

**SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA
XXI CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA**

**ANÁLISIS DE LA CONTRIBUCIÓN GLACIAR A RÍOS DE LOS ANDES DE
CHILE CENTRAL MEDIANTE EL USO DE TRAZADORES**

AUTORES

MAXIMILIANO RODRÍGUEZ M.¹

NILS OHLANDERS²

JAMES MCPHEE T.³

RESUMEN

Este trabajo busca caracterizar la contribución relativa de glaciares, nieve estacional y almacenamiento subterráneo a la escorrentía de la cuenca del río Juncal, a partir de diferentes tipos de modelos de mezcla alimentados con datos de trazadores químicos e isotópicos. Los resultados muestran que en una cuenca dominada por glaciares como el Juncal Norte, y en un año seco, como lo fue el año hidrológico 2011, al menos el 30% del caudal de la Estación fluviométrica Juncal en Juncal proviene en forma directa de glaciares, un 20% de la nieve y el restante 50% proviene del almacenamiento subterráneo, que es por cierto alimentado por las dos primeras. Esta estimación está sujeta aún a altos niveles de incertidumbre, y son necesarios análisis adicionales para refinar cada vez más estos valores. La información meteorológica se compara con los resultados de la separación del hidrograma, siendo posible identificar como varían las proporciones de caudal proveniente de cada fuente, resultados que están influenciados directamente por la variación isotópica e hidroquímica cuando existen distintas condiciones de radiación incidente de onda corta, temperatura y precipitación.

¹ Investigador, Advanced Mining Technology Center (AMTC), Universidad de Chile - xam.rodriguez@gmail.com

² Investigador, Centro de Ecología Aplicada (CEA)

³ Profesor Asociado, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile & Investigador asociado Advanced Mining Technology Center (AMTC), Universidad de Chile - jmcphée@ing.uchile.cl

1. INTRODUCCIÓN

En un escenario de cambio global acelerado, cada vez existe mayor consenso en cuanto a que el comportamiento histórico de sistemas ambientales podría no representar adecuadamente la respuesta de dichos sistemas ante forzantes naturales o influencias antropogénicas futuras. En este sentido, el comportamiento estadístico de las series de datos de caudales en sistemas fluviales podría perder gran parte de su poder predictivo. Ante lo anterior, cobra cada vez mayor importancia el conocimiento mecanístico o funcional disponible acerca de sistemas hidrológicos, pues dicho conocimiento puede conducir a modelos predictivos robustos, que sean válidos aún en condiciones radicalmente distintas a las que prevalecían al momento de su construcción.

En particular, interesa caracterizar la influencia de los reservorios naturales que almacenan agua en el ciclo hidrológico. En cuencas andinas de Chile central, estos reservorios típicamente incluyen glaciares en distintas formas, el manto de nieve estacional, y sistemas subterráneos en rellenos aluviales y roca fracturada. En este trabajo, mediante el uso de trazadores, tales como iones e isótopos, se busca conocer mejor el ciclo hidrológico característico de la cordillera de los Andes en Chile Central, y cuál es la contribución de los distintos reservorios que almacenan el agua desde el invierno hasta el verano, muchas veces de forma interanual.

La separación del hidrograma en flujo base y flujo superficial es la herramienta básica para determinar las componentes en la descarga de una cuenca (Clark y Fritz, 1997), por lo que en el presente estudio se realiza una división minuciosa de las componentes del hidrograma considerando la precipitación, el derretimiento de nieve, agua de glaciar y flujo subterráneo, de manera de conocer con profundidad el funcionamiento de las cuencas en estudio. Los trazadores, en estudios de hidrología, buscan evaluar la contribución dinámica de las fuentes al caudal de un río, y determinar la edad de las aguas subterráneas. La geoquímica e isótopos de distinto tipo se han utilizado constantemente en distintas cuencas en las pasadas dos décadas, con buenos resultados en cuanto a agregar información complementaria que enriquece de manera significativa el análisis hidrológico. (Cable et al., 2010; McNamara et al., 1997).

Con el objetivo de estudiar el comportamiento de las reservas en una cuenca de alta montaña en los Andes de Chile Central se plantean tres metodologías de análisis de los datos: i) en base a un análisis de componentes principales utilizando datos de isótopos estables; ii) basado en un modelo de mezcla simple (EMMA); y iii) a partir de un modelo bayesiano considerando información precedente en el área de investigación. La metodología presentada se aplica en la cuenca del río Juncal, tributario del río Aconcagua.

Numerosos estudios han dado cuenta del retroceso experimentado por el área cubierta de hielo en Los Andes extra tropicales (Gascoin et al., 2011; Rivera et al., 2002, Bown et al, 2008; Rabatel et al., 2011). Recientemente, Ohlanders et al. (2013) estudiaron datos de isótopos estables de agua de alta resolución para describir cualitativa y cuantitativamente la contribución de distintas fuentes a la hidrología del río Juncal. En este trabajo se profundiza dicho análisis, con la inclusión de información hidroquímica, y la estimación de incertidumbre de los resultados.

2. ZONA DE ESTUDIO

Para la realización de este estudio se seleccionó la cuenca del río Juncal, la cual se ubica en Chile Central en la Región de Valparaíso, en la provincia de los Andes (Figura 2-1).

