra en la II región de Antofagasta, aproximadamente 100 kilómetros al noreste de la ciudad de Calama, presentando un clima de estepa en altura. Este clima abarca la zona sobre los 3.000 m, comprendiendo la Puna de Atacama. Esta altura hace que las temperaturas sean muy frías, lo que provoca que muchas de las precipitaciones sean de nieve. Por sobre los 5.700 metros, las bajas temperaturas hacen que las nieves sean eternas, caracterizando los picachos más elevados de la Región.

Las precipitaciones responden al régimen estival, no logrando vencer el carácter de desierto y siguen disminuyendo hacia el sur.

Los terrenos en donde se emplazan los pozos de prueba, se encuentran delimitados por un polígono, cuyos vértices, identificados a través de las coordenadas UTM, según carta “Calama” del Instituto Geográfico Militar, escala 1:250.000, Datum Provisorio Sudamericano de 1956, son los siguientes:

Tabla 3.1 Vértices de zona de exploración.

| Vértices Polígono | | |
|--------------------|---------|-----------|
| 6.573,69 Hectáreas | | |
| Vértices | Este(m) | Norte(m) |
| 1 | 595.289 | 7.552.225 |
| 2 | 593.900 | 7.555.850 |
| 3 | 600.950 | 7.556.060 |
| 4 | 602.000 | 7.557.000 |
| 5 | 606.000 | 7.552.000 |
| 6 | 603.500 | 7.549.100 |
| 7 | 598.610 | 7.547.877 |
| 8 | 598.750 | 7.548.500 |

En la figura 3.1 se muestra la zona de estudio:

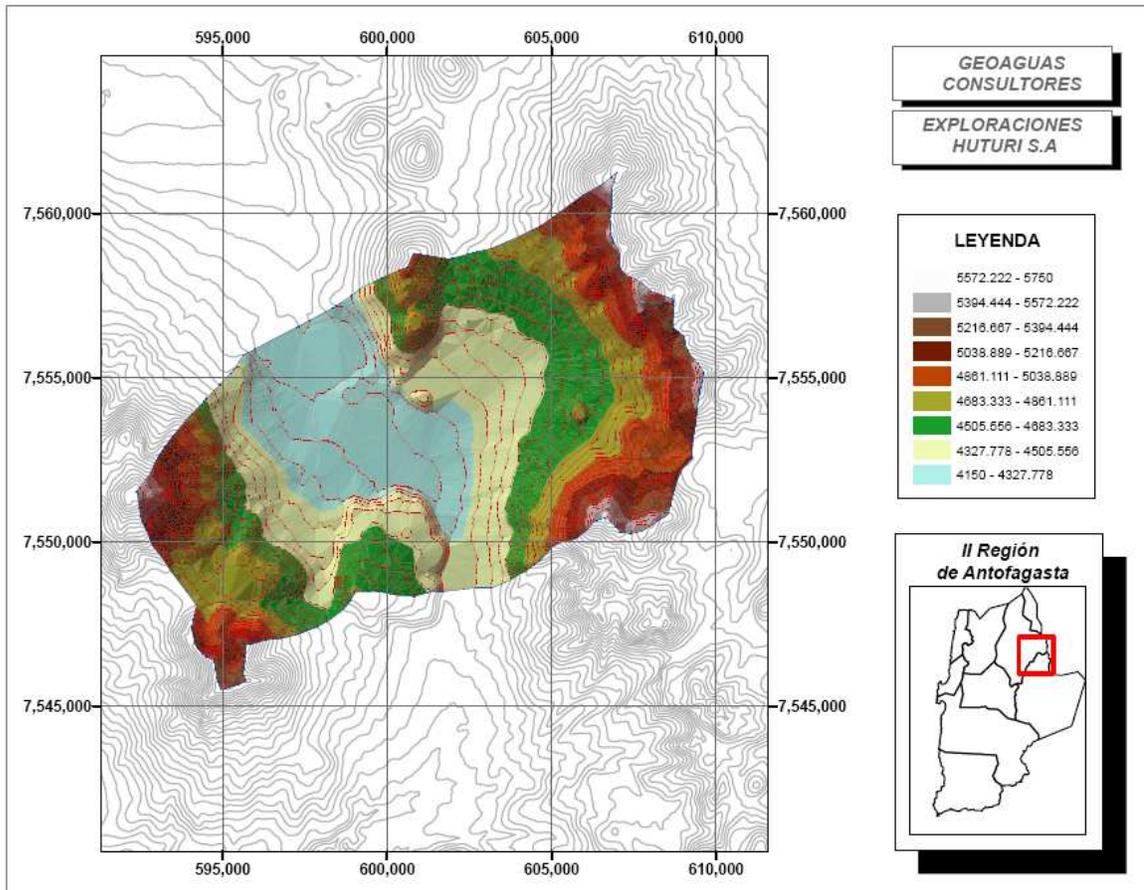


Figura 3.1 Cuenca Pampa Peineta (Fuente: Geo-Aguas Consultores).

Las formaciones acuíferas conocidas en el país corresponden básicamente a sedimentos cuaternarios no consolidados de origen fluvial, fluvio-glacial, aluvial, aluvional, laháricos y otros. Siguiendo la división planteada en el mapa hidrogeológico de Chile (DGA, 1986) se puede distinguir en el territorio nacional continental 3 provincias hidrogeológicas: altiplánica, andina vertiente pacífico y cuencas costeras. La provincia andina vertiente pacífica está dividida en 5 subprovincias, correspondiendo la zona de estudio a la subprovincia Norte Grande que incluye acuíferos formados por rellenos cuaternarios adyacentes a los escasos cauces superficiales de la zona; el gran sistema acuífero de la Pampa del Tamarugal, un extenso y potente relleno aluvional terciario y cuaternario; y el sector del Desierto de Atacama, con sistemas acuíferos aluvionales de características poco favorables para su explotación por su escasa recarga. Por este motivo es necesario realizar detallados estudios que permitan determinar el recurso hídrico.

Con respecto al balance hidrológico, las cabeceras de los ríos Toconce y San Pedro de Inacaliri, definen al menos dos potenciales zonas de salidas del sistema analizado. El río Inacaliri junto con sus afluentes, drenan una superficie de 1.087 km². El río Salado tiene sus orígenes a los pies de la Cadena del Volcán Tatio, a unos 4,200 m.s.n.m. Después, toma dirección Oeste. En su curso medio recibe desde el norte el río Toconce, reunido con el Hojalar. Más abajo recibe por su costado izquierdo al río Caspana. Una tercera potencial zona de salida, corresponde a una eventual descarga al acuífero del Salar de Turi. Se conoce, además, la hidrología de la cuenca, por lo que se puede estimar el caudal entrante por precipitaciones.

Realizando un balance hídrico, se desea calcular el caudal entrante a la cuenca, desde el altiplano. En la figura 3.2, se muestra el balance realizado que más adelante será explicado detalladamente.

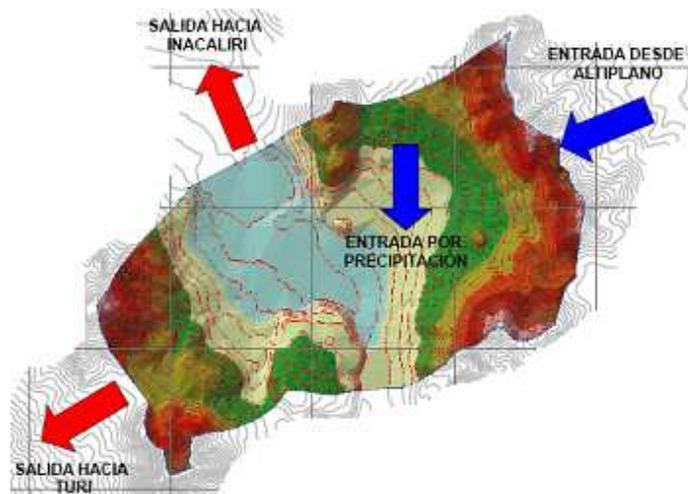


Figura 3.2 Esquema del balance hidrológico (Fuente: GEO-AGUAS Consultores).

Con respecto los estudios geológicos y geofísicos realizados por Geo-Aguas Consultores en el sector de Pampa Peineta, se tiene información sobre la geología de superficie, estratigrafía de pozos y geofísica.

En el plano superficial la cuenca de Pampa Peineta se compone de depósitos no consolidados de origen volcánico, tales como gravas monomícticas andesíticas. Se observan a la vez otros depósitos no consolidados, no tan relevantes, al norponiente del área de estudio, dispuestos sobre la ladera sur de río Inacaliri, conformados por arenas de grano medio a fino. Todos estos depósitos de tipo aluvial y eólico, rellenan la cuenca y se disponen sobre lavas andesíticas, dacíticas y tobas.

En el área de estudio se han construido una serie de pozos profundos, de bombeo y observación, los cuales han permitido conocer la litología, distribución y potencias de las unidades de relleno y roca en subsuperficie. Sobre pozos se realizó la inyección y medición de trazadores. En la tabla 3.2 se muestra un listado de los pozos con sus características (Geo-Aguas, 2010):

Tabla 3.2 Listado de pozos.

| Punto | Coordenadas UTM (PSAD 56) | | Cota [m.s.n.m.] | Diámetro [pulgadas] | Profundidad [m] | Nivel de Agua [m.b.b.p.] |
|--------|------------------------------|----------|--------------------|------------------------|--------------------|--------------------------------|
| | Norte [m] | Este [m] | | | | |
| PPX-2 | 7.551.888 | 596.969 | 4315,46 | 2 | 300 | 150,99 |
| PPX-3 | 7.554.112 | 598.336 | 4214,21 | 2 | 254 | 52,29 |
| PPX-5 | 7.551.590 | 601.307 | 4239,01 | 2 | 170 | 64,56 |
| PPX-6 | 7.558.287 | 597.213 | 4098,88 | 2 | 152 | 41,53 |
| PPE-5 | 7.553.330 | 599.656 | 4229,45 | 14 | 250 | 63,47 |
| PPE-9 | 7.554.112 | 598.359 | 4214,11 | 14 | 250 | 51,63 |
| PPE-10 | 7.555.185 | 597.922 | 4176,50 | 14 | 250 | 48,55 |
| PPE-12 | 7.554.148 | 597.728 | 4206,54 | 14 | 250 | 45,37 |

La disposición de los pozos y geología superficial en el sistema Pampa Peineta se muestra en la figura 3.3

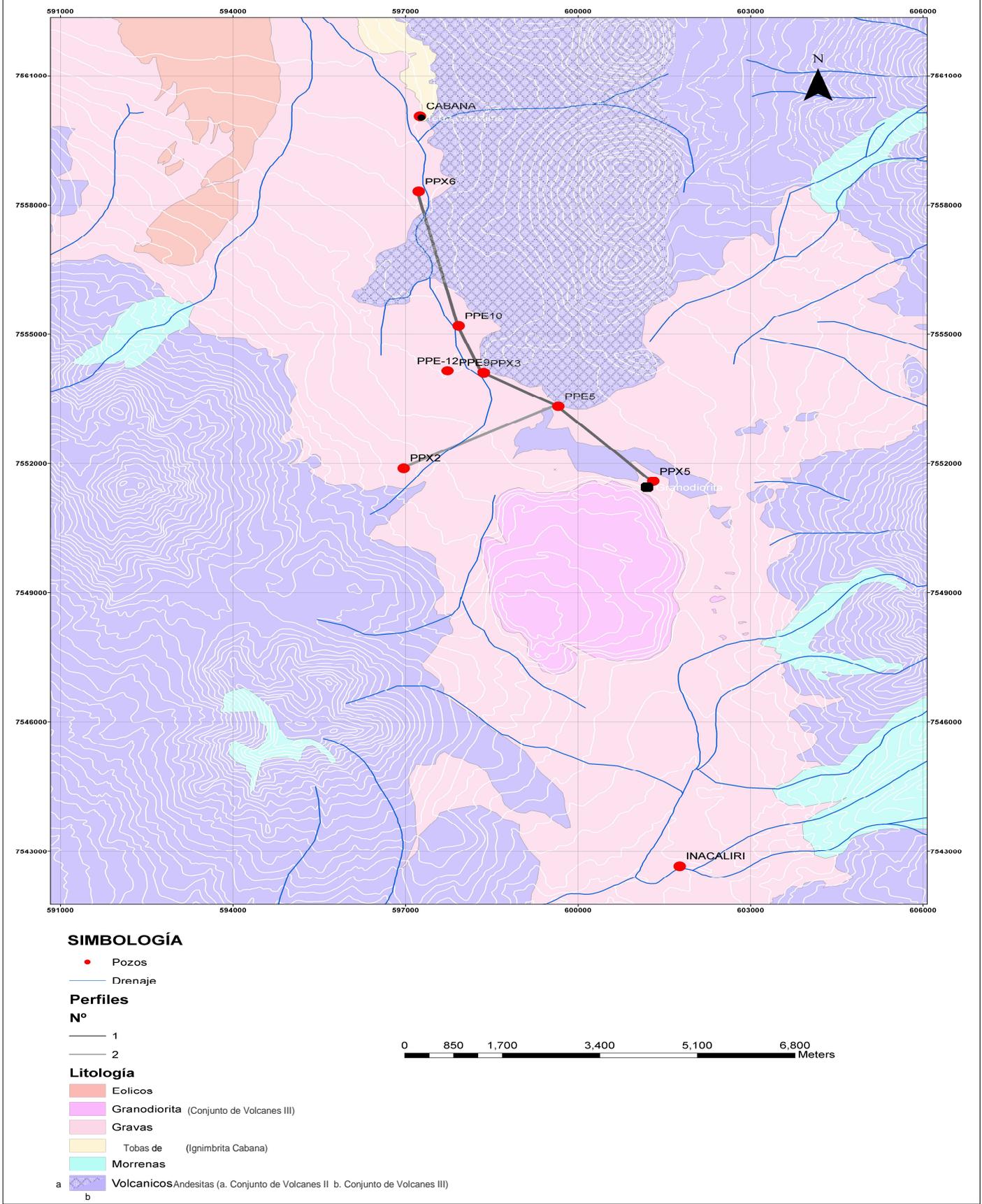


Figura 3.3 Disposición de los pozos y geología superficial del área en estudio (Fuente: Geo-Aguas Consultores).

Mientras se realizaba la perforación de dichos pozos, simultáneamente se recolectaba cada 1 metro una muestra del material atravesado para poder conocer la estratigrafía en cada punto. En general se aprecia una secuencia volcánica constituida en su mayoría por lavas andesíticas y dacíticas, con intercalaciones sedimentarias y tobas, cubierta en superficie por un relleno aluvial con potencias variables que alcanzan hasta los 130 metros.

Se trató de hacer una correlación de las unidades de roca descritas en superficie con la estratigrafía de los pozos, sin embargo, debido a la gran extensión de área de los flujos lávicos, que además es irregular, y la diversidad de centros volcánicos en el área, no se puede identificar una continuidad clara entre estas litologías. En profundidad se observan distintas coladas de lava, probablemente interdigitadas, con niveles de toba y cuerpos hipabisales de mayor cristalinidad, cuya similitud litológica complica la correlación con las unidades formales. No obstante, en sub-superficie es posible correlacionar las litologías, utilizando algunos niveles tobaceos que sirven de estratos guía.

En la figura 3.4 se entregan 2 perfiles, mostrando los pozos con su estratigrafía y su nivel de agua. La orientación de los perfiles se puede observar en la figura 3.3.

PERFIL 1

N

S

Altura(m.s.n.m)

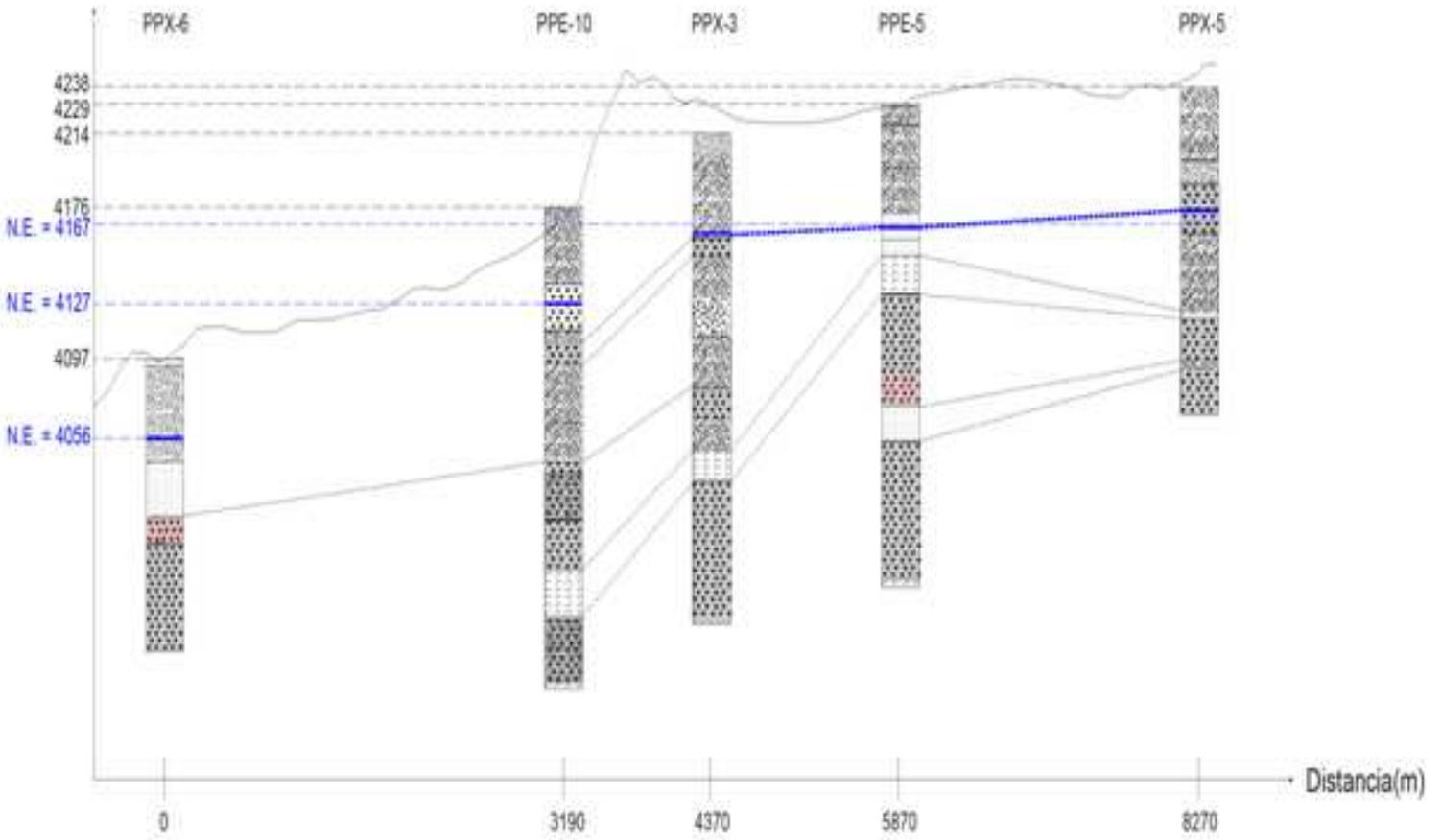


Figura 3.4 Perfiles pozos PPX-6, PPE-10, PPX-3, PPE-5 y PPX-5. (Fuente: Geo-Agua Consultores).

