



FCA
FACULTAD DE
CIENCIAS AGRARIAS

IBAM
CONICET
UNCUYO

CONTENIDO DE ELEMENTOS TRAZA EN LOS RÍOS BLANCO, LA PALCA Y JÁCHAL, SAN JUAN

Tesis presentada para optar al título de Ingeniería en Recursos
Naturales Renovables- UNCuyo



Autor: Abraham Acosta, Said Nahir

**Facultad de Ciencias Agrarias – Universidad Nacional de Cuyo
Laboratorio de Bioquímica Vegetal - Instituto de Biología Agrícola de
Mendoza – CONICET**

Mendoza, 5 de marzo de 2018

CONTENIDO DE ELEMENTOS TRAZA EN LOS RÍOS BLANCO, LA PALCA Y JÁCHAL, SAN JUAN

Autor

ABRAHAM ACOSTA, Said Nahir
saidabraham5@gmail.com

Directora

PICCOLI, Patricia

Codirector

FUNES PINTER, Iván

Miembros del Comité Evaluador

LAURO, Carolina

MASTRANTONIO, Leandro

REARTE, Emilio

RESUMEN

Los ríos Blanco y La Palca junto a su efluente, el río Jáchal, se ubican en la localidad de Jáchal provincia de San Juan. Diversos estudios han determinado la presencia de elementos traza dentro de estos sistemas fluviales, superando valores límites establecidos por normativas legales para distintos usos por parte de las poblaciones.

En la presente investigación se realizaron estudios en la zona, tanto en el recurso suelo como en el agua, con el fin de conocer el estado actual de los cauces respecto al contenido de cobre, zinc, hierro, bario, mercurio, plomo, cromo, plata, arsénico, manganeso, talio y boro. Además se analizó su comportamiento dentro del complejo sistema natural determinando las diferencias existentes entre los tres ríos respecto a los elementos traza mencionados. Para ello se realizaron análisis físico químicos, análisis discriminantes lineales, análisis de la varianza, análisis de correlaciones y cálculo de aportes porcentuales desde los ríos afluentes al efluente. A su vez se tuvo en cuenta el marco legal argentino (Código Alimentario Argentino y Ley 24.051), procurando estudiar si existían especies químicas que excedieran los valores umbrales para su consumo en distintas actividades.

Los resultados obtenidos mostraron claras diferencias entre los tres ríos a lo largo de los diversos análisis, dejando en evidencia distintas concentraciones entre los cauces, diferencias en los aportes entre los ríos Blanco y La Palca al Jáchal según el elemento traza, y comportamientos propios de cada especie química, influenciados por factores ambientales, dentro del sistema en su totalidad. Por otro lado se encontró que en muchos casos los valores de concentraciones medidos excedían los valores establecidos legalmente, dando indicios de posibles problemas que el consumo del agua de estos ríos, podría ocasionar sobre poblaciones aledañas.

Los resultados mostraron que el consumo del recurso hídrico proveniente de la zona en estudio, requiere de una especial atención por parte de las personas que hacen uso del mismo, ya que el agua podría causar daños sobre la salud de los habitantes y posiblemente el medio ambiente si no se realiza un consumo consciente del recurso. Es necesario realizar futuros estudios que amplíen esta investigación y que determinen el comportamiento temporal del sistema con el objetivo de elaborar estrategias que eliminen o disminuyan los riesgos en las poblaciones.

PALABRAS CLAVE

Ríos, Elementos traza, Sistema fluvial, Jáchal.

AGRADECIMIENTOS

A mi familia, por el apoyo incondicional que me dieron a lo largo de este camino alentándome a jamás bajar los brazos y a levantarme después de cada caída. Sin ellos hoy no estaría abriendo nuevas puertas.

A mis amigos de la vida cuyas palabras fueron el aliento que siempre me mantuvieron firme en mis decisiones.

A mis compañeros de facultad, amigos y hermanos de vocación, quienes fueron mi sostén en todo este trayecto y junto a los cuales compartí y seguiré compartiendo momentos únicos de mi vida.

A personas que hoy ya no están físicamente pero que con sus palabras que hoy siguen resonando, alguna vez me empujaron a volar alto y a lograr esta meta que alguna vez me propuse.

A mis profesores y a muchas personas pertenecientes a la Facultad de Ciencias Agrarias que formaron parte de mi aprendizaje, lo que les agradezco enormemente.

A mis evaluadores, directora y codirector de esta tesis por el tiempo y esfuerzo dedicado para poder lograr un buen trabajo.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. OBJETIVOS	5
2.1. Objetivo general	5
2.2. Objetivos específicos.....	5
3. HIPÓTESIS	5
3.1. Hipótesis general.....	5
3.2. Hipótesis específicas.....	5
4. MATERIALES Y MÉTODOS.....	6
4.1. Área de estudio	6
4.1.1. Ubicación, superficie y población.....	6
4.1.2. Producción y superficie irrigada.....	6
4.1.3. Geología y Edafología	7
4.1.4. Características hidrológicas.....	8
4.1.5. Características fisiográficas de la subcuenca Jáchal	8
4.2. Muestreo de agua y sedimentos.....	9
4.3. Determinación de caudales	11
4.4. Análisis físico-químico	11
4.5. Digestión ácida y análisis elemental	11
4.6. Análisis estadístico	12
4.6.1. Análisis físico-químico	12
4.6.2. Análisis discriminante lineal.....	12
4.6.3. Concentración de ET mediante ADEVA.....	12
4.6.4. Análisis de correlación.....	13
4.6.5. Aporte porcentual de ET desde ríos Blanco y La Palca al río Jáchal	13
5. RESULTADOS	14
5.1. Análisis físico-químico	14
5.2. Análisis discriminante lineal.....	14
5.3. Concentración de ET mediante ADEVA.....	17
5.4. Correlaciones	23
5.4.1. Río Blanco.....	23
5.4.2. Río La Palca.....	23
5.4.3. Río Jáchal	24

5.5. Aporte porcentual de ET desde ríos Blanco y La Palca al río Jáchal	25
6. DISCUSIÓN.....	28
7. CONCLUSIONES	31
8. BIBLIOGRAFÍA.....	32

ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS

ADEVA	Análisis de la varianza
Ag	Plata
As	Arsénico
B	Boro
Bi	Bismuto
Cd	Cadmio
CE	Conductividad eléctrica
CEes	Conductividad eléctrica en extracto de saturación
Co	Cobalto
Cr	Cromo
Cu	Cobre
ET	Elemento/s traza
Fe	Hierro
Hg	Mercurio
Mn	Manganeso
Mb	Molibdeno
Nd	No detectado
Ni	Níquel
Pb	Plomo
ppb	Partes por billón
ppm	Partes por millón
Sb	Antimonio
Se	Selenio
Sn	Estaño
Tl	Talio
Zn	Zinc

1. INTRODUCCIÓN

A lo largo del tiempo los elementos traza (ET), formados por metales pesados y metaloides, se definieron siguiendo varios criterios tales como densidad (mayor a 4 g cm^{-3} , mientras otros mayor o igual a 5 g cm^{-3}), número atómico (mayor a 20), peso atómico alto, ó alta masa atómica (que incluye a los metales de transición) y otras propiedades químicas (Botté et al., 2013). En la actualidad se tiende a asumir que los ET están asociados a la contaminación y que poseen propiedades potencialmente tóxicas o ecotóxicas (Duffus, 2009), aunque esta aseveración en muchos casos no sea correcta y más aun teniendo en cuenta la diversidad en el concepto.

En este trabajo el término a adoptar se relaciona con el dispuesto por la Oceanografía Química. Esta rama de la ciencia considera que los metales pesados quedan incluidos en los “elementos trazas” debido a sus muy bajas concentraciones en el agua natural. Asimismo, desde el punto de vista biológico algunos son conocidos como oligoelementos (Botté et al., 2013).

Los ET, componentes naturales de los ambientes (Prego y Cobelo-García, 2003), se hallan generalmente a bajas concentraciones por lo que no causan efectos deletéreos sobre la salud humana (Zhou et al., 2008) ni sobre la biota en general; aunque a veces a muy bajas concentraciones pueden provocar alteraciones o deficiencias en los seres vivos trayendo consigo efectos negativos. Evidencias experimentales han demostrado que el grado de importancia biológica de estos elementos con respecto a los sistemas vivos, se relaciona con la disponibilidad de los mismos en la naturaleza (Wood, 1974; Rovira, 1993).

Los ET forman parte de los ciclos biogeoquímicos naturales y se mueven en la tierra a través del ciclo hidrológico (Salomons y Förstner, 1984). Circulan a través de todos los compartimientos con distintos tiempos de residencia, pero los que corresponden a los suelos y sedimentos están en grandes escalas de tiempo, lo que permite considerarlos como reservorios temporales o semi-permanentes, donde quedan retenidos hasta que nuevamente son movilizados (Ip et al., 2007). Esta liberación puede darse por disturbios o cambios en las condiciones ambientales tales como pH, potencial redox, oxígeno disuelto o la presencia de quelantes orgánicos (Macklin, 1992). Según su forma de asociación, pueden ser susceptibles de solubilizarse durante las modificaciones físico-químicas estacionales (estiaje, crecida, etc.). La desoxigenación o disminución de oxígeno de las capas profundas de los cauces durante el verano, ocasiona la reducción química de los óxidos asociados a la fase sólida, produciendo así, la disminución de la concentración de Fe y Mn en el sedimento. La reducción de estos dos elementos puede ocasionar la solubilización de ciertos ET adsorbidos en el sedimento como el Zn, Cr y el Ni; (El Falaki et al., 1994; Baruah et al., 1996).

Dentro de los ciclos anteriormente mencionados, las rocas y los suelos se consideran la principal fuente natural de ET en el ambiente. Estos se hallan contenidos en la red litogénica y pueden quedar libres por efecto de la meteorización. Cuanto menores sean los fragmentos, mayor es la superficie disponible para el ataque químico y, cuanto más débiles sean las uniones de estos elementos en las rocas más fácil la formación de minerales (Salomons y Förstner, 1984).

Otra fuente que debe considerarse es el aporte de origen antrópico o natural que llegan a un sistema por transporte atmosférico. Estudios lograron demostrar que las concentraciones de Hg, cuyos valores en sitios no disturbados (por incendios, remoción del terreno, etc.) con líquenes trasplantados, considerados valores de línea base, son claramente mayores que los contenidos de otras regiones no disturbadas o que valores de referencia en otros estudios de

contaminación. La diferencia es consecuencia del Hg captado por los líquenes. Esto se puede atribuir a aportes desde fuentes naturales locales o alejadas que movilizan sus ET a través del aire (Ribeiro Guevara et al., 2004).

Otro ejemplo de lo mencionado anteriormente son los estudios realizados en diferentes gradientes altitudinales en la cordillera de los Alpes con musgos como indicadores de contaminación por ET. En este trabajo se correlacionó positivamente el aumento de la concentración de estas especies químicas con la altitud creciente, atribuyéndose este hecho a una mayor cantidad de precipitaciones que se dan en los picos de la cordillera (Zechmeister, 1995). Esta investigación afirma que el transporte atmosférico es uno de los mayores responsables de su aumento en zonas montañosas. Esto puede deberse a la elevada volatilidad de algunos, como es el caso del Hg y del Pb, lo que permite su transporte aéreo y deposición en zonas de baja temperatura (Ford et al., 1995).

Las actividades humanas son mayores en zonas aledañas a los cuerpos de agua, entre ellos, las cuencas fluviales, que favorecen los asentamientos urbanos y permiten distintas actividades industriales (Kennish, 1998). Este es el caso de las ciudades capitales de la zona andina de Argentina, las cuales se ubican cerca de los cauces para su aprovechamiento. Los ríos son considerados como los principales transportadores de ET en forma disuelta, como sólidos suspendidos y como carga del sedimento del lecho (Ip et al., 2007).

Las altas concentraciones de estos elementos en las aguas de corrientes fluviales asociados a sulfuros tales como el As, Cd, Cu, Pb y Zn pueden atribuirse a la minería y son causa del fuerte impacto en el medio ambiente (Salomons, 1995). En cambio, otros elementos no sulfurosos como el Cr, Ni y Hg posiblemente indican otro tipo de contaminación antropogénica que está estrechamente asociada con las descargas industriales (Nelson y Lamothe, 1993; Fernández et al., 1997). El problema principal en los ecosistemas acuáticos es que los ET no se eliminan de estos sistemas por procesos naturales debido a que no son biodegradables en estos ambientes (Förstner y Prosi, 1979; Förstner y Wittmann, 1981; Murray, 1996).

Entre los ET, los llamados oligoelementos son los requeridos por los seres vivos en bajas cantidades para sus ciclos vitales. Al pasar cierto umbral se vuelven tóxicos. Dentro de este grupo se encuentran el B, el Cr, el Cu, el Mb, el Co, el Mn, el Ni, el Fe, el Se, el Zn y el metaloide As. Por otra parte existen algunos sin función biológica específica, y que su presencia en determinadas cantidades en los seres vivos podría ocasionar problemas en su funcionamiento al acumularse y ser tóxicos. Dentro de este grupo se encuentran: el Bi, Cd, Hg, Sb, Pb, Sn y Tl; (García y Dorronsoro, 2005). En la actualidad los ET son utilizados como indicadores de la calidad ambiental de los cuerpos de agua debido a su toxicidad y especialmente a su comportamiento bioacumulativo (Purves, 1985; Moalla et al., 1998). En este sentido, se habla de bioacumulación cuando se produce una elevada concentración de un compuesto químico en un organismo vivo en un cierto tiempo, comparada con la concentración de dicho producto químico en el medio ambiente (Angelova et al., 2004). Esto último hace que muchas especies de invertebrados puedan ser usados como bioindicadores de la calidad ambiental (Rainbow y Phillips, 1993).

Actualmente a nivel mundial existen legislaciones y códigos que establecen valores límites de contenido en agua y suelo dependiendo el uso que se vaya a hacer de estos recursos. En Argentina existen al menos 2 referencias importantes: la Ley 24.051 de Residuos Peligrosos y el Código Alimentario Argentino. A continuación se muestran los valores máximos permitidos de los ET más relevantes para el presente trabajo, según algunos de los usos de los recursos en cuestión.

Tabla 1. Valores límites de elementos traza para la calidad del agua (ppb) y del suelo (ppm) según sus usos.
Fuente: Ley 24.051 y Código Alimentario Argentino

Elemento traza	Valores límites de calidad del agua (ppb)			Valores límites de calidad del suelo para uso agrícola (ppm)
	Para protección de vida acuática en agua dulce superficial	Para suministro público y uso domiciliario	Para irrigación	
Arsénico (total)	50	10	100	20
Bario	No especificado	No especificado	No especificado	No especificado
Boro (total)	750	500	500	750
Cobre (total)	2	1000	200	150
Cromo (total)	2	50	100	750
Hierro (total)	No especificado	300	5000	No especificado
Manganeso (total)	100	100	200	No especificado
Mercurio (total)	0,1	1	No especificado	0,8
Plata (total)	0,1	50	No especificado	20
Plomo (total)	1	50	200	375
Talio (total)	0,4	No especificado	No especificado	1
Zinc (total)	30	5000	2000	600

Si bien los análisis de ET deben llevarse a cabo tanto en sedimentos como en agua para un mejor estudio del sistema natural, se debe tener en cuenta que ambos estudios son diferentes y otorgan distinta información.

El análisis en sedimentos permite detectar la contaminación que muchas veces escapa al análisis de las aguas y también proporciona información acerca de las zonas críticas del sistema acuático (Förstner y Salomons, 1980; Baudo y Muntau, 1990; Belkin y Sparck, 1993; Förstner et al., 1993; Chen et al., 1996; Moalla et al., 1998). La concentración en los sedimentos no sólo depende de fuentes antropogénicas y litogénicas, sino también de las características texturales, contenido de la materia orgánica, composición mineralógica y ambiente deposicional de los sedimentos (Rosas Rodríguez, 2001). En general, los ET están asociados con las partículas pequeñas de estos materiales (Ackermann, 1980; Presley et al., 1980; Salomons y Förstner, 1984; Martincic et al., 1990; Biksham et al., 1991; Singh et al., 1999). Esta asociación es atribuida principalmente a la adsorción, co-precipitación y complejidad de estos elementos en las capas superficiales de las partículas. Cuando las partículas son pequeñas tienen mayor área superficial con relación a su volumen que las partículas de mayor tamaño, y por consiguiente pueden retener altas concentraciones. El área superficial específica de los sedimentos es dependiente de los parámetros granulométricos y la composición mineral (Juracic et al., 1982; Singh et al., 1999). Por lo mencionado anteriormente, muestras de sedimentos tomadas en puntos muy próximos, pueden presentar contenidos de ET muy distintos, siendo la textura del sedimento la principal responsable de tales discrepancias (Zöllmer y Irion, 1993; Morillo Aguado et al., 1997). En el limo y en las fracciones finas de arenas las concentraciones generalmente disminuyen, al igual que en la fracción denominada “componentes de cuarzo” (Salomons y Förstner, 1984; Casas et al., 1990; Vaithyanathan et al., 1993).

