

## MODELADO DE CALIDAD DE AGUA EN RÍOS DE MONTAÑA CON IMPACTO ANTRÓPICO. CASO DE ESTUDIO: SIERRA CHICA DE CÓRDOBA, ARGENTINA

Stella Maris FORMICA<sup>1\*</sup>, Gabriela Andrea SACCHI<sup>1</sup>, Verena Agustina CAMPODONICO<sup>2</sup>,  
Andrea Inés PASQUINI<sup>1</sup> y Marcela Alejandra CIOCCALE<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales, Centro de Investigaciones en Ciencias de la Tierra, Universidad Nacional de Córdoba, Avenida Vélez Sársfield 1611, Córdoba, Argentina, X5016GCA

<sup>2</sup> Centro de Investigaciones en Ciencias de la Tierra, Universidad Nacional de Córdoba, Avenida Vélez Sársfield 1611, Córdoba, Argentina, X5016GCA

\*Autor para correspondencia: stellaformica@gmail.com

*(Recibido agosto 2014; aceptado abril 2015)*

Palabras claves: hidroquímica, QUAL2Kw, uso del agua, modelación geoquímica

### RESUMEN

Los modelos de calidad del agua constituyen una valiosa herramienta para analizar el estado ecológico de los sistemas hídricos y predecir la respuesta de estos sistemas frente a diferentes escenarios ambientales. Se presenta aquí un ejemplo de la aplicación del programa de modelado de calidad de agua QUAL2Kw en cuencas hídricas de montaña con impacto antrópico en la provincia de Córdoba, Argentina. Las cuencas de los ríos Ceballos y Salsipuedes drenan la ladera oriental de la Sierra Chica de Córdoba y constituyen la principal fuente de abastecimiento de agua para consumo humano y recreación en las ciudades de la zona. Las aguas son bicarbonatadas cálcicas con una tendencia hacia términos sulfatados cálcico/sódicos aguas abajo. La fuentes naturales de solutos en estas aguas son la meteorización química de silicatos y la disolución de carbonatos. En esta región el desarrollo urbano se ha incrementado notablemente durante los últimos años impactando directamente en la calidad de los recursos hídricos. Elevadas concentraciones de sulfatos, cloruros, sodio, nitratos, fósforo y bacterias coliformes totales y fecales fueron determinadas en las zonas más urbanizadas de la región, evidenciando la clara influencia antrópica sobre el medio natural. El empleo del programa de modelado de calidad de agua QUAL2Kw permitió evaluar cualitativa y cuantitativamente el comportamiento de las variables hidroquímicas mencionadas, atribuidas principalmente a descargas difusas de origen antrópico. Lo anterior logró poner en evidencia la potencialidad del programa para la gestión integrada de ríos en ambientes de montaña.

Key words: hydrochemistry, QUAL2Kw, water management, geochemical modeling

### ABSTRACT

The water quality models are valuable tools to analyze the ecological status of aquatic systems and to predict their response under different environmental scenarios. An example of the application of the water quality modeling QUAL2Kw in polluted mountain watersheds in Córdoba province (Argentina) is presented here. The Ceballos and

Salsipuedes river basins drain the eastern slope of Sierra Chica and constitute the main source of fresh water for human consumption and recreation in several towns around the region. Waters are calcium-bicarbonate type and evolve to sulfated-calcium/sodium type downstream. The natural sources of solutes are the chemical weathering of silicates and the dissolution of carbonates. In the Sierra Chica region the urban development has increased markedly in the last decades. This fact had strongly impacted on the water quality. As a consequence of anthropic factors, high concentrations of sulfates, chlorides, sodium, nitrates, phosphorus, total coliforms and fecal bacteria were recognized. The use of QUAL2Kw software allowed analyzing the spatial variation of the physical-chemical parameters, as well as modeling and quantifying the anthropogenic impact on the water quality, highlighting the potential of geochemical modeling for the integrated management of water resources.

## INTRODUCCIÓN

Una cuenca hídrica constituye la unidad básica de estudio en hidrología. Puede definirse, desde un punto de vista sistémico como un área de tierra donde toda el agua que escurre por su superficie o debajo de ella es drenada por el sistema de corrientes y confluye en un mismo punto (Aparicio Mijares 1999, Davie 2008). Sin embargo, en un sentido más amplio, una cuenca hídrica (o cuenca de drenaje o sistema hídrico) puede ser considerada como un área geográfica donde los procesos naturales y las actividades humanas están íntimamente relacionadas. Por lo anterior, son regiones adecuadas para la realización de estudios geográficos, geoquímicos, hidrológicos y de uso de la tierra que pueden proporcionar información de base para la planificación y gestión integrada de los recursos hídricos (GIRH) (Dasso *et al.* 2014). Se entiende por GIRH “a un proceso que promueve la gestión y el desarrollo coordinados del agua, la tierra y los recursos relacionados, con el fin de maximizar el bienestar social y económico resultante de manera equitativa, sin comprometer la sostenibilidad de los ecosistemas vitales” (GWP 2008). Wiegandt (2008) ha señalado la importancia que reviste el estudio de los sistemas hídricos de montaña, debido a que la mayor proporción de agua de la que dispone la humanidad proviene de regiones montañosas. Se puede definir un río de montaña como aquel que posee un gradiente igual o mayor a 0.002 m/m a lo largo de la mayor parte de la longitud de su cauce (Jarret 1992). Wohl (2010) también señala un número de características que definen un río de montaña, tales como un pronunciado gradiente en el canal, una marcada variabilidad en su régimen hidrológico, una alta variabilidad espacial en la morfología del canal, entre otras.

Desde el punto de vista geoquímico, una cuenca hídrica se comporta como un sistema integrado,

donde cada componente interactúa e influye en el comportamiento de los otros, tanto en el espacio como en el tiempo. El origen natural de los constituyentes químicos del agua está determinado por una serie de factores como el clima y las condiciones hidrológicas de las cuencas de drenaje, la composición química del regolito y la roca subyacente, así como por procesos físicos, químicos y biológicos (Garrels y Mackenzie 1967, Gibbs 1970, Drever 1997, Dupré *et al.* 2003, Depetris *et al.* 2014). Las actividades humanas causan múltiples y complejos cambios en la composición química del agua natural debido al aporte de contaminantes a los sistemas hídricos (Meybeck 2005, Duh *et al.* 2008, Li *et al.* 2009, Kurissery *et al.* 2012, Torres Beristáin *et al.* 2013).

El estudio de situaciones ambientales que generan escenarios adversos ocasionados por el hombre, además de ser una preocupación a nivel global, tiene un marcado enfoque multidisciplinario que permite entender que las alteraciones ocasionadas en una zona en particular, afectarán inevitablemente a otras. Los modelos de calidad de agua constituyen eficaces herramientas para investigar y describir el estado ecológico de los sistemas hídricos, permitiendo predecir la respuesta de éstos frente a alteraciones de algunas de las condiciones ambientales (Holguin González *et al.* 2013). En este sentido, el programa de modelado QUAL2Kw desarrollado por Pelletier *et al.* (2005) es numéricamente preciso y se puede aplicar para simular la calidad de agua de ríos bajo diferentes condiciones ambientales (Park y Lee 2002, Kannel *et al.* 2007, Camargo *et al.* 2010). El seguimiento espacial y temporal de las diversas variables involucradas en el modelado facilita la asignación de fuentes puntuales o difusas de contaminación sobre el cauce principal del río (Pasquini *et al.* 2012).