PERFIL 2

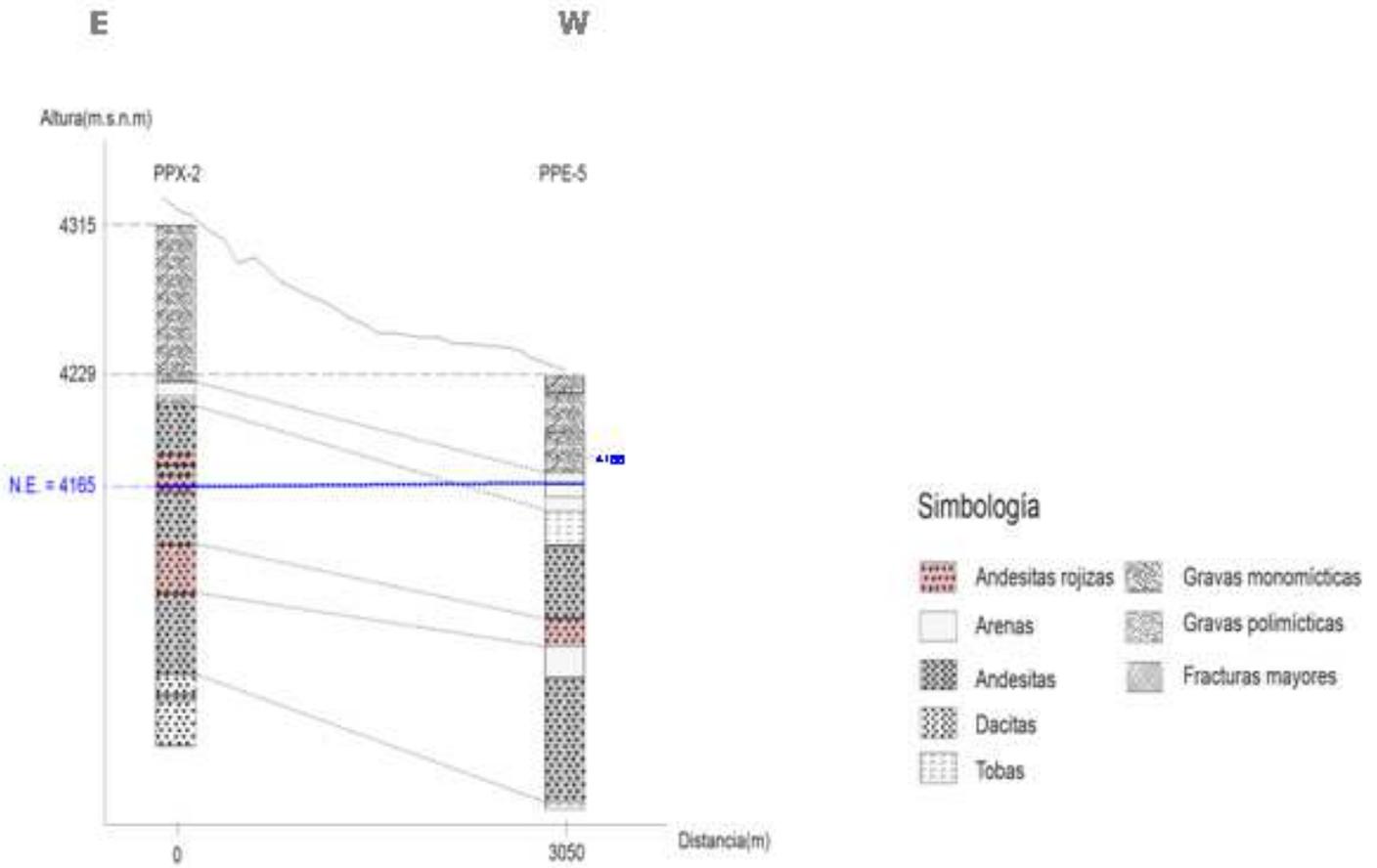


Figura 3.5 Perfiles pozos PPX-2 y PPE-5 (Fuente: Geo-Agua Consultores).



Figura 3.6 Pozo PPX-3.

En los perfiles, se puede observar una continuidad lateral, tanto de la unidad de relleno sedimentaria como de las rocas volcánicas y volcanoclásticas, observan además proyecciones del cuerpo hipabisal, granodiorítico, hacia el norte y norponiente. Estas rocas se presentan en algunos tramos fuertemente fracturadas y con intercalaciones de estratos descritos como sedimentos, pero que podrían corresponder a lavas y tobas alteradas y fracturadas (en el caso donde se describen fragmentos monomícticos con arcilla y/o arena).

Al observar los perfiles se ven algunos desplazamientos laterales de los estratos, los cuales podrían corresponder a fallas que no son visibles en superficie, al encontrarse cubierta por los depósitos modernos.

Los niveles de agua registrados en estos pozos muestran gradientes en dirección al norte y poniente de Pampa Peineta, aumentando notoriamente al norte del pozo PPX-3.



Figura 3.7 Pampa Peineta, Mayo 2010.

3.2 Balance hidrológico.

Como se muestra en la figura 3.2, se definen una entrada por precipitación, una entrada subterránea desde el altiplano y dos salidas subterráneas. A continuación se presentan los cálculos y aproximaciones para la cuantificación de estas entradas y salidas.

3.2.1 Aporte por precipitaciones.

Para el cálculo del caudal aportado por las precipitaciones en Pampa Peineta, se cuenta con un registro de 20 estaciones DGA con datos de precipitación mensual de diversos años. Estos datos fueron obtenidos por Geo – Aguas Consultores desde la Dirección General de Aguas. Antes de trabajar con estos datos, se realiza el test de homogeneidad hidrológica, test que verifica las estaciones pluviométricas que se relacionan directamente con la zona de estudio, descartando las otras en el análisis.

A continuación, se muestra una tabla con las estaciones con datos de precipitación disponibles en la zona estudiada, y los respectivos resultados del test realizado (Tabla 3.3).

Tabla 3.3 Resultados Test de homogeneidad.

| Estación | Test |
|----------------------|--------------|
| Socaire | Homogénea |
| Peine | Homogénea |
| Camar | Homogénea |
| San Pedro | Homogénea |
| Talabre | Homogénea |
| Toconao Exp | Homogénea |
| Toconao retén | Homogénea |
| El Tatio | No Homogénea |
| Linzor | No Homogénea |
| Parshall2 | Homogénea |
| Río Grande | Homogénea |
| Toconce | Homogénea |
| Ayquina | Homogénea |
| Salado Embalse | Homogénea |
| Cupo | Homogénea |
| Ojos de San Pedro | Homogénea |
| San Pedro de Chonchi | Homogénea |
| Inacaliri | Homogénea |
| Caspana | Homogénea |
| Chonchi en Embalse | Homogénea |

Con las estaciones que presentaron un test de homogeneidad positivo, se graficaron los valores de precipitación media anual en función de la cota, para poder obtener posteriormente el caudal aportado por las precipitaciones en la cuenca. En la figura 3.8 se muestra de forma gráfica la precipitación en función de la cota:

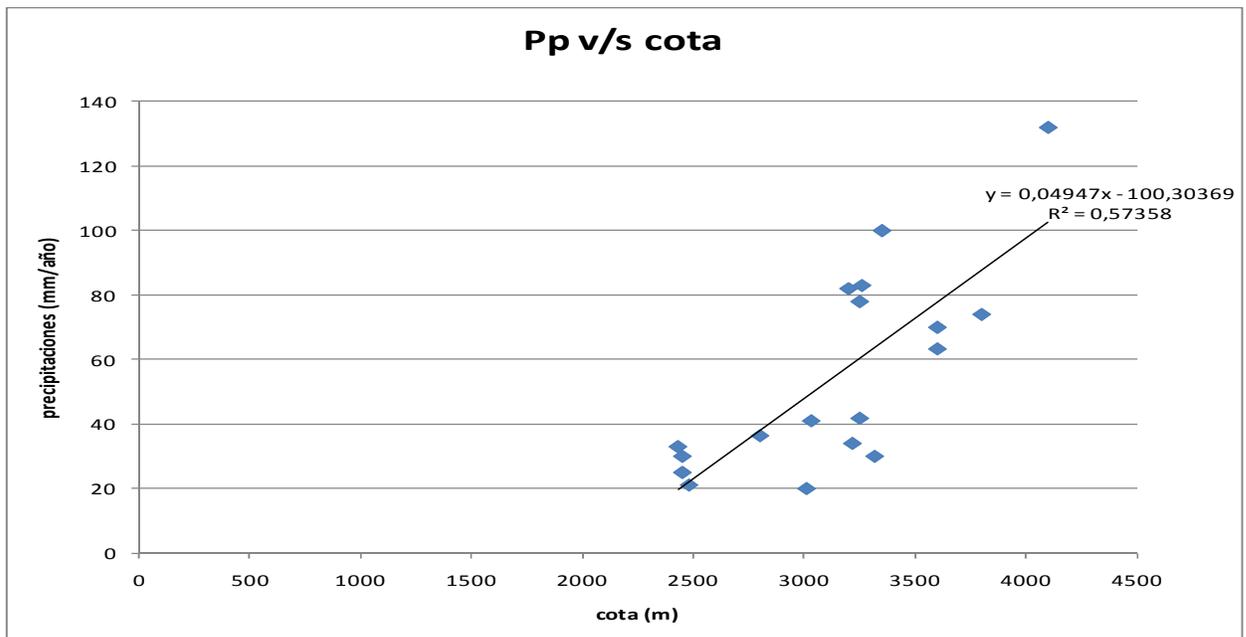


Figura 3.8 Gráfico Precipitación v/s cota.

Por lo que, la expresión para el perfil de precipitaciones queda de la siguiente manera:

$$Pp = 0,0495Z - 100,3 \quad (3.1)$$

Donde

Pp : Precipitación [mm/año].

Z : Cota [m].

También se provee la hipsometría de la zona (Tabla 3.4) , con lo que, calculando el área parcial y acumulada para cada cota, se obtiene el caudal correspondiente a cada altura queda y así la entrada total por precipitación en el área de estudio(Chow, 1994):

Tabla 3.4 Resumen de caudales por precipitación.

| Cota [m.s.n.m.] | Pp [mm/año] | Área Acumulada [km ²] | Área Parcial [km ²] | Q [l/s] |
|--------------------|----------------|---|---------------------------------------|------------|
| 4200 | 107,4 | 9,37 | 9,37 | 31,9 |
| 4300 | 112,4 | 33,93 | 24,55 | 87,4 |
| 4400 | 117,3 | 54,36 | 20,43 | 76,0 |
| 4500 | 122,3 | 73,17 | 18,80 | 72,8 |
| 4600 | 127,2 | 89,63 | 16,46 | 66,3 |
| 4700 | 132,2 | 103,68 | 14,05 | 58,8 |
| 4800 | 137,0 | 113,84 | 10,15 | 44,1 |
| 4900 | 142,0 | 121,10 | 7,25 | 32,6 |
| 5000 | 147,0 | 128,65 | 7,54 | 35,1 |
| 5100 | 151,9 | 133,61 | 4,96 | 23,8 |
| 5200 | 156,9 | 137,90 | 4,29 | 21,3 |
| 5300 | 161,8 | 141,31 | 3,40 | 17,4 |
| 5400 | 166,8 | 143,78 | 2,46 | 13,0 |
| 5500 | 171,7 | 145,26 | 1,48 | 8,0 |
| 5600 | 176,7 | 145,75 | 0,49 | 2,7 |
| 5700 | 181,6 | 145,87 | 0,12 | 0,6 |
| | | | Suma | 592.8 |

Por lo tanto el caudal total por precipitación, es de 592.8 [l/s]. Considerando, según recomendaciones de Geo – Aguas Consultores, que la infiltración en la cuenca es del orden del 15%, la recarga bruta debido a las precipitaciones sería de 88.9 [l/s] (Tabla 3.4).

3.2.2 Salida Subterránea hacia Inacaliri

Para la obtención del caudal de salida hacia Inacalari se utilizó la expresión de Darcy, relación (2.1) que calcula el caudal de agua pasante por una sección de acuífero conocida, en función del gradiente hidráulico y la permeabilidad del acuífero. El detalle de la obtención de cada uno de los parámetros se explica a continuación.

El gradiente hidráulico en la sección de paso fue obtenido mediante la información de niveles en los pozos mostrados en la figura 3.9

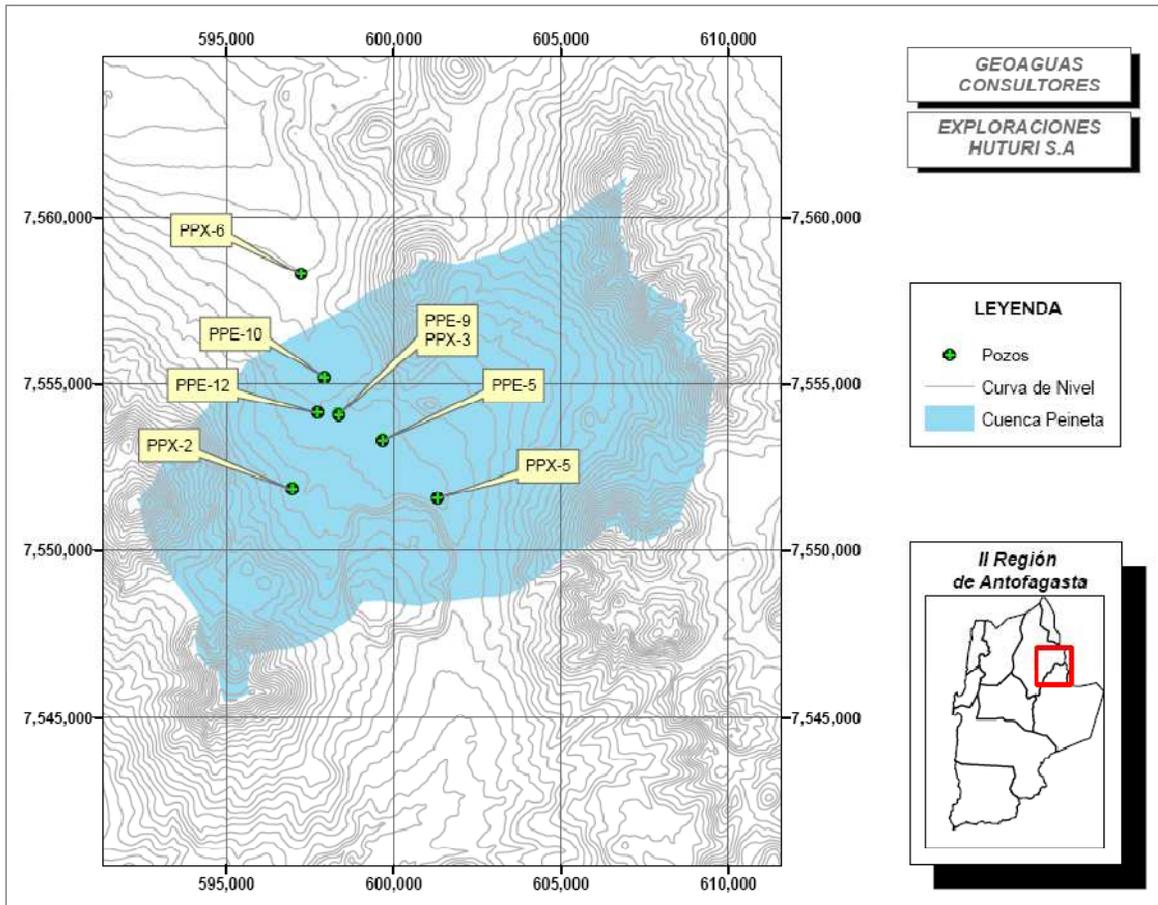


Figura 3.9 Pozos en Pampa Peineta (Fuente: Geo-Aguas Consultores).

Principalmente se consideraron los niveles en los pozos PPX-6 y PPE-10 por encontrarse más cercanos a la zona de interés. El resultado obtenido para dicho gradiente fue de aproximadamente 2,4%.

Para la geometría de la sección de salida: se utilizó el perfil geofísico TEM L-20 que permite diferenciar los distintos sectores del terreno por sus resistividad (inverso a la conductividad) y por lo tanto interpretar secciones que puedan contener agua. La figura 3.10 muestra las dos secciones de paso de dimensiones aproximadas de 2.000 x 100 metros y 1.500 x 250 metros (Geo-Aguas, 2010).