Por otro lado, resulta sumamente importante medir los factores de transferencia de ET (concentración, acumulación y eventualmente magnificación) en los ecosistemas acuáticos ya que permite obtener información de la distribución de estas especies químicas y de las posibles alteraciones de sus ciclos naturales. Otro aspecto a considerar a la hora de evaluarlos es su especiación, ya que ésta influye sobre el transporte, la toxicidad y la biodisponibilidad en

ambientes acuáticos (Bargiela et al., 2006). Por lo tanto, para entender mejor el efecto de los ET sobre los ecosistemas, es necesario determinar las formas químicas de los elementos en la fase solución de los sistemas sedimentos-agua (Patrick y Verloo, 1998). Un aspecto importante que debe tenerse en cuenta, es la concentración total, ya que sólo ciertas formas químicas son tóxicas para los organismos, estas incluyen iones libres y metales liposolubles (Chen et al., 1996).

El departamento Jáchal, San Juan, se caracteriza por presentar sitios con elevados contenidos de ET en el suelo y agua (Funes Pinter et al., 2017). Aunque actualmente existen muy pocos estudios acerca del tema en el área mencionada, algunos han determinado valores de concentraciones presentes en el agua. Los más elevados corresponden al As y el B, con concentraciones de $357 \mu\text{g L}^{-1}$ y $3,92 \text{ mg L}^{-1}$ respectivamente (O'Reilly et al., 2010), resultando ser altas concentraciones respecto a los parámetros admisibles y pudiendo ocasionar problemas de salud en las personas.

El presente trabajo se enfocará en el estudio de ET en 3 ríos ubicados en los departamentos Iglesia y Jáchal: el río Blanco, el río La Palca y el río Jáchal que surge de la confluencia de los dos primeros (Bereciartua, 2009). Este último resulta ser uno de los ríos más importantes de la provincia de San Juan tanto por su caudal como por sus diversos usos, motivo por el cual su estudio es de gran importancia. Por otro lado, la caracterización de sus afluentes permite conocer el aporte de ET en agua de cada uno al cauce principal como así también determinar las diferencias de concentraciones y especies químicas que se hallan en ambos ríos. El análisis de sedimentos resulta relevante ya que como se mencionó anteriormente, el suelo es una de las principales fuentes en los sistemas fluviales y su estudio permite conocer la magnitud del aporte.

Cabe destacar que los departamentos en cuestión cuentan con una elevada actividad agrícola, siendo el cultivo de hortalizas una de las más importantes en Jáchal. Este aspecto se debe tener muy en cuenta, ya que estos sitios son regados con aguas que contienen una elevada concentración de ET, pudiendo bioacumularse en los distintos cultivos agrícolas, poniendo en riesgo la salud de humanos y animales (Prieto Méndez et al., 2009). Por otro lado una fuerte actividad desarrollada en la zona es la minería, la cual produce grandes impactos ambientales tales como, alteración de paisaje, remoción de suelo, contaminación atmosférica y de cauces de agua, etc. (Balderiote et al., 1982). Las minas Veladero y Pascua-Lama son consideradas unas de las más importantes en esas zonas cordilleranas. De lo anterior surge la necesidad de realizar nuevos estudios en la zona de Jáchal con la finalidad de determinar las concentraciones actuales y las especies químicas de los recursos hídricos y edafológicos presentes, para disponer de información útil y certera al momento de evaluar la calidad ambiental y anticipar los posibles problemas que puedan ocasionarse a futuro.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo general

Analizar las concentraciones de ET en los ríos La Palca y Blanco, para determinar el aporte al río Jáchal.

2.2. Objetivos específicos

- ✓ Determinar el contenido de ET en aguas y sedimentos de los ríos La Palca, Blanco y Jáchal.
- ✓ Identificar si existen ET que superen los límites establecidos para riego de cultivos y para consumo humano.
- ✓ Evaluar la relación entre las características físico-químicas del suelo y el agua, y el contenido de ET.
- ✓ Determinar la relación entre el contenido de ET del río Jáchal en base al contenido en los ríos La Palca y Blanco.

3. HIPÓTESIS

3.1. Hipótesis general

Existen diferencias entre los aportes realizados por los ríos Blanco y La Palca de elementos traza al río Jáchal, superando los límites establecidos por los marcos legales vigentes en Argentina.

3.2. Hipótesis específicas

Hipótesis 1: Existen ET presentes en los ríos Blanco, La Palca y Jáchal que superan los límites máximos admisibles establecidos por marcos legales vigentes en Argentina.

Hipótesis 2: El aporte de elementos ET desde los ríos Blanco y La Palca provocan un incremento de la concentración de los mismos en el río Jáchal.

Hipótesis 3: El río la Palca presenta mayores concentraciones de elementos traza como consecuencia de la presencia de actividad mineras en zonas cercanas a su origen.

4. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1. Área de estudio

4.1.1. Ubicación, superficie y población

Los departamentos Iglesia y Jáchal se ubican adyacentes entre sí, dentro de la provincia de San Juan, Argentina (figura 1). Iglesia se halla al Noroeste de la provincia, con una superficie total de 19.801 km². Por su parte Jáchal se encuentra al Norte de la provincia con una extensión de 14.749 km². Su capital es San José de Jáchal donde la población se concentra en el Valle de Jáchal, el segundo oasis agrícola de riego en importancia económica y poblacional de la provincia. (Posleman y Krause Yornet, 2006; Universidad Nacional de San Juan, 2006).

Según el Censo Nacional del 2010, el departamento de Iglesia cuenta con una población de 9.099 habitantes, mientras que Jáchal posee 21.484 habitantes.

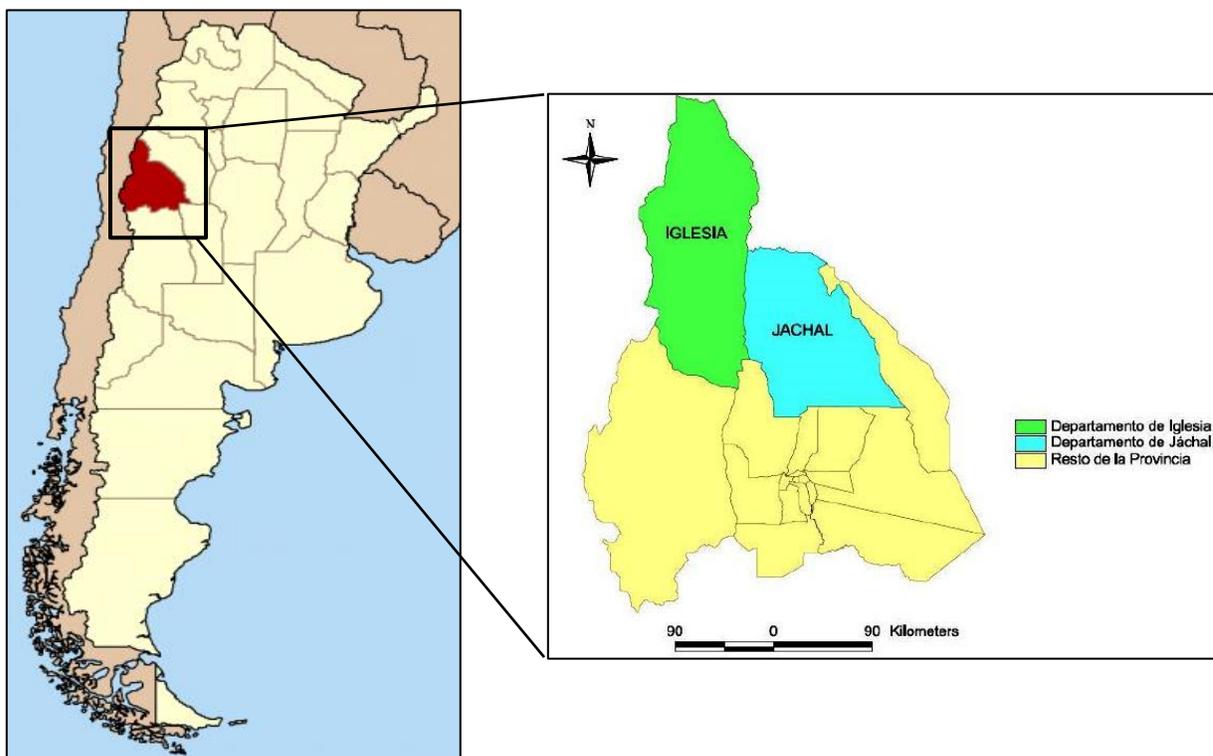


Figura 1. Ubicación de los departamentos Iglesia y Jáchal en Argentina y en San Juan. Fuente: Iezzi, 2011

4.1.2. Producción y superficie irrigada

La estructura económica de Iglesia se basa, además de la minería, en la agricultura intensiva. Casi el 70% de las explotaciones son minifundios o explotaciones menores a 10 ha que producen hortalizas, como lechuga, porotos y semillas principalmente de ajo (Iezzi, 2011). En general Jáchal posee una estructura económica similar, donde las unidades productivas rurales son explotadas por pequeños productores que históricamente cultivan cebolla (Allub y Guzmán, 2000).

Para que la agricultura pueda desarrollarse con normalidad 7.418 ha son irrigadas mediante los aportes del río Jáchal (Miranda et al., 2010), principalmente en las localidades de Malimán, La Chigua, Los Quillay, Buena Esperanza y Totoralito (Bereciartua, 2009).

Con respecto a la infraestructura de riego, la zona cuenta con 2 diques: Los Cauquenes y Pachimoco ambos en Jáchal. Además existe la represa hidroeléctrica "Cuesta del Viento" ubicada en Iglesia. Este sistema se completa con más de 300 km de canales de distribución de agua.

4.1.3. Geología y Edafología

Los departamentos en estudio se caracterizan por los contrastes altimétricos. Se distinguen la Cordillera Frontal y la Precordillera como relieves positivos, y los valles de altura como relieves negativos (figura 2) (Posleman y Krause Yornet, 2006; Universidad de San Juan, 2006).

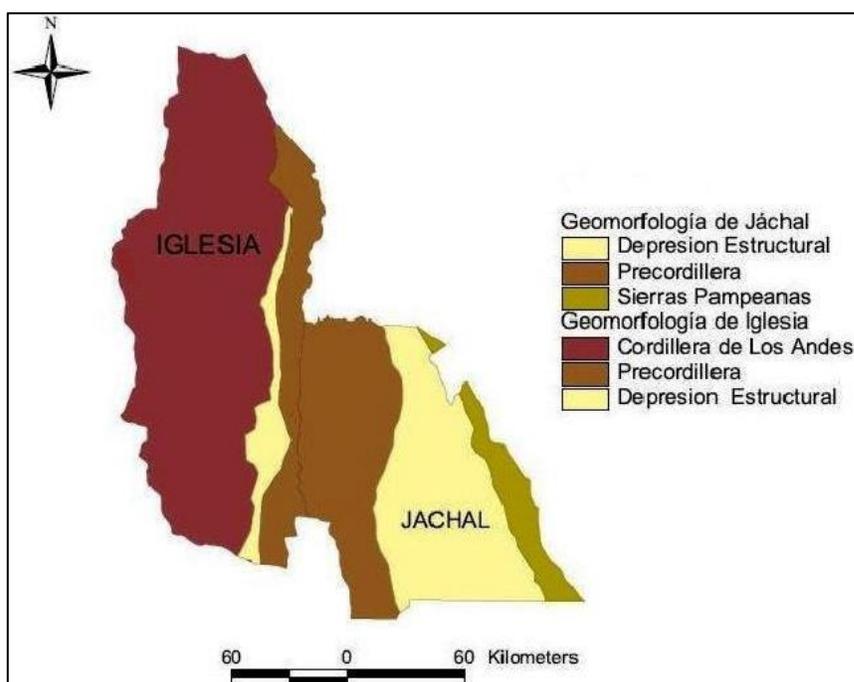


Figura 2. Mapa geológico de los departamentos Iglesia y Jáchal. Fuente: lezzi, 2011

Según la clasificación Soil Taxonomy, los suelos de ambos departamentos se consideran Entisoles. Particularmente en el área muestreada los suelos son Torrifluventes típicos lindantes a Torriortentes típicos (CONICET, 2000).

Los estudios mineralógicos de suelos sanjuaninos son escasos. Entre las principales características puede encontrarse que en cuanto a la proporción de minerales livianos y pesados en la arena muy fina (62-105 micrones), se observa que la fracción pesada es alta (21,6 %) en los sedimentos coluvio-aluviales. En otros suelos se puede encontrar menor proporción de pesados (fluctúan entre 4,2 a 13,2) debido a la mayor cantidad de minerales livianos, especialmente cuarzo y feldespato, en los materiales derivados de rocas de Precordillera y Cordillera andina. La existencia del mineral turmalina en determinadas zonas puede ser responsable de intoxicaciones de boro en determinados cultivos. Con respecto a la mineralogía de arcillas se observa que la mayor parte de los Torrifluventes son de composición mixta (CONICET, 2000).

4.1.4. Características hidrológicas

El río Las Taguas es la fuente primaria de agua y vía de drenaje de la escorrentía superficial de las minas Veladero y Pascua-Lama. Avanza con sentido norte para luego cambiar su rumbo hacia el sudeste, hasta conectarse con el río Valle del Cura para formar el río La Palca, tributario a su vez del Jáchal. El río La Palca aporta el 70% de los derrames del Jáchal y el río Blanco el 30% restante (figura 3) (Salvioli, 2007; Miranda et al., 2010).

El río Jáchal es la principal fuente de agua superficial para el abastecimiento de la población de la zona de estudio, tanto para uso domiciliario como para riego (Posleman y Krause Yornet, 2006).

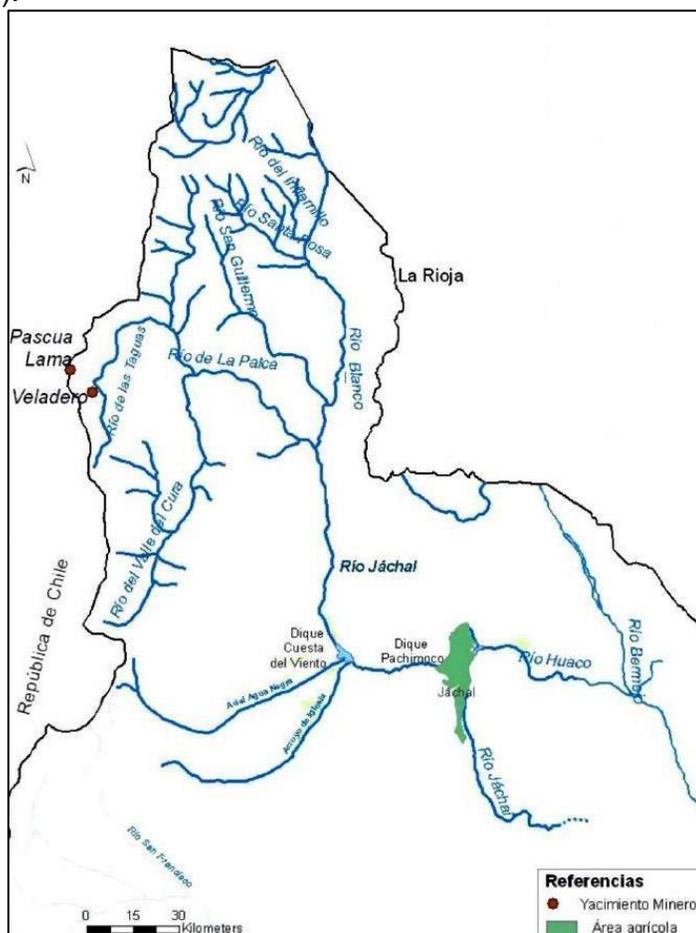


Figura 3. Mapa hidrológico de los departamentos Iglesia y Jáchal junto con ubicación del área agrícola y de las minas Veladero y Pascua-Lama. Fuente: Bereciartua, 2009

4.1.5. Características fisiográficas de la subcuenca Jáchal

La subcuenca del río Jáchal (figura 4) posee una extensión de 34.661,1 km² y pertenece a la cuenca del río Desaguadero-Salado-Chadileuvú-Curacó, la cuenca de mayor superficie (360.000 km²) desarrollada íntegramente dentro del territorio argentino.