Se presentan los resultados obtenidos en relación con la aplicación del programa de modelado QUAL2Kw en ríos de montaña antrópicamente

alterados en la Sierra Chica de Córdoba (Argentina), simulando escenarios que explican y cuantifican ese impacto sobre la calidad del agua. La información obtenida permite ejemplificar las capacidades predictivas que brindan las herramientas de modelado geoquímico y su utilidad potencial en el manejo eficiente de los recursos hídricos.

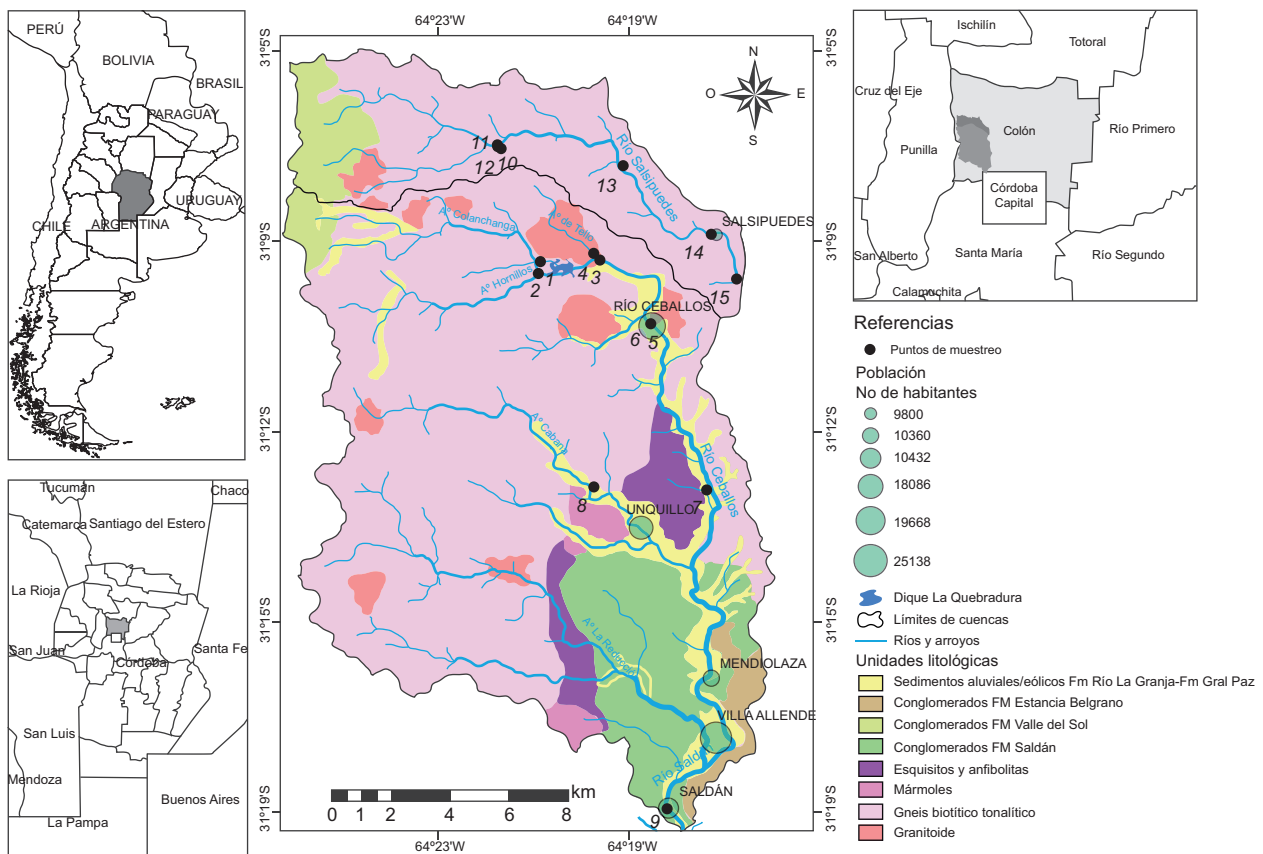
Los sistemas hídricos analizados son los ríos Ceballos y Salsipuedes y sus afluentes, que constituyen la principal fuente de abastecimiento de agua para consumo y recreación para las localidades de este sector de la Sierra Chica (Fig. 1). En esta región la calidad del agua de los ríos se encuentra seriamente comprometida, como consecuencia entre otras razones, de un notable crecimiento demográfico en los últimos años, lo que ha aumentado la generación de residuos urbanos, el volumen de aguas residuales y la problemática de su tratamiento. No se conocen en esta región estudios que analicen la influencia antrópica sobre la química de los ríos y menos aún que analicen la calidad del agua mediante herramientas de modelado geoquímico.

Los objetivos de este estudio son: caracterizar la hidroquímica de los ríos Ceballos y Salsipuedes, determinar las fuentes naturales y antrópicas de los constituyentes disueltos, modelar la calidad del agua a través de la aplicación del programa QUAL2Kw y realizar una comparación de los valores encontrados y modelados con los límites admisibles en la legislación vigente.

**MATERIALES Y MÉTODOS**

**Área de estudio**

La región de estudio está ubicada en la vertiente oriental de la Sierra Chica de Córdoba, entre los 31° 05' y 31° 19' S y 64° 15' y 64° 25' O (Fig. 1). Esta unidad morfoestructural, de orientación norte-sur, constituye el bloque más oriental del sistema de Sierras Pampeanas en Argentina. El río Ceballos nace a 750 msnm, su cuenca tiene una extensión de 213 km<sup>2</sup> siendo los arroyos Los Hornillos y Colanchanga sus principales afluentes en el ambiente serrano. El agua



**Fig. 1.** Ubicación geográfica de las cuencas de los ríos Ceballos y Salsipuedes, características litológicas, ubicación de las estaciones de muestreo de aguas y principales localidades de la región

de estos dos arroyos forma el embalse La Quebrada a partir de una presa artificial. Desde allí nace el río Ceballos, atraviesa la ciudad homónima con 19 668 hab (INDEC 2010) donde cambia su dirección oeste-este a norte-sur y se encauza en un valle estructural de orientación meridiana recibiendo sus principales afluentes desde el oeste, los arroyos Cabana y La Reducción. Finalmente, con el nombre de río Saldán, desagua en la margen izquierda del río Suquia, una de las cuencas hídricas más extensas de la provincia de Córdoba. Aguas abajo de la ciudad de Río Ceballos atraviesa las ciudades de Unquillo (18 086 hab), Mendiolaza (10 360 hab), Villa Allende (25 138 hab) y Saldán (10 432 hab). En la **figura 1** el tamaño de los símbolos representa la densidad demográfica. La cuenca del río Salsipuedes tiene sus nacientes en las proximidades del cerro El Cuadrado a 1250 msnm y abarca una superficie aproximada de 68 km<sup>2</sup>, presenta una forma alargada con el eje mayor en dirección noroeste-sureste. Discurre por el piedemonte de las sierras, atraviesa la localidad de Salsipuedes (9800 hab) y se infiltra antes de alcanzar la llanura (**Fig. 1**).