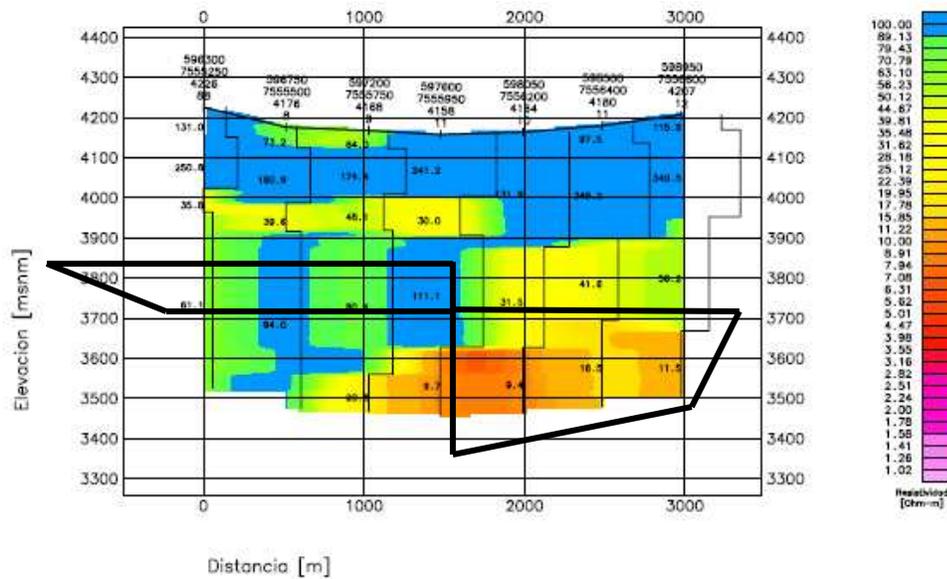


Figura 3.10 Perfil geofísico TEM en el lugar de salida (Fuente: Geo-Aguas Consultores).

La transmisividad del medio (proporcional al parámetro de conductividad hidráulica) se obtuvo mediante el Test de Cooper-Jacob con la información de la prueba de bombeo de gasto constante del Pozo PPE-10, el cual es el más cercano a la sección de salida. El valor obtenido fue de $1.390 \text{ m}^2/\text{d}$ y puede considerarse representativo de toda la sección (Geo-Aguas, 2010) (Fig. 3.11).

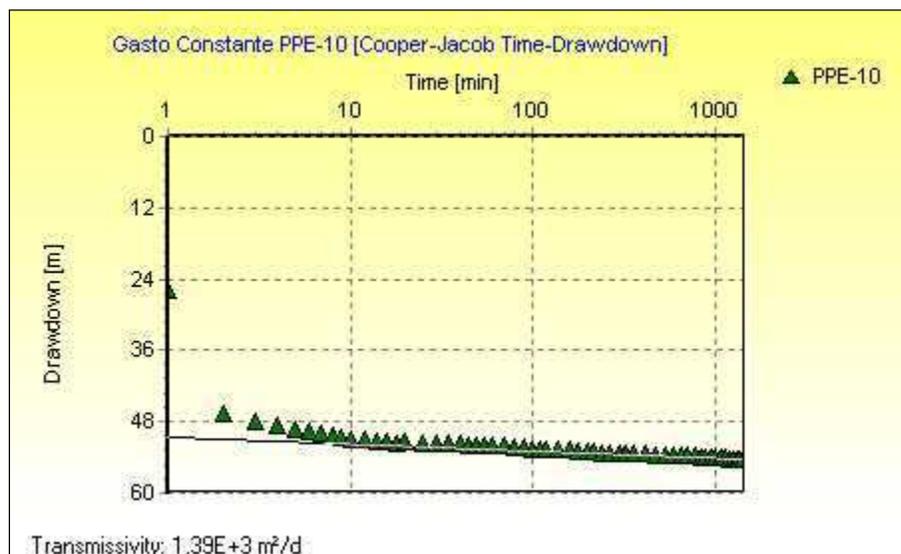


Figura 3.11 Test de Cooper – Jacob (Fuente: Geo-Aguas Consultores).

Finalmente, el valor del caudal de salida hacia Inacaliri se obtiene con la relación de Darcy de la siguiente forma:

De la relación (2.1) se tiene:

$$Q = -K * A * \frac{dh}{dl} = T * i * b \quad (3.2)$$

Donde:

T : Transmisividad [L^2/T].

i : Pendiente del terreno [-].

b : Ancho de la sección [L].

De manera que considerando los valores anteriormente evaluados se obtiene un caudal de salida de 1378 [l/s].

3.2.3 Salida Subterránea hacia la Cuenca de Turi.

Una buena alternativa para evaluar posibles aportes desde fuera de una cuenca hidrográfica, cuando en ella no existe mayor aporte que no sean las precipitaciones, es el indicador explicación, obtenido mediante una regresión dinámica entre Caudal y Precipitación, y que cuantifica en qué medida las variaciones en la precipitación explican las variaciones en el caudal (Barra, 2010).

De este modo, se analizó el caso de la estación fluviométrica Río Toconce en el punto denominado (antes Represa Sendos), la cual limita con la cuenca de Pampa Peineta y cuyas variaciones en función de la precipitación (explicación), permiten evaluar el origen de la recarga al sistema.

La explicación se define como:

$$\text{Explicación}(\%) = \left(1 - \frac{\sigma_e^2}{\sigma_y^2}\right) \quad (3.3)$$

Donde:

e : Error de predicción.

y : Transformada del caudal.

La Figura 3.12 muestra la ubicación de los portezuelos que conectan las aguas subterráneas del sector de Inacaliri – Pampa Peineta con el sector del Salar de Turi. Se observa que desde Pampa Peineta el traspaso de agua se produce a través de un solo portezuelo.

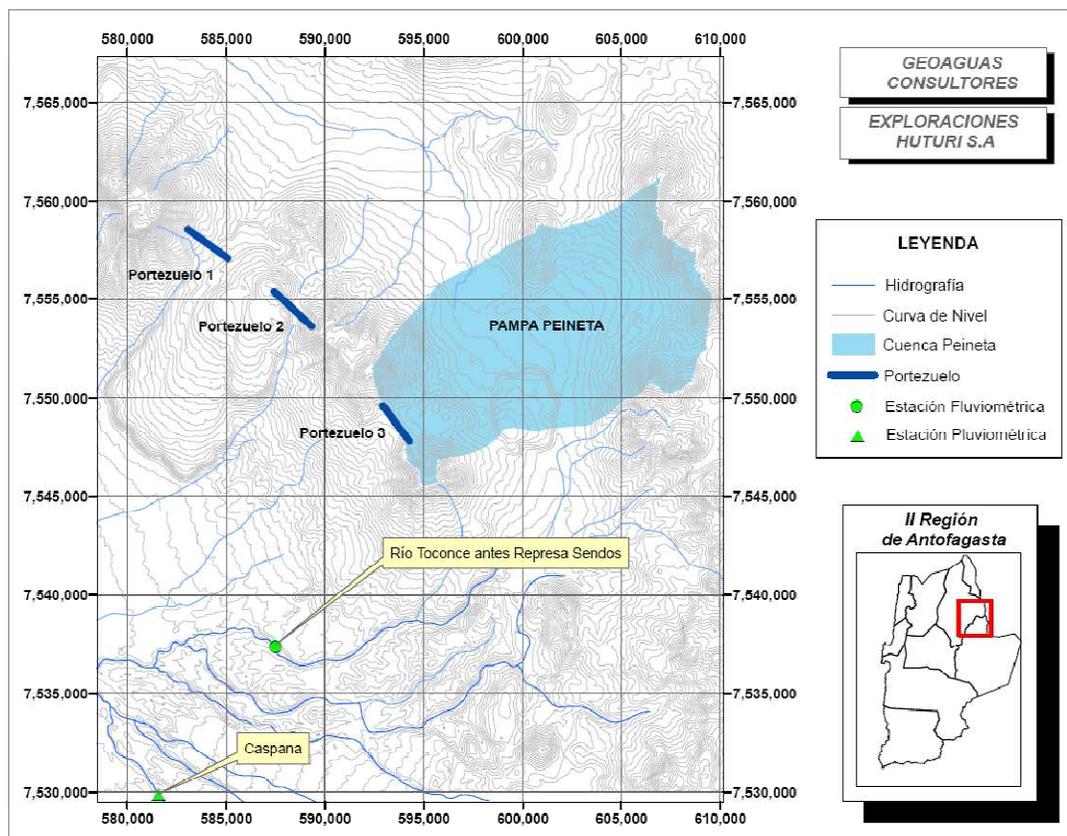


Figura 3.12 Diagrama de Portezuelos (Fuente: Geo-Aguas Consultores).

La función de transferencia se define como:

$$W_t = \delta_1 W_{t-1} + \delta_2 W_{t-2} + \dots + \delta_r W_{t-r} + \omega_0 Z_{t-b} - \omega_1 Z_{t-b-1} - \dots - \omega_s Z_{t-b-s} + \eta_t \quad (3.4)$$

Donde:

W : Serie de caudales.

Z : Serie de precipitaciones.

η_t : Error.

Luego los pasos a seguir son:

- Se construyen funciones de transferencia con distintos valores de r , s y b .
- Simultáneamente se realiza el autocorrelograma entre caudales y precipitación con los datos de la estación para saber en qué período la serie se hace independiente.

A continuación se muestra el autocorrelograma con $r=4$, pues es el periodo en que se hace nulo. Se utilizaron, además, valores de $s=1, 2, 3$.

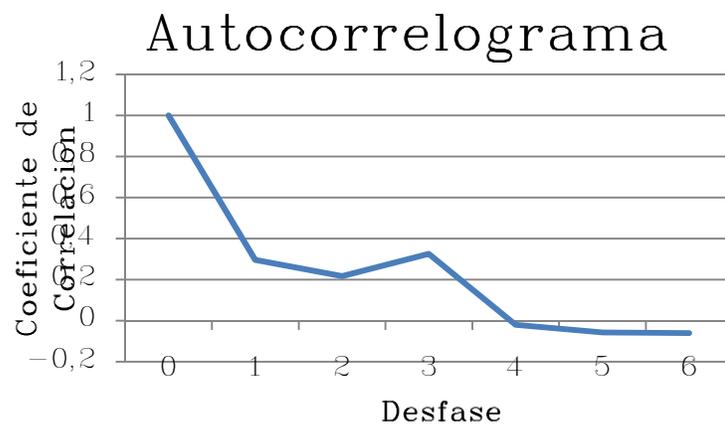


Figura 3.13 Autocorrelograma.

- A continuación se mide la parsimonia, utilizando el criterio de información de Akaike (AIC). La función de transferencia que presente el menor valor corresponde a la que se debe utilizar.

AIC se define como:

$$AIC(r, s) = N * Ln(\sigma_e^2) + 2 * (r * s) \quad (3.5)$$

Donde:

N : Número de datos entregados por la función de transferencia.

σ_e^2 : Varianza del error.

La función de transferencia que presenta menor AIC (-102.74) corresponde a $FT(r,s,b) = FT(3,2,0)$, obteniéndose una explicación de 82.91%.

Se consideró desfase nulo ($b = 0$), pues el impulso de precipitación se manifiesta practicamente en el mismo tiempo sobre el caudal fluviométrico.

Los resultados se presentan en la tabla 3.5

Tabla 3.5 Resumen de resultados de la función de transferencia.

| r | s | Explicación | AIC |
|---|---|-------------|---------|
| 3 | 0 | 0,246 | -74,56 |
| 3 | 1 | 0,808 | -99,57 |
| 3 | 2 | 0,846 | -102,74 |
| 3 | 3 | 0,847 | -101,93 |
| 3 | 4 | 0,851 | -101,43 |
| 4 | 0 | 0,256 | -69,72 |
| 4 | 1 | 0,842 | -96,66 |
| 4 | 2 | 0,859 | -97,67 |
| 4 | 3 | 0,876 | -98,94 |
| 4 | 4 | 0,876 | -97,96 |
| 4 | 5 | 0,882 | -97,80 |

Este 84,6 % representa el porcentaje de la recarga total a la cuenca del Río Toconce (antes Represa Sendos) que es aportado por la precipitación. De este modo, el 15,4% (100 % - 84,6 %) de la recarga al sistema debe corresponder a un flujo subterráneo desde otra cuenca u otras cuencas. Entonces, evaluando la recarga por concepto de precipitación efectiva, correspondiente a un 84,6 % de la recarga total, se podrá obtener el complemento, vale decir, el 15,4 % de la recarga total y con ello saber cuánto es lo que aporta Pampa Peineta al sistema de río Toconce, y por lo tanto, la salida de aguas subterráneas de nuestro sistema de interés a través del portezuelo 3 (Fig 3.11).

Mediante la hipsometría de la cuenca del río Toconce (Tabla 3.6), perfil de precipitaciones y porcentaje de infiltración (15%), se obtiene el volumen de recarga por precipitación, el cual resulta ser igual a 97,51 [l/s] (volumen total 650,1 [l/s]). Este caudal es el equivalente al 84,6 % de la recarga.

Tabla 3.6 Hipsometría cuenca río Toconce (antes represa Sendos).

| Cota Media | Área Parcial | Precipitación | Volumen |
|---------------|--------------------|---------------|---------|
| [m.s.n.m.] | [km ²] | [mm] | [l/s] |
| 3375 | 0,151 | 66,1 | 0,32 |
| 3450 | 2,096 | 70,6 | 4,69 |
| 3550 | 5,595 | 76,5 | 13,58 |
| 3650 | 5,723 | 82,5 | 14,97 |
| 3750 | 6,335 | 88,4 | 17,76 |
| 3850 | 4,716 | 94,4 | 14,11 |
| 3950 | 5,131 | 100,3 | 16,32 |
| 4050 | 7,598 | 106,3 | 25,60 |
| 4150 | 12,511 | 112,2 | 44,51 |
| 4250 | 17,209 | 118,1 | 64,47 |
| 4350 | 13,982 | 124,1 | 55,02 |
| 4450 | 10,319 | 130,0 | 42,55 |
| 4550 | 11,369 | 136,0 | 49,02 |
| 4650 | 9,632 | 141,9 | 43,35 |
| 4750 | 8,897 | 147,9 | 41,72 |
| 4850 | 6,504 | 153,8 | 31,72 |
| 4950 | 4,934 | 159,8 | 24,99 |
| 5050 | 4,701 | 165,7 | 24,70 |
| 5150 | 6,036 | 171,6 | 32,85 |
| 5250 | 5,704 | 177,6 | 32,12 |
| 5350 | 4,867 | 183,5 | 28,32 |
| 5450 | 3,795 | 189,5 | 22,80 |
| 5550 | 0,737 | 195,4 | 4,57 |

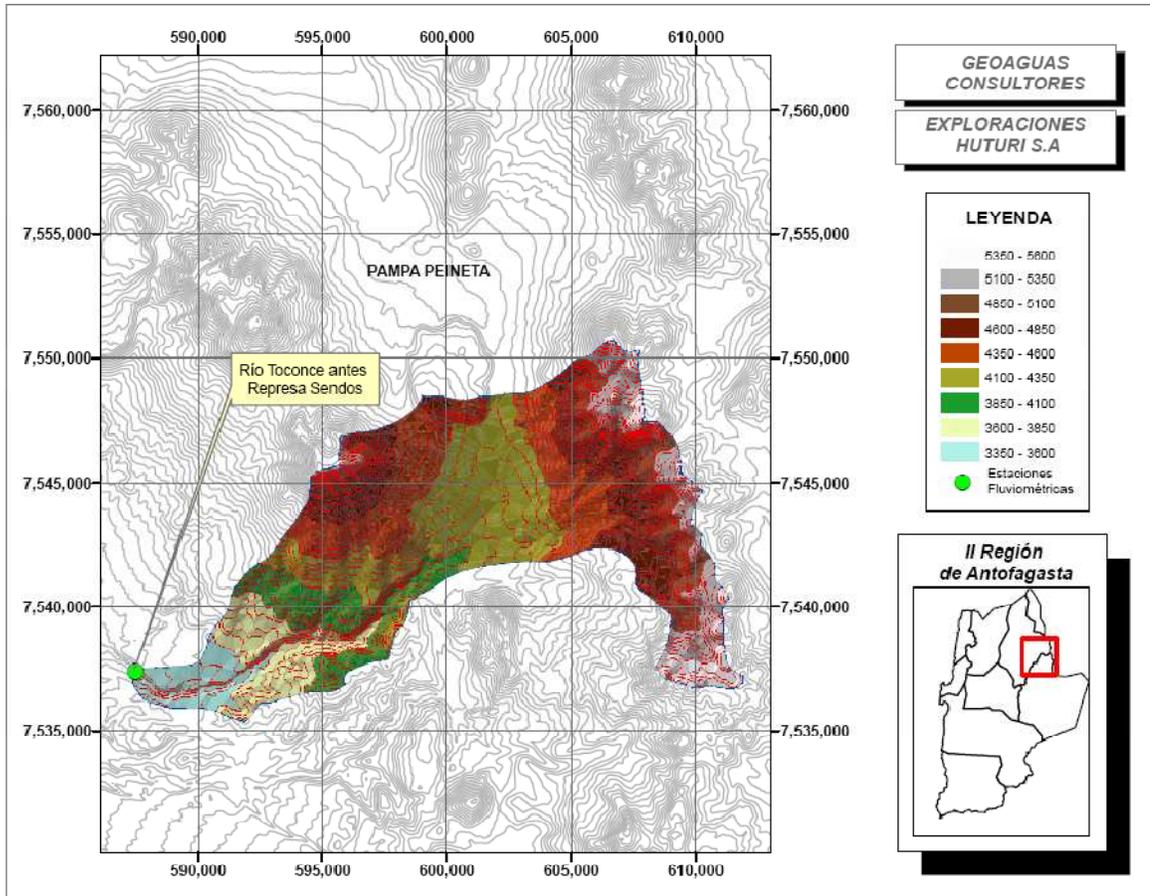


Figura 3.14 Cuenca río Toconce (antes represa Sandos) (Fuente: Geo-Aguas Consultores).