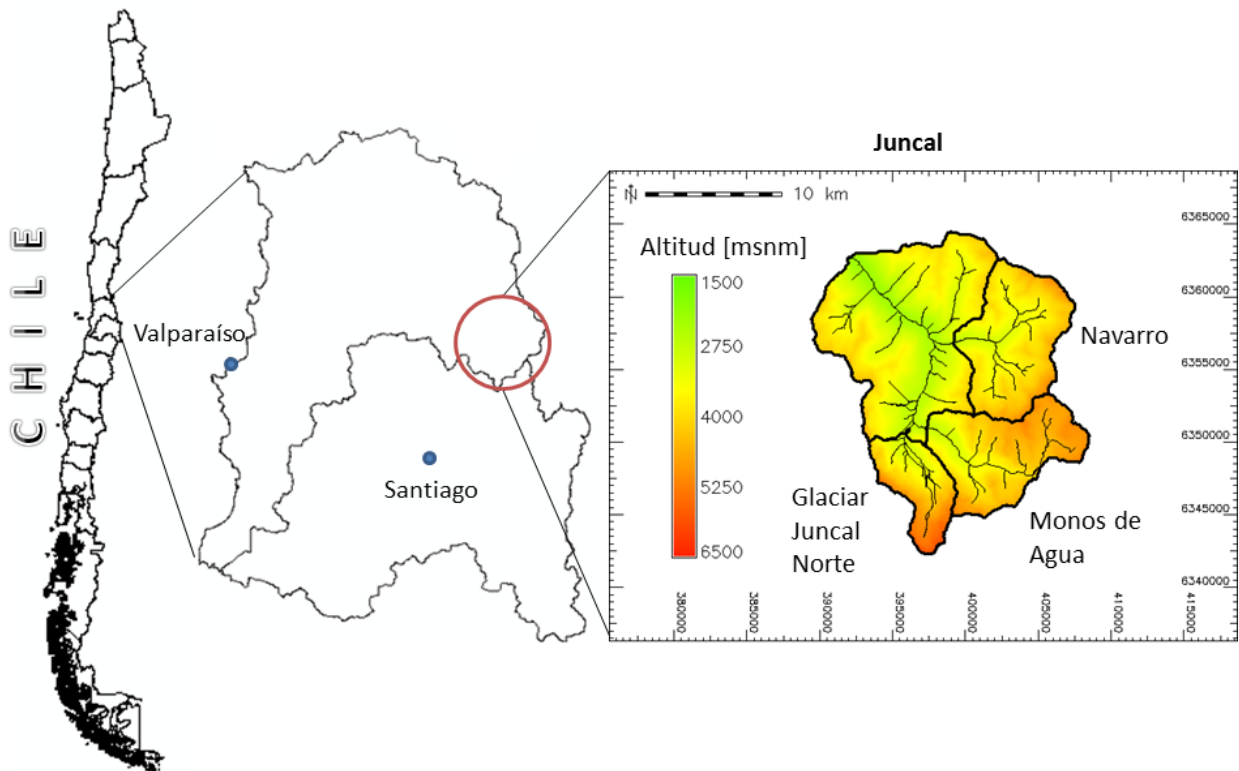


Figura 2-1: Zona de Estudio.

La cuenca del río está definida por la Estación fluviométrica Juncal en Juncal, controlada por la Dirección General de Aguas (DGA-MOP). El clima se presenta semi-árido, con precipitaciones sólidas en invierno producto de los sistemas frontales provenientes del Pacífico y, en menor cantidad, líquidas en verano originadas por tormentas de origen convectivo. Las precipitaciones pueden superar los 600 mm anuales. La temperatura en la cuenca presenta una disminución de hasta 4°C en sus valores de temperatura media anual con respecto a los valles de la zona central, siendo cercana a los 9°C (Dirección Meteorológica de Chile, 2001).

La zona de estudio se caracteriza por tener zonas bien marcadas en cuanto a la litología presente. En Juncal antiguamente existió una mina de yeso situada en la sub cuenca de Navarro, de la cual se extraía yeso. Las aguas provenientes de esta sub cuenca tienen una diferencia marcada en cuanto a su calidad de aguas en comparación con el resto de las aguas, siendo importante el alza en la concentración de calcio y sulfato.

En las cercanías de Navarro y Monos de Agua se aprecian rocas sedimentarias detríticas como lutita, arenisca y conglomerados. Existen rocas sedimentarias químicas como la caliza y coquina. Cabe mencionar la presencia de la Formación Auquilco (Yeso Principal) en Navarro. Hacia el lado oeste de la cuenca de Juncal predominan las rocas andesíticas. Existe también la presencia de rocas máficas como el basalto. En una pequeña zona de Juncal existe granodiorita y en otras zonas es común encontrar rocas piroclásticas como la Toba, las cuales están compuestas por fragmentos que fueron expulsados durante una erupción volcánica.

La información disponible para el análisis consistió en primer lugar en datos de caudales medios diarios medidos por la DGA en la estación fluviométrica Juncal en Juncal, obtenidos a partir del promedio de valores cada 15 min registrados de manera automática en dicha sección. Además, se llevaron a cabo aforos en distintos puntos del río Juncal y sus tributarios, con el fin de complementar la toma de muestras de agua para análisis. Se tomaron muestras de agua de dos maneras distintas: en primer lugar, en la ubicación aproximada de la estación fluviométrica se instaló un colector automático, capaz de tomar muestras de agua a intervalos programables, y de almacenar hasta 24 muestras entre visitas consecutivas de mantención. El colector operó entre las fechas 5-10-2011 y 25-04-2012. Fue programado para tomar muestras diarias o cada 2 días dependiendo de la época del año, con una mayor frecuencia de colección entre Octubre y Diciembre para recopilar mayor cantidad de datos en la época de transcientes de caudal más pronunciados. Por otro lado, se tomaron muestras de agua en puntos interiores de la cuenca durante campañas de terreno diseñadas para este fin, con el objetivo de caracterizar, en lo posible previo a procesos mayores de mezcla, distintas fuentes del caudal en el río. Las muestras fueron analizadas en los laboratorios de la Universidad de Chile, en la Universidad de Minnesota y en la Universidad de Utah. De manera complementaria, se contó con datos históricos de calidad de aguas medidos por la DGA desde el año 1996. El protocolo de medición de la DGA es distinto, con observaciones cada cuatro meses en la ubicación de la estación fluviométrica Juncal en Juncal. Finalmente, se contó con información meteorológica a intervalos de 10 min medida en la estación "Hornitos", operada por el Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile en cooperación con Colbún S.A.

Tabla 2-1: Puntos de muestreo más importantes y ubicación de estaciones meteorológicas usadas.

Código	Características	Coordenadas		Elevación
		E [m]	N [m]	[msnm]
JEST	Río Juncal en Juncal.	393845	6360543	2243
JNV	Estero Navarro	397904	6357280	2464
JMA	Estero Monos de Agua en Juncal	396475	6351542	2749
JGL	Estero naciente del glaciar	395852	6350307	2890
CBS	Colector de muestras (muestras automáticas en río). Cercano a este sitio se encuentra Estación meteorológica Hornitos.	392461	6362560	2233

3. METODOLOGÍA

3.1 Variabilidad de la conductividad

En primera instancia se analizaron los valores de conductividad eléctrica históricos junto a los obtenidos en este estudio, sin individualizar iones, con el fin de desarrollar una descripción global del comportamiento de la cuenca y su respuesta a cambios estacionales, así como a eventos meteorológicos. En consecuencia, además de conductividad y caudal se incluyó la temperatura del aire en este análisis, usando una ventana móvil de tres días de duración.