Geológicamente la región está caracterizada por un basamento plutónico-metamórfico de edad precámbrica (900-1000 Ma) (Kraemer *et al.* 1995), integrado principalmente por esquistos y gneises (**Fig. 1**). Las metamorfitas más abundantes son gneises tonalíticos biotíticos de grado medio a facies de anfíbolita. Con menor desarrollo superficial e intercalado en las litologías anteriores, se reconocen cuerpos de granitoides, mármoles, esquistos y anfíbolitas (Gordillo y Lencinas 1979). La secuencia sedimentaria de la ladera oriental de la Sierra Chica está conformada desde la base por sedimentitas continentales denominadas “estratos rojos” compuestas por conglomerados polimícticos, brechas de matriz arenosa, areniscas, limolitas y pelitas subordinadas, de típico ambiente continental árido (Formación Saldán), de probable edad cretácica tardía. En la parte de las cumbres, en el sector norte y oeste de las cuencas de los ríos Ceballos y Salsipuedes respectivamente, el basamento está cubierto por conglomerados denominados Fangulomerado Valle del Sol asignados al Cretácico tardío - Paleoceno (Gordillo y Lencinas 1979). Sedimentos de rodados y arenas fluviales friables cubren discordantemente al basamento (Formación Estancia Belgrano). Se apoyan, también en discordancia sobre las unidades precedentes, sedimentos loésicos con carbonato de calcio diseminado (Formación General Paz). Culminan la secuencia (Santa Cruz 1978, Cioccale 1999, Candiani *et al.* 2001) sedimentos fluviales y aluviales de derrame de desborde, terrazas, albardones, cauces,

paleocauces y abanicos aluviales de extensa propagación areal, en ocasiones mezclados con el loess (Formación Río La Granja).

Las características climáticas más sobresalientes de la región son la irregular distribución anual de las precipitaciones y la ausencia de verano térmico. Las temperaturas medias anuales varían entre los 14 y los 17 °C, las máximas medias anuales fluctúan entre 20 y 25 °C, mientras que las mínimas medias anuales lo hacen entre 9 y 10 °C (Capitanelli 1979). La precipitación media anual (1960-2013) es de 944 mm. La estación húmeda se extiende de noviembre a abril y concentra más del 80 % de las lluvias anuales (710 mm para el mismo período de registro).

La región de la Sierra Chica ha sufrido el mayor crecimiento demográfico de la provincia de Córdoba en las últimas décadas. De acuerdo con datos del Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (2010), la población de las ciudades de Río Ceballos y Salsipuedes (**Fig. 1**) se incrementó un 28 % y 41 % respectivamente. Por otro lado, la región registra un aumento temporal de la población durante la estación estival, como consecuencia de una importante actividad turística. El agua de los sistemas hídricos estudiados es utilizada principalmente como fuente para consumo humano y recreación. En la ciudad de Río Ceballos existe una planta potabilizadora de agua que se abastece del embalse La Quebrada, ubicado 7 km hacia el oeste de la misma. La región no cuenta con plantas de tratamiento de efluentes, por lo que las descargas de aguas sanitarias sin tratamiento previo junto con las aguas residuales urbanas, se infiltran en pozos ciegos y sangrías.

### Muestreo y determinaciones analíticas

Se realizaron dos muestreos estacionales durante los meses de octubre de 2010 y abril de 2011. En la **figura 1** y el **cuadro I** se encuentra la localización geográfica de los sitios muestreados que se ubicaron a lo largo de los cauces principales y afluentes de los ríos estudiados, mismos que fueron seleccionadas considerando el uso de la tierra, la densidad demográfica y las características geológicas, geomorfológicas e hidrológicas de las cuencas. Se tomaron nueve muestras de agua superficial en la cuenca del río Ceballos y seis en la del río Salsipuedes. El número de cada estación indicada en la **figura 1** corresponde a los sitios de muestreo listados en el **cuadro I**. Se utilizaron técnicas de muestreo y métodos analíticos estándares para todas las determinaciones, tanto en campo como en laboratorio (Eaton *et al.* 1995). *In situ* se midieron: pH (con un pHmetro digital Lutron), temperatura, conductividad eléctrica (CE)

**CUADRO I. UBICACIÓN GEOGRÁFICA, PARÁMETROS FÍSICOS Y QUÍMICOS Y COMPOSICIÓN MAYORITARIA DE LAS MUESTRAS DE AGUA DE LOS RÍOS CEBALLOS, SALSIPUEDES Y SUS AFLUENTES**

Estación N°	Muestra	Río o Arroyo	Latitud	Longitud	Temp. °C	pH	STD	CE	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Balance	
									mg/L									%
									mg/L									%
<b>CUENCA DEL RIO CEBALLOS</b>																		
Fecha: 20/10/2010																		
1	ACOL-1-1	A. Colanchanga	-31.148204°	-64.351893°	19.3	8.0	162	324	190.3	--	1.42	2.06	13	2.2	7.3	42.3	1.7	
2	AHOR-1-2	A. Los Hornillos	-31.151217°	-64.352726°	19.4	8.3	133	266	152.5	--	1.17	1.50	9.9	2.6	5.7	32.1	-0.4	
3	RCEB-1-3	R. Ceballos	-31.147209°	-64.334013°	19.7	8.3	190	379	215.9	--	2.51	3.20	15	2.8	7.9	50.5	2.5	
4	A TEL-1-4	A. Tello	-31.145300°	-64.335617°	19.4	8.2	208	410	226.9	--	1.88	3.56	20	3.3	7.8	53.8	4.9	
5	RCEB-1-5	R. Ceballos	-31.166717°	-64.317950°	22.0	8.1	330	650	274.5	--	12.49	15.12	29	5.3	13.7	80.4	7.8	
6	AMAL-1-6	A. Mal Paso	-31.166839°	-64.318304°	23.1	8.1	380	770	323.3	--	16.06	22.13	38	7.2	15.2	86.6	4.2	
7	RCEB-1-7	R. Ceballos	-31.217844°	-64.300945°	21.1	8.2	420	840	320.9	12.6	21.10	26.02	44	7.6	20	93.2	4.5	
8	ACAB-1-8	A. Cabana	-31.217121°	-64.335814°	21.5	8.1	171	338	165.9	6.6	1.69	3.05	15	3.5	8	42.7	6.7	
9	RCEB-1-9	R. Ceballos	-31.315713°	-64.313302°	25.8	8.2	473	948	334.3	11.4	23.02	70.13	72	9.6	23.9	86.6	4.1	
Fecha: 13/04/2011																		
1	ACOL-2-1	A. Colanchanga	-31.148204°	-64.351893°	19.5	8.0	179	360	194.0	--	4.42	3.09	16	2.2	7.6	40.8	0.8	
2	AHOR-2-2	A. Los Hornillos	-31.151217°	-64.352726°	18.7	8.6	174	350	145.2	3.05	2.28	1.85	12	2.3	5.8	33.8	2.5	
3	RCEB-2-3	R. Ceballos	-31.147209°	-64.334013°	17.7	8.4	169	333	173.2	--	14.4	3.05	18	2.9	6.8	39.1	0.9	
4	A TEL-2-4	A. Tello	-31.145300°	-64.335617°	20.5	8.1	227	451	237.9	--	5.11	1.33	20	3	7.2	52.4	1.2	
5	RCEB-2-5	R. Ceballos	-31.166717°	-64.317950°	20.6	8.0	319	636	262.3	--	23.9	13.78	31	4.8	12.9	73.8	6.9	
6	AMAL-2-6	A. Mal Paso	-31.166839°	-64.318304°	21.9	8.0	455	911	331.8	--	69.3	40.5	49	8.8	17.7	105.0	4.4	
7	RCEB-2-7	R. Ceballos	-31.217844°	-64.300945°	24.9	8.3	404	805	268.4	14.64	66.3	45.44	49	6.4	19.6	92.2	-0.7	
8	ACAB-2-8	A. Cabana	-31.217121°	-64.335814°	24.6	8.1	203	410	173.2	9	5.44	4.4	17	3.1	8.8	50.2	8.9	
9	RCEB-2-9	R. Ceballos	-31.315713°	-64.313302°	24.7	8.4	460	920	287.9	11.4	52	114.5	72	8.1	21.1	82.1	-4.8	
<b>CUENCA DEL RIO SALSIPUEDES</b>																		
Fecha: 20/10/2010																		
10	A1SAL-1-1	A. La Estancia 1	-31.112028°	-64.365222°	18.1	7.9	154	308	167.1	--	1.34	1.55	12	2.2	6.9	39.3	4.8	
11	A2SAL-1-2	A. La Estancia 2	-31.112500°	-64.365222°	18.3	7.7	150	300	175.7	--	1.30	1.74	13	2.1	6.4	39.0	2.1	
12	RSAL-1-3	R. Salsipuedes	-31.113039°	-64.364055°	18.7	8.0	140	300	165.9	--	1.25	1.98	12	2.2	6.6	38.7	3.9	
13	RSAL-1-4	R. Salsipuedes	-31.118520°	-64.326620°	17.8	8.3	167	323	158.6	9	1.69	3.85	14	2.4	7.3	42.4	5.5	
14	RSAL-1-5	R. Salsipuedes	-31.139611°	-64.299389°	18.4	8.3	204	408	176.9	10.2	2.94	5.58	16	2.8	8.6	53.6	8.6	
15	RSAL-1-6	R. Salsipuedes	-31.153198°	-64.291612°	18.0	8.0	273	545	251.3	9	5.32	8.39	24	4.4	12.3	68.1	5	
Fecha: 13/04/2011																		
10	A1SAL-2-1	A. La Estancia 1	-31.112028°	-64.365222°	18.5	7.9	160	321	153	--	2.61	3.48	14	1.8	5.9	39.4	8.1	
11	A2SAL-2-2	A. La Estancia 2	-31.112500°	-64.365222°	20.2	7.7	138	276	151	--	1.62	1.03	12	1.7	6.2	38.5	8.3	
12	RSAL-2-3	R. Salsipuedes	-31.113039°	-64.364055°	20.5	7.6	147	294	188.0	--	1.97	1.51	14	1.8	6.4	41.0	0.7	
13	RSAL-2-4	R. Salsipuedes	-31.118520°	-64.326620°	17.2	7.8	165	330	165	--	2.69	2.77	16	1.9	6.7	42.6	9.3	
14	RSAL-2-5	R. Salsipuedes	-31.139611°	-64.299389°	21.6	8.0	189	378	224	3.05	4.98	4.59	18	2.3	7.3	50.7	-1.3	
15	RSAL-2-6	R. Salsipuedes	-31.153198°	-64.291612°	19.6	8.5	271	542	250	--	15.8	14.36	28	4	12.3	72.1	7.3	