El río Jáchal es un curso de agua permanente con un caudal medio anual de 10 m³ s⁻¹ (período 1936-1969) y su alimentación es de carácter nival.

Prácticamente no hay vegetación en toda la subcuenca, con excepción de las zonas adyacentes del fluvio.



Figura 5. Imagen satelital de la zona de estudio. Fuente: Google Earth

Para cada uno de los ríos se determinó un sitio de muestreo, con 5 puntos equidistantes entre sí (100 m aproximadamente) en cada uno (figura 6). Se tomaron muestras de sedimentos y de agua.

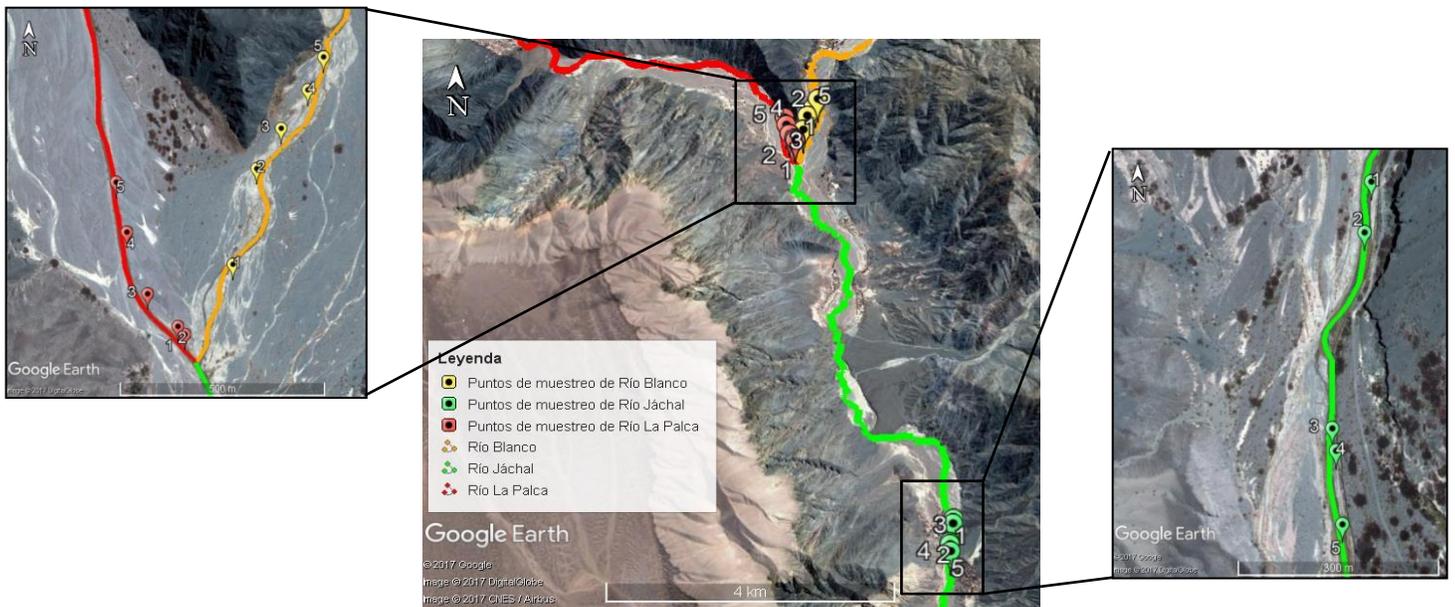


Figura 6. Imágenes satelitales general y detalladas de los puntos de muestreo en la zona de estudio. Fuente: Google Earth

En lo que respecta a las muestras de sedimentos, se extrajo una porción a cada lado del río en el punto de muestreo en cuestión, dando un total de 15 muestras con 2 repeticiones cada una, las cuales se almacenaron en bolsas de plástico a 4 ° C hasta el secado y digestión ácida. La profundidad de extracción en el suelo no fue mayor a los 30 cm debido a la composición rocosa del recurso en el lugar.

Por otro lado, en tubos de 50 mL se tomaron 3 volúmenes de agua de aproximadamente 50 cm³ cada uno, en cada punto de muestreo: 2 a las orillas y 1 al centro del cauce. Esto dio un total de 15 muestras con 3 repeticiones cada una, que fueron almacenadas a 4°C.

4.3. Determinación de caudales

Para la realización de los análisis fue necesario conocer el caudal de los tres ríos en estudio en la época de muestreo.

En el caso del río Blanco se efectuó una medición del mismo mediante el “Método del flotador” (Scott y Houston, 1977), en el que se mide el área aproximada de la sección transversal del cauce y luego se multiplica por la velocidad que presenta el agua en un intervalo de distancia previamente definido. El resultado de esta determinación arrojó un resultado de $6,76 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.

El caudal instantáneo del río Jáchal, $34 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, pudo obtenerse mediante una medición realizada en la estación de aforo Pachimoco ubicada aguas abajo del sitio de muestreo. Si bien dicha estación se halla fuera de servicio desde julio de 1997, el flujómetro en la actualidad funciona correctamente.

Finalmente para el caso del río La Palca no existen mediciones, esto se debe a la ausencia de una estación de aforo que proporcione este dato. Para solucionar el problema se estimó el dato en $27,24 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ mediante la diferencia de caudales del río efluente y el río Blanco.

4.4. Análisis físico-químico

Finalizada la toma de muestras, las mismas fueron llevadas al laboratorio de Edafología de la Facultad de Ciencias Agrarias (UNCuyo), donde se les realizaron los análisis físico-químicos, que se detallan a continuación:

En sedimentos:

- Análisis granulométrico (Boyoucus, 1962)
- pH en pasta (Richards, 1954)
- Conductividad eléctrica en extracto de saturación (CEes) (Richards, 1954)

En agua:

- pH
- Conductividad eléctrica

A partir de los resultados obtenidos y mediante el uso del Software InfoStat (Di Rienzo et al., 2011) se realizó un análisis estadístico sencillo para determinar algunos estadígrafos descriptivos de cada variable analizada: la media, su error estándar y los valores máximos y mínimos.

4.5. Digestión ácida y análisis elemental

En las muestras de agua y sedimentos se analizó la concentración de los siguientes 12 ET: Cu, Zn, Fe, Ba, Hg, Pb, Cr, Ag, As, Mn, Tl y B.

Para realizar un correcto análisis elemental, en las muestras de sedimentos se realizó previamente una digestión ácida de 100 g de sedimentos por muestra siguiendo el procedimiento indicado a continuación (Funes Pinter et al., 2017):

1. Adición de 1,5 mL HNO_3
2. Adición de 1 mL de HCl
3. Adición de 500 μL HClO_4
4. Adición de 100 μL H_2O_2

5. Agitación vigorosa de 1 min
6. Sonicado durante 15 min
7. Adición de 200 μ L H₂O₂
8. Agitación vigorosa de 1 min
9. Sonicado durante 15 min
10. Adición de 200 μ L H₂O₂
11. Agitación vigorosa de 1 min
12. Sonicado durante 15 min
13. Microondas a máxima potencia durante 30 s (600 W)

Las muestras de agua y el sobrenadante de las digestiones de sedimentos se analizaron por Espectrometría de Masas con Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-MS) en el laboratorio INQUISAL, CONICET, San Luis. Se requirió una dilución de 1:20 para analizar por ICP-MS con un equipo Perkin Elmer SCIEX, ELAN DRC-e (Thornhill, Canadá). El Argón con una pureza de 99.99% fue suministrado por Air Liquid S.A. (Córdoba, Argentina). HF resistente y modelo de nebulizador de perfluoracetato de alto rendimiento (PFA) PFA-ST, acoplado a una cámara de pulverización ciclónica de cuarzo con una cámara interna deflector y línea de drenaje, enfriados con el sistema PC3 de ESI (Omaha - NE, EE. UU.). Se utilizó tubería de bomba peristáltica negra/negra Tygon de 40 cm de longitud y 0,76 mm i.d. La calibración instrumental se llevó a cabo por niveles de doble carga (B⁺⁺/Ba⁺) e iones de óxido (CeO⁺/Ce⁺), evaluación que no debe ser mayor al 3%; sensibilidad instrumental y que se supervisó para Mg, In y U. Por otro lado, la calibración del método se llevó a cabo mediante calibración externa con ácido (1% v v-1 HNO₃) de patrones acuosos. Ambos procedimientos se realizaron con comerciales estándares adquiridos de Perkin Elmer (PerkinElmer® Pure Plus Soluciones estándar multielementos de espectroscopia atómica 1, 2, 3, 4 y 5; y Ba y Ce ELAN® 6100 DRC™ Setup / Stab / Masscal Solution. PerkinElmer, Inc., Shelton, CT EE. UU.). Límites de detección de isótopo, blanco instrumental en ppb: ¹⁰⁷Ag (0,008), ⁷⁵As (0,05), ¹¹B (0,05), ¹³⁸Ba (0,001), ⁵¹Cr (0,02), ⁶³Cu (0,01), ⁵⁷Fe (0,04), ²⁰²Hg (0,002), ⁵⁵Mn (0,002), ²⁰⁸Pb (0,001), ⁸²Se (0,02), ²⁰⁵Tl (0,001), ⁶⁶Zn (0,005).

4.6. Análisis estadístico

4.6.1. Análisis físico-químico

Se analizaron en general los datos obtenidos respecto a las variables pH y CE para muestras de agua, y pH y CEes para muestras de sedimentos. En el caso del pH se caracterizaron los recursos en cuestión de acuerdo a si el valor era menor a 7 (ácido), igual a 7 (neutro) o mayor a 7 (alcalino). En cuanto a la CEes y la CE para la caracterización se tuvo en cuenta que 4000 μ S cm⁻¹ es el valor a partir de la cual un suelo se considera salino para uso agrícola.

4.6.2. Análisis discriminante lineal

Con la finalidad de obtener una visión general de la ubicación mayoritaria de cada uno de los ET en los tres ríos estudiados, se realizaron dos Análisis discriminantes, uno para agua y otro para sedimentos, haciendo uso del Software InfoStat (Di Rienzo et al., 2011).

4.6.3. Concentración de ET mediante ADEVA

Las diferencias entre los 3 cauces en lo que respecta a los parámetros físico-químicos y la concentración de ET fueron determinados a través de un Análisis de la varianza (ADEVA) monofactorial, tomando como factor la variable río, y las diferencias entre las medias se analizaron con la prueba múltiple de Fisher y un nivel de significancia de $p \leq 0.05$; utilizando el Software InfoStat (Di Rienzo et al., 2011). Los supuestos del ADEVA (normalidad, homoscedasticidad e independencia de muestras) fueron validados previamente.

4.6.4. Análisis de correlación

Se procedió a realizar diversas correlaciones con la finalidad de encontrar relaciones entre las distintas variables en estudio, entre los sedimentos y el agua y dentro de un mismo recurso, para cada uno de los ríos; mediante el uso del Software InfoStat (Di Rienzo et al., 2011). Para ello se calculó el coeficiente de correlación de Pearson.

Una vez obtenido los resultados y teniendo en cuenta el nivel de significancia encontrado se realizó la siguiente clasificación:

- Correlación fuerte (alto nivel de significancia, $p \leq 0,01$)
- Correlación media (medio nivel de significancia, $0,05 \geq p > 0,01$)
- Correlación débil (bajo nivel de significancia, $0,1 \geq p > 0,05$)

4.6.5. Aporte porcentual de ET desde ríos Blanco y La Palca al río Jáchal

Los valores de las concentraciones medidas de los ET estudiados, se afectaron multiplicándolos por el caudal correspondiente de cada río para obtener la concentración de cada especie química transportada por cada cauce en unidad de tiempo. Las unidades obtenidas fueron $\mu\text{g s}^{-1}$ ó ng s^{-1} , dependiendo de si la concentración medida originalmente fue elevada o baja. Realizado esto, se calculó para cada uno de los elementos, el porcentaje que cada río afluente aporta al río efluente.

Se consideró como 100% al valor de concentración de la especie química dentro del río Jáchal y en base a esto se determinó el porcentaje de aporte de cada río aguas arriba, mediante una relación de proporcionalidad calculada a partir de las concentraciones que presentaba cada afluente. Se consideró que todo el ET era transportado hacia el río efluente.

5. RESULTADOS

5.1. Análisis físico-químico

La tabla 2 muestra los estadígrafos descriptivos de las variables analizadas en agua. Puede observarse que los valores de pH de cada río son similares y no presentan una gran diferencia entre ellos. El valor máximo se registra en el río Jáchal (7,76), mientras que el mínimo pertenece al río Blanco (7,19). A partir de esto puede considerarse que los tres sistemas fluviales poseen aguas con pH alcalino.

Con respecto a la conductividad en agua, el río Blanco posee una media muy elevada ($2105,33 \pm 22,46 \mu\text{S/cm}$) respecto a la de los otros dos cauces, lo que se refleja al poseer el valor más alto medido ($2310 \mu\text{S/cm}$). El valor más bajo corresponde al río La Palca ($580 \mu\text{S/cm}$), el cual posee la conductividad eléctrica media más baja ($707,33 \pm 14,29 \mu\text{S/cm}$).

Tabla 2. Estadígrafos descriptivos de las variables analizadas en agua según el sitio

Sitio	pH				Conductividad Eléctrica ($\mu\text{S/cm}$)				Coordenada media	
	Media	Error estándar	Mínimo	Máximo	Media	Error estándar	Mínimo	Máximo	Latitud	Longitud
Río Blanco	7,57	0,03	7,19	7,73	2105,33	22,46	1910	2310	-29.554980	-69.191217
Río la Palca	7,52	0,01	7,43	7,64	707,33	14,29	580	750	-29.557715	-69.194616
Río Jáchal	7,61	0,02	7,49	7,76	869,33	5,47	810	890	-29.616531	-69.168880

Respecto a los sedimentos analizados, en la tabla 3 se observa que el mayor pH medio pertenece al río Jáchal ($7,61 \pm 0,1$), mientras que el más bajo al río Blanco ($7,3 \pm 0,05$). El primer cauce posee el valor más alto (8,1) y el segundo el más bajo (7,02). Todos estos valores conducen a considerar que el pH del suelo del área en estudio es alcalino.

En el río Blanco se encuentra la mayor CEes media ($33425 \pm 12575,78 \mu\text{S/cm}$) y el río Jáchal la menor ($6372 \pm 2830,44 \mu\text{S/cm}$). Debe tenerse en cuenta que si bien la diferencia entre los valores medios es muy grande, los errores estándares también lo son por la gran variación en los valores obtenidos al analizar las muestras. Cabe destacar que 14 de las 30 muestras totales de los tres ríos excedieron los $4000 \mu\text{S cm}^{-1}$, conductividad a partir de la cual un suelo se considera salino para uso agrícola.

Tabla 3. Estadígrafos descriptivos de las variables analizadas en agua según el sitio

Sitio	Clasificación		pH				Conductividad Eléctrica en extracto de saturación ($\mu\text{S/cm}$)				Coordenada media	
	Internacional	Americana	Media	Error estándar	Mínimo	Máximo	Media	Error estándar	Mínimo	Máximo	Latitud	Longitud
Río Blanco	Franco arenoso	Franco arenoso	7,3	0,05	7,02	7,5	33425	12,575,78	2710	111000	-29.554980	-69.191217
Río la Palca	Franco arenoso	Franco arenoso	7,47	0,07	7,05	7,71	7045	1866,29	640	17570	-29.557715	-69.194616
Río Jáchal	Franco arenoso	Franco arenoso	7,61	0,1	7,26	8,1	6372	2830,44	1330	24400	-29.616531	-69.168880

5.2. Análisis discriminante lineal

Este análisis mostró una aproximación del contenido de metales pesados, tanto en agua como en sedimentos, de los ríos Blanco, La Palca y Jáchal.