3.2 Número de Fuentes

Hooper (2003) presenta una metodología para analizar el número mínimo de fuentes necesarias para caracterizar la química de un río. Esta metodología se basa en el análisis de gráficos residuales, cuyos detalles se explican a continuación.

Los datos de los trazadores seleccionados (iones y/o isótopos) se proyectan en el espacio vectorial creado por los vectores propios que explican en forma decreciente la variabilidad de los datos según queda determinado por los valores propios. Estos nacen del análisis de componentes principales aplicado sobre los datos de trazadores de Juncal en Juncal. Es posible proyectar sobre este espacio (denominado espacio U) cualquier serie de datos y disminuir la dimensionalidad del espacio conservando una buena explicación de la química del río, por lo tanto, si en un comienzo se disponía de 6 solutos (i.e. 6 dimensiones) para la descripción de una muestra, es posible explicar de buena forma esta, generalmente, mediante dos o tres vectores propios. Los gráficos residuales nacen de la distancia entre los datos en el espacio original, creado con los solutos iniciales, y los proyectados en el espacio U. Una explicación coherente se da cuando no existen tendencias en los gráficos residuales vs concentración. La cantidad de fuentes necesarias para explicar la química del río siempre es uno más que la cantidad de vectores propios utilizados en el espacio nuevo.

Por otra parte, los datos históricos de la DGA fueron registrados en el mismo punto en el que se ubica el colector de muestras, por lo que su química debiera responder de manera similar. Sin embargo, los datos históricos fueron registrados por un lapso de tiempo de aproximadamente 15 años, mientras que los nuevos tomados por el Departamento de Ingeniería Civil son a lo largo de 1 año. La pregunta es qué tan comparables pueden ser estos dos registros y de qué manera pueden verse las diferencias entre ellos. Esta comparación también puede ser llevada a cabo con el análisis descrito anteriormente.

3.3 Separación del hidrograma

El estudio de los reservorios de agua de una cuenca puede estudiarse mediante la separación del hidrograma, el que da cuenta de la evolución de estos. Los diferentes reservorios pueden ser de distinta índole, pero en el estudio presente los más usuales son los glaciares, el manto nival y

acuíferos. Se utiliza el nombre de fuente para designar a cada uno de los lugares donde se almacena el agua y de los que deseamos conocer su contribución al caudal del río.

Una de las separaciones de hidrograma típicas es la que presenta Rodhe (1998). Otras modelaciones pueden crearse de la división en dos del modelo de Rodhe (1998), considerando por un lado solo una componente de aguas nuevas y aguas antiguas utilizando alguna información de isótopos (McNamara et al., 1997), o por otro lado mediante hidroquímica entre aguas superficiales y otras sub-superficiales (Sueker et al., 2000).

La separación utilizada en este estudio y que usualmente es la base de modelos más complejos que se explican más adelante, puede ser descrita matemáticamente por las siguientes ecuaciones:

$$C_r^1 = f_1 \cdot C_1^1 + f_2 \cdot C_2^1 + f_3 \cdot C_3^1 \quad (1)$$

$$C_r^2 = f_1 \cdot C_1^2 + f_2 \cdot C_2^2 + f_3 \cdot C_3^2 \quad (2)$$

$$f_1 + f_2 + f_3 = 1 \quad (3)$$

Donde f_i representa la fracción proveniente de cada fuente i , C_i^j es la concentración del soluto j en la fuente i y finalmente r es el lugar donde se encuentra la estación fluviométrica que cierra la cuenca. Este sistema de ecuaciones permite cuantificar la fracción de caudal proveniente de 3 fuentes. Modelos más sencillos son posibles de construir eliminando un soluto y la fracción (f_3). El caudal proveniente de cada fuente i queda descrito con respecto a la fracción por:

$$f_i = \frac{Q_i}{Q_t} \quad (4)$$

Donde Q_t es el caudal de la estación fluviométrica Juncal en Juncal y Q_i el caudal de la fuente i .

3.3.1 Modelo isotópico

Primeramente se utilizan los datos isotópicos para analizar su comportamiento y ver cuáles son las posibles fuentes que están influenciando el caudal. Se estudian los datos de Juncal en Juncal en términos de su variabilidad anual y mediante un análisis de componentes principales se reduce el problema a los dos vectores propios principales, donde el primero representa la variación espacial a distintas altitudes y el segundo la temporal (estacional).

3.3.2 Modelo de mezcla basado en EMMA (End member mixing analysis)

Para realizar la separación del hidrograma se ocupa el enfoque EMMA, el cual pertenece a una categoría pragmática de separación de hidrograma, que puede ayudar a estimar la contribución de agua de diferentes flujos (Hoeg et al., 2000). Técnicas de separación generalmente utilizan isótopos o trazadores químicos para resolver la ecuación del balance de masa (D.A. Burns et al, 2001). El modelo utiliza todos los datos disponibles a los cuales se les aplica primeramente un

análisis de componentes principales para reducir la dimensionalidad del problema, a la vez de retener la fracción dominante de variabilidad en los datos.

3.3.3 Modelo Bayesiano simple

La separación del hidrograma mediante EMMA entrega un valor exacto de la cantidad de agua proveniente de cada fuente, pero no permite la estimación de la incertidumbre asociada a las conclusiones que se obtienen sobre el sistema en estudio. En busca de una mejora a este problema se aplica un modelo probabilístico para la separación del hidrograma, basado en el Teorema de Bayes. Éste, a diferencia de EMMA, consigue entregar una distribución de probabilidad sobre la contribución de una determinada fuente. De este modo, la estadística bayesiana puede ayudar a manejar las dificultades que surjan al incorporar la incertidumbre en las predicciones.

El modelo propuesto incorpora información a priori basado en estudios anteriores y utiliza la información nueva para mejorar el conocimiento ya disponible sobre las fuentes del río Juncal en Juncal.

4. RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1 Análisis de datos de conductividad

La Figura 4-1 muestra los datos de conductividad y caudal del periodo 2011-2012 junto con la temperatura promedio de los 3 días anteriores al muestreo de la estación meteorológica de Hornitos. Para una mejor comparación se grafican estos junto a los datos históricos registrados por la DGA.