Mediante simple proporción, se obtiene que la salida occidental de aguas subterráneas en el dominio en estudio corresponde a:

$$97,51 \cdot (100 - 84,6) / 84,6 \text{ [l/s]} = 17,74 \text{ [l/s]}$$

3.2.4 Balance y Entrada desde el Altiplano.

Bajo el supuesto de sistema en equilibrio y a partir de los resultados anteriores, la entrada subterránea desde el altiplano a la cuenca de Pampa Peineta se aprecia en la figura 3.14 y corresponde a:

$$17,74 + 1378 - 88,9 = 1306 \text{ [l/s].}$$

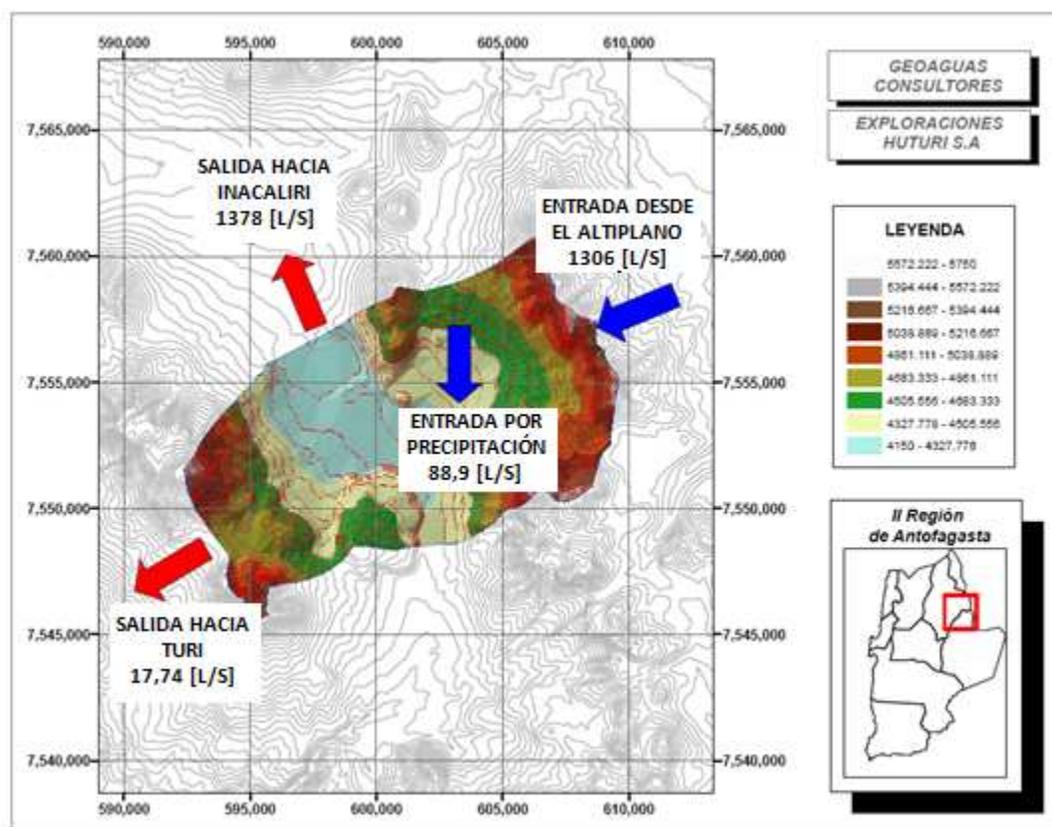


Figura 3.15 Balance hidrológico (Fuente: Geo-Aguas Consultores).

De esta manera, teniendo una estimación de los flujos y sus direcciones se pueden obtener nociones de los resultados que se obtendrán con trazadores, Por lo tanto los ensayos ayudarían a corroborar las direcciones y velocidades de flujo existentes, calculadas en este capítulo.

CAPÍTULO 4: APLICACIÓN DE TRAZADORES SISTEMA PAMPA PEINETA.

4.1 Aspectos generales.

En este capítulo se explica de forma detallada la experiencia en terreno de los 2 trazadores analizados (bacteriófago MS2 y sal común), los resultados entregados y cómo se interpretaron, tanto en la dirección y velocidad, como en relación al balance hidrológico. Finalmente se muestra una analogía de los trazadores, comparándolos con otros, bajo ciertos parámetros. También se muestra un detalle de los costos involucrados en el estudio.

4.2 Trazador biológico.

El objetivo es analizar el comportamiento de un trazador biológico. En este caso se determinó utilizar el bacteriófago MS2 como trazador de flujo. Por definición, los bacteriófagos son virus que atacan específicamente a bacterias determinadas. En particular el MS2 (ATCC15587b) es un virus (F⁺) RNA, su tamaño aproximadamente 25 [nm] de diámetro, razón que lo hace un potencial trazador. En comparación con sales, ha mostrado mejor calidad en los resultados, moviéndose a velocidades casi similares a la del agua; probablemente debido a su pequeño tamaño.

Puede permanecer hasta 6 meses en el agua (Skilton, 1989), tiempo más que suficiente para la realización de un ensayo. Pertenece a la familia Leviviradae y es inocuo. No se puede replicar por sí solo y es muy poco frecuente en aguas subterráneas. Su único hospedero natural es la bacteria *Escherichia coli* ATCC 15597 (American, 2005).

Por lo general tiene un buen comportamiento, no sólo para medir parámetros hidráulicos del acuífero, sino también para conocer el comportamiento de contaminantes en medios subterráneos. (Rossi, 1998)

Debido a las características ya mencionadas, además de su simple detección en laboratorio, este trazador es recomendado para estudios de supervivencia de contaminantes en un acuífero y velocidad en aguas subterráneas.



Figura 4.1 Placas de bacteriófago MS2 sobre cultivo de *E. coli* 15597 (Fuente: Gabriela Castillo M.)

La experiencia realizada en este proyecto consistió en inyectar el trazador en 3 pozos, para posteriormente realizar una toma de muestras en los pozos inyectados y 2 aledaños para realizar un monitoreo que permitiera obtener lo propuesto en los objetivos.

Los pozos inyectados fueron PPX-5, PPE-9, PPX-2; el monitoreo se realizó en los 3 ya mencionados y además en los pozos PPX-3 y PPE-12. La ubicación y características de estos se mostró en el capítulo 3.

Se realizaron 4 visitas en terreno:

- 22 de enero de 2010: Inyección de trazador y una vez hecha la mezcla, muestreo en pozos PPX-5, PPE-9, PPX-2.
- 27 de marzo de 2010: Muestreo en pozos PPX-5, PPE-9, PPX-2, PPX-3 y PPE-12.
- 17 de abril de 2010: Muestreo en pozos PPX-5, PPE-9, PPX-2, PPX-3 y PPE-12.
- 23 de mayo de 2010: Muestreo en pozos PPX-5, PPE-9, PPX-2, PPX-3 y PPE-12.

En cada pozo se inyectaron 2 litros de fago MS2 estéril, y las concentraciones fueron de $2,2 \times 10^{10}$ [UFP/mL] en el pozo PPX-5; $7,5 \times 10^9$ [UFP/mL] en el pozo PPE-9, y $1,8 \times 10^8$ [UFP/mL] en el pozo PPX-2. Estas fueron calculadas en el laboratorio de Calidad de Aguas de la Universidad de Chile por la académica Gabriela Castillo.



Figura 4.2 Inyección Pozo PPX5 en Pampa Peineta.

La inyección se realizó en condiciones asépticas por medio de una manguera y un embudo, ubicado justo bajo el nivel freático, para lograr una distribución homogénea en la parte superior de la columna de agua.

Para la toma de muestras se utilizó un Bailer, instrumento que toma muestras a 2 [m] de profundidad sumergida, utilizando frascos estériles de 200 [ml]. Las muestras no presentaron anomalías, salvo la del pozo PPX-2 en el primer muestreo, que eran de color café oscuro con olor a hidrógeno sulfurado. Se determinó en todas las muestras pH y Turbiedad. En el primer y segundo muestreo se determinó abundancia bacteriana, mediante tinción DAPI (4',6-diamidino-2-phenylindole), reactivo fluorescente que se une al DNA y permite contar las células bajo Microscopía de Epifluorescencia. Tras recolectar las muestras, se trasladaron a laboratorio para los análisis respectivos.

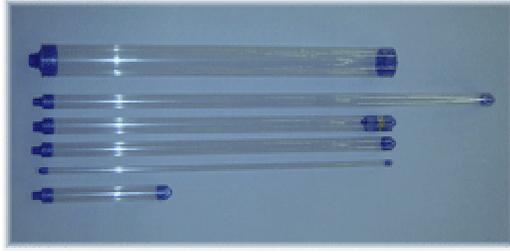


Figura 4.3 Bailer (Fuente: <http://www.groundwateressentials.com/bailers.html>).



Figura 4.4 Muestra pozo PPE-9.



Figura 4.5 Muestra pozo PPX-2.

La preparación del inóculo de fago MS2 consistió en las siguientes etapas:

- Purificación de la cepa hospedera *Escherichia coli* ATCC 15597.
- Crecimiento logarítmico de la cepa hospedera.
- Purificación y propagación del fago MS2.
- Titulación del fago MS2 propagado.
- Preparación de volumen de fago a inyectar.
- Doble filtración y esterilización del fago a través de Steri-cup (poro 0,2 μ m).
- Titulación de la concentración del fago MS2 a utilizar como inóculo.

En la siguiente tabla se muestran los resultados de los 119 días que duró el estudio.

Tabla 4.1 Concentración, pH y turbiedad de trazador biológico.

| Pozo Nº | Fecha muestreo | Días transcurridos | Unidad Formadora de Placas mL^{-1} [UFP/mL]* | Abundancia microbiana Células mL^{-1} DAPI** | pH | Turbiedad |
|------------|-------------------|-----------------------|---|--|-----|-----------|
| PPX5 | 24.01.2010 | 0 | $2,9 \times 10^9$ | $1,1 \times 10^4$ | 6,1 | 45,00 |
| | 27.03.2010 | 62 | 170 | $6,0 \times 10^5$ | 6,9 | 0,21 |
| | 17.04.2010 | 83 | 377,4 | N.D. | 7,2 | 0,49 |
| | 23.05.2010 | 119 | 1 | N.D. | 7,5 | 0,24 |
| PPX2 | 24.01.2010 | 0 | $5,8 \times 10^6$ | $1,5 \times 10^4$ | 6 | 38,00 |
| | 27.03.2010 | 62 | 1100 | $4,1 \times 10^4$ | 6,4 | 1,43 |
| | 17.04.2010 | 83 | 36 | N.D. | 6,4 | 0,62 |
| | 23.05.2010 | 119 | 1 | N.D. | 7,2 | 1,38 |
| PPE9 | 24.01.2010 | 0 | $4,5 \times 10^8$ | $1,8 \times 10^4$ | 7,1 | 6,20 |
| | 27.03.2010 | 62 | 110 | $5,4 \times 10^5$ | 8,1 | 1,41 |
| | 17.04.2010 | 83 | 170 | N.D. | 8,2 | 0,95 |
| | 23.05.2010 | 119 | 1 | | 7,3 | 18,30 |
| PPX3*** | 27.03.2010 | 62 | 1.5 | N.D. | 7,0 | 3,30 |
| | 17.04.2010 | 83 | 1 | N.D. | 7,3 | 0,12 |
| | 23.05.2010 | 119 | 0 | N.D. | 7,3 | 0,21 |
| PPE12*** | 27.03.2010 | 62 | 1.04 | N.D. | 7,6 | 0,99 |
| | 17.04.2010 | 83 | 0 | N.D. | 7,5 | 0,62 |
| | 23.05.2010 | 119 | 0 | N.D. | 7,7 | 3,80 |

*Media geométrica de muestra triplicada + Desv. Standard **DAPI: recuento microbiano con colorante

4,6-diamidino-2-phenylindol usando microscopía de epifluorescencia. ***Pozos de monitoreo de flujo.

En el gráfico 4.6 se puede apreciar la variación de concentración de trazador en el tiempo en los pozos estudiados.

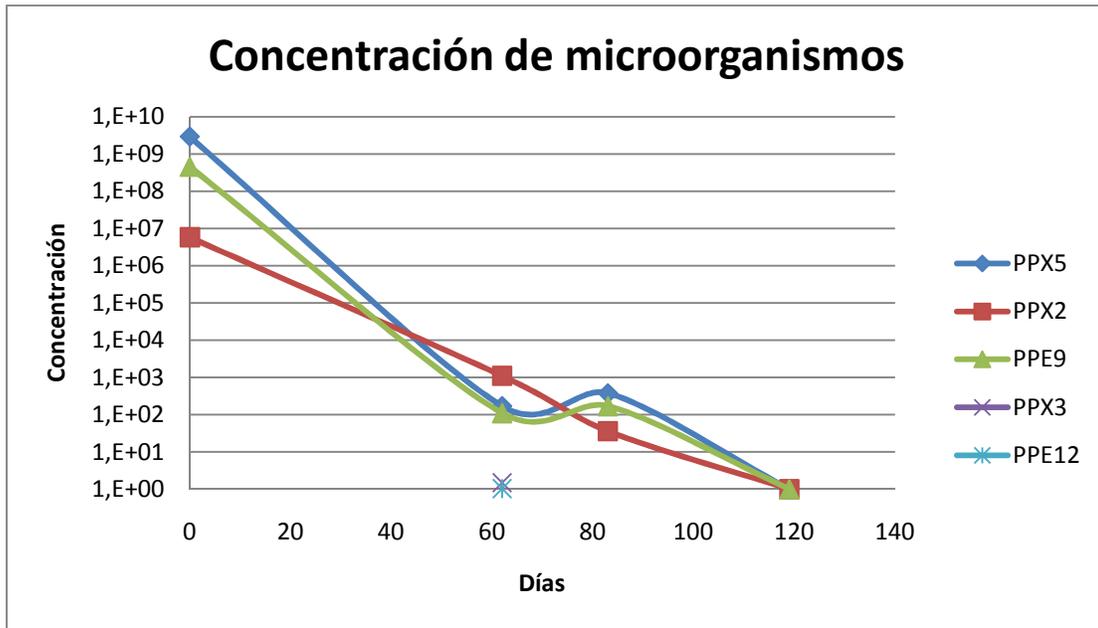


Figura 4.6 Concentración de fago MS2 en el tiempo.

Estos resultados serán analizados en la sección Resultados, Finalmente los costos asociados a experimento, sin considerar gastos de logística, son los siguientes:

Tabla 4.2 Costos ensayo trazador biológico.

| Ítem | Costo | Cantidad | Total |
|------------------------------------|-------------------|----------|--------------|
| Materiales para inyección (aprox.) | \$ 100 000 | - | \$ 100 000 |
| Preparación de fago | 4,5 UF / litro | 6 | \$ 570 024 |
| Análisis de muestra | 1 UF / muestra | 45 | \$ 950 040 |
| Análisis de pH o cloruro | 0,25 UF / muestra | 45 | \$ 190 008 |
| | | TOTAL | \$ 1 810 072 |

*Valor UF Mayo 2010: \$ 21112

El ítem Materiales para inyección corresponde a una estimación de los materiales necesarios para realizar la inyección (por ejemplo: Bailer, Mangueras, frascos). Los otros tres ítems corresponden a los valores de análisis en laboratorio.

4.3 Trazador químico.

En este caso el trazador a inyectar fue sal común (NaCl), y el parámetro a medir fue la conductividad eléctrica en el agua de los pozos.

Entre el 13 y el 15 de mayo de 2010 se realizó la campaña de terreno para instalar los equipos de medición de conductividad e inyectar el trazador. Los pozos inyectados fueron PPE-9, PPE-10 y PPX-5, instalando también un conductímetro en PPX-3 para medir flujo proveniente de PPE-9. Para conocer las condiciones iniciales se obtuvo un perfil de conductividad y temperatura de los pozos señalados, encontrando valores de conductividad entre 500 y 700 [uS/cm] y temperaturas entre 20 y 30 [°C].

La solución saturada de sal a inyectar se preparó disolviendo 8,75 [kg] de sal en bidones de 25 [lt] de agua. Por medio de una manguera de 18 [mm] de diámetro interno se marcó toda la columna de agua del pozo de manera uniforme, inyectando el trazador a través de un embudo y subiendo lentamente con velocidad uniforme.

La solubilidad de la sal común en el agua es de unos 350 [mg/l] y una conductividad aproximada de 467 [mS/cm]. Las concentraciones fueron estimadas en base a los diámetros interiores de la manguera y los sondajes, de manera de cumplir el orden de la concentración estimada.

Luego se inyectó por el extremo superior de la manguera un volumen de la solución de trazador igual al volumen interno de la misma, internando la manguera y extrayéndola lentamente a una velocidad constante por gravedad. Con esto, el trazador queda distribuido uniformemente a lo largo de la columna.

Inmediatamente después se instaló el conductímetro, con sistema de almacenamiento de datos, a la profundidad deseada. Se dejó instalado hasta que el trazador ya no fue detectado. La frecuencia de medición definida fue de 10 minutos.

Para la estimación de velocidades se asume flujo horizontal.

En la tabla 4.3 se muestra las características de la inyección:

Tabla 4.3 Características de inyección.

| | PPE-9 | PPE-10 | PPX-5 | PPX-3 |
|--|----------------|----------------|---------------|------------|
| Fecha inyección | 14-05-2010 | 14-05-2010 | 13-05-2010 | 13-05-2010 |
| Profundidad perforación | 250 [m] | 250 [m] | 170 [m] | 250 [m] |
| Diámetro interior | 13,75" | 13,75" | 2" | 2" |
| Profundidad nivel de agua | 52,68 [m] | 49,39 [m] | 64,91 [m] | 52 [m] |
| C.E.inicial 70 [m] por debajo del nivel | 478 [uS/cm] | 574 [uS/cm] | 852 [uS/cm] | |
| Diámetro manguera | 18 [mm] | 18 [mm] | 18 [mm] | |
| Profundidad manguera | 103,6 [m] | 133,9 [m] | 126 [m] | |
| Profundidad instalación conductivímetro desde terreno. | 85 [m] | 115 [m] | 123 [m] | 210 [m] |
| Columna marcada con trazador | 50,92 [m] | 84,51 [m] | 61,09 [m] | |
| Número inyecciones seguidas | 2 | 2 | 1 | |
| Volumen total de solución inyectada | 26 [lt] | 43 [lt] | 15,5 [lt] | |
| C.E. Solución saturada de NaCl aprox. | 448,02 [mS/cm] | 492,66 [mS/cm] | 431,7 [mS/cm] | |
| Hora aprox. De inyección | 14:00 | 16:30 | 14:35 | |
| Frecuencia mediciones C.E. | 10 [min] | 10 [min] | 10 [min] | |

Posteriormente en campaña de terreno realizada entre el 12 y 13 de Julio se retiraron los instrumentos de medición de CE para rescatar los datos medidos. Por problemas técnicos no se pudo obtener los datos del pozo PPX-3 debido al desprendimiento de una pieza del conductivímetro, dañando el equipo.