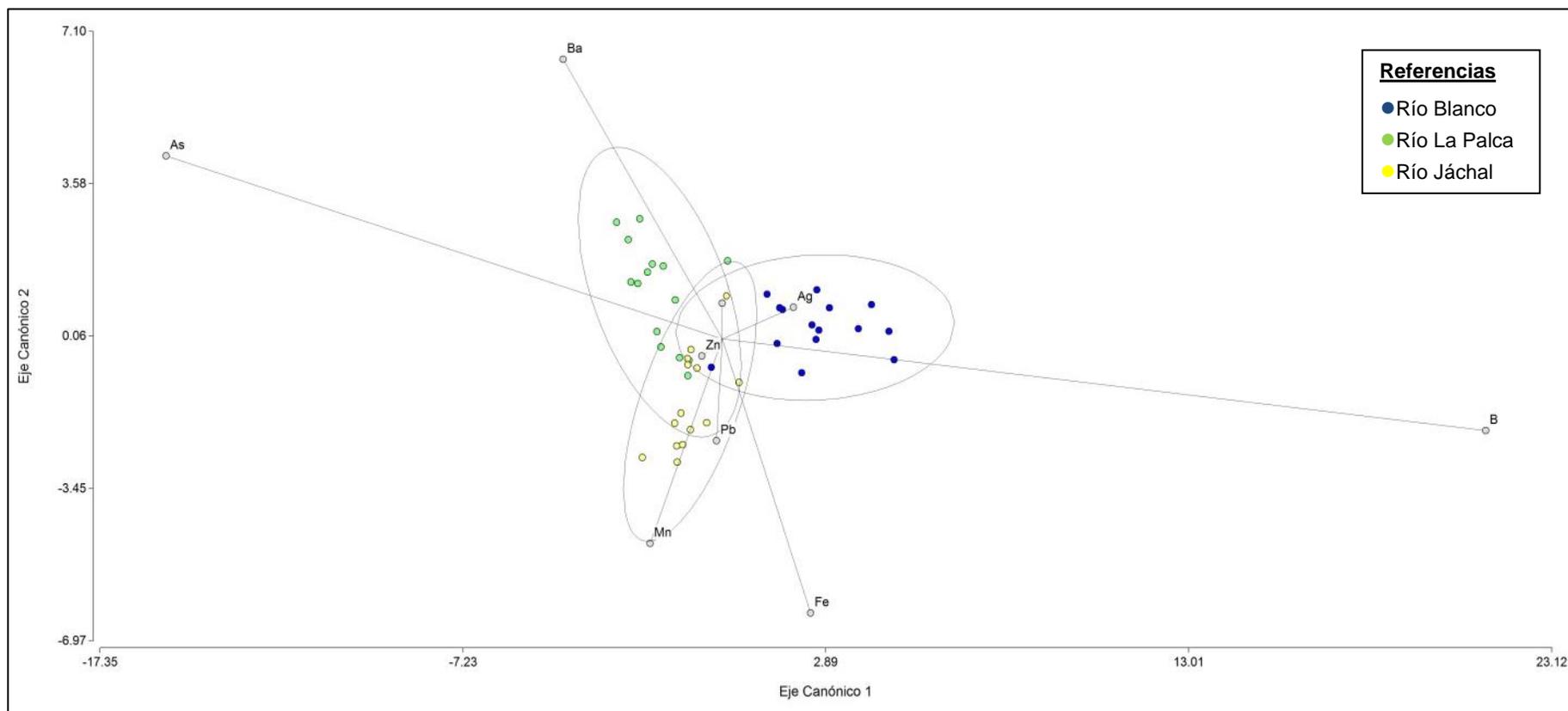


Figura 7. Análisis discriminante del contenido de ET en el recurso agua en los ríos Blanco, La Palca y Jáchal.

Como se puede observar en la figura 7 para el análisis de agua, los ejes canónicos 1 y 2 explican el 100 % de la variabilidad entre grupos, siendo el eje 1 el principal, es decir, el que mayor variabilidad explica (80,6 %). Teniendo en cuenta este eje se observa que los ríos La Palca y Jáchal, con mayores contenidos de As, Ba y Mn, se agrupan hacia un lado separándose del río Blanco que posee mayores concentraciones de B. Los ET que en mayor medida influyen en esta separación son, en orden decreciente, el B, As, Ba y Fe. El eje canónico 2 explica el 19,4 % de la variabilidad, siendo el Fe y el Ba las variables más importantes para la discriminación. También cabe mencionar que para el río Blanco 14 muestras fueron correctamente clasificadas dentro de este grupo y sólo una fue clasificada como perteneciente al río Jáchal (6,7 % de error). Para el río Jáchal 13 muestras fueron correctamente clasificadas y una se clasificó en el grupo río La Palca (7,1 % de error). Por último el análisis incluyó correctamente 12 muestras en el grupo río La Palca, mientras que 3 fueron clasificadas como pertenecientes al río Jáchal (20 % de error).

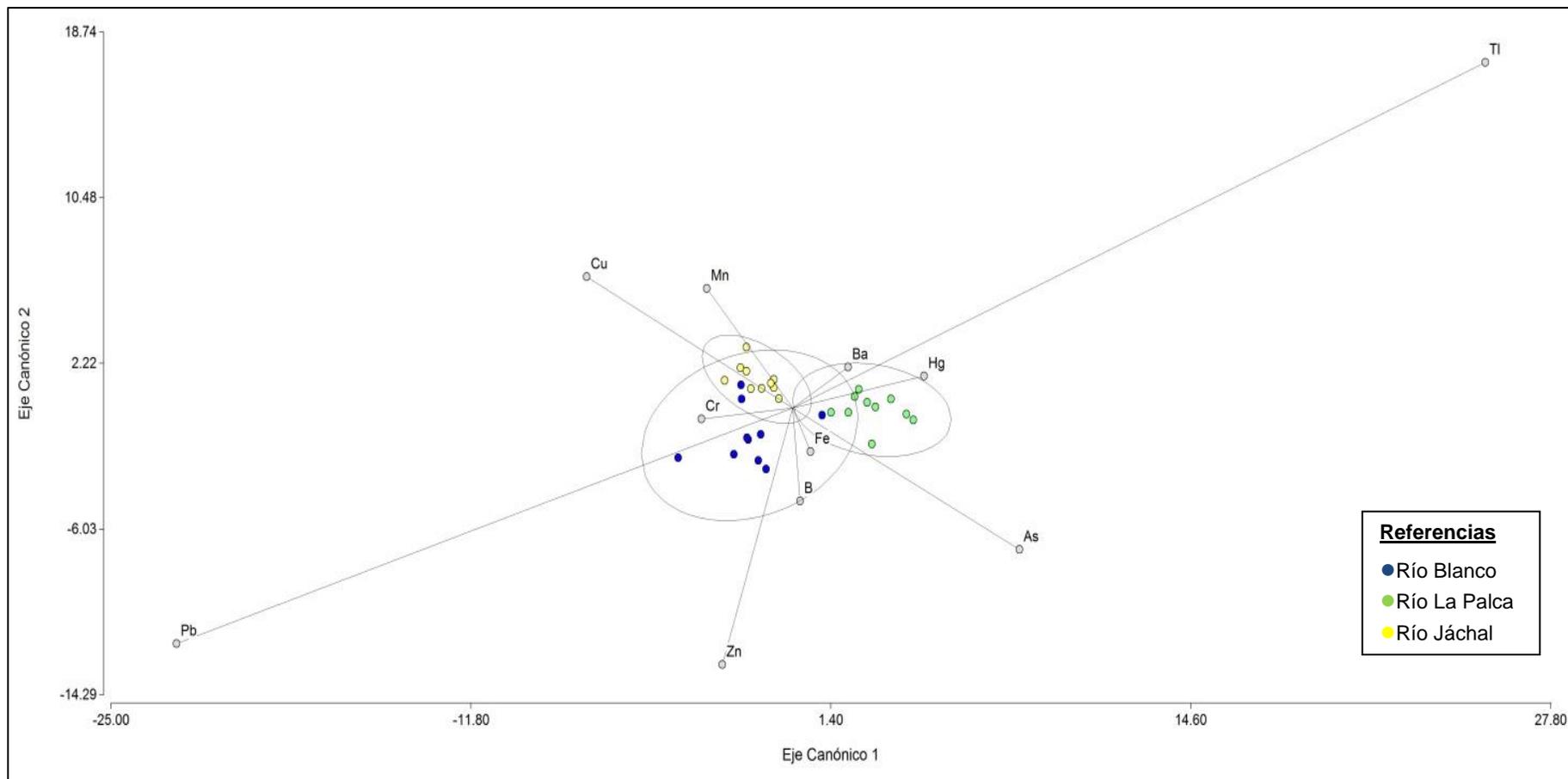


Figura 8. Análisis discriminante del contenido de ET en sedimentos de los ríos Blanco, La Palca y Jáchal

El análisis discriminante realizado para las muestras de sedimentos (figura 8) dio como resultado que el eje canónico 1 explica el 76,3 % de la variabilidad entre grupos. Teniendo en cuenta este eje se observa que los ríos Blanco y Jáchal, con mayores concentraciones de Mn, Cr, Pb y Zn, se agrupan hacia un lado separándose del río La Palca que posee mayor contenido de Tl, As y Hg. Las variables que en mayor medida influyen en esta separación son el Tl y el Pb, seguidos por el As. El eje canónico 2 explica el 23,7% de la variabilidad, siendo el Tl, Zn y Pb las variables más importantes para la discriminación. Este análisis clasificó correctamente el total de las muestras en los grupos río Jáchal y río La Palca, pero en el caso del río Blanco 2 muestras se clasificaron dentro del grupo río Jáchal y una en el grupo río La Palca (30 % de error).

5.3. Concentración de ET mediante ADEVA

El análisis demostró que para determinados ET existen diferencias entre los tres ríos respecto a sus concentraciones. En algunos casos, como el Fe y el As, las diferencias se mostraron más acentuadas entre los cauces.

A continuación se analizan los resultados obtenidos teniendo en cuenta los valores límites según las normativas nacionales vigentes que se detallaron anteriormente.

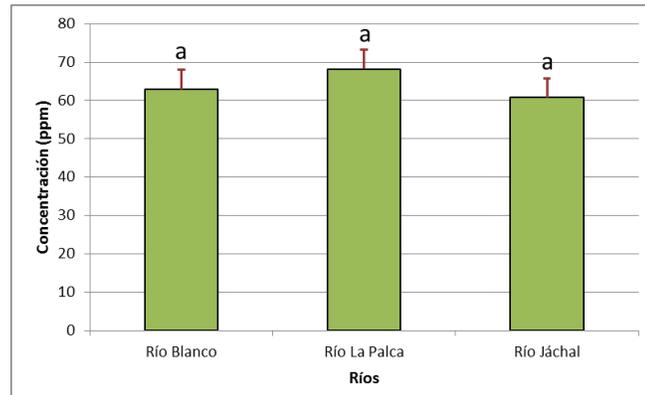


Figura 9. Concentración de Cu en sedimentos en los ríos Blanco, La Palca y Jáchal. Letras minúsculas distintas indican diferencias significativas en la concentración del elemento entre los ríos para $p < 0,05$.

En lo que respecta al Cu, no se detecta su presencia en el agua de ninguno de los tres ríos, aunque sí en sedimentos y sin diferencias significativas. El río Blanco presentó 63 ppm, el río La Palca 68 ppm y el río Jáchal 61 ppm. Ninguno de estos resultados excede los valores umbrales del ET en suelo para uso agrícola.

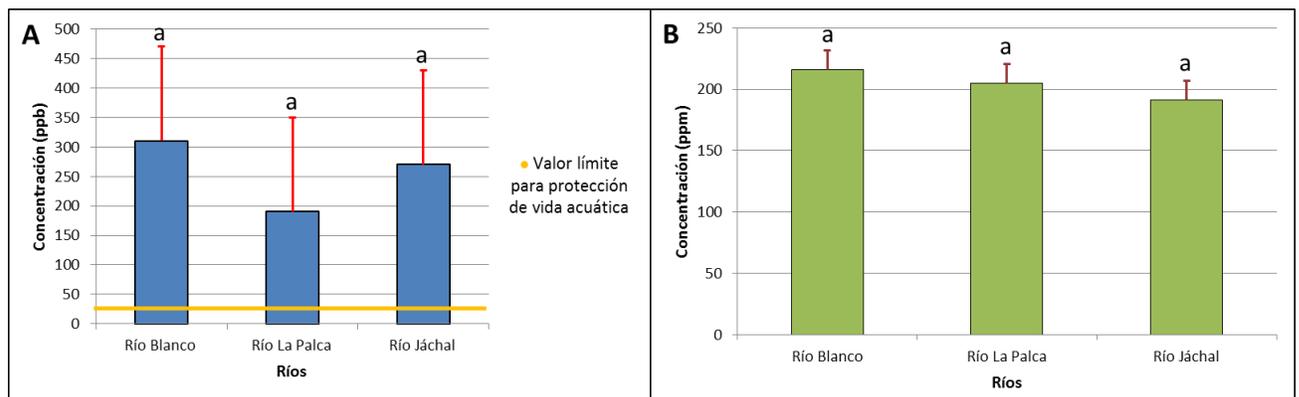


Figura 10. Concentración de Zn en agua (A) y sedimentos (B) en los ríos Blanco, La Palca y Jáchal. Letras minúsculas distintas indican diferencias significativas en la concentración del elemento entre los ríos para $p < 0,05$.

Se observa en la figura 10 que no hay diferencias significativas en las concentraciones de Zn tanto en sedimentos como en agua de los tres ríos en cuestión. En agua, el río Blanco presenta 310 ppb, el río La Palca 190 ppb y el río Jáchal 270 ppb. Estos tres valores exceden el límite de Zn que se considera apto en la calidad de agua para protección de vida acuática en agua dulce superficial dentro del marco de la Ley 24.051.

Respecto a los valores de Zn en sedimentos no se hallan diferencias significativas. El río Blanco contiene 216 ppm, el río La Palca 205 ppm y el río Jáchal 191 ppm; manteniéndose por debajo de los valores máximos permitidos de ET para uso agrícola del recurso según la Ley de residuos peligrosos.

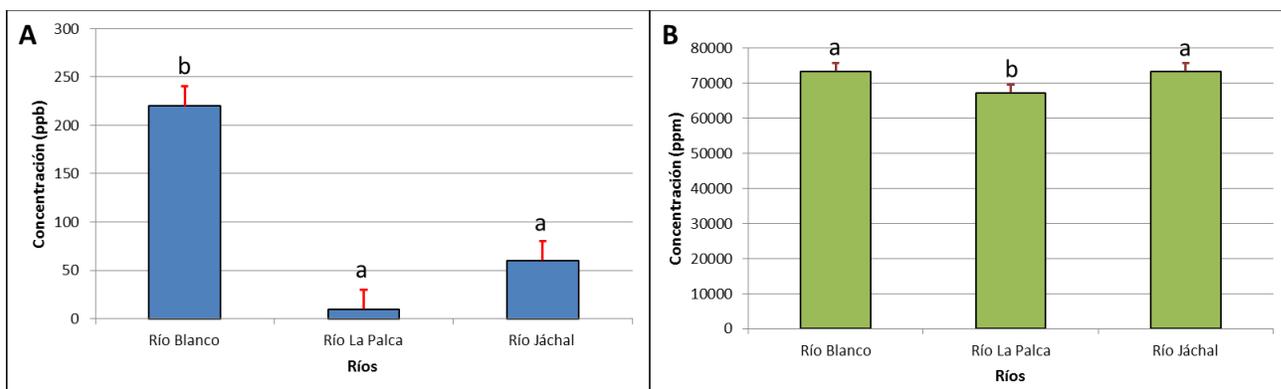


Figura 11. Concentración de Fe en agua (A) y sedimentos (B) en los ríos Blanco, La Palca y Jáchal. Letras minúsculas distintas indican diferencias significativas en la concentración del elemento entre los ríos para $p < 0,05$.

En el figura 11 se demuestra que existe una diferencia significativa en la concentración de Fe en agua del río Blanco (200 ppb) respecto a la concentración en el río La Palca (10 ppb) y el río Jáchal (60 ppb). Estos valores no exceden el límite de Fe que se considera en las normas expuestas anteriormente.

Los valores de Fe en sedimentos también presentan diferencias significativas y sus concentraciones son: 73393 ppm en el río Blanco, 67263 ppm en el río La Palca y 73451 ppm en el río Jáchal. El valor del segundo río difiere mucho de los otros dos. Si bien los valores son elevados, no se encuentra un límite legal establecido.