y sólidos totales disueltos (STD) con un electrodo Hach. La alcalinidad (como carbonato de calcio) fue determinada mediante titulación con ácido sulfúrico 1.6 N y el oxígeno disuelto (OD) mediante un

electrodo selectivo acoplado a una estación registradora X-plorer. En cada punto de muestreo se midieron además variables hidráulicas y de morfología del cauce, requeridas para el modelado con el programa



QUAL2Kw, como la velocidad ( $V$ ), la profundidad ( $H$ ), el ancho, la pendiente y las características del lecho. Las muestras para análisis de laboratorio fueron recolectadas con botellas plásticas y transportadas y mantenidas a 4 °C hasta su análisis químico. Los aniones mayoritarios ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ) fueron determinados por cromatografía iónica con detector de conductividad y supresión electroquímica de la conductividad del eluyente en los laboratorios del Centro de Investigaciones en Ciencias de la Tierra (CICTERRA, CONICET-UNC). Los cationes mayoritarios ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ), fósforo total (FT) y bacterias coliformes totales y fecales (CT y CF) se determinaron en laboratorios externos.

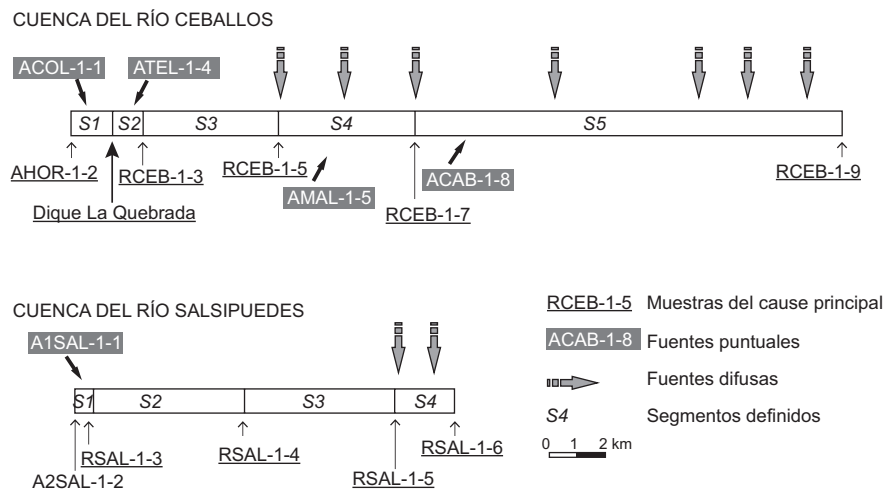
### QUAL2Kw

El programa QUAL2Kw (Pelletier y Chapra 2005), utilizado para modelar la calidad del agua de los ríos estudiados se basa en ecuaciones diferenciales para corrientes unidimensionales asumiendo un flujo estacionario. Este programa permite modelar la contaminación procedente de fuentes puntuales y difusas. Además, incluye para la calibración automática un algoritmo genético que facilita el ajuste de los resultados simulados sobre la base de los datos medidos en el campo. La solución de integración se realiza con el método de Euler. La ecuación y el coeficiente de Manning se emplean para expresar la relación que existe entre la profundidad, la pendiente, el radio hidráulico, la rugosidad, la velocidad y el caudal del cauce. QUAL2Kw considera al río como un conjunto de segmentos interconectados que son interpretados como canales trapezoidales, donde los valores constitutivos de la calidad de agua (por

ejemplo temperatura, pH, CE, OD, nitrógeno de nitratos [ $\text{N-NO}_3^-$ ] y de nitritos [ $\text{N-NO}_2^-$ ], fósforo inorgánico, fósforo total [FT] y bacterias coliformes totales, entre otras variables), se registran para cada segmento, además de las variables hidráulicas ( $Q$ ,  $V$  y  $H$ ) y la morfología del cauce (ancho, pendiente, características del lecho). Un segmento se define como un tramo del río de longitud variable, que puede recibir contaminación de fuentes puntuales y no puntuales o difusas.

La **figura 2** muestra la segmentación de los ríos estudiados y la localización de las fuentes puntuales y las asignadas como difusas. El río Ceballos, con una longitud total de 28.5 km se dividió en cinco segmentos. Los datos de cabecera corresponden al arroyo Los Hornillos (AHOR-1-2) y como fuentes puntuales se asignaron los afluentes al cauce principal como los arroyos Colanchanga (ACOL-1-1), Tello (ATEL-1-4), Mal Paso (AMAL-1-6) y Cabana (ACAB-1-8). El río Salsipuedes, con una longitud total de 13.5 km, se dividió en cuatro segmentos. La cabecera está representada por el arroyo La Estancita 1 (A1SAL-1-1), mientras que como fuente puntual se consideró su afluente, el arroyo La Estancita 2 (A2SAL-1-2).