Los resultados se muestran en las figuras 4.7, 4.8 y 4.9.

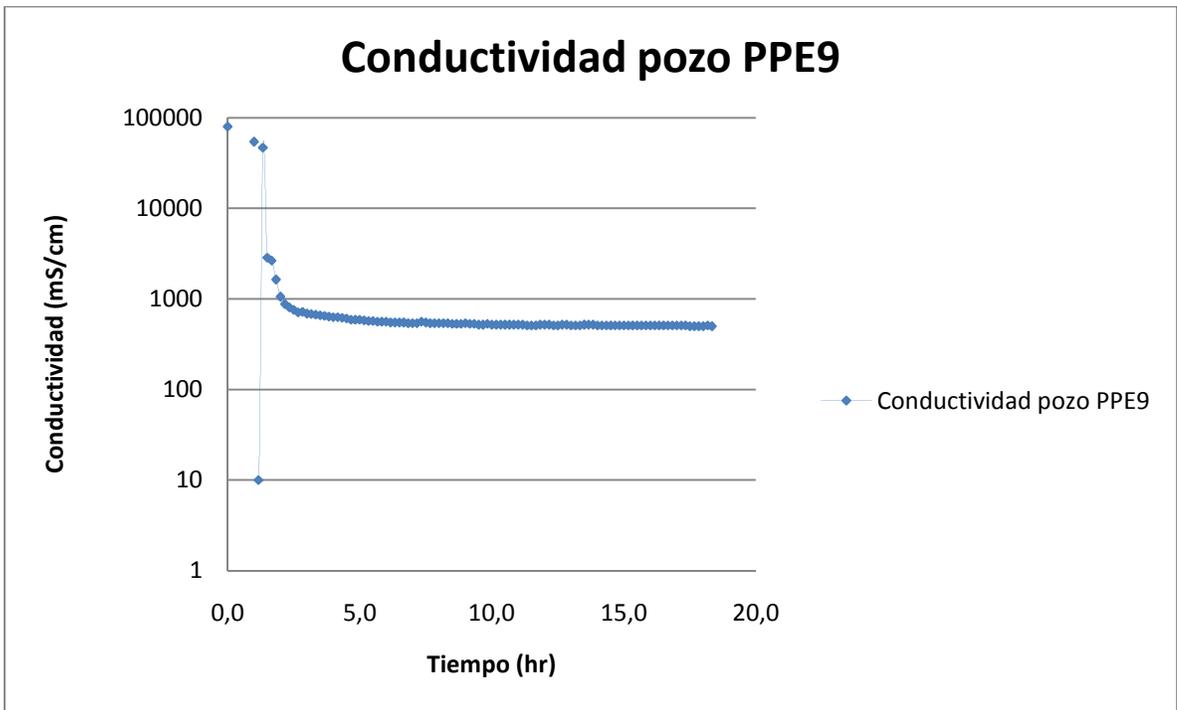


Figura 4.7 Conductividad pozo PPE-9.

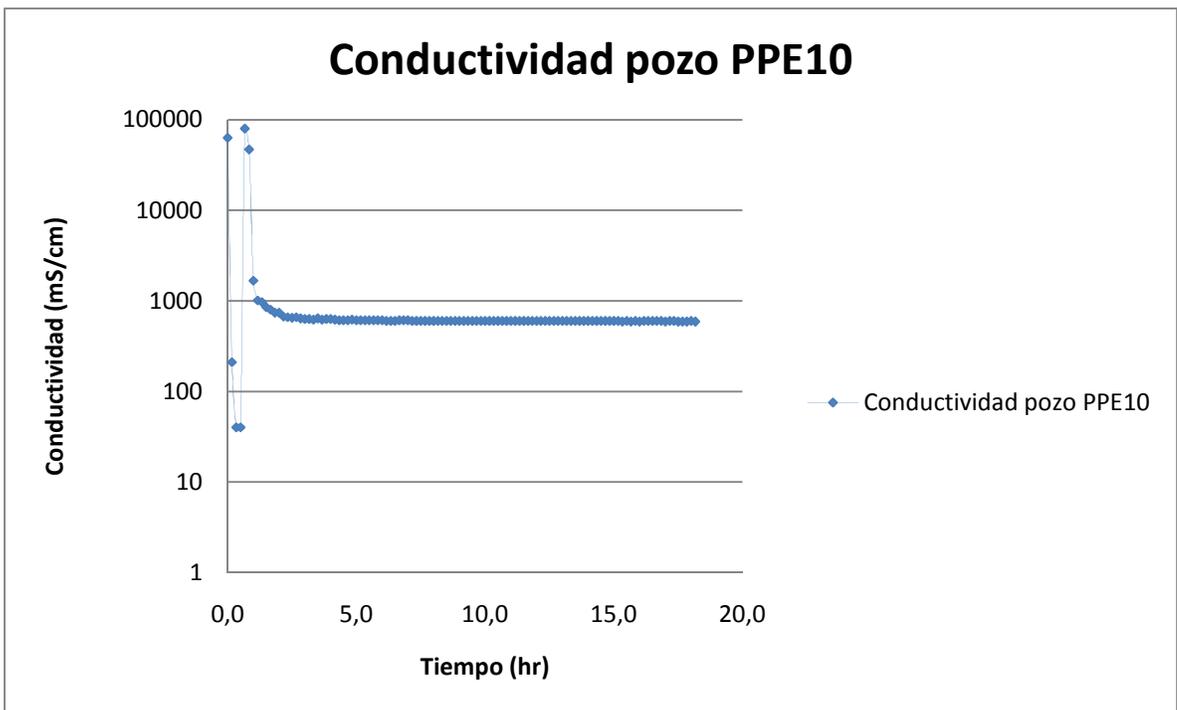


Figura 4.8 Conductividad pozo PPE-10.

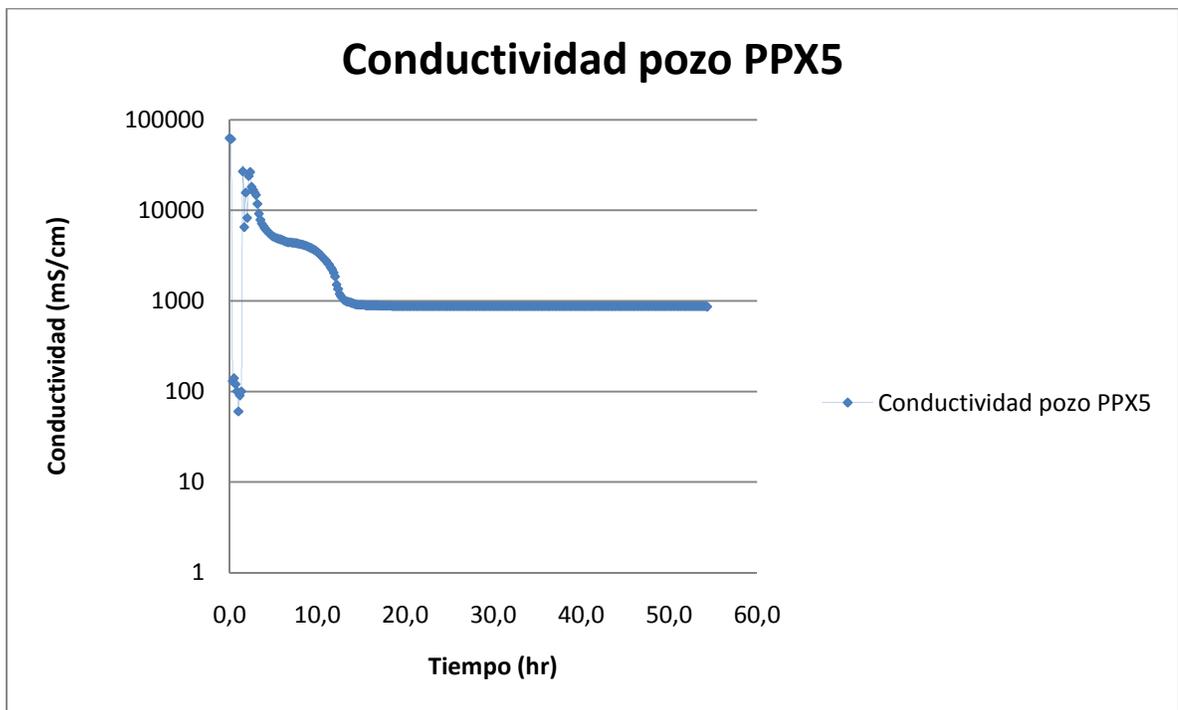


Figura 4.9 Conductividad pozo PPX-5.

Los costos asociados se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 4.4 Costos ensayo trazador químico.

| Item | Costo | Cantidad | Total |
|------------------------------------|--------------|--------------|---------------------|
| Materiales para inyección (aprox.) | \$ 100 000 | - | \$ 100 000 |
| Dispositivos de medición | \$ 1 100 000 | 4 | \$ 4 400 000 |
| | | TOTAL | \$ 5 500 000 |

El Item Materiales para inyección corresponde a una estimación de los materiales necesarios para realizar la inyección (por ejemplo: Embudo, Manguera, frascos). Dispositivos de medición corresponde al valor comercial de los conductivímetros que se utilizaron en el estudio. Muy importante destacar que todos los implementos comprados para este ensayo son una única inversión. Por lo tanto, si se desea repetir, sólo habría que comprar sal común.

4.4 Resultados e interpretación de resultados en el balance hidrológico.

A partir de los resultados de variación de concentración y conductividad en ambos ensayos se obtienen valores de velocidad.

En el caso del trazador biológico sólo se tiene información en los pozos que fueron inyectados, en los otros se detectó la presencia del trazador pero en cantidades ínfimas que no permiten hacer un análisis, pero si una consideración muy importante en relación a la dirección del flujo, reforzando de manera importante lo planteado en el balance hidrológico.

Del mismo modo, en el caso del trazador químico sólo se tiene información en los pozos que se inyectó el trazador. Esto limita de cierta manera el conocimiento de los flujos subterráneos, pero no es impedimento para hacer un análisis de velocidades.

Como se mencionó en el capítulo 2, en relación a los tipos de ensayos, se realizaron los cálculos para el método de dilución puntual, que se detalla en la sección anexos.

Los datos de los pozos son los siguientes:

Tabla 4.5 Datos para cálculo de velocidades con el trazador biológico.

| Pozo | Diámetro int. Tubo (m) | Diametro ext. Tubo (m) | Diametro perforación (m) | k1 (m/día) | k2 (m/día) | k3 (m/día) |
|--------|------------------------|------------------------|--------------------------|------------|------------|------------|
| PPX-5 | 0.0508 | 0.0608 | 0.254 | 1000 | 10 | 9 |
| PPE-9 | 0.3436 | 0.3556 | 0.508 | 1000 | 10 | 9 |
| PPX-2 | 0.0508 | 0.0608 | 0.254 | 1000 | 10 | 9 |
| PPX-3 | 0.0508 | 0.0608 | 0.254 | 1000 | 10 | 9 |
| PPE-12 | 0.3436 | 0.3556 | 0.508 | 1000 | 10 | 9 |

Tabla 4.6 Dato para cálculo de velocidades con el trazador químico.

| Pozo | Diámetro int. Tubo (m) | Diametro ext. Tubo (m) | Diametro perforación (m) | k1 (m/día) | k2 (m/día) | k3 (m/día) |
|--------|------------------------|------------------------|--------------------------|------------|------------|------------|
| PPX-5 | 0.0508 | 0.0608 | 0.254 | 1000 | 10 | 9 |
| PPE-9 | 0.3436 | 0.3556 | 0.508 | 1000 | 10 | 9 |
| PPE-10 | 0.3436 | 0.3556 | 0.508 | 1000 | 10 | 9 |

Los parámetros K1, K2 y K3 representan la permeabilidad efectiva del sondeo, prefiltro y terreno respectivamente. Los valores de velocidad en los pozos se muestran en la tabla 4.7 y 4.8:

Tabla 4.7 Velocidad de flujo subterráneo con uso de trazador biológico.

| Pozo | Co [UFP/mL] | Ct [UFP/mL] | Tiempo [d] | Diámetro [m] | Alfa | Velocidad [m/d] |
|--------|----------------|----------------|---------------|-----------------|------|--------------------|
| PPX-5 | 2900000000 | 1 | 119 | 0,0508 | 2,47 | 0,003 |
| PPE-9 | 450000000 | 1 | 119 | 0,3436 | 2,15 | 0,021 |
| PPX-2 | 5800000 | 1 | 119 | 0,0508 | 2,47 | 0,002 |
| PPX-3 | - | - | - | 0,0508 | 2,47 | - |
| PPE-12 | - | - | - | 0,3436 | 2,15 | - |

Tabla 4.8 Velocidad de flujo subterráneo con uso de trazador químico

| Pozo | Co [uS/cm] | Ct [uS/cm] | Tiempo [d] | Diámetro [m] | Alfa | Velocidad [m/d] |
|--------|---------------|---------------|---------------|-----------------|------|--------------------|
| PPX-5 | 26400 | 860 | 2,17 | 0,0508 | 2,47 | 0,026 |
| PPE-9 | 2860 | 500 | 0,70 | 0,3436 | 2,15 | 0,312 |
| PPE-10 | 1670 | 590 | 0,72 | 0,3436 | 2,15 | 0,183 |

Los parámetros Co y Ct representan la concentración o conductividad, según sea el caso al inicio y al final del estudio, Tiempo corresponde a la duración del ensayo, Diámetro interior del tubo, Alfa al coeficiente de corrección apropiado al tipo de sondaje y de acuífero en base a los diámetros de perforación, interior y exterior del tubo; y a las permeabilidades mencionadas en las tablas 3.5 y 3.6. Esto se produce por las deformaciones de las líneas de flujo en el entorno del sondeo como consecuencia de la variación de las condiciones hidráulicas.

A modo de comparación se puede tomar el pozo PPE-9 y PPE-10 y hacer un cálculo de velocidad por la relación de Darcy. Del mismo modo entre los pozos PPE-10 y PPX-6. En ambos casos se considera una permeabilidad de 10 [m/d], valor utilizado y entregado por Geo-Aguas Consultores. Las pendientes son 0,26% y 2,4% respectivamente, entregando para el primer caso una velocidad de flujo subterránea de 0,026 [m/d] y 0,24 [m/d] para el segundo caso (Fig. 3.3).

Comparando estos últimos resultados se presenta una variación en los resultados calculados por los 3 métodos (trazador biológico, trazador químico y Ley de Darcy), aún así existe una concordancia entre ellos. A medida que se acerca hacia el punto de salida del sistema (PPX-6),

en todos los casos la velocidad aumenta, indicando y corroborando la hipótesis de flujo subterráneo hacia las zonas indicadas en el balance.

Con respecto a la diferencia de velocidad entre ambos trazadores, era de esperar una velocidad mayor en el trazador biológico (en base a otros experimentos con trazadores biológicos) que en el químico, haciendo principal referencia al tamaño de las partículas y posibles interacciones con el terreno. De todos modos se puede apreciar que los valores teóricos se asemejan más a los valores entregados por el virus.

Por lo tanto se puede corroborar que las direcciones de flujo planteadas son correctas. Con respecto a las velocidades, se puede tener una clara de la magnitud del flujo bajo tierra, pero no de manera exacta. Los errores, posibles causas y análisis de los procedimientos serán comentadas en la sección Conclusiones.

Finalmente en la tabla 4.9 se presenta una pequeña analogía entre ambos trazadores, producto de las experiencias realizadas en este trabajo de título.

Tabla 4.9 Analogía entre trazadores.

| Trazador | Biológico | Cloruro |
|-----------------------|--|--|
| Costos | \$ 1.810.072. Más económico, pero es un gasto contante cada vez que se desee hacer el ensayo | \$5.500.000. Ventaja: Costo único, por lo que en futuros ensayos, sólo hay costos de materiales para la inyección. |
| Tiempo en resultados | Rápidos, 6 horas. | Esperar al final de la medición. Se puede tener una alta frecuencia de resultados |
| Calidad en resultados | Buena calidad, sujetos a un alto número de mediciones | Buena calidad, pero en altas concentraciones puede presentar cambios en los parámetros del agua. |
| Manejo de muestras | Manejar muestras con cuidado y llevarlas a laboratorio | Entregadas en computador, manejo cuidadoso de los equipos. |
| Impacto ambiental | Nulo. | No determinado |
| Duración en el agua | 3 a 6 meses. | No determinado |
| Puesta en marcha | Sólo inocular | Montaje y demontaje de equipos e inyección |

La gran diferencia entre los costos es que en el trazador Cloruroes que todos los gastos pasan a ser una inversión y se puede volver a reutilizar.

Los tiempos en los resultados son aleatorios, para el trazador biológico corresponden al tiempo de análisis de laboratorio, aproximadamente 6 horas. Para el trazador cloruro, los datos se obtienen una vez que se retira el equipo, por lo tanto el tiempo depende exclusivamente de la duración del ensayo, considerando también que se puede regular la frecuencia de datos, como

una gran ventaja, ya que se puede obtener una curva de concentración en el tiempo muy detallada.

En ambos casos se obtienen resultados de buena calidad, considerando siempre aplicar la menor cantidad de trazador para no afectar los parámetros del agua.

CAPÍTULO 5: PROPUESTA DE ENSAYO EN TERRENO.

5.1 Aspectos generales.

En este capítulo se realizará una propuesta de ensayo de trazadores biológicos en terreno, como complemento de esta tesis, en estudios futuros, que permitan profundizar la aplicación en base a este tipo de trazadores. Lógicamente las indicaciones aquí mencionadas pueden distar del estudio que se pudiese realizar, de todos modos lo más importante es poder aprovechar la experiencia realizada, en una materia poco abordada en nuestro país.

5.2 Evaluación preliminar de la zona.

Por razones económicas y logísticas, la intención es realizar este estudio en pozos ya existentes, preferentemente en desuso y/o que no sean para consumo humano; por lo tanto, conseguir la utilización de éstos debe ser una de las principales gestiones iniciales.