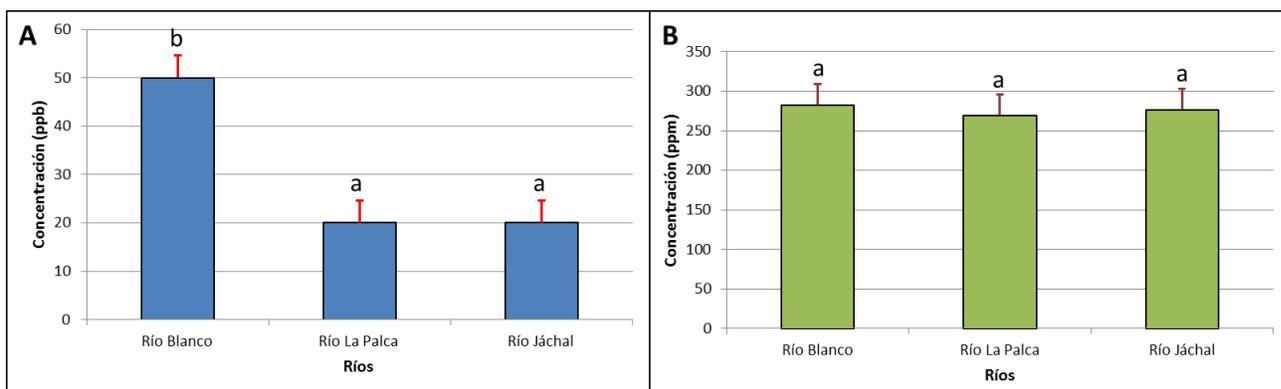


Figura 12. Concentración de Ba en agua (A) y sedimentos (B) en los ríos Blanco, La Palca y Jáchal. Letras minúsculas distintas indican diferencias significativas en la concentración del elemento entre los ríos para $p < 0,05$.

En lo que respecta al Ba en agua, la figura 12 permite apreciar, que el río Blanco posee 50 ppb, el río La Palca 20 ppb y el río Jáchal 20 ppb. A raíz de esto se depende que el primer río presenta diferencias significativas respecto a los otros dos. Al igual que en suelo no se encuentran valores límites especificados en la legislación argentina.

No hay diferencia significativa al considerar las concentraciones del ET en sedimentos. El río Blanco presenta 283 ppm, el río La Palca 269 ppm y el río Jáchal 276 ppm.

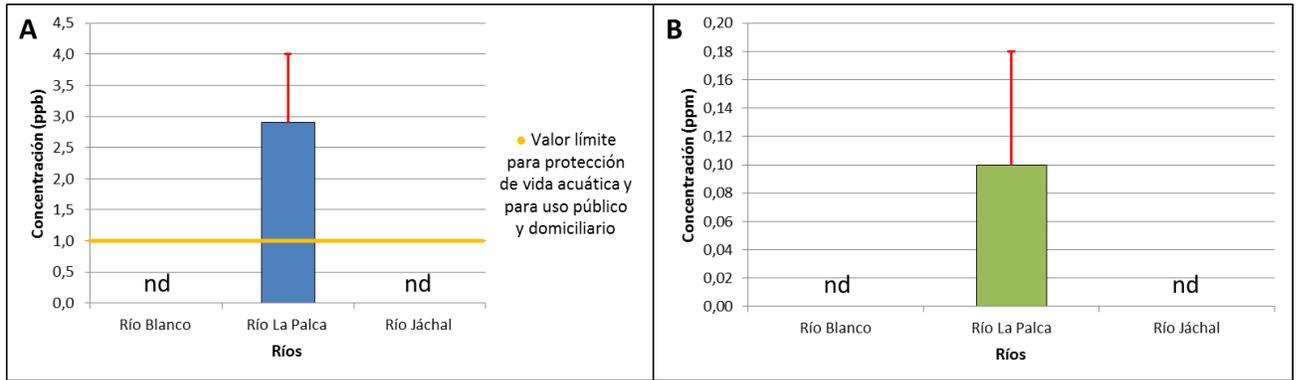


Figura 13. Concentración de Hg en agua (A) y sedimentos (B) en los ríos Blanco, La Palca y Jáchal. Letras minúsculas distintas indican diferencias significativas en la concentración del elemento entre los ríos para $p < 0,05$.

Sólo se detecta Hg en el río La Palca con concentraciones de 2,9 ppb y 0,1 ppm en agua y en sedimentos respectivamente. Es el valor de agua el que excede los límites establecidos de calidad de agua para la protección de la vida acuática en agua dulce superficial y para suministro público y uso domiciliario (figura 13).

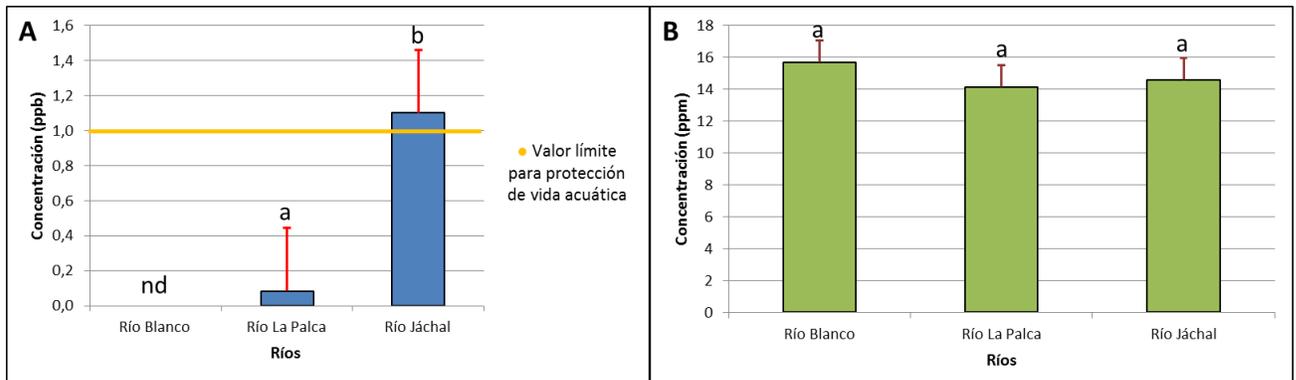


Figura 14. Concentración de Pb en agua (A) y sedimentos (B) en los ríos Blanco, La Palca y Jáchal. Letras minúsculas distintas indican diferencias significativas en la concentración del elemento entre los ríos para $p < 0,05$.

Si bien en agua no se detecta (nd) Pb dentro del río Blanco, se observa en la figura 14 que hay diferencias significativas en las concentraciones de Pb en los dos ríos restantes. El río La Palca contiene 0,08 ppb y el río Jáchal 1,10 ppb; este último valor excede el valor máximo permitido de Pb que se considera permitido en la calidad de agua para protección de vida acuática en agua dulce superficial. Cabe destacar que ambos valores se hallan cercanos al límite de detección del equipamiento utilizado para el análisis de ET.

Respecto a los valores de Pb en sedimentos, el río Blanco contiene 15,7 ppm, el río La Palca 14 ppm y el río Jáchal 14,6 ppm; manteniéndose por debajo de los límites de ET para uso agrícola del recurso según la Ley de residuos peligrosos. A partir de estos valores se desprende que no existe diferencia significativa entre las concentraciones medias de los tres cauces.

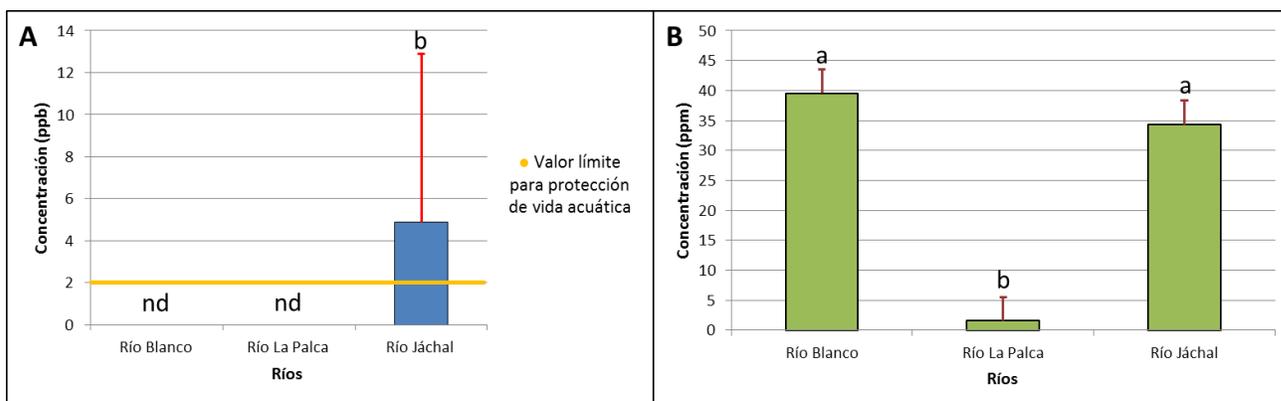


Figura 15. Concentración de Cr en agua (A) y sedimentos (B) en los ríos Blanco, La Palca y Jáchal. Letras minúsculas distintas indican diferencias significativas en la concentración del elemento entre los ríos para $p < 0,05$.

Como muestra la figura 15, en ninguno de los ríos afluentes se detecta Cr en agua, mientras que en el río Jáchal se hallan 4,9 ppb; suficiente para exceder el valor umbral de protección de vida acuática en agua dulce superficial.

Respecto al análisis en sedimentos, se encuentran diferencias significativas en las concentraciones del ET de los tres cauces en estudio, siendo el río La Palca el que difiere al presentar un valor muy bajo en comparación con el resto. Éste contiene 2 ppm, mientras que el río Blanco 40 ppm y el río Jáchal 34 ppm. Dichos valores no superan los límites establecidos por la legislación.

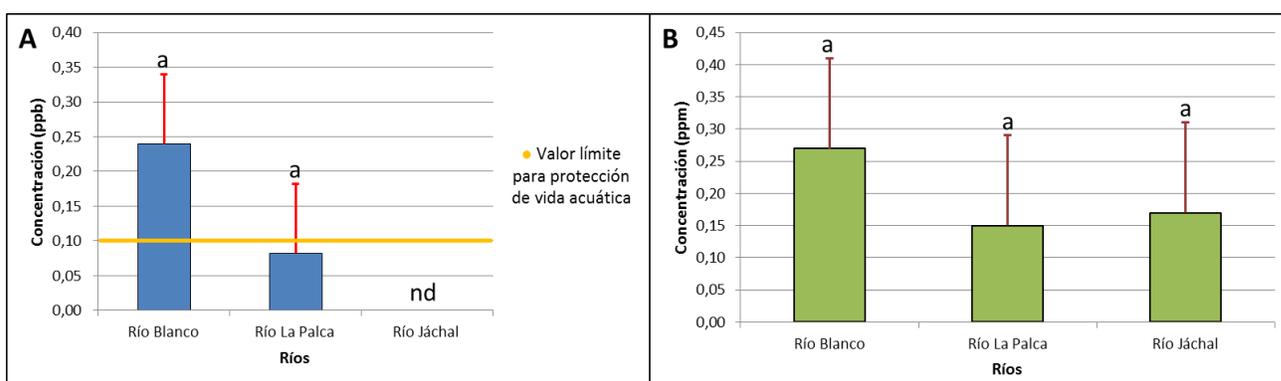


Figura 16. Concentración de Ag en agua (A) y sedimentos (B) en los ríos Blanco, La Palca y Jáchal. Letras minúsculas distintas indican diferencias significativas en la concentración del elemento entre los ríos para $p < 0,05$.

Se observa en la figura 16 que no hay diferencias significativas en las concentraciones de Ag tanto en sedimentos como en agua de los tres ríos en cuestión. En agua, el río Blanco presenta 0,24 ppb, el río La Palca 0,08 ppb y en el río Jáchal no se detectó el ET. Es el primer río mencionado el que excede el límite de Ag que se considera en la calidad de agua para protección de vida acuática en agua dulce superficial dentro del marco de la Ley 24.051.

Respecto a los valores de Ag en sedimentos, el río Blanco contiene 0,27 ppm, el río La Palca 0,15 ppm y el río Jáchal 0,17 ppm; manteniéndose por debajo de los valores máximos permitidos de ET para uso agrícola del recurso según la Ley de residuos peligrosos.

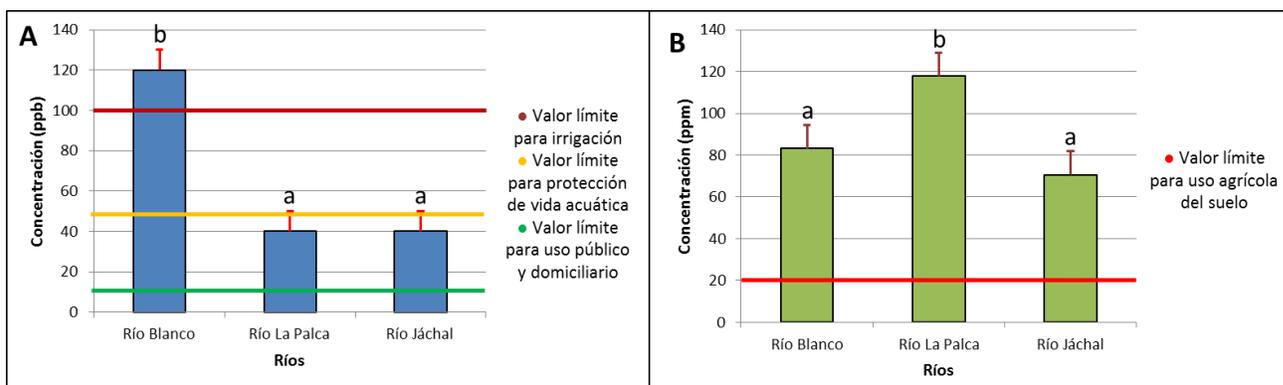


Figura 17. Concentración de As en agua (A) y sedimentos (B) en los ríos Blanco, La Palca y Jáchal. Letras minúsculas distintas indican diferencias significativas en la concentración del elemento entre los ríos para $p < 0,05$.

En la figura 17 se demuestra que existe una diferencia significativa entre las concentraciones de As en agua del río Blanco (120 ppb) respecto a los otros dos sistemas fluviales (río La Palca y río Jáchal, ambos con 40 ppb). El río con mayor valor excede los límites establecidos para la protección de vida acuática en agua dulce superficial, para irrigación y para suministro público y uso domiciliario; los otros dos ríos sólo lo exceden para uso público y domiciliario.

Los valores de As en sedimentos también presentan diferencias significativas al diferir el río La Palca con 118 ppm de los otros dos, con 83 ppm en el río Blanco y 71 ppm en el río Jáchal. Los tres cauces superan los valores umbrales para suelos destinados a actividades agrícolas.

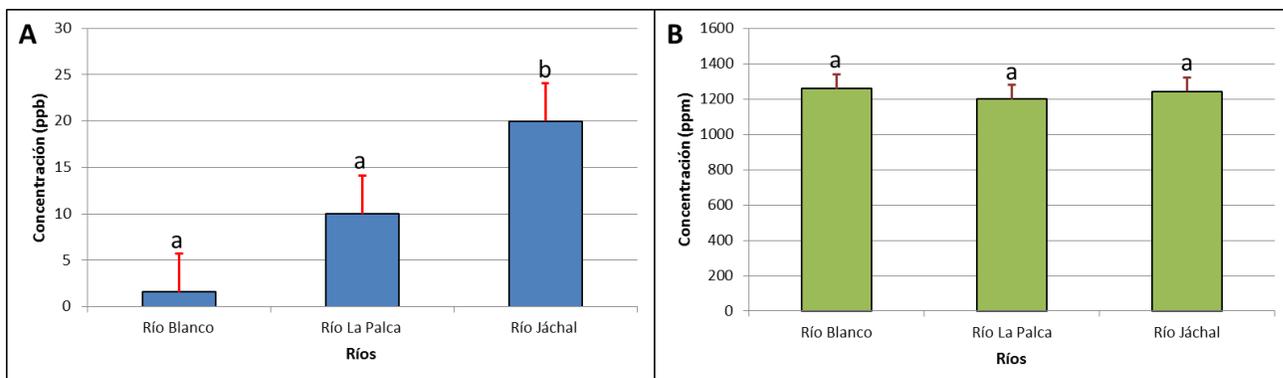


Figura 18. Concentración de Mn en agua (A) y sedimentos (B) en los ríos Blanco, La Palca y Jáchal. Letras minúsculas distintas indican diferencias significativas en la concentración del elemento entre los ríos para $p < 0,05$.