Los datos de verano del periodo 2011-2012 se muestran con un menor desplazamiento hacia la derecha evidenciando la condición de año seco sobre la región. Sin embargo la conductividad no varía fuertemente durante esta temporada. Los datos de primavera siguen la tendencia de los datos históricos, pero en invierno los datos se desplazan con mayor fuerza hacia la parte superior de la figura, lo que puede deberse a una condición más fría sobre la cuenca y a una menor cantidad de nieve caída, con lo que existe una menor dilución de los solutos una vez que el agua ha pasado por el suelo.

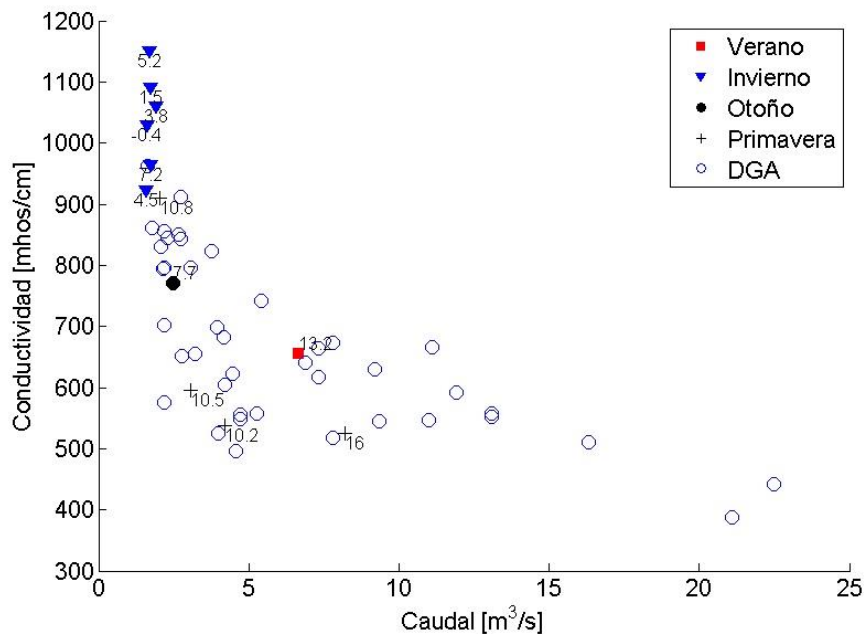


Figura 4-1: Conductividad v/s Caudal. Se grafica la temperatura promedio de los 3 días anteriores a la medición de conductividad. El periodo de medición corresponde a los años 2011-2012. DGA muestra los datos históricos.

4.2 Número de Fuentes

El análisis de Hooper (2003) puede ser llevado a cabo para conocer cuántas fuentes son necesarias para describir el problema de mezcla.

El primer vector propio explica gran parte de la química del río, con un valor de un 79.9%, mientras los demás lo hacen en una menor proporción (15.5, 2.5, 1.4, 0.5 y 0.17%).

Si los datos presentan alguna tendencia en los gráficos de residuales versus concentración, entonces se deberá incorporar un segundo vector, lo que implica la identificación de una fuente adicional relevante para efectos de la variabilidad. Esto porque una tendencia en los datos implica que el espacio propuesto no explica bien la química del río.

Al proyectar los datos en el espacio 1D definido por el primer vector propio se observan tendencias en los casos del Potasio y el Sodio (no mostrado), lo que indica que la química del río no puede ser explicada en términos de solo un eje de variación. Al incorporar un segundo vector propio se logra explicar un 95% de la variabilidad de los datos en el río. En la Figura 4-2 se aprecian las tendencias en los residuales, con lo que se verifica que tres fuentes no son suficientes para explicar la totalidad de la variabilidad de los datos observados, sin embargo, este espacio puede ser usado como una simplificación de un comportamiento complejo.

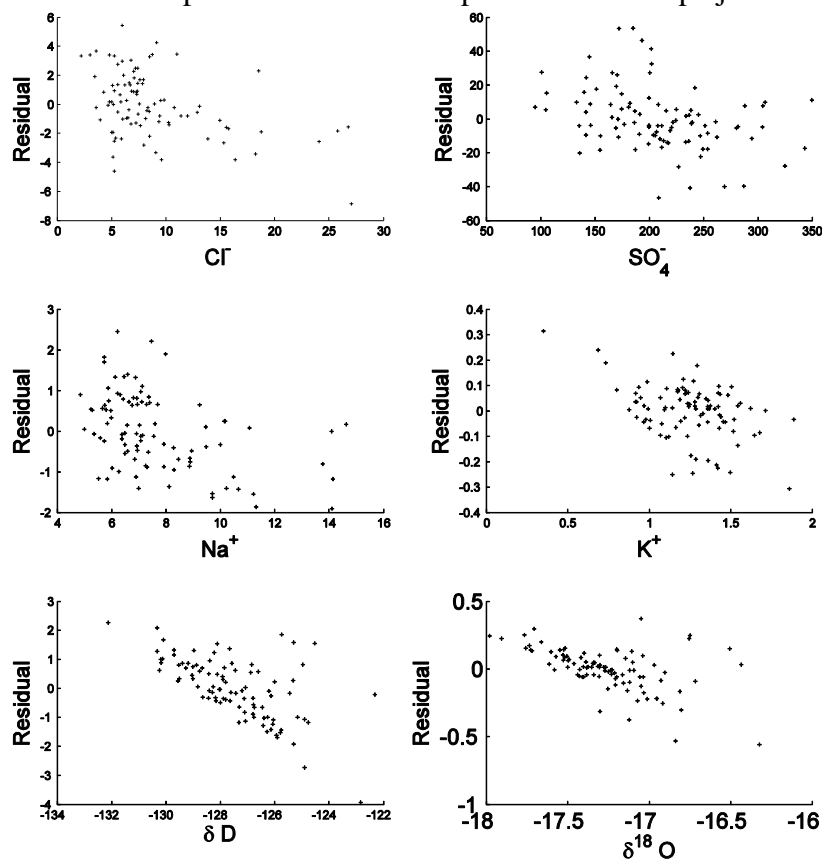
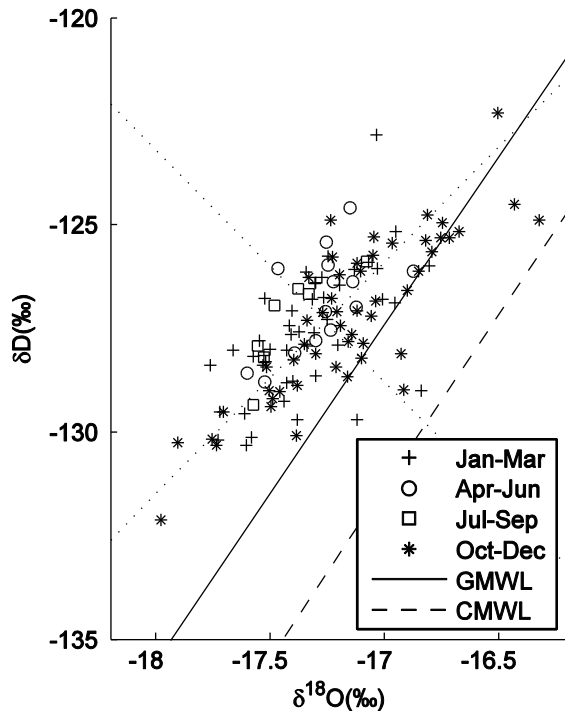