Para la determinación de fuentes difusas se ensayaron descargas simuladas de contaminantes en las áreas urbanas. Los datos medidos fueron el escenario de partida que describieron las condiciones reales de los sistemas naturales estudiados. Luego se generaron diferentes escenarios de modelado modificando las cargas, las fuentes de contaminación y los caudales de los ríos. También se llevaron a cabo simulaciones considerando datos hidráulicos del dique La Quebrada. Es necesario aclarar que en la época de toma de las



**Fig. 2.** Representación esquemática de los segmentos definidos aguas abajo para la modelación con QUAL2Kw

muestras (octubre de 2010 y abril de 2011), el río Ceballos aguas abajo de la presa, estaba alimentado por filtraciones del embalse, aguas subterráneas y precipitaciones, ya que las compuertas se encontraban cerradas y el nivel del embalse no sobrepasaba el nivel del vertedero.

Dado que el programa considera los patógenos en forma genérica, se incluyeron como dato las bacterias coliformes totales (**Cuadro II**). Para el caso del nitrato, en aquellas muestras cuyas concentraciones fueron inferiores al límite de detección instrumental

(0.5 mg/L), se utilizó este valor para el modelado con QUAL2Kw.

Descripciones más detalladas así como aplicaciones de este programa están disponibles en la bibliografía (Park y Lee 2002, Pelletier *et al.* 2006, Kannel *et al.* 2007, Camargo *et al.* 2010, Pasquini *et al.* 2012).

### Legislación

Con el fin de establecer el estado de calidad del agua, los valores medidos de diferentes variables

**CUADRO II.** VARIABLES BIOGEOQUÍMICAS, NUTRIENTES Y CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS DE LOS RÍOS CEBALLOS, SALSIPUEDES Y SUS AFLUENTES

Estación Núm.	Muestra	Río o arroyo	OD mg/L	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> mg/L	FT mg/L	CT NMP/100 mL	CF	Q m <sup>3</sup> /seg	V m/seg	H m
<b>CUENCA DEL RIO CEBALLOS</b>										
Fecha: 20/10/2010										
1	ACOL-1-1	A. Colanchanga	8.5	<0.5	56	2450	290	0.06	0.21	0.10
2	AHOR-1-2	A. Los Hornillos	8.5	<0.5	45	2400	280	0.46	0.19	0.50
3	RCEB-1-3	R. Ceballos	9.7	<0.5	48	13000	1300	0.05	0.19	0.14
4	ATEL-1-4	A. Tello	7.9	<0.5	nd	3100	250	0.01	0.12	0.07
5	RCEB-1-5	R. Ceballos	8.6	24.7	144	90000	1700	0.02	0.19	0.11
6	AMAL-1-6	A. Mal Paso	7.8	35.4	nd	4500	400	0.01	0.15	0.08
7	RCEB-1-7	R. Ceballos	8.4	50.6	164	8000	1400	0.02	0.22	0.04
8	ACAB-1-8	A. Cabana	10.10	<0.5	nd	2800	150	0.01	0.06	0.12
9	RCEB-1-9	R. Ceballos	8.5	56.5	219	50000	7000	0.05	0.21	0.08
Fecha: 13/04/2011										
1	ACOL-2-1	A. Colanchanga	8.2	<0.5	74.1	2400	2400	0.15	0.24	0.17
2	AHOR-2-2	A. Los Hornillos	9.2	<0.5	nd	nd	nd	0.65	0.19	0.50
3	RCEB-2-3	R. Ceballos	9.2	<0.5	22	50000	50000	0.09	0.22	0.38
4	ATEL-2-4	A. Tello	8.2	<0.5	nd	nd	nd	0.03	0.15	0.10
5	RCEB-2-5	R. Ceballos	8.5	10.7	104	30000	2400	0.05	0.22	0.14
6	AMAL-2-6	A. Mal Paso	8.0	31	nd	nd	nd	0.02	0.16	0.11
7	RCEB-2-7	R. Ceballos	8.7	57.4	78	5000	1300	0.04	0.25	0.06
8	ACAB-2-8	A. Cabana	10.4	<0.5	nd	nd	nd	0.01	0.09	0.15
9	RCEB-2-9	R. Ceballos	10.2	72.5	193	24000	5000	0.09	0.24	0.11
<b>CUENCA DEL RIO SALSIPUEDES</b>										
Fecha: 20/10/2010										
10	A1SAL-1-1	A. La Estancita 1	8.8	<0.5	35	7000	140	0.02	0.11	0.04
11	A2SAL-1-2	A. La Estancita 2	nd	<0.5	nd	500	80	0.03	0.13	0.04
12	RSAL-1-3	R. Salsipuedes	nd	<0.5	nd	nd	nd	0.05	0.19	0.05
13	RSAL-1-4	R. Salsipuedes	nd	<0.5	nd	nd	nd	0.05	0.17	0.10
14	RSAL-1-5	R. Salsipuedes	9.6	1.7	68	5000	1300	0.01	0.14	0.04
15	RSAL-1-6	R. Salsipuedes	8.4	14.9	105	3000	1300	0.01	0.18	0.06
Fecha: 13/04/2011										
10	A1SAL-2-1	A. La Estancita 1	8.7	<0.5	24	170	50	0.06	0.19	0.06
11	A2SAL-2-2	A. La Estancita 2	9.2	<0.5	nd	nd	nd	0.07	0.21	0.06
12	RSAL-2-3	R. Salsipuedes	9.7	<0.5	nd	nd	nd	0.12	0.31	0.07
13	RSAL-2-4	R. Salsipuedes	8.8	<0.5	nd	nd	nd	0.10	0.28	0.12
14	RSAL-2-5	R. Salsipuedes	8.2	3.6	3.5	3000	2400	0.02	0.23	0.06
15	RSAL-2-6	R. Salsipuedes	8.4	17.3	17.3	5000	1300	0.02	0.30	0.06

químicas y biológicas se compararon con los límites permitidos en normativas provinciales, nacionales e internacionales de acuerdo con el uso del recurso: Decreto 415/99 de la Norma Provincial para descarga de efluentes líquidos a cursos de aguas superficiales (DIPAS 1999), Real Decreto 927/1988 (BOE 1988), Decreto 831/93 para agua superficial destinada a la producción de agua potable (Boletín Oficial 1993) y la Directiva 76/160/CEE para uso con fines de recreación (CEE 1976)

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Hidroquímica

Los parámetros físicos y químicos, así como la composición mayoritaria, es decir, la concentración de los iones mayoritarios disueltos ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$ ) (Meybeck 2005) se presentan en el **cuadro I**. Las concentraciones de STD se encuentran dentro del límite establecido para agua no salina (<1000 mg/L). En la cuenca del río Ceballos varían entre 130 y 473 mg/L, mientras que para la cuenca del río Salsipuedes están comprendidos entre 138 y 273 mg/L, con menores concentraciones en los afluentes y, como es de esperar, la concentración aumenta aguas abajo. Las aguas son de ligeramente alcalinas a alcalinas, con pH variable entre 7.6 y 8.6.

Las concentraciones de cationes mayoritarios decrecen en el orden  $\text{Ca}^{+2} > \text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$ . Los dos primeros iones constituyen más del 80 % del total de cationes (en meq/L). Por otro lado el  $\text{HCO}_3^-$  es el anión dominante, superando siempre el 80 % del total de aniones (en meq/L). De acuerdo con su abundancia, los aniones siguen el orden  $\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^-$  en la estación seca (octubre 2010), mientras que en la estación lluviosa (abril 2011) se observa  $\text{HCO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-}$ .