Como se observa en la figura 18, existe una diferencia significativa en la concentración de Mn en agua del río Jáchal respecto a los otros dos ríos. El río Blanco contiene 1,6 ppb, el río La Palca 10 ppb y el río Jáchal 20 ppb. Estos valores no exceden los valores máximos permitidos determinados por la Ley 24.051.

En sedimentos el río Blanco presenta 1258 ppm, el río La Palca 1200 ppm y el río Jáchal 1242 ppm; manteniéndose por debajo de los límites de ET para uso agrícola del recurso según la Ley de residuos peligrosos.

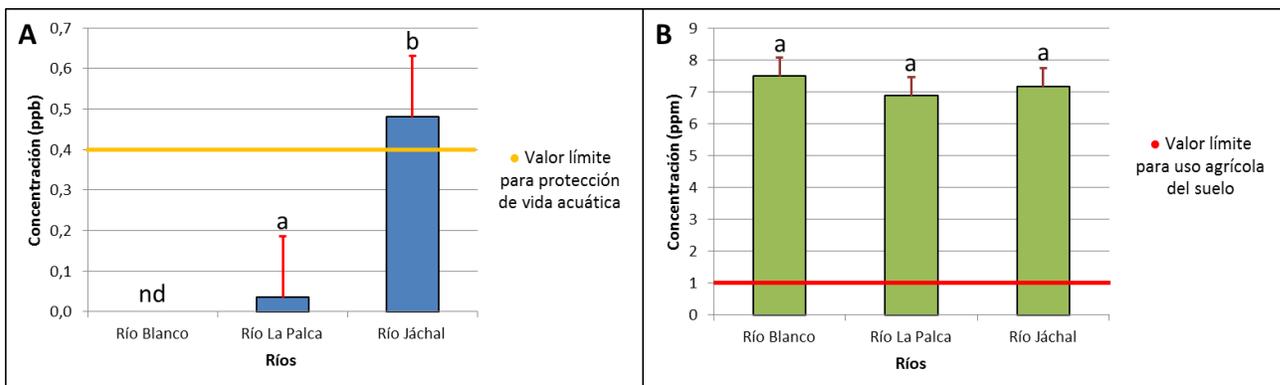


Figura 19. Concentración de TI en agua (A) y sedimentos (B) en los ríos Blanco, La Palca y Jáchal. Letras minúsculas distintas indican diferencias significativas en la concentración del elemento entre los ríos para $p < 0,05$.

La figura 19 muestra la existencia de diferencias significativas en las concentraciones en agua. El río Jáchal presenta un valor elevado (0,48 ppb) respecto al río La Palca (0,04 ppb). En el río Blanco no se detecta la presencia de TI. El río efluente supera los límites máximos permitidos para la protección de la vida acuática en agua dulce superficial.

En cuanto al metal presente en sedimentos, no se encuentran diferencias significativas. El río Blanco presenta el mayor valor, siendo éste de 7,49 ppm, y los ríos La Palca y Jáchal 6,87 ppm y 7,15 ppm respectivamente. Los tres cauces superan los valores umbrales para suelos destinados a actividades agrícolas.

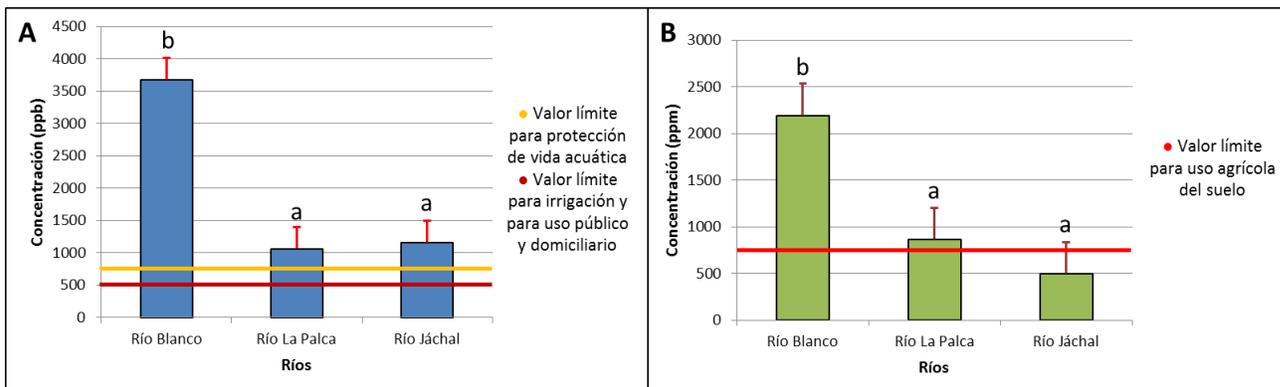


Figura 20. Concentración de B en agua (A) y sedimentos (B) en los ríos Blanco, La Palca y Jáchal. Letras minúsculas distintas indican diferencias significativas en la concentración del elemento entre los ríos para $p < 0,05$.

En la figura 20 se evidencia una diferencia significativa entre las concentraciones de B de los ríos en estudio. El río Blanco, el que difiere de los otros cauces en cuestión, posee 3680 ppb, el río La Palca 1060 ppb y el río Jáchal 1160 ppb. Todos ellos superan los valores máximos permitidos establecidos para la protección de vida acuática en agua dulce superficial, para irrigación y para suministro público y uso domiciliario.

En cuanto las concentraciones en sedimentos también hay diferencias significativas, siendo el río Blanco el que se diferencia del resto al presentar un mayor valor del metal. Este río posee 2193 ppm, el río La Palca 865 ppm y el río Jáchal 499 ppm. Los valores del río Blanco y del río La Palca son mayores que los indicados para suelos de uso agrícola.

5.4. Correlaciones

A continuación se muestran los coeficientes de correlación obtenidos a partir de las correlaciones significativas, los cuales indican los niveles de relación entre distintas variables y permiten inferir sobre ciertos comportamientos del sistema natural. Es importante tener en cuenta que los análisis de correlación determinan qué las variables están asociadas entre sí, pero no explican necesariamente relaciones causales, por lo tanto, algunas correlaciones pueden no tener o significado fisicoquímico en el ambiente estudiado.

5.4.1. Río Blanco

Los coeficientes de correlación determinados entre los ET y las propiedades físico-químicas de los sedimentos; fueron:

Tabla 4. Correlaciones entre los ET y las propiedades físico-químicas de los sedimentos del río Blanco según criterio de clasificación

Correlación media	+0,71 entre la CEes y el B
	+0,64 entre el pH y el Zn
Correlación débil	+0,58 entre el pH y el TI
	+0,57 entre el pH y el Pb
	+0,56 entre el pH y el Mn

Los coeficientes de correlación determinados entre los ET y las propiedades físico-químicas de los sedimentos, con los ET y las mismas propiedades; fueron:

Tabla 5. Correlaciones entre los ET y las propiedades físico-químicas de los sedimentos, con los ET y las propiedades físico-químicas del agua del río Blanco según criterio de clasificación

Correlación media	+0,78 entre el Cr de los sedimentos y la conductividad del agua
	+0,66 entre la Ag de los sedimentos y la Ag del agua
Correlación débil	+0,78 entre el Fe de los sedimentos y el pH del agua

No se encontraron correlaciones entre los ET y las propiedades físico-químicas del agua.

5.4.2. Río La Palca

Los coeficientes de correlación determinados entre los ET y las propiedades físico-químicas de los sedimentos; fueron:

Tabla 6. Correlaciones entre los ET y las propiedades físico-químicas de los sedimentos del río La Palca según criterio de clasificación

Correlación media	-0,74 entre el CEes y el Fe
	-0,63 entre el pH y el Cu
Correlación débil	-0,58 entre el pH y el As

Los coeficientes de correlación determinados entre los ET y las propiedades físico-químicas del agua; fueron:

Tabla 7. Correlaciones entre los ET y las propiedades físico-químicas del agua del río La Palca según criterio de clasificación

Correlación fuerte	-0,94 entre el Fe y el pH
Correlación media	-0,63 entre el B y el pH

Los coeficientes de correlación determinados entre los ET y las propiedades físico-químicas de los sedimentos, con los ET y las mismas propiedades en agua; fueron:

Tabla 8. Correlaciones entre los ET y las propiedades físico-químicas de los sedimentos, con los ET y las propiedades físico-químicas del agua del río La Palca según criterio de clasificación

Correlación fuerte	+0,85 entre el pH de los sedimentos y el Ba del agua
Correlación media	+0,79 entre el pH de los sedimentos y el B del agua
	+0,78 entre el pH de los sedimentos y el As del agua
	+0,72 entre el B de los sedimentos y la conductividad del agua
	-0,69 entre el Fe de los sedimentos y la conductividad del agua
	+0,63 entre el Ba de los sedimentos y el pH del agua
Correlación débil	+0,59 entre el Pb de los sedimentos y el pH del agua
	+0,57 entre el Zn de los sedimentos y el pH del agua
	+0,56 entre el TI de los sedimentos y el pH del agua

5.4.3. Río Jáchal

Los coeficientes de correlación determinados entre los ET y las propiedades físico-químicas de los sedimentos; fueron:

Tabla 9. Correlaciones entre los ET y las propiedades físico-químicas de los sedimentos del río Jáchal según criterio de clasificación

Correlación fuerte	+0,92 entre el B y la CEes
Correlación media	+0,75 entre la Ag y la CEes
	-0,69 entre el Fe y la CEes
Correlación débil	-0,58 entre el B y el pH

Los coeficientes de correlación determinados entre los ET y las propiedades físico-químicas de los sedimentos, con los ET y las mismas propiedades en agua; fueron:

Tabla 10. Correlaciones entre los ET y las propiedades físico-químicas de los sedimentos, con los ET y las propiedades físico-químicas del agua del río Jáchal según criterio de clasificación

Correlación fuerte	+0,98 entre la CEes de los sedimentos y el Pb del agua
	+0,98 entre la CEes de los sedimentos y el TI del agua
Correlación media	-0,75 entre la CEes de los sedimentos y el Ba del agua
	-0,74 entre la CEes de los sedimentos y el B del agua
	-0,72 entre la CEes de los sedimentos y el As del agua
	-0,71 entre el B de los sedimentos y el B del agua
	-0,69 entre la CEes de los sedimentos y el Fe del agua

No se encontraron correlaciones entre los ET y las propiedades físico-químicas del agua.

5.5. Aporte porcentual de ET desde ríos Blanco y La Palca al río Jáchal

A continuación se presentan los resultados de los aportes realizados por los ríos Blanco y La Palca al río Jáchal, para cada uno de las especies químicas en estudio.

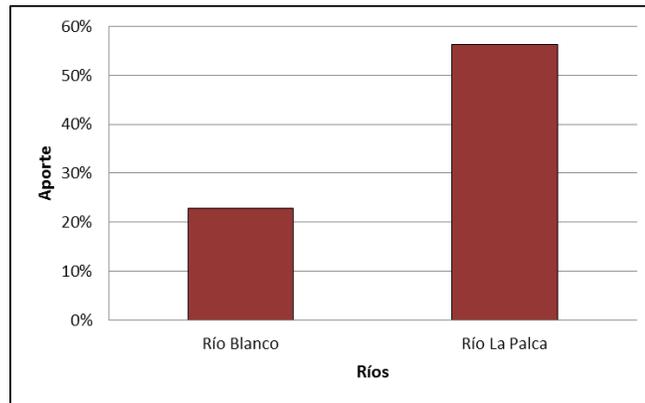


Figura 21. Aporte porcentual de Zn de los ríos Blanco y La Palca al Jáchal.

La figura 21 muestra que el río Blanco aporta 22,83% de Zn ($2,1 \mu\text{g s}^{-1}$) del ET al río Jáchal, mientras que el río La Palca aporta 56,28% ($5,2 \mu\text{g s}^{-1}$), un valor muy superior al primero. El río efluente transporta $9,2 \mu\text{g s}^{-1}$.

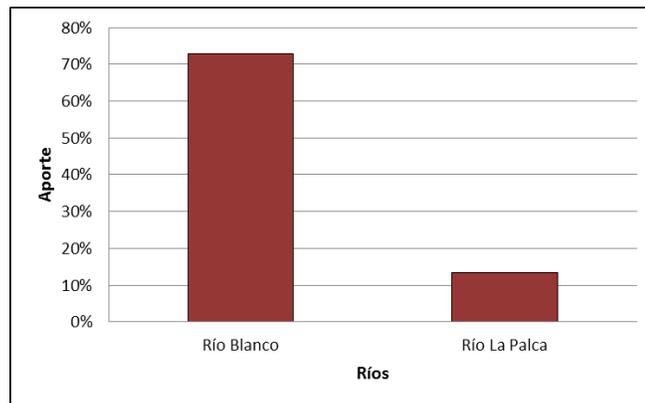


Figura 22. Aporte porcentual de Fe de los ríos Blanco y La Palca al Jáchal.

En la figura 22 se observa que el 72,90% ($1,5 \mu\text{g s}^{-1}$) de Fe es aportado por el río Blanco al río Jáchal, y que el 13,33% ($0,3 \mu\text{g s}^{-1}$) es aportado a este último desde el río La Palca. El río efluente transporta $2 \mu\text{g s}^{-1}$.

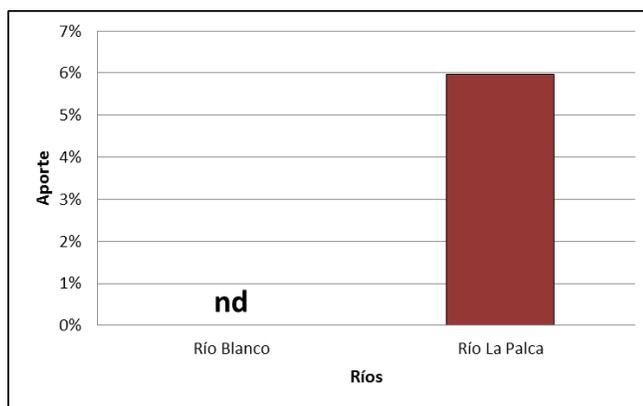


Figura 23. Aporte porcentual de Pb de los ríos Blanco y La Palca al Jáchal.

Puede apreciarse en la figura 23 que el río Blanco no hace (nd) aporte de Pb al río Jáchal, el cual transporta $37,40 \text{ ng s}^{-1}$. Diferente es lo que ocurre en el río La Palca, ya que éste aporta el 5,96% ($2,26 \text{ ng s}^{-1}$) del ET.

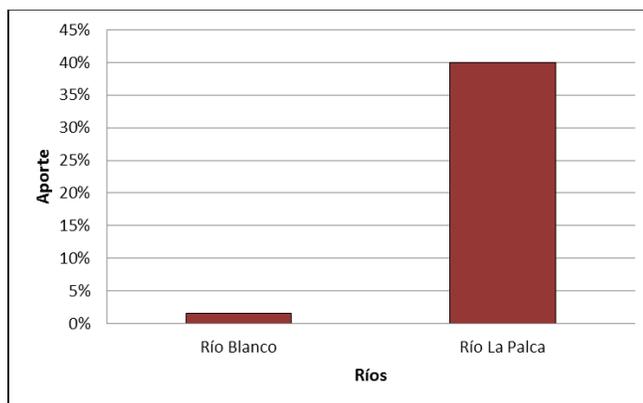


Figura 24. Aporte porcentual de Mn de los ríos Blanco y La Palca al Jáchal.

La figura 24 permite ver que el río Blanco aporta al Jáchal un valor de 1,59% de Mn ($0,01 \mu\text{g s}^{-1}$), el cual resulta bajo comparado con el 39% ($0,27 \mu\text{g s}^{-1}$) que aporta el río La Palca. El río efluente transporta $0,68 \mu\text{g s}^{-1}$.

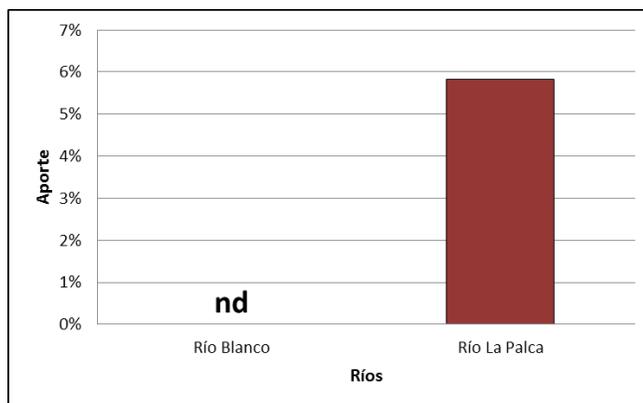


Figura 25. Aporte porcentual de TI de los ríos Blanco y La Palca al Jáchal.