Figura 4-2: Residuales en 2D. Los datos registrados por el Departamento de Ingeniería Civil se proyectan sobre el espacio U. Este resultado sugiere 3 fuentes para explicar la química del río Juncal.

4.3 Identificación de fuentes y comportamientos de los datos

Los datos isotópicos muestran un comportamiento variable a lo largo del año. En la Figura 4-3 se muestran la separación por temporada⁴ según el comportamiento de la cuenca. En particular se quiere mostrar aquellos valores en los que tenemos: i) máximo de caudal en el río, ii) etapa de disminución de caudal en otoño, iii) invierno con cobertura nival sobre cuenca y iv) crecimiento de la curva de deshielo, dado respectivamente por los periodos entre los meses de Enero-Marzo, Abril-Junio, Julio-Agosto y Octubre-Diciembre según lo observado en el hidrograma del río para el año hidrológico 2011-2012.



Cabe mencionar que en los meses de invierno la cuenca se cubre de nieve y las temperaturas descienden de manera importante. A pesar de ello, la composición isotópica del agua en estos meses se mantiene similar a la presente en otoño, donde no existe cobertura nival. Este comportamiento puede ser explicado por las bajas temperaturas presentes en invierno, por lo que, a pesar de existir un manto nival importante, este no se hace presente aún en el río, influyendo solo hacia la primavera en la composición isotópica. La similitud en el valor isotópico que presentan las muestras en invierno y otoño da señales de que el flujo subterráneo es el más importante en ambas estaciones. El comportamiento de las muestras de Juncal en Juncal es la base del modelo isotópico.

Figura 4-3: Datos isotópicos sobre el río Juncal. La curva meteórica global (GMWL) y la chilena (CMWL) fueron obtenida de Spangenberg et al. (2007). Las líneas punteadas muestran los vectores propios obtenidos del análisis de componentes principales.

Cuando la temporada de deshielo ha avanzado y las temperaturas comienzan a aumentar la composición isotópica sufre cambios importantes acercándose a la línea meteórica global (GMWL). Es en este periodo donde se comienza a hacer patente la influencia de la nieve que ha

⁴ Arbitrariamente se consideraron los periodos de: Enero-Marzo, Abril-Junio, Julio-Septiembre y Octubre-Diciembre, puestos que los datos isotópicos muestran un comportamiento característico.

sido almacenada en la cuenca. Existe un enriquecimiento isotópico y los datos se establecen incluso más abajo de la línea meteórica global.

Hacia los meses donde se tienen los mayores caudales, esto es finales de Diciembre, Enero y Febrero, los datos isotópicos muestran un empobrecimiento en cuanto al $\delta^{18}\text{O}$ alejándose de la línea meteórica global. En este periodo la cobertura nival sobre la cuenca es prácticamente nula. Otro fenómeno interesante es el que se produce debido a las precipitaciones líquidas en verano, donde en general el comportamiento de los datos es a desplazarse sobre los vectores propios.

A partir de las observaciones anteriores, proponemos un modelo conceptual que describe la evolución de la composición isotópica de un río como el Juncal, en una zona de alta montaña dominada por glaciares, de acuerdo a sus vectores propios. En la Figura 4-4 se individualiza el comportamiento isotópico de Juncal en Juncal relacionado con la activación de distintas fuentes como lo son: el aporte de glaciares, las lluvias de verano, caudal debido a nieve depositada en el valle de la cuenca, y cuando aumenta el aporte de agua que ha interactuado con el suelo por periodos prolongados de tiempo. Este esquema tiene directa relación con la separación del hidrograma, ya que cuando los datos de Juncal en Juncal muestran un desplazamiento hacia algunas de las fuentes (nieve, lluvia, glaciares o suelo) se presenta un aumento en el caudal obtenido de la separación del hidrograma de aquella fuente en particular.

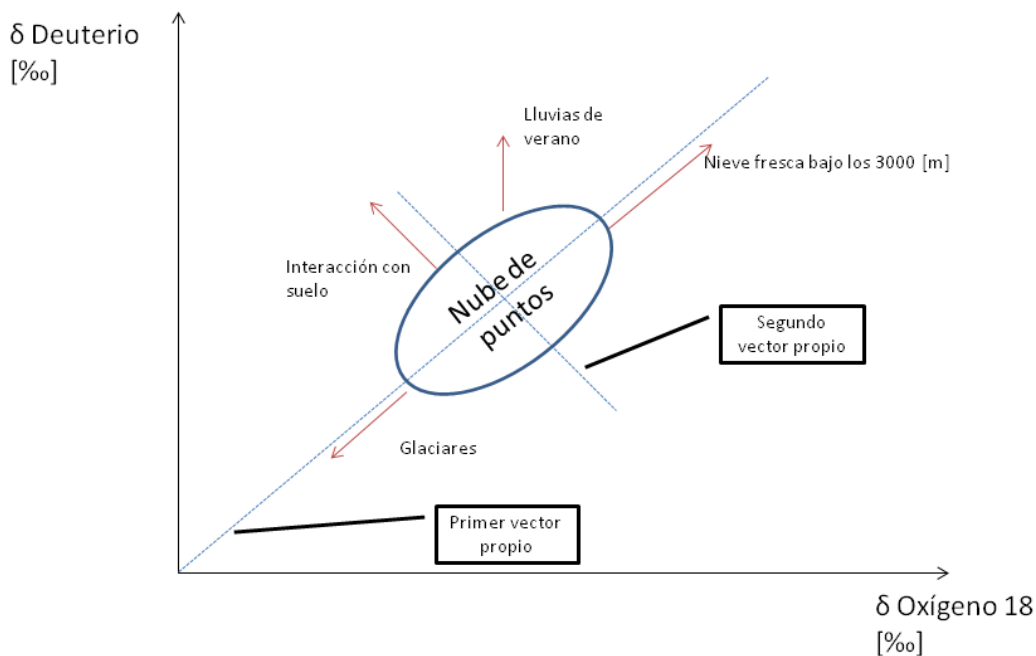


Figura 4-4: Movimiento de los puntos de acuerdo a la influencia de distintos factores en función de los vectores propios que explican los datos. Las flechas indican la tendencia que siguen los puntos de Juncal en Juncal dentro de la nube cuando se produce el fenómeno indicado.