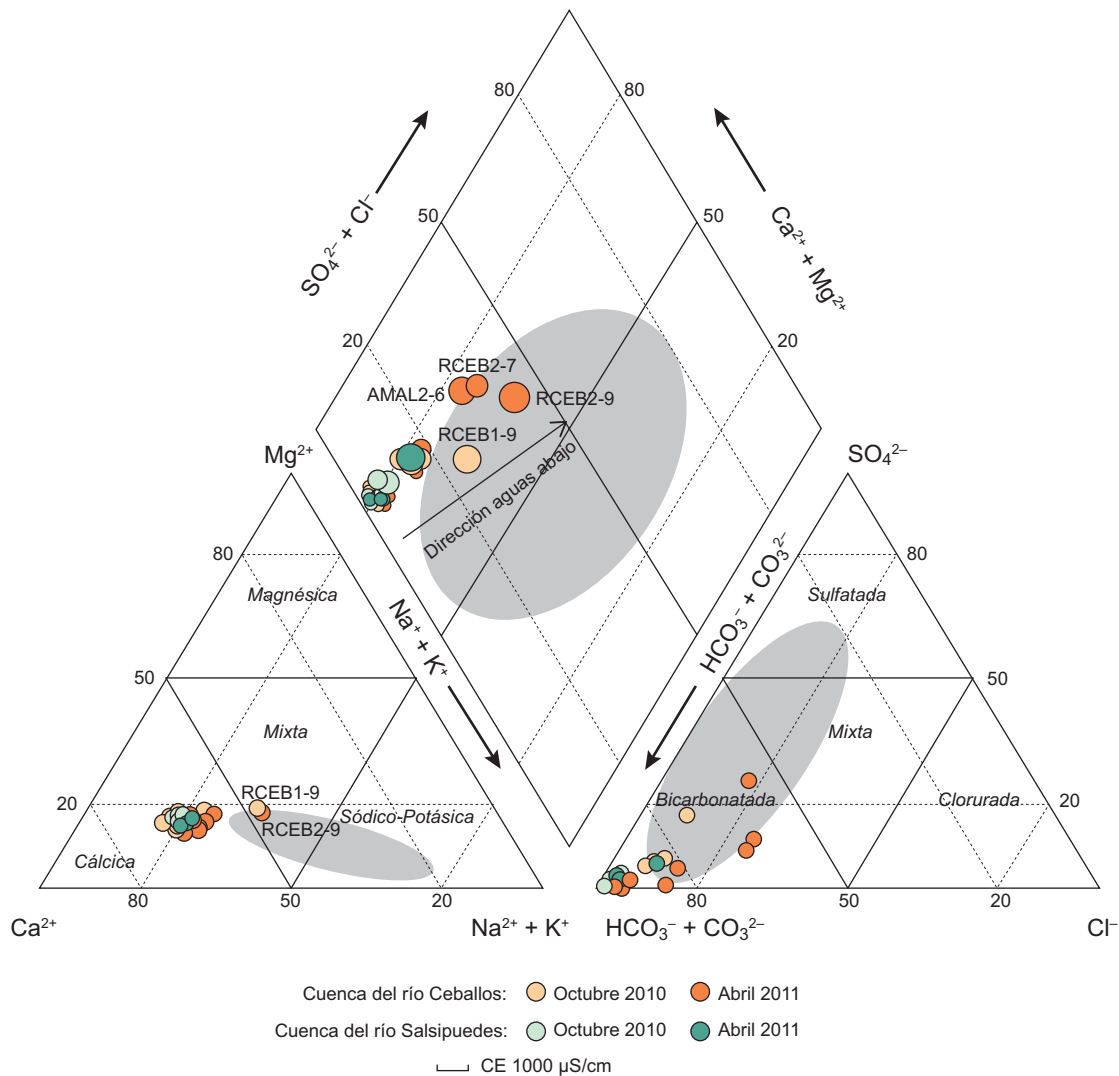
La clasificación química del agua en relación con sus iones mayoritarios se presenta en la **figura 3**. La composición aniónica del agua de los dos ríos estudiados es predominantemente bicarbonatada. Sin embargo, se evidencia un aumento relativo de  $\text{Cl}^-$  y  $\text{SO}_4^{2-}$  en las muestras tomadas en las regiones más urbanizadas de la cuenca del río Ceballos (muestras AMAL-2-6; RCEB-2-7, RCEB-2-9), siendo dicho aumento evidente en la cuenca del río Salsipuedes en la estación lluviosa (muestra RSAL-2-6, **cuadro I**). En cuanto a las concentraciones relativas de los cationes mayoritarios, esto es, su composición catiónica, el agua de los ríos analizados tiene una composición cálcica (**Fig. 3**). En la cuenca del río Ceballos se

observa una menor dispersión que en la composición aniónica, excepto para las muestras RCEB-1-9 y RCEB-2-9 (tomadas en la ciudad de Saldán, **Fig. 1**), que presentan mayores concentraciones de  $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ , siendo las únicas muestras con una composición catiónica mixta. La **figura 3** también incluye, a modo comparativo, el campo composicional (área sombreada) de aguas de la sierra de Córdoba que drenan cuencas graníticas monolitológicas (Lecomte *et al.* 2011), donde se observa una composición de sódico-potásica a mixta.

La composición química del agua estudiada tiene como fuente natural la meteorización química de los aluminosilicatos de las rocas del basamento y la disolución del  $\text{CaCO}_3$  presente en mármoles y sedimentos loésicos. La meteorización como mecanismo de control sobre la química del agua queda reflejada en el diagrama de búmeran de Gibbs (1970) mostrado en la **figura 4**. En cuanto a las muestras de los ríos Ceballos y Salsipuedes, quedan representadas en el miembro final cuya señal química deriva predominantemente de la meteorización de minerales silicatados. A modo de comparación se incluyen en esta figura muestras de agua de vertientes de la Sierra Grande de Córdoba (Pasquini *et al.* 2002), las que presentan menores contenidos de STD y donde la influencia de las precipitaciones sobre la química del agua es más importante que el aporte de la meteorización de las rocas. La alteración de silicatos y la disolución de carbonatos como mecanismos naturales de producción de solutos se evidencian también en la **figura 4b**, que muestra la relación entre alcalinidad y  $\text{Ca}^{+2}$  disuelto en las aguas analizadas. Las muestras de los ríos Ceballos y Salsipuedes presentan una correlación significativa entre ambos parámetros ( $r^2 = 0.92$  y  $0.85$  respectivamente). En dicha figura se incluyen además las rectas teóricas que representan las relaciones molares de la disolución de la calcita ( $y = 0.5x$ ) y la alteración química de la oligoclasa ( $y = 0.1667x$ ), lo que indica que ambos procesos aportan alcalinidad y  $\text{Ca}^{+2}$  disuelto. La composición del agua de otros ríos de las sierras de Córdoba que discurren en cuencas graníticas monolitológicas (**Fig. 4b**) presentan concentraciones menores de estos iones.