Respecto al Tl, en la figura 25 se muestra que no hay aporte al río Jáchal por el río Blanco pero sí por el río La Palca, que aporta un 5,83% ($0,95 \text{ ng s}^{-1}$). El primer río transporta $16,32 \text{ ng s}^{-1}$.

A pesar de que el río Jáchal presenta $0,17 \text{ } \mu\text{g s}^{-1}$ de Cr, no existen aportes desde los ríos afluentes ya que no se detectó la especie química en estos últimos cauces.

No se detecta Ag en el agua del río Jáchal, aunque sí se halla en sus afluentes. El río Blanco transporta $1,62 \text{ ng s}^{-1}$ y el río La Palca $2,233 \text{ ng s}^{-1}$. Una situación similar se da con el Hg, el cual sólo se detecta en el río La Palca con un valor de $78,85 \text{ ng s}^{-1}$.

Al analizar el porcentaje de Ba correspondiente a los $0,68 \text{ } \mu\text{g s}^{-1}$ que transporta el río Jáchal, el río Blanco aporta 49,71% ($0,34 \text{ } \mu\text{g s}^{-1}$) y el río La Palca 79,97% ($0,54 \text{ } \mu\text{g s}^{-1}$). Puede observarse que la suma de estos valores es mayor a la totalidad del metal presente en el río efluente. La misma situación ocurre con el As y el B donde el río Blanco y el río La Palca presentan 59,65% ($0,81 \text{ } \mu\text{g s}^{-1}$) y 79,97% ($1,1 \text{ } \mu\text{g s}^{-1}$) de As y 63,08% ($24,9 \text{ } \mu\text{g s}^{-1}$) y 73,08% ($28,8 \text{ } \mu\text{g s}^{-1}$) de B respectivamente; mientras que el río Jáchal transporta $1,4 \text{ } \mu\text{g s}^{-1}$ de As y $39,4 \text{ } \mu\text{g s}^{-1}$ de B.

6. DISCUSIÓN

La escasez de estudios en los departamentos Iglesia y Jáchal abordando la temática en cuestión, es una gran limitante para realizar comparaciones con el presente trabajo. No obstante, este estudio puede considerarse como un buen punto de referencia para futuras investigaciones que busquen ampliar o mejorar este aporte, como así también el análisis de la problemática desde otras perspectivas.

Los bajos contenidos de arcillas en suelo, el pH alcalino tanto en suelo como en agua y la diversidad de valores de conductividad en los distintos puntos muestreados, coincidieron con estudios realizados por Funes Pinter et al. (2017). También fueron similares las altas concentraciones de As, B y TI en suelo y agua, y los elevados valores de Fe y Mn determinados en suelo. A partir de la comparación de los límites legales con los valores medidos de ET pudo demostrarse el cumplimiento de la primera hipótesis específica, dejando en evidencia la existencia de diversos elementos químicos que superan los valores legales establecidos para diversos usos tanto de suelo como de agua. Con excepción de Fe, Ba y Mn, el resto de las especies químicas superaron los límites establecidos para la protección de la vida acuática. Las consecuencias de altas concentraciones en ecosistemas acuáticos se han presentado en muchas ocasiones mediante diferentes procesos, algunos de ellos severos: la mortalidad masiva o la aparición de tumores en peces y otros organismos; crecimientos desmesurados de algas y/o fitoplancton; disminuciones en la población y diversidad de varias especies, etcétera (GESAMP, 1991; Sarokin y Shulkin, 1992). Cabe destacar que autores como Montenegro (2010), plantean la necesidad de realizar nuevos estudios ambientales en la subcuenca Jáchal con la finalidad de conocer la situación de sus ecosistemas y prevenir futuros problemas en su conservación y correcto funcionamiento. Una investigación realizada en el área de estudio por Mazzucco (2017) determinó que ciertas especies vegetales nativas del lugar, eran capaces de absorber los ET presentes en los ríos en hojas y raíces, disminuyendo las concentraciones excesivas. Si bien este parece ser un proceso de fitorremediación beneficioso, la absorción y acumulación de estas especies químicas por las plantas es generalmente el primer paso para la entrada de éstos en la cadena alimentaria, pudiendo ocasionar no solo alteraciones ecosistémicas dentro de los cauces, sino también en los alrededores afectando hasta la fauna terrestre (Prieto Méndez et al., 2009). Son estos casos por ejemplo los que demandan una mayor atención en las futuras investigaciones que puedan llevarse a cabo en las cercanías de los ríos La Palca, Blanco y Jáchal.

Por otro lado As y B superaron todos los límites tenidos en cuenta respecto al agua, demostrando que el recurso no es apto ni para uso público y domiciliario, ni para agricultura. A su vez en este último aspecto son los mismos ET juntos con el TI, los que se encuentran en exceso en el suelo excediendo los límites permitidos para uso agrícola. Los metales pesados son peligrosos porque tienden a bioacumularse en diferentes cultivos convirtiéndose en formas accesibles a los humanos causando efectos nocivos en su salud a largo plazo (Prieto Méndez et al., 2009; Prieto García et al., 2005). Además deben considerarse los riesgos asociados para la salud y el ambiente (Scott, 2004) debido a la presencia de ET que pueden ocasionar problemas de contaminación de aguas subterráneas (Morris et al., 2003). Respecto a la salinidad, ya en 1943 las expediciones Palmero – Rovira mostraban como conclusiones indicios de una mala calidad del agua del río Jáchal indicando al río Blanco y su afluente, el río Salado, como los causales del elevado tenor salino que perjudicaba a los cultivos de Jáchal. Tan sólo tres años más tarde, en 1946, la expedición Augusto Tapia reconfirmaría esto, que décadas después es coincidente con el presente estudio (Bosque, 2001).

El comportamiento particular de cada ET dentro del complejo sistema fluvial, se ve reflejado al considerar el transporte de cada río. Elementos como Ba, Fe, As y B se encontrarían mayoritariamente dentro del agua del río Blanco, lo cual resulta coincidente con estudios

publicados por Montenegro (2010) extraídos de informes regionales de la Secretaría de Minería de la Nación. En los mismos, al igual que lo que sucede con la salinidad, se atribuye la gran concentración de estas especies químicas al río Salado el cual lo aporta al río Blanco y luego este último al río Jáchal. Por otro lado el río La Palca no poseería ninguna especie química con altos contenidos respecto de los otros dos cauces, salvo la presencia de Hg. Puede constatar que Zn, Fe, Pb, Mn y Tl estarían siendo aportados desde los ríos Blanco y/o La Palca hacia el Jáchal. Es para estos últimos elementos que la hipótesis específica dos puede ser aceptada. No sucede lo mismo con el resto de las especies químicas ya que para estas se presentan diversos casos que deben tenerse en cuenta.

La detección de Cr sólo en el río Jáchal y no en sus afluentes podría estar dado por su retención en suelo aguas arriba y solubilización aguas abajo en el río efluente. Una correlación media positiva entre el Cr en sedimentos y la conductividad del agua del río La Palca sustentan esto al considerar que la salinidad en agua modifica la captación de elementos trazas por lo que bajas conductividades son señales de un incremento en la solubilización del ET (Rainbow et al., 1993). En suelo, el aumento de la conductividad puede influir en la estructura del recurso, ocasionando una mayor movilidad de los ET (Acosta et al., 2011). Otro aspecto que debe tenerse en cuenta es que los altos valores de pH podrían reducir la biodisponibilidad del metal, excepto para As que muestra una mayor solubilización en condiciones alcalinas (Ferguson y Gavis, 1972; Frost y Griffin, 1976).

Si se considera el caso de Ag sólo se encontró en los ríos afluentes y no en el Jáchal, mientras que Hg se observó sólo en sedimentos y escasamente en agua en el río La Palca, una situación similar a la del Cr pero esta vez la retención sucede antes de ingresar al río efluente. En el río Blanco una correlación media positiva de Ag de los sedimentos con Ag del agua podría indicar un incremento del ET en el primer recurso con su llegada en la solución proveniente desde zonas superiores de la cuenca. Respecto al Hg nuevamente una posible retención en el río La Palca, tal vez por factores no tenidos en cuenta, estaría evitando un aporte al río Jáchal.

Por otro lado, el no haber detectado Cu en sedimentos y si en agua es un fuerte indicio de que el ET se pueda encontrar muy retenido en el suelo, imposibilitándose su transporte en la fase líquida. El comportamiento de Ba, As y B fue muy similar, al encontrarse mayoritariamente en el agua de los ríos afluentes y en menor concentración en el río Jáchal, lo que indicaría que parte de los ET mencionados están siendo retenidos en alguna zona de los cauces. En el caso de As y Ba, el mayor caudal del río la Palca provocaría que sea el mayor aportante pero no de la totalidad de las especies químicas. Una posible causa sería la precipitación al ingresar al río Jáchal desde sus afluentes, zonas donde no se realizaron mediciones. Además, mediante correlaciones positivas se determinó que en el río La Palca el pH tanto del agua como de los sedimentos influyen en la disponibilidad de los ET pudiendo causar su retención. Debe tenerse presente que los óxidos de Fe en los suelos son capaces de absorber As y otros ET reduciendo su movilidad (Dixit y Hering, 2003; Elliott et al., 1986; Yin et al., 2016), y en la zona estudiada el contenido de Fe fue alto. En cuanto a B, el río Blanco presentó las mayores concentraciones tanto en sedimentos como en agua, pero el mayor aporte al río Jáchal lo realiza por poca diferencia el río La Palca, cauce en el cual determinadas correlaciones mostraron efectos contrarios provocados por el pH y la conductividad con respecto al B, el primero provocando una retención y el segundo solubilizando al elemento. Otra vez se observa que la totalidad de B que ingresa al río Jáchal resulta menor a la concentración medida en este río, por lo que una correlación media negativa entre el elemento en sedimentos y en agua daría indicios de la retención existente al ingresar al sistema fluvial aguas abajo.

Al analizar Pb, Mn y Tl, es el río Jáchal el sitio donde se hallan en mayores cantidades respecto de la totalidad de los ET aguas arriba, lo que resulta llamativo al ser este el río efluente. Una correlación fuerte positiva hallada entre la conductividad del agua del río Jáchal y

el ET estaría demostrando una solubilización del Pb que se reflejaría en un incremento del mismo aguas abajo. Al considerar Mn, una solubilización en zonas aguas arriba de este último cauce donde no se realizaron mediciones, podría explicar este incremento del ET. Para TI una correlación fuerte positiva entre la conductividad del suelo y el ET en el agua del río efluente, muestra como el TI se estaría solubilizando en grandes cantidades aguas abajo.

Al tener en cuenta la hipótesis específica tres, se puede apreciar que como posible derivado de la minería sólo se detectó Hg en el agua del río La Palca. Éste ET está muy vinculado a la actividad minera (Idrovo et al., 2001), lo cual demostraría una posible contaminación del agua por las actividades llevadas a cabo en las minas Pascua-Lama y Veladero. El Hg es considerado uno de los ET que representan un mayor riesgo de contaminación ambiental (Páez-Osuna 1996), hallándose en sedimentos, particularmente en sedimentos acuáticos, donde el tiempo de retención puede ser estimado en 2000 años y donde puede producir la contaminación de organismos acuáticos (Eisler, 2000).

En general los ríos difieren en concentraciones de elementos, en retenciones o solubilizaciones de los mismos, en aportes al río Jáchal para el caso de los ríos afluentes, etc. La hipótesis general bajo este contexto puede ser aceptada, ya que como ha podido apreciarse, cada cauce y cada ET presenta un comportamiento diferente en este complejo sistema fluvial y son los factores de ambientales, geológicos y antrópicos los que estarían influyendo en gran medida.

7. CONCLUSIONES

El sistema fluvial compuesto por los ríos Blanco, La Palca y Jáchal presenta diversas especies de ET que se hallan en diferentes concentraciones tanto entre ellos como para el mismo elemento en suelo y en agua. El comportamiento de cada uno de estos elementos difiere entre sí, al estar sujeto de efectos de diversos procesos que forman parte del sistema y que actúan de forma diferente según cada especie.

Los factores presentes en el sitio de estudio como el pH y la conductividad mostraron una influencia sobre los distintos elementos, lo cual se refleja en los efectos indirectos ocasionados por los procesos propios del sistema, por ejemplo la disponibilidad de las especies químicas y la modificación en el aporte de los ríos afluentes al río Jáchal.

Si bien en la mayoría de los casos los ríos Blanco y La Palca resultaron ser aportantes de ET hacia el sistema aguas abajo, en algunos casos cada uno de estos afluentes aportó en mayor cantidad un elemento ya sea por una mayor disponibilidad o por la simple presencia en uno y no en otro. Además, en determinados casos la retención fue elevada, impidiendo también de este modo el pasaje de la especie química de un río al otro.

No debe dejarse de lado que muchas especies químicas, como As, B, TI, etc., excedieron valores límites establecidos por marcos legales nacionales. Aunque las concentraciones de muchos ET no fueron extremadamente elevadas en el agua del río Jáchal, el conocimiento por parte de las poblaciones que habitan zonas cercanas y que hacen uso de este recurso, es de suma importancia y resulta indispensable para tomar medidas precautorias al momento de realizar su consumo en diversas actividades.

Estudios a futuro deberían ampliar estas mediciones no sólo a escala espacial, sino que debería considerarse la escala temporal, procurando observar el comportamiento de los ET y los factores medioambientales a través del tiempo para una mejor comprensión del sistema fluvial y la detección de posibles incrementos de los elementos en las aguas que pudiesen ocasionar problemas sobre el medioambiente, la salud y las economías de poblaciones cercanas.

8. BIBLIOGRAFÍA

- Ackkermann, F. (1980). A procedure for correcting the grain size effect in heavy metal analyses of estuarine and coastal sediments. *Environmental Technology*, 1(11), 518-527. <https://doi.org/10.1080/09593338009384008>
- Acosta, J. A., Jansen, B., Kalbitz, K., Faz, A., Martínez-Martínez, S. (2011). Salinity increases mobility of heavy metals in soils. *Chemosphere*, 85(8), 1318–1324. <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2011.07.046>
- Angelova, V., Ivanova, R., Delibaltova, V., Ivanov, K. (2004). Bio-accumulation and distribution of heavy metals in fibre crops (flax, cotton and hemp). *Industrial Crops and Products*, 19(3), 197–205. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2003.10.001>
- Allub, L., Guzmán, L. (2000). Las estrategias de sobrevivencia de los pequeños productores rurales de Jáchal, San Juan, Argentina. *Estudios Sociológicos*, 18(52), 125-165. <http://www.jstor.org/stable/40420607>
- Balderiote, M., et al. (1982). *Impacto Ambiental de la actividad minero-industrial*. En: V Congreso Latinoamericano de Geología, Dirección Nacional de Ordenamiento Ambiental, Subsecretaría de Medio Ambiente, Ministerio de Salud Pública y Medio Ambiente, Buenos Aires, Argentina.
- Bargiela, M., Rendina, A., García, A., De Iordo, A. F. (2006). Fracción de metales solubles en sedimentos del cauce del río Matanza, Argentina. *Agronomía y Ambiente*. 26(1), 31-37.
- Baruah, N. K., Kotoky P., Bhattacharyya, K. G., Borah, G.C. (1996). Metal speciation in Jhanji River sediments. *Science of the Total Environment*, 193(1), 1-12. [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(96\)05318-1](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(96)05318-1)
- Baudo, R., Muntau, H. (1990). Chapter 1: Lesser known in-place pollutants and diffuse source problems. En Baudo, R., Giesy, J. P., Muntau, H. (eds.), *Sediments: Chemistry and toxicity of in-place pollutants* (pp 1-14). Chelsea, USA: Lewis Publisher.
- Belkin, H. E., Sparck, M. S. (1993). Mercury, arsenic, antimony, and selenium contents of sediment from the Kuskokwim River, Bethel, Alaska, USA. *Environmental Geology*, 22(2), 106-110. <https://doi.org/10.1007/BF00789322>
- Bereciartua, P. J., et al. (2009). *Estudio integral de la cuenca del río Desaguadero-Salado-Chadileuvú-Curacó* (Tomo 1). Universidad de Buenos Aires, Facultad de Ingeniería. Argentina.
- Biksham, G., Subramanian, V., Ramanathan, A. L., Van Grieken, R. (1991). Heavy metal distribution in the Godavari River basin. *Environmental Geology and Water Sciences*, 17(2), 117–126. <https://doi.org/10.1007/BF01701567>
- Bosque, H. G. (2001). Informe histórico: *El río Jáchal y sus aguas salobres*. D&C Visual S.R.L. Buenos Aires.
- Botté, S., Marcovecchio, J., et al. (2013). Ciclo de metales pesados. En *Procesos químicos en estuarios* (cap. 10, pp. 227-258). Argentina: Edutecne.