4.4 Modelos de Separación

Varios modelos son propuestos en el presente estudio, de los cuales se muestra a continuación el modelo EMMA realizado con todos los datos disponibles. La Figura 4-5 muestra los datos proyectados sobre el espacio U creado con los vectores propios de los datos de Juncal en Juncal (Junc-R1). En él es posible identificar tres fuentes, por un lado las muestras provenientes del glaciar Juncal Norte (EM-Glacier), por otro las que nacen desde la nieve (EM-Snow) y por último aquellas aguas afectadas fuertemente por el suelo como lo es aquella que proviene de la subcuenca de Navarro (EM-Soil). El resto de la nomenclatura corresponde a otros afluentes al río Juncal (West-R1 y R2, Mono-R1) y a muestras de lluvia (Rain-2).

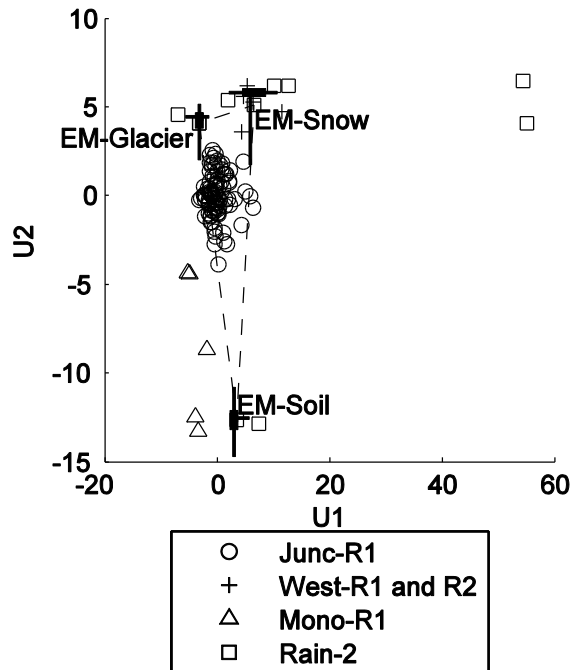


Figura 4-5: Espacio U construido con toda la información disponible a la fecha. La línea punteada representa el área cubierta por las medias de las fuentes.

La separación del hidrograma se muestra en la Figura 4-7 junto con los datos meteorológicos registrados en la estación meteorológica de la Universidad de Chile ubicada en el Embalse Hornitos.

Por otra parte, el modelo bayesiano es capaz de mostrar la probabilidad de obtener cierta fracción de caudal de las fuentes para una determinada fecha. Esto es lo que se muestra en la Figura 4-6 para el día 30 de Enero del 2011. La primera columna muestra el conocimiento a priori que se tiene del estado de la cuenca según estudios previos, mientras que la segunda el estado a posteriori una vez realizado los análisis incorporando los nuevos datos. Puede apreciarse como la distribución disminuye su varianza en vías de definir el porcentaje de caudal que cada fuente contribuye al río.

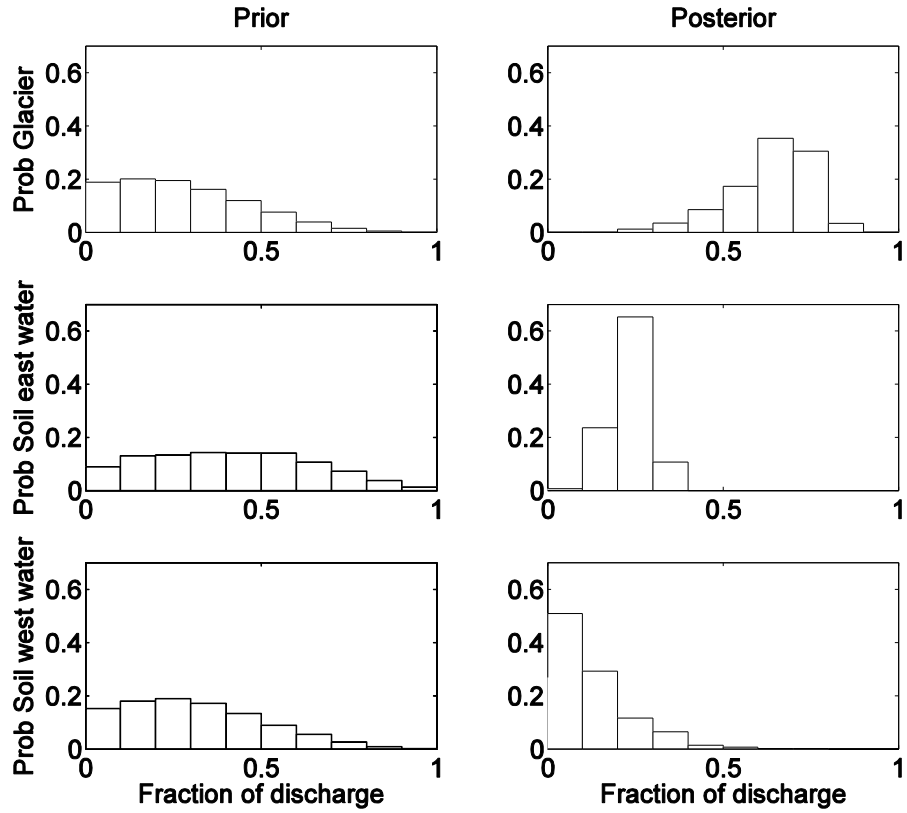


Figura 4-6: Distribuciones de probabilidad de las fuentes. El eje de las abscisas representa la fracción (porcentaje) de aporte de la fuente al río Juncal, mientras que el eje de las ordenadas muestra la probabilidad de tener cierta fracción.