Hay estudios que muestran que la concentración de iones en el agua de los ríos puede incrementarse significativamente por la contaminación antrópica (Meybeck 2005). Las sustancias incorporadas en el agua residual doméstica proceden de restos de alimentos, heces humanas y de animales, limpieza casera, limpieza vial, etc. (Chang 2005, Neal *et al.* 2008). Las heces humanas contienen, por ejemplo, entre 5.0 y 7.0 %



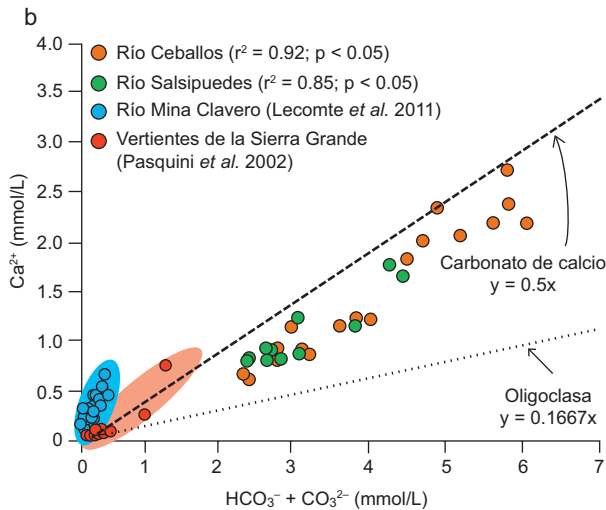
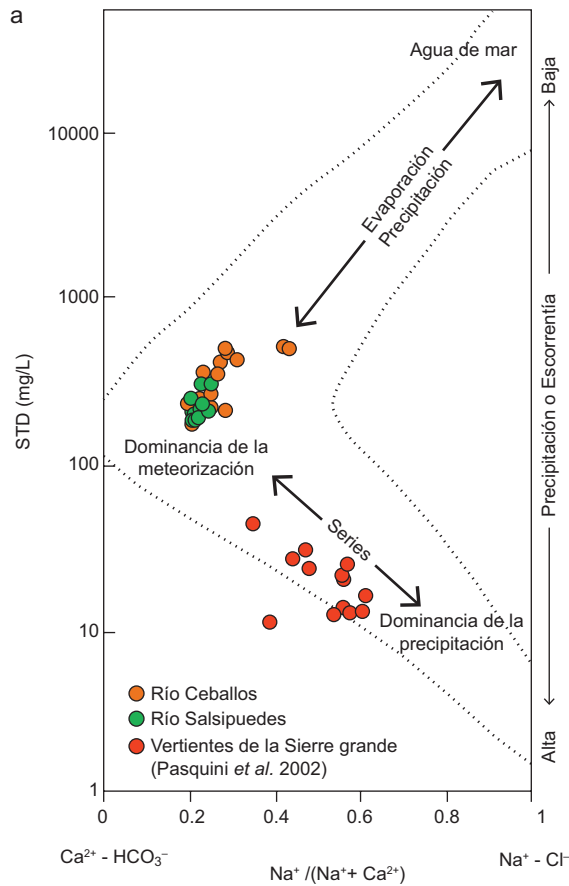


**Fig. 3.** Clasificación química del agua estudiada según el diagrama de Piper (1944)

de nitrógeno, 3.0 y 5.4 % de fósforo ( $P_2O_5$ ) y 1.0 y 2.5 % de K ( $K_2O$ ), en base seca (Gotaas 1956). Los contaminantes pueden ser productos orgánicos, inorgánicos y microorganismos. La contaminación de tipo bacteriológico es debida fundamentalmente a los desechos humanos y animales, ya que los agentes patógenos -bacterias y virus- se encuentran en las heces, orina y sangre, y son el origen de muchas enfermedades y epidemias (como la fiebre tifoidea, la disentería, el cólera, la polio y la hepatitis).

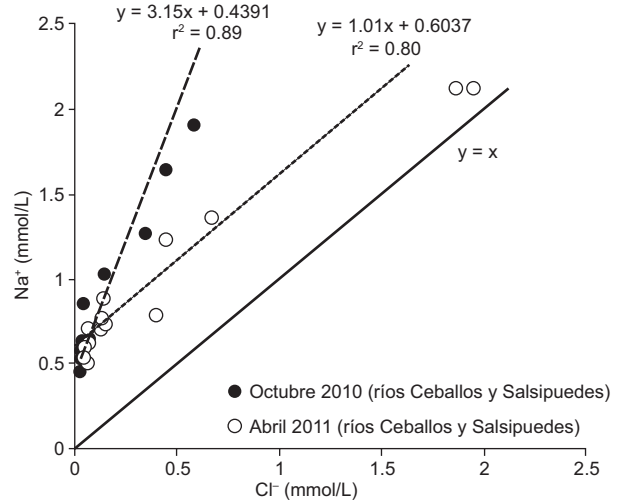
Por otra parte, el agua de lluvia discurre en su totalidad sobre la superficie urbana, arrastrando los residuos orgánicos e inorgánicos depositados en calles, veredas, basureros, etc. Chen *et al.* (2002) han reportado un incremento de  $Cl^-$  y  $SO_4^{2-}$  en el río Changjiang como consecuencia de descargas domésticas. Li *et al.* (2009) señalan también un

significativo incremento de origen antrópico de iones como  $SO_4^{2-}$ ,  $Cl^-$ ,  $K^+$ ,  $Ca^{2+}$  y  $Mg^{2+}$  en la cuenca del río Han (China). En el caso de la provincia de Córdoba, Argentina, pueden mencionarse los estudios de Pesce y Wunderling (2000) y de Pasquini *et al.* (2012), quienes reconocieron el deterioro de la calidad del agua del río Suquía como consecuencia de la influencia antrópica de la ciudad de Córdoba. En las cuencas aquí estudiadas el aumento de concentración de  $Cl^-$  aguas abajo, particularmente en la cuenca del río Ceballos después de la estación estival (muestras de abril 2011, **cuadro I**), respondería al incremento del volumen de aguas residuales domésticas en épocas donde la población aumenta temporalmente como consecuencia de la actividad turística. A modo de ejemplo, la **figura 5** presenta la relación de  $Cl^-$  y  $Na^+$  en estas aguas. Las



**Fig. 4.** Relaciones iónicas indicativas de la señal de la meteorización sobre la composición química del agua estudiada. a) Diagrama discriminante de Gibbs (1970), b) Relación entre alcalinidad y calcio disuelto en el agua estudiada

muestras tienen concentraciones superiores a aquellas correspondientes a la recta  $y = x$ , se observa además que aquellas extraídas en la estación seca (octubre de 2010) presentan una diferente correlación entre sí



**Fig. 5.** Variabilidad del cloruro y del sodio disueltos en los diferentes periodos de muestreo

que las correspondientes a la estación lluviosa (abril 2011). En el primer caso muestran una concentración de  $\text{Na}^+$  tres veces superior a la del  $\text{Cl}^-$  (la pendiente de la curva de regresión es 3.15). Dado que no existen en las cuencas estudiadas rocas evaporíticas, las posibles fuentes de cloruros en el agua son las precipitaciones y las actividades antrópicas. El sodio, por su parte, es aportado por la meteorización de los minerales silicatados de las rocas de la cuenca. La alteración química de las plagioclasas introduce  $\text{Na}^+$  y  $\text{Ca}^{2+}$  en el agua. La siguiente reacción química representa la hidrólisis de una plagioclasa por meteorización química, dando  $\text{Na}$  y  $\text{Ca}$  en solución:  $\text{Na}_2\text{CaAl}_4\text{Si}_8\text{O}_{24(s)} + 4\text{H}^+_{(ac)} + 2\text{H}_2\text{O}_{(l)} \rightarrow 2\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_{4(s)} + 4\text{SiO}_{2(ac)} + 2\text{Na}^+_{(ac)} + \text{Ca}^{2+}_{(ac)}$ . De esta manera, es lógico esperar una relación de  $\text{Na}^+/\text{Cl}^-$  en el agua  $> 1$  en la estación seca como lo muestra la **figura 5**. En la estación lluviosa se evidencia un significativo aumento relativo de  $\text{Cl}^-$  (la pendiente de la recta de regresión es 1.01), atribuible a causas antrópicas.