- Bouyoucus, G. (1962). Hydrometer method improved for making particle size analyses of soils. *Agronomy Journal*, 54(5), 464–465. [10.2134/agronj1962.00021962005400050028x](https://doi.org/10.2134/agronj1962.00021962005400050028x)
- Casas, J. M., Rubio, R., Rauret, R. (1990). Estudio de los sedimentos del río Cardener II. Contaminación por metales pesados. *Tecnología del agua*, 74, 17-24.
- CONICET (2000). Catálogo de recursos humanos e información relacionada con la temática ambiental en la región andina Argentina. Capítulo 13. <https://www.mendoza-conicet.gob.ar/ladyot/catalogo/cdandes/cap13.htm>
- Chen, W., Tan, S. K., Tay, J. H. (1996). Distribution, fractional composition and release of sediment-bound heavy metals in tropical reservoirs. *Water, Air, and Soil Pollution*, 92(3-4), 273-287. <https://doi.org/10.1007/BF00283563>
- Di Rienzo, J.A., Casanoves, F., Balzarini, M.G., Gonzalez, L., Tablada, M., Robledo, Y.C. (2011). InfoStat versión 2011. Grupo InfoStat, Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. URL. <http://www.infostat.com.ar>
- Dixit, S., Hering, J. G. (2003). Comparison of arsenic(V) and arsenic(III) sorption onto iron oxide minerals: implications for arsenic mobility. *Environmental Science and Technology*, 37(18), 4182–4189. <http://dx.doi.org/10.1021/es030309t>
- Duffus, J. (2009). "Heavy metals" a meaningless term? *Pure and Applied Chemistry*, 74(5), 793-807. <https://doi.org/10.1351/pac200274050793>
- Eisler, R. (2000). *Handbook of Chemical Risk Assessment. Health, Hazard to Humans, Plants and Animals*. Boca Raton, Florida: Lewis Publishers.
- El Falaki, K., Perrin, C., Belkesam, L., Peisajovich, A., Martin, G. (1994). Impacto de los detergentes sobre los sedimentos. Movilización de metales. *Tecnología del agua*, 128, 25-31.
- Elliott, H. A., Liberati, M. R., Huang, C. P. (1986). Effect of iron oxide removal on heavy metal sorption by acid subsoils. *Water, Air, and Soil Pollution* 27(3-4), 379–389. <http://dx.doi.org/10.1007/BF00649419>
- Ferguson, J. F., Gavis, J. (1972). A review of the arsenic cycle in natural waters. *Water Res.*, 6(11), 1259–1274. [http://dx.doi.org/10.1016/0043-1354\(72\)90052-8](http://dx.doi.org/10.1016/0043-1354(72)90052-8)
- Fernández J. C., Ruiz Muñoz, F., Galán, E. (1997). Clay mineral and heavy metal distributions in the lower estuary of Huelva and adjacent Atlantic shelf, SW Spain. *Science of the Total Environment*, 198(2), 181-200. [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(97\)05450-8](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(97)05450-8)
- Ford, J., Landers, D., Kugler, D., Lasorsa, B., Allen-Gil, S., Crecelius, E., Martinson, J. (1995). Inorganic contaminants in Arctic Alaskan ecosystems: long-range atmospheric transport or local point sources? *Science of the Total Environment*, 160-161, 323-335. [https://doi.org/10.1016/0048-9697\(95\)04366-9](https://doi.org/10.1016/0048-9697(95)04366-9)
- Förstner, U., Prosi, F. (1979). Heavy Metal Pollution in Freshwater Ecosystems. En Ravera, O. (ed.), *Biological Aspects of Freshwater Pollution* (pp. 129-161). Italia: Ispra. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-023442-7.50011-6>

- Förstner, U., Salomons, W. (1980). Trace metal analysis on polluted sediments. Part I: Assessment of sources and intensities. *Environmental Technology*, 1(11), 494-505. <https://doi.org/10.1080/09593338009384006>
- Förstner, U., Wittmann, G. T. W. (1981). *Metal Pollution in the Aquatic Environment*. Berlin: Springer-Verlag.
- Förstner, U., Ahlf, W., Calmano, W. (1993). Sediment Quality Objectives and Criteria Development in Germany. *Water Science and Technology*, 28(8-9), 307-316.
- Frost, R. R., Griffin, R. A. (1976). Effect of pH on Adsorption of Arsenic and Selenium From Landfill Leachate by Clay Minerals. *Soil Science Society of America Journal Abstract*, 41(1), 53-57.
- Funes Pinter, I., et al. (2017). Arsenic and trace elements in soil, water, grapevine and onion in Jáchal, Argentina. *Science of the Total Environment*, 615, 1485-1498. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.114>
- García, I., Dorransoro, C. (2005). Contaminación por metales pesados. En *Tecnología de Suelos*. Departamento de Edafología y Química Agrícola. Universidad de Granada, Granada.
- GESAMP (1991). Joint Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Pollution. "Statement of the Intergovernmental Meeting of Experts on Land Based Sources of Marine Pollution. World Health Organization.
- Idrovo, A., Manotas, L., et al. (2001). Niveles de mercurio y percepción del riesgo en una población minera aurífera de Guainía (Orinoquia Colombia). *Biomédica*, 21(2), 134-141.
- Iezzi, L. (2011) *Minería aurífera a cielo abierto en Argentina: El caso del emprendimiento Veladero, provincia de San Juan*. (Tesis de grado). Universidad Nacional de La Plata, Facultad de Humanidades y Ciencias de la Educación. Buenos Aires. <http://www.memoria.fahce.unlp.edu.ar/tesis/te.423/te.423.pdf>
- Ip C.C.M., Li X.-D., Zhang G., Wai O.W.H., Li Y.-S (2007). Trace metal distribution in sediments of the Pearl River Estuary and the surrounding coastal area, South China. *Environmental Pollution*, 147(2), 311-323. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2006.06.028>
- Juracic, M., Bauman, I., Pavdic, V. (1982). Are sediments the ultimate depository of hydrocarbon pollutions. *Ves. J. Stud. Pollut. Mar*, 83-87.
- Kennish M. J. (1998). En *Pollution impacts on marine biotic communities*. Nueva Jersey: CRC Press.
- Ley 18.284. Código Alimentario Argentino (1971). Capítulo XII: Artículos: 982 al 1079 - Bebidas Hídricas, Agua y Agua Gasificadas. Argentina. <http://servicios.infoleg.gob.ar/infolegInternet/verNorma.do?id=21841>
- Ley 24.051. Ley de Residuos Peligrosos (1991). Argentina. <http://servicios.infoleg.gob.ar/infolegInternet/verNorma.do?id=450>

- Macklin, M. (1992). Metal pollution of soils and sediments: a geographical perspective; En M. D. Newson (ed.), *Managing the human impact on the natural environment: patterns and processe* (pp. 172–195). London: Belhaven Press.
- Martincic, D., Kwokal, K., Branica, M. (1990). Distribution of zinc, lead, cadmium and copper between different size fractions of sediments I. The Limski Kanal (North Adriatic Sea). *Science of the Total Environment*, 95, 201-215. [https://doi.org/10.1016/0048-9697\(90\)90065-3](https://doi.org/10.1016/0048-9697(90)90065-3)
- Mazzucco, A. (2017) *Análisis del contenido de elementos traza y comportamiento acumulador en plantas de la cuenca del río Jáchal, provincia de San Juan*. (Tesis de grado). Universidad Nacional de Cuyo, Facultad de Ciencias Agrarias. Mendoza, Argentina.
- Miranda, O., Liotta, M., Olguín, A. y Degiorgis, A. (2010). El consumo hídrico de la agricultura y la minería aurífera en la cuenca del Río Jáchal, provincia de San Juan, Argentina. *Aqua-LAC*, 2(1), 68-77.
- Moalla, S. M. N., Awadallah, R. M., Rashed, M. N., Soltan, M. E. (1998). Distribution and chemical fractionation of some heavy metals in bottom sediments of Lake Nasser. *Hydrobiologia*, 364(1), 31-40. <https://doi.org/10.1023/A:1003112008122>
- Montenegro, R. A. (2010). *La cuenca del río Jáchal como mosaico de ecosistemas (san juan, argentina). Elementos para su estudio y la evaluación del impacto ambiental que producen actividades humanas, en particular megaminería a cielo abierto*. Córdoba, Argentina.
- Morillo Aguado, J., Usero García, J., Gracia Manarillo, I. (1997). Contaminación por metales en sedimentos acuáticos. *Tecnología del agua*, 170, 57-60.
- Morris B.L., Laurence A.R.L., Chilton P.J.C., Adams B., Calow R.C. y Klinck B.A. (2003). *Groundwater lands its susceptibility to degradation: A global assessment of the problem and options for management*. Unites Nations Environment Programme. Nairobi, Kenia.
- Murray, K.S. (1996). Statistical comparisons of heavy-metal concentrations in river sediments. *Environmental Geology*, 27(1), 54-58. <https://doi.org/10.1007/BF00770602>
- Nelson, C. H., Lamothe, P. J. (1993). Heavy metal anomalies in the Tinto and Odiel River and estuary system, Spain. *Estuaries and coasts*, 16(3), 496–511. <https://doi.org/10.2307/1352597>
- O'Reilly J., et al. (2010). Arsenic contamination of natural waters in San Juan and La Pampa, Argentina. *Environ Geochem Health*, 32(6), 491-515. <https://doi.org/10.1007/s10653-010-9317-7>
- Páez-Osuna, F. 1996. Fuentes de metales en la zona costera marina. En: A.V. Botello, J.L. Rojas-Galaviz, J.A. Benitez, D. Zárate-Lomelí (eds), *Golfo de México, Contaminación e Impacto Ambiental: Diagnóstico, y Tendencias* (pp. 297-308). Universidad Autónoma de Campeche: EPOMEX Serie científica.
- Patrick W. H. Jr., Verloo M. (1998). Distribution of soluble heavy metals between ionic and complexed forms in a saturated sediment as affected by pH and redox conditions. *Water Science & Technology*, 37(6-7), 165-171.

- Posleman, E., Krause Yornet, M. C. (2006), Impacto de los megaproyectos mineros del Valle del Cura - Informe Socio Económico y Recomendaciones. Coordinador: Ventura Collado, A. Dirección de Minería de San Juan.
- Prego R., Cobelo-García A. (2003). Twentieth century overview of heavy metals in the Galician Rias (NW Iberian Peninsula). *Environmental Pollution*, 121(3), 425-452. [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(02\)00231-2](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(02)00231-2)
- Presley, B. J., Trefry, J. H., Shokes, R. F. (1980). Heavy metal inputs to Mississippi Delta sediments. *Water, Air, and Soil Pollution*, 13(4), 481-494. <https://doi.org/10.1007/BF02191849>
- Prieto García F., Lechuga Vargas M. A., et al. (2005). Acumulación en tejidos vegetales de arsénico, provenientes de aguas y suelos de Zimapán, Hidalgo, México. *Bioagro*, 17(3), 129-135.
- Prieto Méndez, J., González Ramírez, C. A., Román Gutiérrez, A. D., Prieto García, F. (2009). Contaminación y fitotoxicidad en plantas por metales pesados provenientes de suelos y agua. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 10, 29-44.
- Purves, D. (1985). Trace element contamination of the environment. Amsterdam: Elsevier.
- Rainbow, P. S., Phillips, D. J. H. (1993). Cosmopolitan biomonitors of trace metals. *Marine Pollution Bulletin*, 26(11), 593-601. [https://doi.org/10.1016/0025-326X\(93\)90497-8](https://doi.org/10.1016/0025-326X(93)90497-8)
- Rainbow, P. S., Huang, Z. G., Yan, S. K., Smith, B. D. (1993). Barnacles of biomonitors of trace metals in the coastal waters Near Xiamen, China. *Asian Marine Biology*, 10, 109-121.
- Ribeiro Guevara, S., Bubach, D., Arribére, M. (2004). Mercury in Lichens of Nahuel Huapi National Park, Patagonia, Argentina. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 261(3), 679-687. <https://doi.org/10.1023/B:JRNC.0000037113.24485.47>
- Richards, L. A. (1954). Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. *Agricultural Hand Book*. 60. U.S. Dept. of Agriculture, Washington D.C. (160 pp).
- Rosas Rodríguez H. (2001). *Estudio de la contaminación por metales pesados en la Cuenca del Llobregat*. Tesis de Doctorado en Química. Universidad Politécnica de Cataluña. España.
- Rovira, J. V. (1993). *Estudio de la contaminación por metales pesados del Río Jarama*. Tesis Doctoral. Madrid.
- Salomons W., Förstner U. (1984). *Metals in the hydrocycle*. Berlin: Springer-Verlag.
- Salomons, W. (1995). Environmental impact of metals derived from mining activities: Processes, predictions, prevention. *Journal of Geochemical Exploration*, 52(1), 5-23. [https://doi.org/10.1016/0375-6742\(94\)00039-E](https://doi.org/10.1016/0375-6742(94)00039-E)
- Sarokin, D., Schulkin, J. (1992). The role of pollution in large-scale population disturbances. 1: aquatic populations. *Environmental Science and Technology*, 26(8), 1476-1484.

- Slavioli, G. (2007). Hidrometeorología. En Martínez Carretero, E., *Diversidad biológica y cultural de los Altos Andes Centrales de la Argentina: Línea de base de la Reserva de Biosfera de San Guillermo, San Juan* (pp. 63-87). Argentina: EFU.
- Scott H.; Houston C. E. (1977). Measuring irrigation water. Division of Agricultural Sciences, University of California, Leaflet 2956, EE.UU.
- Scout Ch. y Raschid L. (2004). *Wastewater use in irrigated agriculture: Confronting the livelihood and environmental realities*. CAB International, Sri Lanka.
- Silveira Azevedo, M. L., Alleoni Ferracciú, L. R., Guilherme Guimarães, L. R. (2003). Biosolids and heavy metals in soils. *Scientia Agricola*, 60(4), 793-806. <https://dx.doi.org/10.1590/S0103-90162003000400029>
- Singh, A. K., Hasnain, S. I., Banerjee, D. K. (1999). Grain size and geochemical partitioning of heavy metals in sediments of the Damodar River – a tributary of the lower Ganga, India. *Environmental Geology*, 39(1), 90-98. <https://doi.org/10.1007/s002540050439>
- Universidad Nacional de San Juan (2006). *Atlas Socioeconómico de la Provincia de San Juan*. Facultad de Ingeniería, San Juan.
- Vaithyanathan, P., Ramanathan, Al., Subramanian, V. (1993). Transport and distribution of heavy metals in Cauvery river. *Water, Air, and Soil Pollution*, 71(1-2), 13-28. <https://doi.org/10.1007/BF00475509>
- Wood, J. M. (1974). Biological Cycles for Toxic Elements in the Environment. *Science*, 183(4129), 1049-1052.
- Yin, H., Tan, N., Liu, C., et al. (2016). The associations of heavy metals with crystalline iron oxides in the polluted soils around the mining areas in Guangdong Province, China. *Chemosphere*, 161, 181–189. <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.07.018>
- Zechmeister, H. G. (1995). Correlation between altitude and heavy metal deposition in the Alps. *Environmental Pollution*, 89(1), 73-80. [https://doi.org/10.1016/0269-7491\(94\)00042-C](https://doi.org/10.1016/0269-7491(94)00042-C)
- Zhou Q., Zhang J., Fu J., Shi J., Jiang G. (2008). Biomonitoring: AN appealing tool for assessment of metal pollution in the aquatic ecosystem. *Analytica Chimica Acta*, 606(2), 135-150. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2007.11.018>
- Zöllmer, V., Irion, G. (1993). Clay mineral and heavy metal distributions in the northeastern North Sea. *Marine Geology*, 111(3-4), 223-230. [https://doi.org/10.1016/0025-3227\(93\)90132-F](https://doi.org/10.1016/0025-3227(93)90132-F)