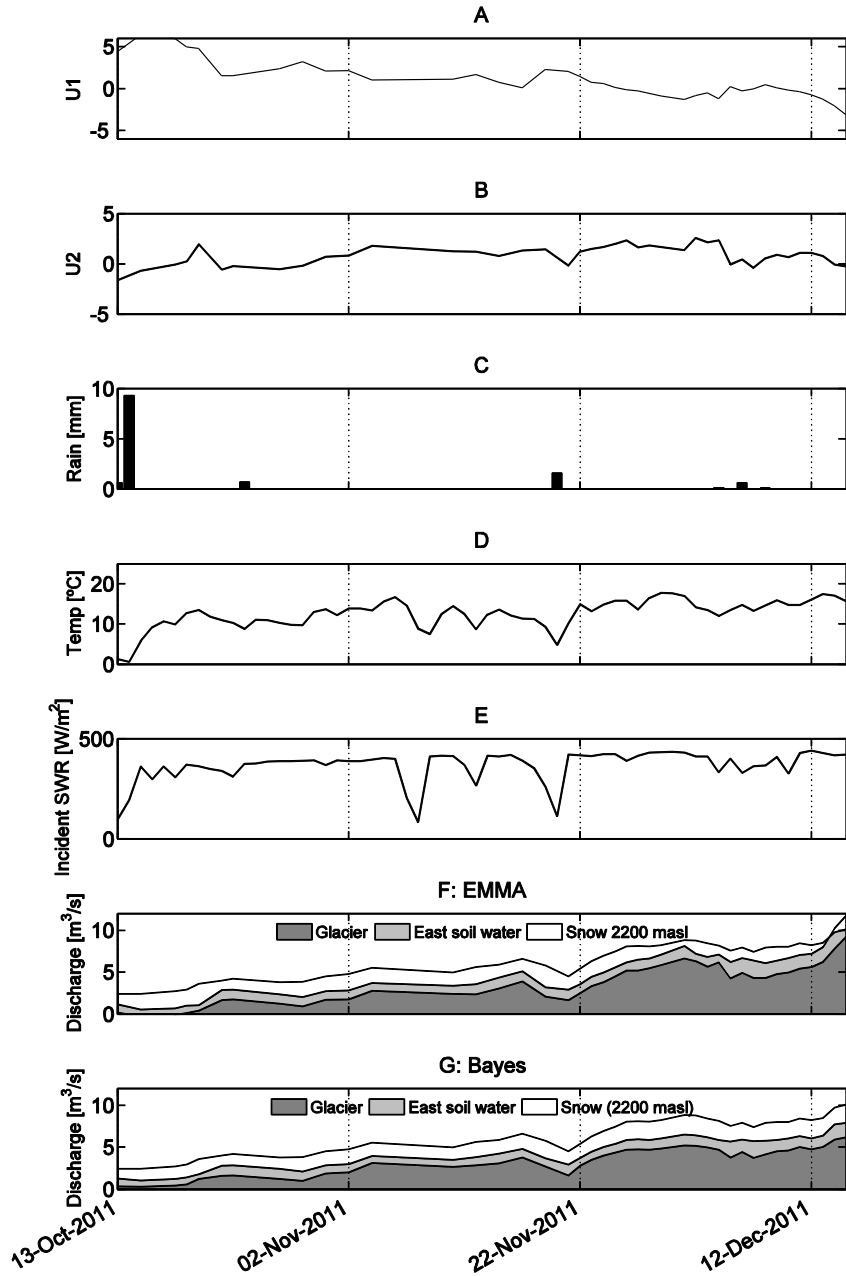


Figura 4-7: Separación del hidrograma para Juncal con todos los datos disponibles en el periodo de crecimiento de la curva de descarga, más información meteorológica de la Estación de Hornitos ubicada en recinto de Colbún. Se muestran los resultados del modelo bayesiano simple y del modelo de mezcla utilizando EMMA.

5. CONCLUSIONES

El resumen de resultados de las separaciones del hidrograma se muestra en la Tabla 5-1 y Tabla 5-2 para la cuenca de Juncal.

Tabla 5-1: Porcentaje de influencia de fuentes sobre el río Juncal en el periodo de crecimiento de la curva de descarga (Octubre-Diciembre).

Fuente	Glaciar directo	Nieve directa	Suelo
Modelo EMMA-PCA	55	25	20
Modelo Bayesiano simple	51	19	30

Tabla 5-2: Porcentaje de influencia de fuentes sobre el río Juncal en el periodo de máximo caudal y decrecimiento de la curva de descarga (Diciembre-Marzo).

Fuente	Glaciar directo	Aguas superficiales de alta concentración	Aguas superficiales de baja concentración
Modelo EMMA-PCA	66	9	25
Modelo Bayesiano simple	58	16	26

En primavera el derretimiento de glaciar es la fuente más importante con una contribución cercana al 50% del total de caudal de Juncal. El derretimiento rápido contribuye solo con un 20% y el resto es agua que ha tenido una alta interacción con el suelo. Esta última fuente es una mezcla de aguas provenientes desde el glaciar o la nieve, sin embargo, con la información disponible hasta ahora no puede ser separada.

En verano la contribución de glaciar se incrementa llegando a ser cercana al 60%. El agua proveniente del derretimiento de nieve no es muy importante y el agua que aflora del suelo permanece relativamente constante.

La separación del hidrograma muestra la importancia de los glaciares en un año hidrológico seco, siendo los esteros nacientes de los cuerpos de hielo uno de los principales afluentes en un río de los Andes de Chile Central. Cabe destacar que cuando se habla de agua de glaciar en este estudio, se está considerando precisamente al estero naciente de éste, por lo tanto, la señal que identifica a esta fuente está determinada por el hielo e inclusive por la nieve que se deposita sobre él y que perdura un tiempo mayor a la que se deposita en otras partes de la cuenca.

El modelo isotópico indica que el agua nueva de glaciar (de la temporada probablemente) equivale a una importante fracción del caudal del río Juncal, expresado esto en la cercanía de estas muestras a las capturadas en la salida de la cuenca, mientras que la nieve con baja interacción representa un porcentaje bastante menor.