Es muy importante conocer las características de la zona, tanto como para el trabajo en terreno, como para el estudio hidrogeológico. Se debe considerar que la zona va a ser visitada constantemente, teniendo accesos libres durante el estudio. Otro punto a considerar es el clima, y conocer cómo puede afectar al estudio, de modo que posibles lluvias u otros fenómenos puedan alterar el funcionamiento de los pozos, y por lo tanto el trabajo en general. Por otro lado realizar estudios previos sobre la geología del lugar, de modo que se puedan tener nociones preliminares en relación a los flujos subterráneos. Posiblemente existan datos sobre los pozos, como estratigrafía, altura de aguas; si no, una ayuda puede ser consultar la Carta Geológica de Chile.

Del mismo modo, en la cuenca de estudio se pueden recopilar datos fluviométricos, pluviométricos, hipsometría, entre otros; que entregan una clara noción sobre el balance hidrológico del sistema, conociendo las entradas y salidas, y así sobre los flujos subterráneos.

Por último ya se puede hacer una evaluación económica preliminar que entregue valores cercanos a los costos que se enfrentarán realmente.

5.3 Pozos.

Considerando todo lo mencionado anteriormente en el informe, la elección de los pozos debe realizarse bajo ciertas condiciones o lo más cercano a éstas.

Como se desea conocer la factibilidad del trazador, seleccionar pozos que estén relativamente cerca y seguros. Estos deben poseer flujos paralelos, para optimizar los resultados.

Idealmente los pozos deben ser estables, es decir, que no presenten variabilidad de alturas de agua, velocidades ni cualquier tipo de característica del agua, al menos mientras dure el estudio.

Lógicamente se debe tener registro de las características de cada pozo, como coordenadas, diámetros.

Finalmente es de esperar que estos no posean instalados equipos de bombeo, a no ser que el ensayo lo requiera, pues podrían estorbarán durante el muestreo y en la instalación de equipos debido al poco espacio de operación que generalmente poseen.

5.4 Procedimientos.

Se propone realizar un ensayo de dilución puntual para los pozos de inyección y un ensayo de flujo uniforme o paralelo para los pozos de observación.

Una vez elegidos los pozos se espera contar con parámetros geológicos del acuífero. De no ser posible se propone realizar un ensayo que permita conocer la permeabilidad en el pozo, una buena fórmula puede ser desarrollando una prueba de gasto constante, obteniendo la curva de agotamiento (Espinoza, 2007).

Se debe asumir flujo paralelo entre los pozos, por medio del balance hidrológico se puede tener una clara noción de la dirección de los flujos.

Una de las técnicas para conocer la dirección en un ensayo de pozo único es instalando una malla metálica circular al interior del pozo y posteriormente inyectar un trazador. Luego al final del ensayo se retira la malla y se analiza la parte que posee mayor concentración de trazador, un buen ejemplo es un trazador radioactivo, pues es fácil de medir en la malla (Rojas, 2009).

Se asume homogeneidad y medio isotrópico en el acuífero. También se supone flujo exclusivamente horizontal. De todos modos no es necesario comprobar, pues se propone una duración de ensayo baja, de manera que de existir flujo, lo afecte levemente.

En caso de que se necesite comprobar un flujo vertical, existen pruebas donde se inyecta un trazador a lo largo del pozo y se mide la variación en función del tiempo y la altura (Aracil, 2000), (Guimaraens, 2008)

Una vez obtenido los datos necesarios; corresponde contar con la instrumentación requerida. Como el objetivo es poder comparar con la experiencia realizada, se propone aplicar los mismos instrumentos utilizados en dicho ensayo, tanto para inyectar, como para medir.

Posteriormente se procede a realizar el experimento. Las concentraciones de trazador a inyectar dependerán exclusivamente de las características del acuífero y del pozo. De todos modos se debe considerar que ésta sea entre 100 y 1000 veces la concentración existente en el pozo o que sea detectable, teniendo en cuenta que la duración estimada sea de 5 días.

Con el objetivo de tener resultados de mejor calidad, los trazadores se deben aplicar por separado, para evitar posibles interacciones entre ellos, por lo tanto se propone aplicar y analizar primero el trazador químico. En primer lugar se realiza la toma de muestra de las condiciones naturales en ambos pozos, completando los datos de pH, turbiedad, concentración natural de trazadores, perfil de conductividad, temperatura. Tras esto se procede a la instalación de los equipos, programando la recolección cada 1 minuto. En algunos casos la temperatura ha influido en experimentos de trazadores biológicos, disminuyendo su rendimiento (McKay, 1993), razón que hace importante controlar este parámetro.

De no ser posible contar con un equipo automático, se recomienda tomar al menos 3 muestras por día. En este caso, dependiendo de la disponibilidad, puede ser mejor no hacer el ensayo de trazador por separado, si no junto de modo de evitar un doble muestreo innecesario.

Una vez finalizado este proceso ya se puede trabajar con el trazado biológico. Como ya se conoce el funcionamiento del trazador cloruro se puede determinar cuántas muestras tomar y cuando. De manera de hacer un trabajo más eficiente y reduciendo costos. Por la tendencia de la curva se hace mucho más importante tener una buena composición de datos al inicio de ensayo que al final, en el caso de que este fuese un limitante. Idealmente se sugiere tomar al menos 3 muestras diarias parceladas en el tiempo. Existen ensayos con duración de un par de meses que han tomado sólo 15 mediciones (Skilton, 1988) con buenos resultados, en este caso

el trazador tenía una vida media de 12 meses, todo dependerá de que tan detallado se necesiten los resultados.

Ya terminada la campaña en terreno, se debe procesar los datos. Se calculan velocidades de flujo con los métodos de dilución puntual en pozo único y en ensayo de flujo paralelo se obtienen parámetros hidrogeológicos del acuífero. También se corrobora velocidades y dirección.

Finalmente se hace una comparación de los resultados de ambos métodos con la solución teórica dada por Darcy.

CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES.

En primer lugar en relación a los objetivos de esta tesis se puede concluir que se pudo conocer, con valores muy cercanos, las velocidades en distintos puntos del acuífero. Estas presentaron entre los trazadores utilizados y los valores teóricos una pequeña variación, pero para ciertos análisis puede ser importante.

Las velocidades calculadas en los 2 ensayos mostraron una total congruencia en relación a la cercanía con la salida del sistema y la magnitud de la velocidad, información relevante para apoyar la hipótesis de flujos. En este caso, por medio del balance hidrológico, la empresa consultora Geo-Aguas hizo una importante solicitud de derechos de aguas. Por lo tanto este estudio apoya dicha solicitud.

Para las direcciones de flujos subterráneos, la presencia del trazador biológico en los pozos de observación corrobora la idea inicial de flujo subterráneo. Por lo tanto en base a ese objetivo planteado, este estudio satisface completamente la intención de apoyar la suposición de flujos, direcciones y velocidades subterráneas.

Por el contrario existe una serie de detalles en los procedimientos, que podrían haber afectado los resultados y ser de algún modo los causantes de la pequeña divergencia numérica en los resultados.

Para el trazador biológico se hacen el siguiente análisis.

- A pesar que al final del ensayo se demuestra que el virus no está presente en el acuífero, siempre se debe tomar una muestra previa a la inyección para conocer las condiciones iniciales del pozo, por lo tanto es fundamental para otros estudios conocer las características naturales del pozo (no se hizo en este ensayo), ya que de estar presente el trazador, el estudio puede llegar a quedar nulo.
- Se hizo una toma de muestras a periodos muy separados. Por lo que se recomienda realizarla de manera más frecuente, con una mayor cantidad de análisis. Una buena idea pues ser buscar las condiciones para que el ensayo sea más corto, con concentraciones menores. También es importante analizar las muestras en laboratorio al menos en triplicado, pues de esta manera se disminuye el error, es decir, la incertidumbre. Para este estudio, se obtuvo un rango de error cercano al 80% en algunas muestras. Razón que puede explicar el alza en la concentración para los 80 días en el gráfico 4.6.

- Se utilizó una concentración demasiado alta, si se considera que siendo 1000 veces como máximo la concentración de detección que debe ser inyectada, el ensayo hubiese sido más económico y hubiese durado sólo un par de días. Esto puede afectar las condiciones iniciales del agua en el sondeo, como por ejemplo la densidad. De todos modos en ciertos casos una buena concentración de microorganismos es directamente proporcional al rendimiento (Pang, 2002). De este modo se busca un equilibrio, pues se deben evitar también problemas de dispersión que pueden afectar a un trazador biológico (Bricelj, 2003)
- El pH se mantuvo constante en el ensayo, pero existieron variaciones en la turbiedad del agua que pueden ser considerables. Al ser pocas muestras es difícil determinar que esto se debe a la inyección del trazador, pero sí es un parámetro al que se le debe prestar atención para futuros estudios.
- Por lo general el bacteriófago MS2 trabaja en mejores condiciones con alto pH, baja fuerza iónica y alta materia orgánica disuelta. Por lo tanto puede haber existido una interacción indirecta entre trazadores, provocando la alteración en los resultados ya mencionados (Walshe, 2010).
- El punto de medición fue incorrectamente elegido, esto debido a que en la zona superior de los pozos se encontraba “pozo ciego”, disminuyendo considerablemente el flujo en esa zona. Por lo tanto se puede explicar de esta manera la menor velocidad entregada por este trazador. Se debió elegir otros pozos de inoculación o simplemente cambiar el instrumento de medición.

En general este trazador ha sido estudiado para obtener y conocer el acuífero, pero puede ser utilizado de mejor forma para conocer comportamiento de contaminantes en las aguas subterráneas (Taylor, 2004). Sobre todo considerando que en el norte de Chile gran parte de este recurso proviene de la zona sub superficial, y en su mayoría para el consumo humano.

Con respecto al trazador cloruro:

- Se recomienda estimar previamente la duración del ensayo. En este caso, sólo un par de días fueron suficientes para que se extinguiera el trazador en el pozo, de manera que se pueden emplear otras estrategias para la medición y de esta manera disminuir costos.
- La frecuencia de medición debe ser mayor. A pesar de que los datos permiten construir una curva, una mayor densidad de datos provee mejores cálculos y así resultados de mejor calidad.

- Se propone hacer mediciones de pH y turbiedad. De esta manera se tiene un mayor control sobre las condiciones de los pozos y como el trazador afecta su funcionamiento.
- Utilizar acero inoxidable en la cuerda sostenedora del conductivímetro, ya que al interactuar con el pozo, se oxida y puede provocar daño en los equipos de medición y posibles cambios en la calidad del agua.

Desde el punto de vista económico, el costo del trazador químico es mucho más alto que el trazador biológico, pero se debe mencionar que en el primer caso la mayoría de los costos son únicos, por lo que en un futuro ensayo los costos de implementación serían casi nulos. Por el contrario en el caso del trazador biológico los costos son esenciales en la realización de cualquier ensayo. Por consiguiente, la hora de elegir un trazador se debe pensar tanto en la calidad de los resultados como en la reutilización de instrumentos y futuras investigaciones a desarrollar.

Con respecto al marco legal, no existe en Chile entidad que regule la inyección de trazadores, por este motivo se sugiere seguir la normativa de la EPA. Esta hace una selección según el tipo de trazador a utilizar, categorizándolos de manera muy amplia. De este modo sirve principalmente para saber el nivel de rigurosidad y cuidado que se deben tener en la implementación del estudio de una manera general. Lo demás se debe controlar en base a los parámetros hidrogeológicos del sistema.

Finalmente no se puede decir con claridad cual método entrego mejores resultados, quizás los valores que entregó el ensayo con trazador químico se pueden acercar más a la realidad comparando con los valores teóricos, de todos modos las condiciones en que se realizaron ambos ensayos no permiten entregar un resultado con certeza. Se espera que el capítulo 5 sea a futuro un complemento a este trabajo, permitiendo una investigación más profunda de este tema en Chile y entregar información más específica sobre los temas expuestos en este estudio.

BIBLIOGRAFÍA.

- AMERICAN Water Works Association. (2005). Standard Methods for the examination of water and wastewater. 21st Edition. APHA, AWWA, WEF, U.S.A.
- ARACIL Ávila, Enrique. Medición de flujos en sondeos de captación de agua [en línea] <http://aguas.igme.es/igme/publica/libros2_TH/art1/pdf/aracil.pdf>. [consulta: 2000].
- BARRA, Leonel. Apuntes curso Gestión operacional de aguas subterráneas, CI66K. Departamento de Ingeniería civil, Universidad de Chile, 2010.
- BRICELJ, Mihael. Microbial tracers ins groundwater research. [en línea] RMZ – Materials and Geoenvironment, 50 (1): 67-70, sep. 2003 http://www.rmz-mg.com/letniki/rmz50/rmz50_0067-0070.pdf [consulta: 2003].
- CHOW, Ven Te. Hidrología aplicada. McGraw-Hill, 1994
- COMISIÓN Docente Curso Internacional de Hidrología Subterránea. Hidrogeología. Barcelona, Fundación Centro Internacional de Hidrogeología Subterránea, FCIHS, 2009. 768p.
- CUSTODIO, Emilio, LLAMAS, Manuel Ramón (Eds). Hidrología subterránea. Barcelona, Omega, 1976. 2v.
- DECRETO N° 46. CHILE. Establece Norma de emisión de residuos líquidos a aguas subterráneas, 17 de enero de 2003.
- DGA, Dirección General de aguas. Mapa hidrogeológico de Chile, 1986.
- ESPINOZA, Carlos. Apuntes curso hidráulica de aguas subterráneas y su aprovechamiento, CI51J. Departamento de Ingeniería civil, Universidad de Chile., 2007.
- GEO – AGUAS Consultores, Proyecto Pampa Peineta, 2010.
- GERBA, Charles. Microorganisms as groundwater tracers. Groundwater pollution microbiology. New York, John Wiley & Sons, 225-233, 1984.

- GUIMARAENS, Martín, SILVERIO DA SILVA, José Luiz, GAMAZO, Pablo, BESSOUAT, Claudia, FAILACHE, Leonardo, CAMPONOGARA, Isabel. 2008. Determinación de flujo mediante ensayo de trazadores de pozo único en sistema acuífero guaraní en la zona de Artigas (Uruguay). En: IX Congreso Latinoamericano e Hidrología Subterránea e Expo Agua 08 a 12 de Julio de 2008. Quito, Colegio Regional de Ingenieros Geólogos, de Minas, Petróleos y Ambiental, CIGMYP, pp.sp.
<http://jararaca.ufsm.br/websites/labhidro/download/quito_2008.pdf> [consulta: 2008].
- HOLMBECK-PELHAM, S.A. RASMUSSEN, T.C. and FOWLER, L.A. Regulation of Injected Ground Water Tracers. *Ground Water*, 38(4): 541-549, jul-aug. 2000.
- LESSER Illades, Juan Manuel. El uso y aplicación de trazadores de agua subterránea. Boletín de la sociedad Geológica Mexicana, 39(2):71-76, sep. 1978 [en línea] <<http://boletinsgm.igeolcu.unam.mx/epoca03/1978-39-2%20Lesser.pdf>> [Consulta: 1978]
- MCKAY, Larry. A field Example of Bacteriophage as tracers of fracture flow. Environ. Sci. Technol, 27, 1075-1079, 1993
- PANG, Liping. Application of the method of temporal moments to interpret solute transport with sorption and degradation. Journal of contaminant Hydrology, 60: 123-134. Mayo 2002.
- ROJAS, Rubén. Determinación de velocidad y dirección del flujo de aguas subterráneas mediante trazadores radioactivos. [en línea] <<http://www.ipen.br/arcad/arquivos/117.doc>> [consulta: Abril, 2009]
- ROSSI, Pierre.. Bacteriophages as surface and ground water tracers. Hydrology and Earth System Sciences, 2(1), 101-110, 1998.
- SKILTON, Helen y Wheeler, C. Bacteriophage tracer experiments in groundwater. Journal of Applied Bacteriolog, 65387-39s, 1988.
- SKILTON, Helen y Wheeler, C. The application of bacteriophage as tracers of chalk aquifer systems. Jornal of Applied Microbiology, 66(6): 549-557, jun. 1989.

- TAYLOR, Richard. The implications of groundwater velocity variations on microbial transport and wellhead protection – review of field evidence. FEMS Microbiology Ecology 49, 17–26. 2004.
- WALSH, Gillian E. Effects of pH, ionic strength, dissolved organic matter, and flow rate on the co-transport of MS2 bacteriophages with kaolinite in gravel aquifer media. Water Research, 44(4): 1255-1269, feb.2010.

ANEXO A

Perfiles de conductividad eléctrica y temperatura en pozos de aplicación trazador químico.