El modelo de mezcla basado en EMMA es una herramienta matemática potente, con la capacidad de describir los datos y aportar nueva información. Al ser un enfoque determinístico su solución es única y depende de la posición relativa de las fuentes con respecto a las muestras del río. Es un análisis de menor complejidad que el de los otros modelos de mezcla y permite una vía sencilla para realizar la separación del hidrograma. Al entender la posición relativa de las fuentes respecto a las muestras del río es posible mejorar los modelos hidrológicos y determinar que fuentes influyen de manera más importante sobre el río. Por su parte, el modelo bayesiano es capaz de determinar también la fracción aportante de cada fuente al río, pero como una distribución de probabilidad. Así, la información entregada por este análisis es capaz de cuantificar la incertidumbre del modelo. Una de las mayores ventajas de utilizar este enfoque por sobre el resto, es la posibilidad de poder incorporar información precedente en el análisis. Esto significa que los nuevos resultados ayudan a mejorar el conocimiento previo. La información precedente queda incorporada en la distribución a priori que en ese caso se denominará informativa. Además el modelo bayesiano es capaz de encontrar solución para múltiples fuentes en un espacio reducido, puesto que se busca una solución probabilística. No obstante, su aplicación es bastante más compleja puesto que la resolución del problema matemático puede ser no trivial, en especial cuando el problema es multivariable y las distribuciones que se multiplican dentro del Teorema de Bayes son complejas. En estos casos los modelos para encontrar una solución no son analíticos y se emplean modelos MCMC (Cadenas de Markov y Monte Carlo) que permiten encontrar una solución numérica.

Los resultados de este estudio dan importante información del funcionamiento del ciclo hidrológico. No obstante, mayores mediciones deben ser realizadas en busca de reducir la varianza en los datos e identificar las fuentes de mejor manera, para así conseguir una mayor precisión en los resultados de los modelos. La mejora en la información puede llevarse a cabo mediante la recolección de muestras de distinta índole, como hielo de glaciares, nieve abarcando distintas altura y muestras de pozos en distintos lugares de la cuenca. Esta debiera realizarse a una escala temporal fina, en lo posible diaria. Con esto se lograría mejorar sustancialmente el entendimiento de los procesos hidrológicos de la cuenca.

La nueva información recopilada puede ser incorporada a modelos hidrológicos más avanzados que permitan predecir con mayor exactitud el caudal, de modo que la gestión de recursos hídricos se realice en base a información más precisa. Con ello es posible optimizar el recurso para el beneficio de todos los usuarios del agua.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bown, F., Rivera, A., & Acuña, C. (2008). Recent glacier variations at the Aconcagua basin, central Chilean Andes, *Ann. Glaciol.*, 48, 43-48, doi:10.3189/172756408784700572.
- Burns, D., McDonnell, J., Hooper, R., Peters, N., Freer, J., Kendall, C., y otros. (2001). *Quantifying contributions to storm runoff through end-member mixing analysis and hydrologic measurements at the Panola Mountain Research Watershed (Georgia, USA)*. *Hydrological processes* 15, 1903-1924.
- Cable, J., Ogle, K., & Williams, D. (2011). *Contribution of glacier meltwater to streamflow in the Wind River Range, Wyoming, inferred via a Bayesian mixing model applied to isotopic measurements*. *Hydrological processes*, doi: 10.1002/hyp.7982.
- Clark, I., & Fritz, P. (1997). *Environmental Isotopes in Hydrogeology*. CRC Press.
- Dirección Meteorológica de Chile, Departamento de Climatología y Meteorología. (2001). *Climatología Regional*. Recuperado el Marzo de 2013, de <http://www.meteochile.gob.cl/climatologia.php>
- Gascoin, S., Kinnard, C., Ponce, R., Macdonnell, S., Lhermitte, S., & Rabatel, A. (2011). Glacier contribution to streamflow in two headwaters of the Huasco River, Dry Andes of Chile. *The Cryosphere*, 5, 1099-1113.
- Hoeg, S., & Uhlenbrook, S. (2000). *Hydrograph separation in a mountainous catchment-combining hydrochemical and isotopic tracers*. *Hydrological Processes* 14(7):1199-1216.
- Hooper, R. (2003). Diagnostic tools for mixing models of stream water chemistry. *Water Resources Research*, Vol. 39, N° 3, 1055, doi: 10.1029/2002WR001528.
- McNamara, J., Kane, D., & Hinzman, L. (1997). *Hydrograph separations in an Arctic watershed using mixing model and graphical techniques*. *Water Resources Research*, Vol. 33, No. 7, 1707-1719.
- Ohlanders, N., Rodriguez, M., & McPhee, J. (2013). Stable water isotope variation in a Central Andean watershed dominated by glacier and snowmelt. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 17,1-16.
- Rabatel, A., Castebrunet, H., Favier, V., Nicholson, L., & Kinnard, C. (2011). Glacier changes in the Pascua Lama region, Chilean Andes (29° S): recent mass balance and 50 yr surface area variations. *The Cryosphere*, 5, 1029-1041, doi:10.5194/tc-5-1029-2011.
- Rivera, A., Acuña, C., Casassa, G., & Bown, F. (2002). Use of remotely sensed and field data to estimate the contribution of Chilean glaciers to eustatic sea-level rise. *Annals of Glaciology*. Vol. 34, N°1, pp. 367-382(6).
- Rivera, A., Casassa, G., Acuña, C., & Lange, H. (2000). Variaciones recientes de glaciares en Chile. *Santiago: Invest. geogr.* 34, 29 a 60.

- Rodhe, A. (1998). Snowmelt-dominated systems. En C. Kendall, & J. McDonnell, *Isotope tracers in catchment hydrology* (págs. 391-434). Amsterdam: Elsevier.
- SERNAGEOMIN. (Publicación Geológica Digital, No 4, 2003). *Mapa Geológico de Chile: Versión Digital*. Gobierno de Chile - Servicio Nacional de Geología y Minería.
- Spangenberg, J., Dold, B., Vogt, M.-L., & Pfeifer, H.-R. (2007). *Stable hydrogen and oxygen isotope composition of waters from mine tailings in different climatic environments*. Environmental Science & Technology/ Vol. 41, No 6.
- Sueker, J., Ryan, J., Kendall, C., & Jarrett, R. (2000). *Determination of hydrologic pathways during snowmelt for alpine/subalpine basins, Rocky Mountain National Park, Colorado*. Water Resources Research Vol. 36 No. 1, 63-75.