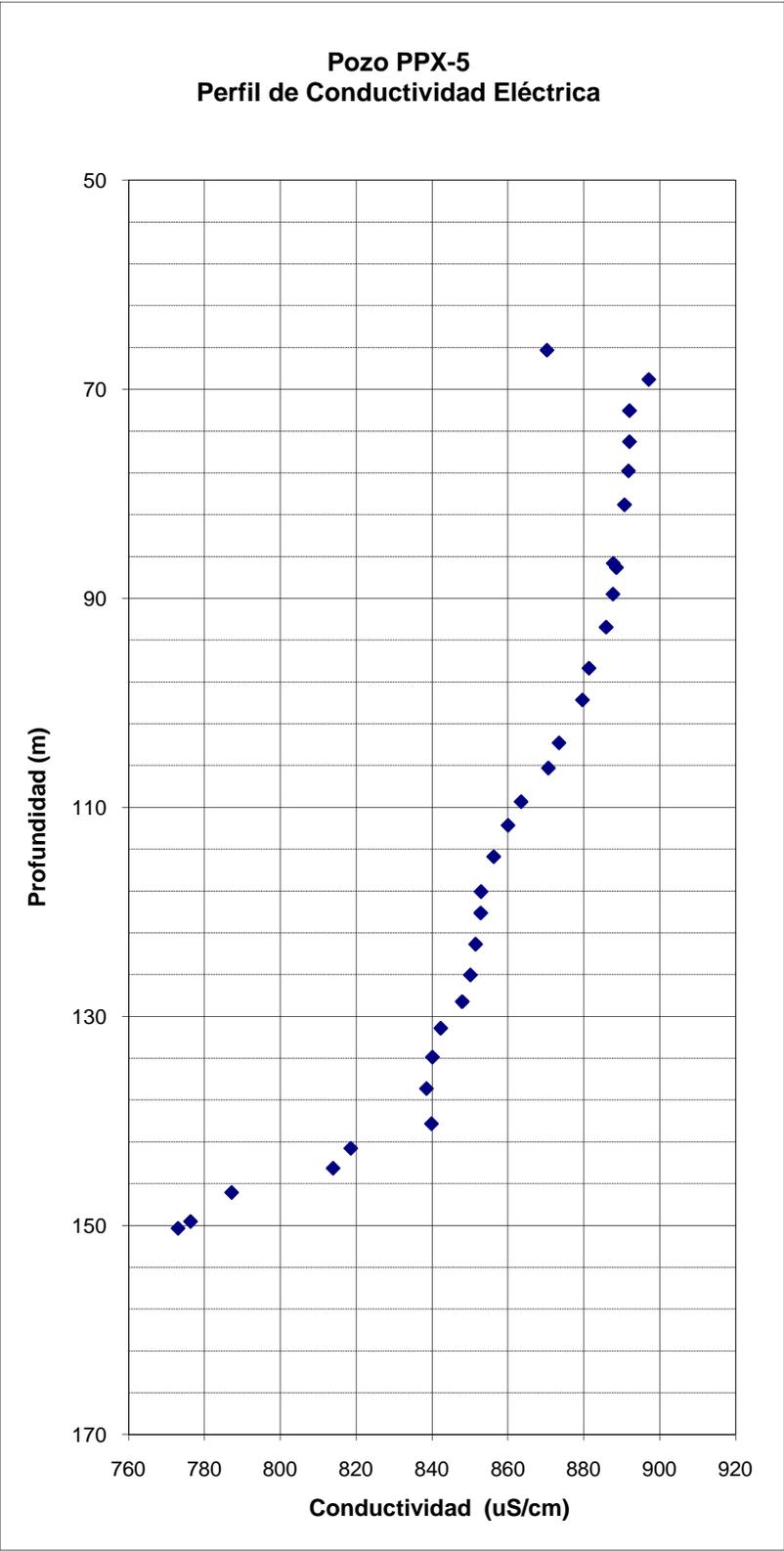


Figura A.1 Perfil de conductividad pozo PPX-5.

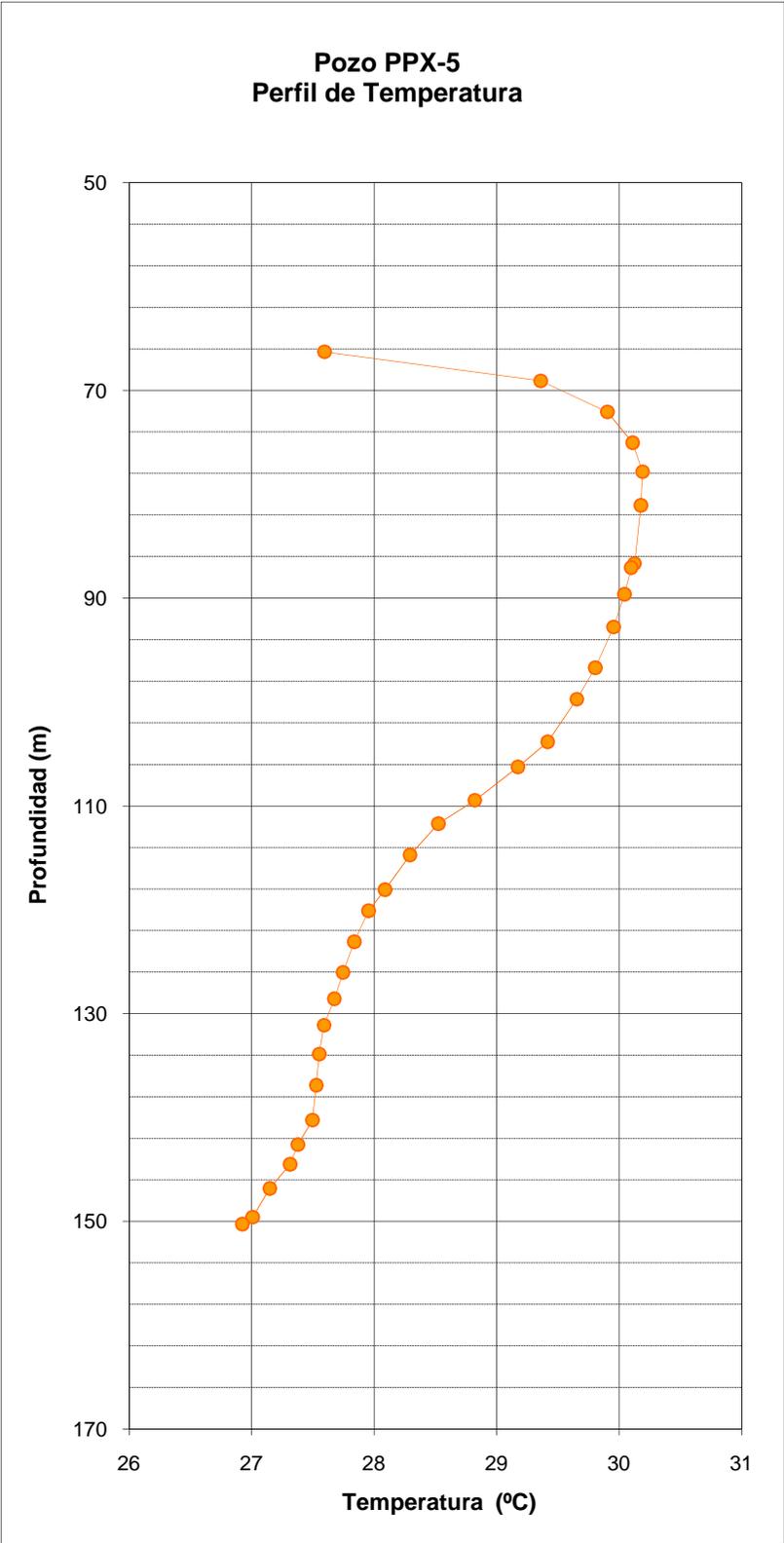


Figura A.2 Perfil de temperatura pozo PPX-5.

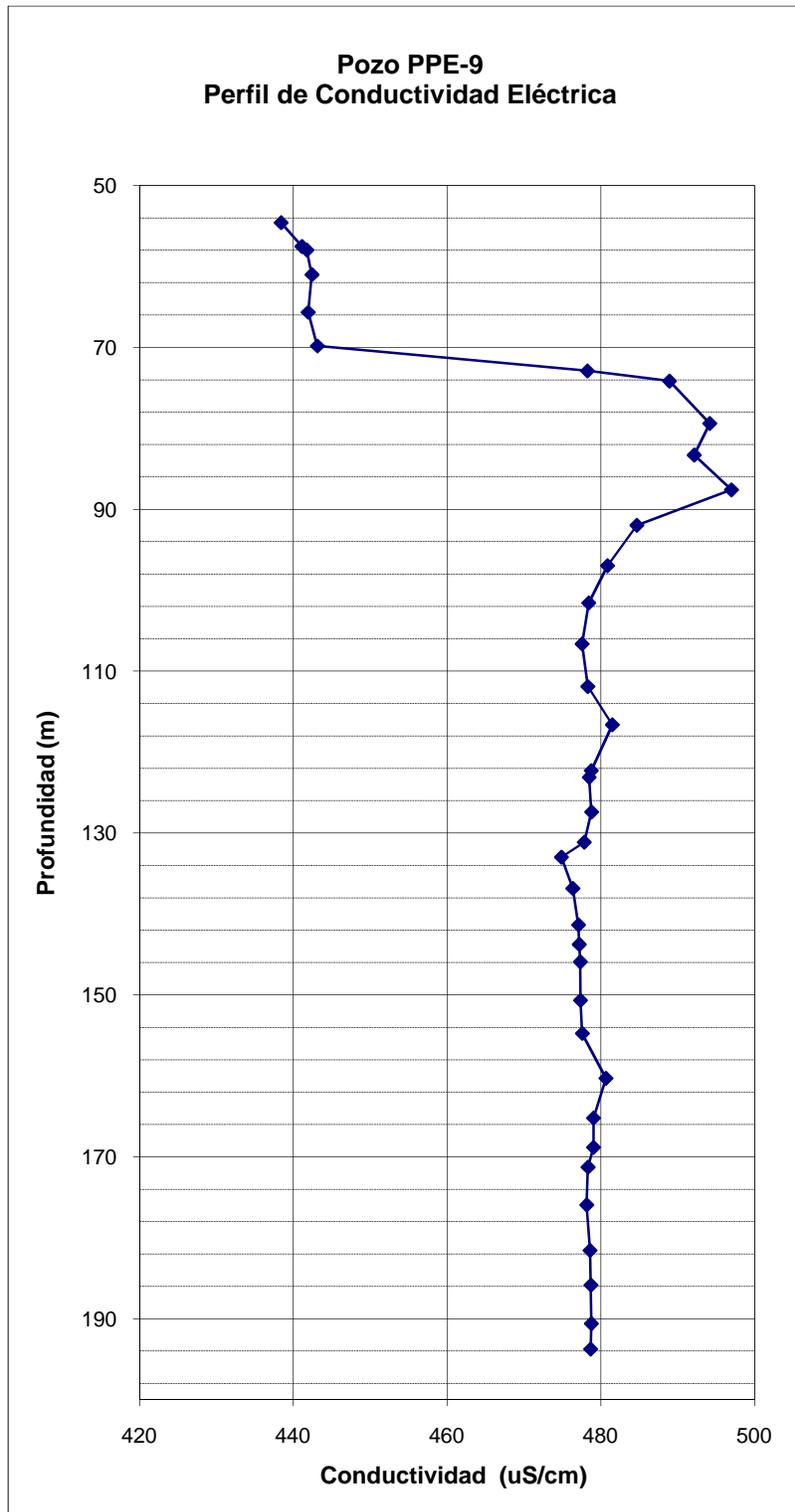


Figura A.3 Perfil de conductividad pozo PPE-9.

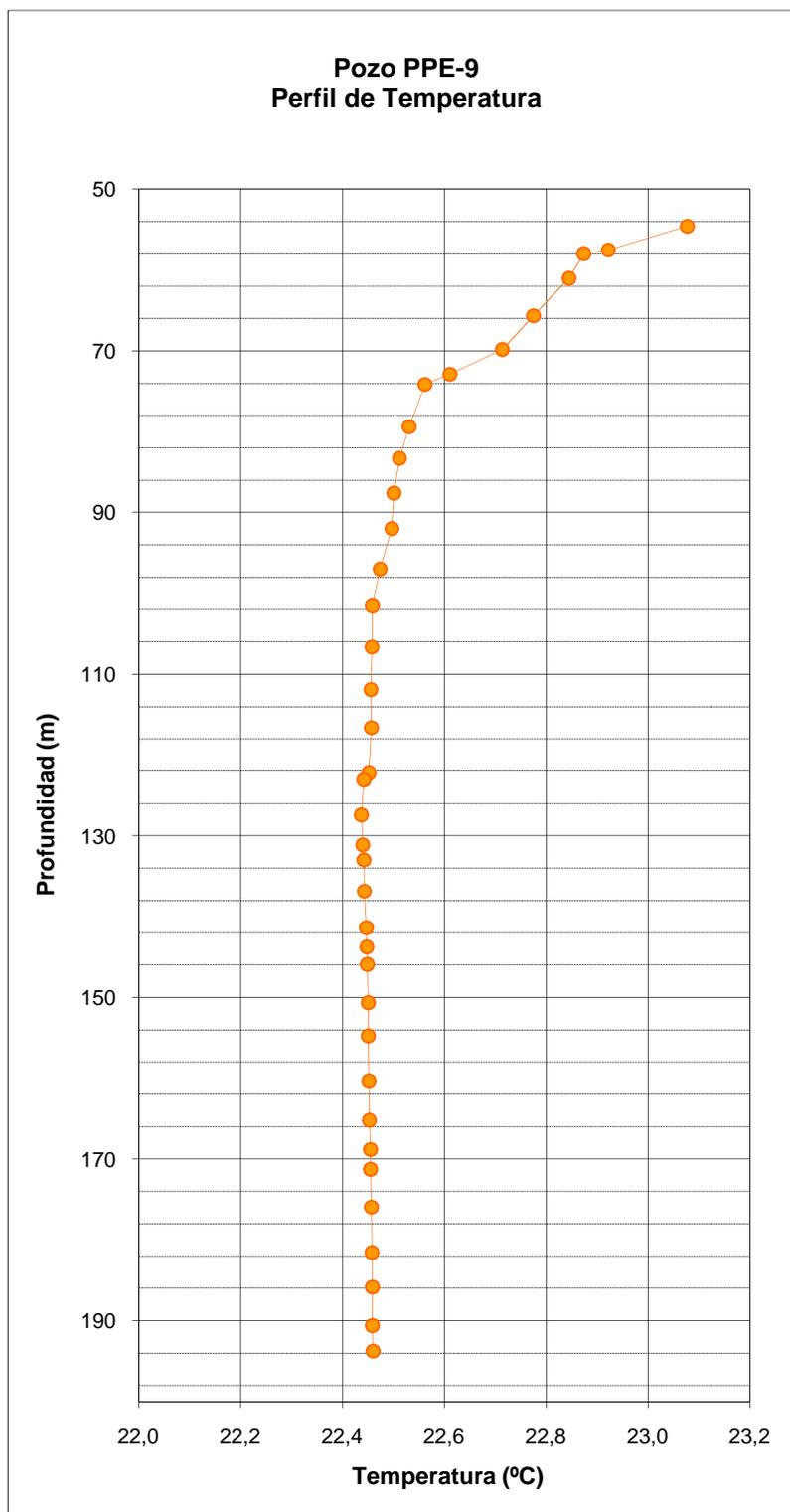


Figura A.4 Perfil de temperatura pozo PPE-9.

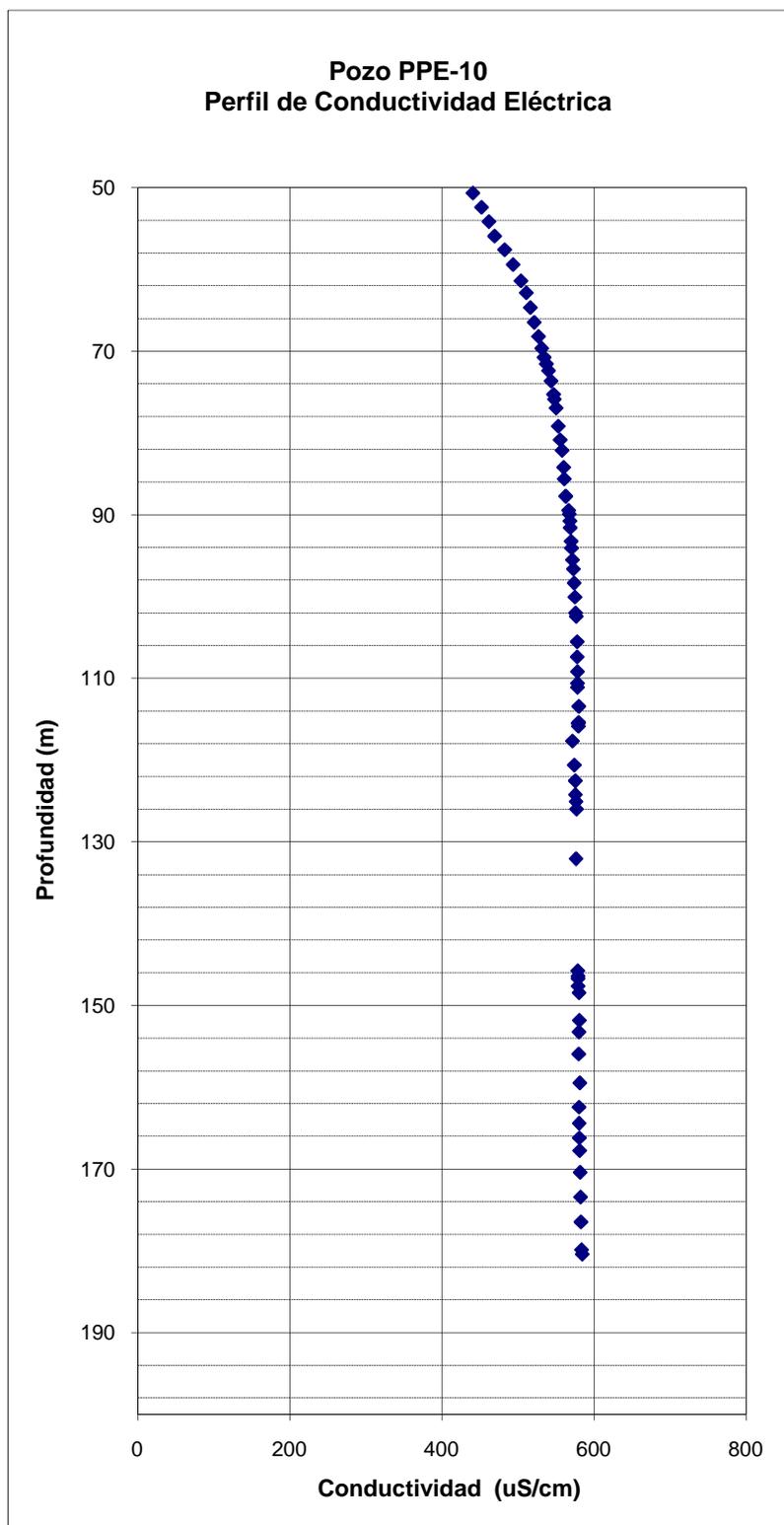


Figura A.5 Perfil de conductividad pozo PPE-10.

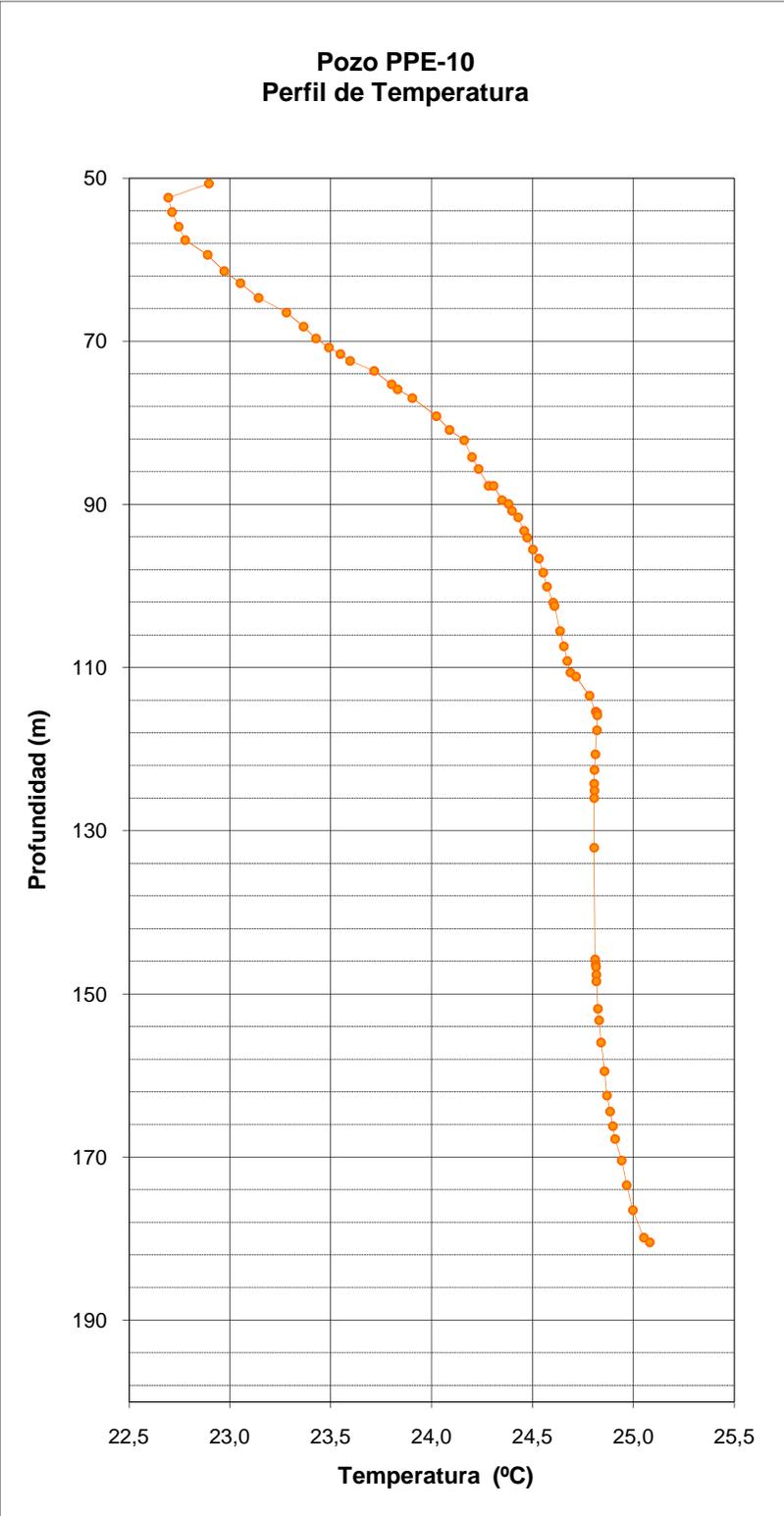


Figura A.6 Perfil de temperatura pozo PPE-10.

ANEXO B

Preparación del inóculo para inyectar, por Gabriela Castillo Morales.

TÉCNICA DE PROPAGACIÓN DE BACTERIÓFAGO

Materiales

1. Buffer tris para dilución del fago (2.7 mL por tubo)
2. Agar de profundidad (bottom): Agar soya caseína (TSA) de concentración normal (Difco): 30g TSA. Disolver, autoclavar y disponer 15 mL en placas de petri estéril.
3. Agar tope (top). Caldo soya caseína (TSB) + agar + agua destilada (Disco): 3g de TSB + 1g de Bactoagar + 100 mL de agua destilada. Disolver por calor, distribuir 4 mL por tubo de ensayo, tapar y autoclavar.
4. Medio para bacteria hospedera, preparar TSB y dispensar 3 mL en tubos de ensayo y 50-100 mL en frascos erlenmeyer. Autoclavar.

PREPARACIÓN DEL FAGO STOCK

1. Inocular 1 tubo (3mL de TSB) con una colonia de la bacteria hospedera e incubar a 35°C por 18-24h hasta que el organismo se encuentre en la fase estacionaria.
2. Inocular un frasco de 50-100 mL de TSB con un 1 mL de la bacteria hospedera. Incubar a 35°C por 4 a 6h., hasta que el organismo se encuentre en la fase de crecimiento logarítmico.
3. Preparar una dilución de 10^5 de su fago stock (que probablemente se encontrará entre 10^{10} - 10^{11} mL⁻¹). Realizar diluciones agitando con vortex entre cada una y usar nueva pipeta entre las diluciones.
4. Fundir varios tubos de agar tope, colocarlos en un baño a 48°C a) Agregar a cada tubo 1 mL de la bacteria crecida en fase log. b) Agregar 0,1 mL del fago diluido por tubo c) Agitar suavemente en el vortex y derramar (pour) sobre las placas de agar de profundidad (bottom) d) dejar solidificar, invertir las placas e incubar a 35°C por 24h.
5. Después que las placas crecen en forma confluyente, agregar 6 mL de buffer Tris o TSB por placa y dejar reposar a temperatura ambiente durante 2 h, para permitir que el fago difunda a la solución. Aspirar o vaciar el eluyente y centrifugar a 10,000 rpm por 10 min.
6. Esterilizar el sobrenadante a través de un filtro de 0,2 µm y titular mediante el ensayo en placa y guardar a 4°C. Tratar obtener 10³ a 10⁵ placas por placa; las 24 placas producirán alrededor de 50 mL de fago por 10^{11}

ENSAYO EN PLACA

1. Inocular con una colonia de la bacteria hospedera desde una siembra de aislamiento en placa. Incubar por 24h a 35°C. (día 1)
2. Inocular un frasco de TSB (50-100mL) con 1 mL de la bacteria hospedera. Incubar a 35°C por 3h en un shaker (150-180 rpm) o por 4-6 h agitando suavemente con la mano, El término del tiempo el organismo se encontrará en la fase logarítmica y lista para usar. (día 2)
3. Sacar las placas de TSA del refrigerador, dejar en friar por 3 h.
4. Diluir el fago y plaquear de acuerdo a las diluciones esperadas.
5. Fundir varios tubos de agar top, mantenerlos en un baño de agua a 48°C. No más de 20 min antes del uso. Agregar 1 mL de la bacteria hospedera en fase log.; agregar 0,1 a 1 mL del fago diluido por tubo, Agitar suavemente en el vortex y dispersar sobre las placas de TSA (bottom). Dejar solidificar e incubar a 35°C por 24h. Se puede trabajar hasta co 10 tubos a la vez. (día 3)
6. Enumerar las placas. (día 4)
7. Siempre realizar en ensayo en duplicado

PURIFICACIÓN DE LA CEPA HOSPEDERA

1 Para ello, se traspasó un inóculo de la cepa hospedera de *E. coli* ATCC 15597, almacenada en agar cepario en el laboratorio, a un medio de enriquecimiento (Caldo Soya Caseína (TSB), se incubó a 35°C por 18 h y luego se traspasó por siembra en superficie, a un medio selectivo agar McConkey, dispuesto en placa. Se incubó otras 18 h a 35°C y se obtuvo colonias típicas aisladas de la bacteria purificada.

PREPARACIÓN DE VOLUMEN DE FAGO PARA INYECCIÓN DE LOS POZOS

1. Para la obtención de la cantidad necesaria de fago para inyección de los pozos utilizados en este estudio se procedió en igual forma a lo descrito en la preparación del fago stock, aumentando el tiempo de crecimiento de la bacteria hospedera en TSB para la obtención de la fase log. de 4 a 6h. y el volumen del fago stock a inocular.
2. Previamente se propagó y tituló el fago stock guardado en el laboratorio.

3. Posteriormente se hizo crecer el fago titulado con la bacteria hospedera en 1 litro de TSB, se tituló y esterilizó mediante filtro Stericup de 0,2 μm . Una vez obtenido el volumen requerido, el fago se re-esterilizó, se volvió a titular y se dispuso en frascos estériles de 2 L.

ANEXO C

Interpretación de ensayo flujo paralelo y pozo único, FCIHS.

A partir de dichas curvas se puede estimar el tiempo medio de llegada del trazador, donde se cumple que la concentración dividida la concentración inicial es un medio. La velocidad real de flujo viene dada por:

$$v = \frac{q}{\eta} \quad (\text{AC.1})$$

$$v = \frac{R}{t_o} \quad (\text{AC.2})$$

Donde:

v : Velocidad [L/T].

q : Caudal específico [L/T].

η : Porosidad [-].

R : Distancia [L].

t_o : Tiempo medio de llegada [T].

Operando con dichas fórmulas se puede deducir que:

$$\eta = \frac{k*i*t_o}{R} \quad (\text{AC.3})$$

Donde:

k : Permeabilidad [L/T].

i : Pendiente [-].

Dependiendo de las curvas de llegada sean simétricas, se pueden determinar dos puntos de la curva correspondientes a t_{16} y t_{84} , 16 % y 84 % de la masa respectivamente a llegado en dichos instantes. $n_a d$

Se trata de determinar la desviación tipo σ de las curvas de distribución del trazador, recordando sus propiedades relacionadas a la campana de Gauss. Luego los instantes que están separados de t_0 a una distancia σt es la desviación de la curva. En el caso ideal $\sigma_{16} = \sigma_{84}$.

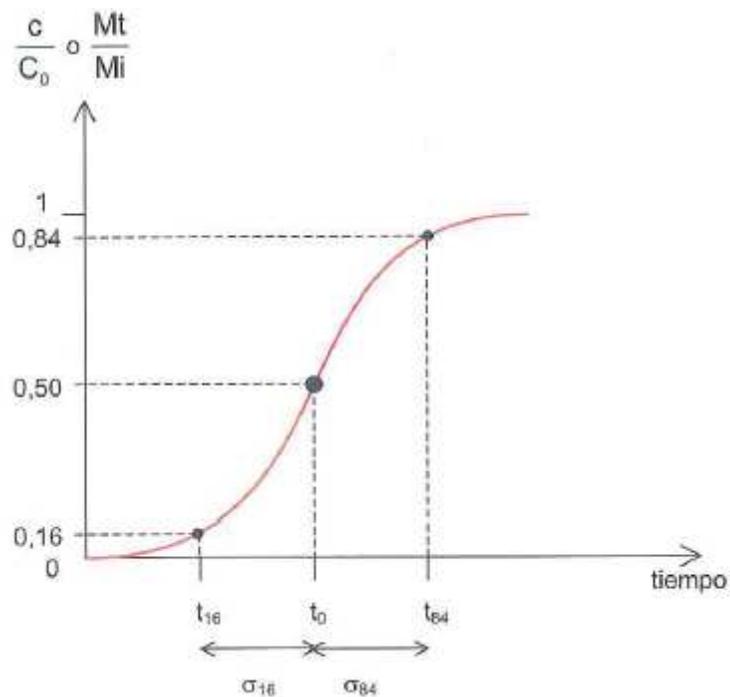


Figura AC.3 Desviación tipo de las curvas de distribución del trazador.

En este caso el coeficiente de dispersión D viene dado por la expresión siguiente:

$$D = \frac{\sigma^2 v^2}{2t_0} \tag{AC.4}$$

Donde:

D : Coeficiente de dispersión.

Y la dispersividad α por:

$$\alpha = \frac{D}{v} = \frac{\sigma_t^2 v}{2t_o} \quad (\text{AC.5})$$

Donde:

α : dispersividad.

2. ENSAYO POZO ÚNICO.

Se utiliza para medir velocidad de flujo horizontal en un acuífero, como para determinar flujos verticales. Fue desarrollado por Korcherin en 1916 y ampliado posteriormente por otros autores. Los pasos son:

1.- Se aísla un tramo de un piezómetro con un Volumen V_o tal que:

$$V_o = \frac{\pi * d^2}{4} l \quad (\text{AC.5})$$

Donde:

V_o : Volumen [L^3].

d : Diámetro [L^2].

l : Altura [L].

2.- Se inyecta un trazador que se mezcla en el sondeo con el agua, alcanzando una concentración constante y homogénea.

3.- Se mide la concentración en dicho piezómetro cada intervalos de tiempo determinados.

Se debe considerar: Flujo estacionario, concentración homogénea, ausencia de flujos verticales, difusión nula.

Este método se basa en como disminuye la concentración en el tiempo a una cierta profundidad debido a la dilución del agua que se produce por el flujo existente.

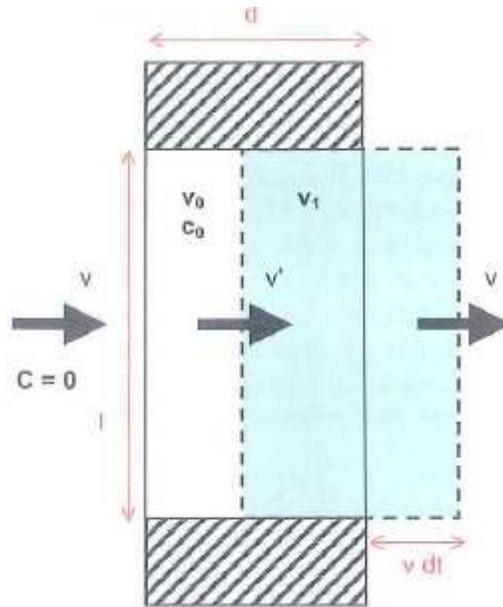


Figura AC.5 Reducción del trazador en el sondeo (Fuente: Hidrogeología FCIHS).

Se tiene que:

$$\ln\left(\frac{C_0}{C}\right) = \frac{Sv't}{v_0} \quad (\text{AC.6})$$

Donde:

S : Sección del tramo [L^2].

t : Tiempo de medición [T].

Se deben considerar las perturbaciones sobre la velocidad del agua que se mide en el sondeo v' respecto a la velocidad del agua que existe en el medio permeable v .

$$v' = \alpha * v \quad (\text{AC.7})$$

En este caso el parámetro α es un coeficiente de corrección apropiado al tipo de sondeo y acuífero. En la siguiente figura se muestra la deformación de las líneas de flujo como consecuencia de la variación de propiedades hidráulicas.

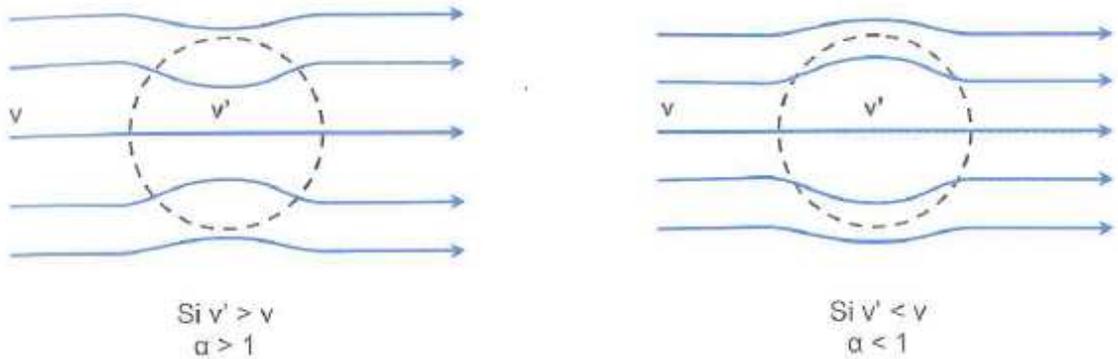


Figura AC.6 Reducción del trazador en el sondeo (Fuente: Hidrogeología FCIHS).

Este coeficiente viene dado por la siguiente relación:

$$\alpha = \frac{8}{\left(1 + \frac{K_3}{K_2}\right) \left[1 + \frac{r_1^2}{r_2^2} + \frac{K_2}{K_1} \left(1 - \frac{r_1^2}{r_2^2}\right)\right] + \left(1 - \frac{K_3}{K_2}\right) \left[\frac{r_1^2}{r_3^2} + \frac{r_2^2}{r_3^2} + \frac{K_2}{K_1} \left(\frac{r_1^2}{r_2^2}\right) - \frac{r_2^2}{r_3^2}\right]} \quad (\text{AC.8})$$

Donde:

K_1 : Permeabilidad efectiva en el sondeo.

K_2 : Permeabilidad efectiva del pre filtro.

K_3 : Permeabilidad efectiva del terreno.

r_1 : Radio interno del tubo del sondeo.

r_2 : Radio externo del tubo del sondeo.

r_3 : Radio del sondeo más el prefiltro.

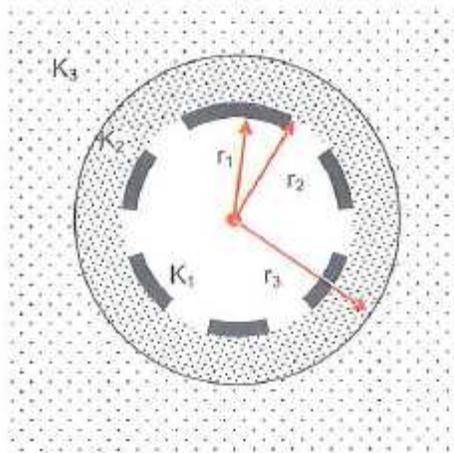


Figura AC.7 Sección transversal de un sondeo en el terreno (Fuente: Hidrogeología FCIHS).

Finalmente se calcula la velocidad por medio de la siguiente relación:

$$\ln\left(\frac{c_o}{c_t}\right) = \frac{4t\alpha v}{\pi d} \quad (\text{AC.9})$$