El **cuadro II** muestra la concentración de nutrientes y parámetros relacionados en el agua estudiada. A partir de las concentraciones determinadas se desprende que el  $\text{NO}_3^-$ , FT, CT y CF demuestran también la influencia antrópica sobre el medio natural. Para el caso del  $\text{NO}_3^-$ , en la zona prístina de ambas cuencas las concentraciones fueron inferiores al límite de detección instrumental (0.5 mg/L, **Cuadro II**), mientras que su concentración aumentó notablemente aguas abajo después de atravesar las áreas urbanas, hasta alcanzar valores superiores a los 50 mg/L en la cuenca del río Ceballos y 15 mg/L en la cuenca del río Salsipuedes. Las CT prueban especialmente el efecto de las regiones urbanizadas, con valores de

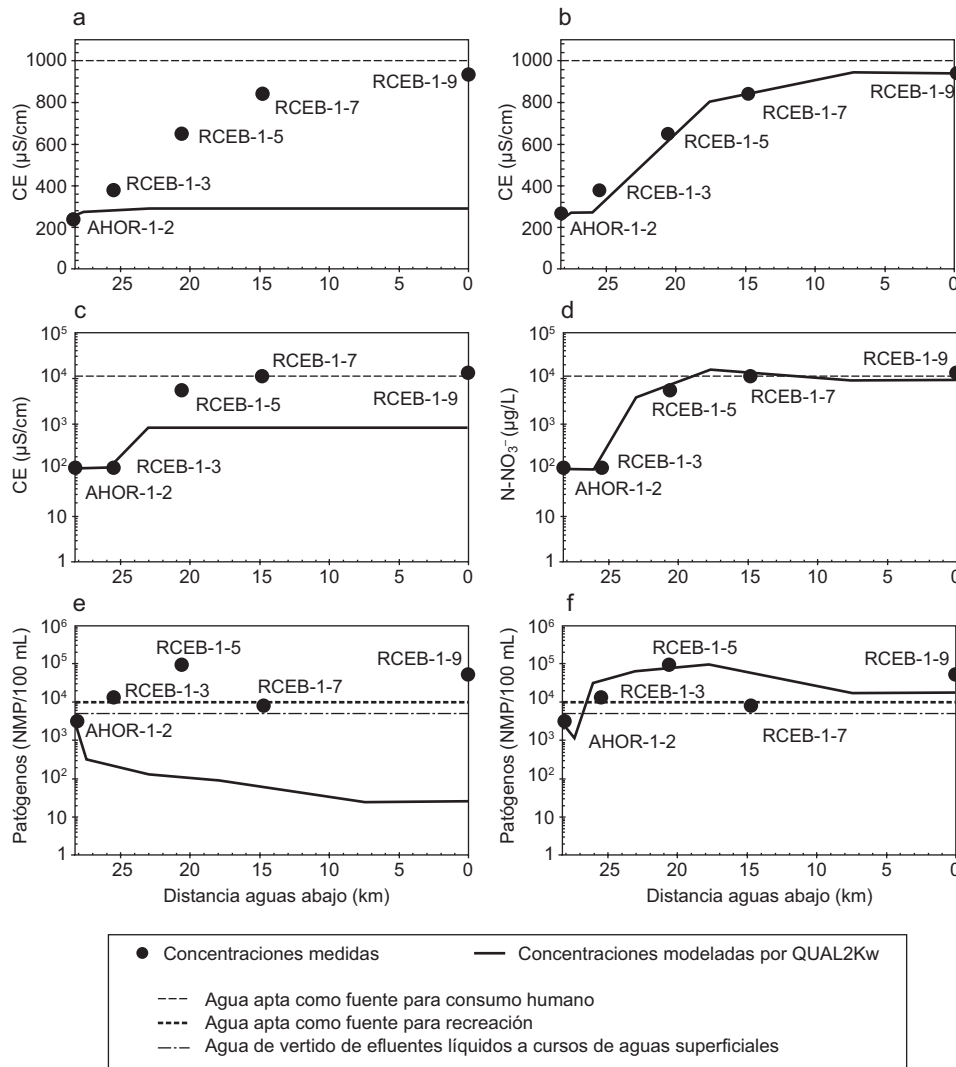
2400 NMP/100 mL en las zonas más prístinas hasta 90 000 NMP/100 mL en la ciudad de Río Ceballos (**Cuadro II**). El comportamiento espacial de estas variables y la influencia antrópica sobre sus concentraciones se modeló con el programa QUAL2Kw y los resultados obtenidos se presentan a continuación.

**Modelado de calidad de aguas**

En la **figura 6** se presentan, a modo de ejemplo, las modelaciones obtenidas en la cuenca del río Ceballos para las variables CE, NO<sub>3</sub><sup>-</sup> (expresado como N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) y patógenos, que son aquellas que presentaron una marcada diferencia entre las concentraciones medidas y las modeladas por el programa.

En las **figuras 6a, 6c y 6e** se muestran las curvas de modelación para la CE, N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> y patógenos

respectivamente, incluyendo las fuentes puntuales relevadas (**Fig. 2**) (situación actual del sistema). Diferentes escenarios fueron simulados para ajustar la curva modelada por el programa a los datos reales. Las **figuras 6b, 6d y 6f** muestran, para las mismas variables, el mejor ajuste obtenido. Para el caso de la CE se simularon descargas difusas que superaron entre el 26 % y el 58 % los valores modelados inicialmente y un incremento del 67 % para la descarga del arroyo Mal Paso (fuente puntual AMAL-1-6) (**Fig. 6b**), situado en la zona urbana de la ciudad de Río Ceballos. De manera similar, las concentraciones de N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> inicialmente modeladas (**Fig. 6c**) se ajustaron simulando fuentes difusas con una carga de este parámetro comprendida entre 68 % y 84 % y de un 67 % para el arroyo Mal Paso (AMAL-1-6)



**Fig. 6.** Modelado de calidad de agua del río Ceballos con QUAL2Kw: a), c) y e) datos de campo; b), d) y f) curva modelada con la simulación de fuentes difusas

(Fig. 6d). Los organismos patógenos presentaron un comportamiento similar a las otras variables analizadas. Las concentraciones medidas en las zonas urbanas del río Ceballos se alejan de los valores inicialmente modelados (Fig. 6e). Las fuentes difusas simuladas en este caso, ajustaron el modelo considerando un incremento del 100 % en esta variable (Fig. 6f).

La figura 7 muestra el modelado realizado en la cuenca del río Salsipuedes para los mismos parámetros. En este caso el mejor ajuste entre los datos medidos y modelados, se reflejó en el área prístina (Figs. 7a, 7c y 7e, muestras A1SAL-1-1, RSAL-1-3, RSAL-1-4). El desajuste se registra en la zona más urbanizada (muestras RSAL-1-5 y RSAL-1-6) (Figs. 7a, 7c y 7e). Los valores de CE para las car-

gas difusas se incrementaron entre un 25 y 45 % respecto a lo modelado inicialmente (Fig. 7b). Para el caso del  $N-NO_3^-$  las cargas difusas simuladas alcanzaron un incremento máximo del 97 % (Fig. 7d), mientras que para los patógenos el incremento fue del 90 %. En el tramo analizado sólo existe una fuente puntual con caudal permanente ubicada a 0.27 km de la cabecera del sistema, cuya descarga no debió modificarse para ajustar los parámetros analizados. El orden de magnitud de las descargas simuladas para ambos sistemas hídricos resultó similar, a pesar de que la población urbana es mayor en la cuenca del río Ceballos. Para evaluar el grado de afectación de las descargas en los ríos sobre la calidad del agua, se recurrió a la legislación vigente relacionada con diferentes usos del recurso. Las

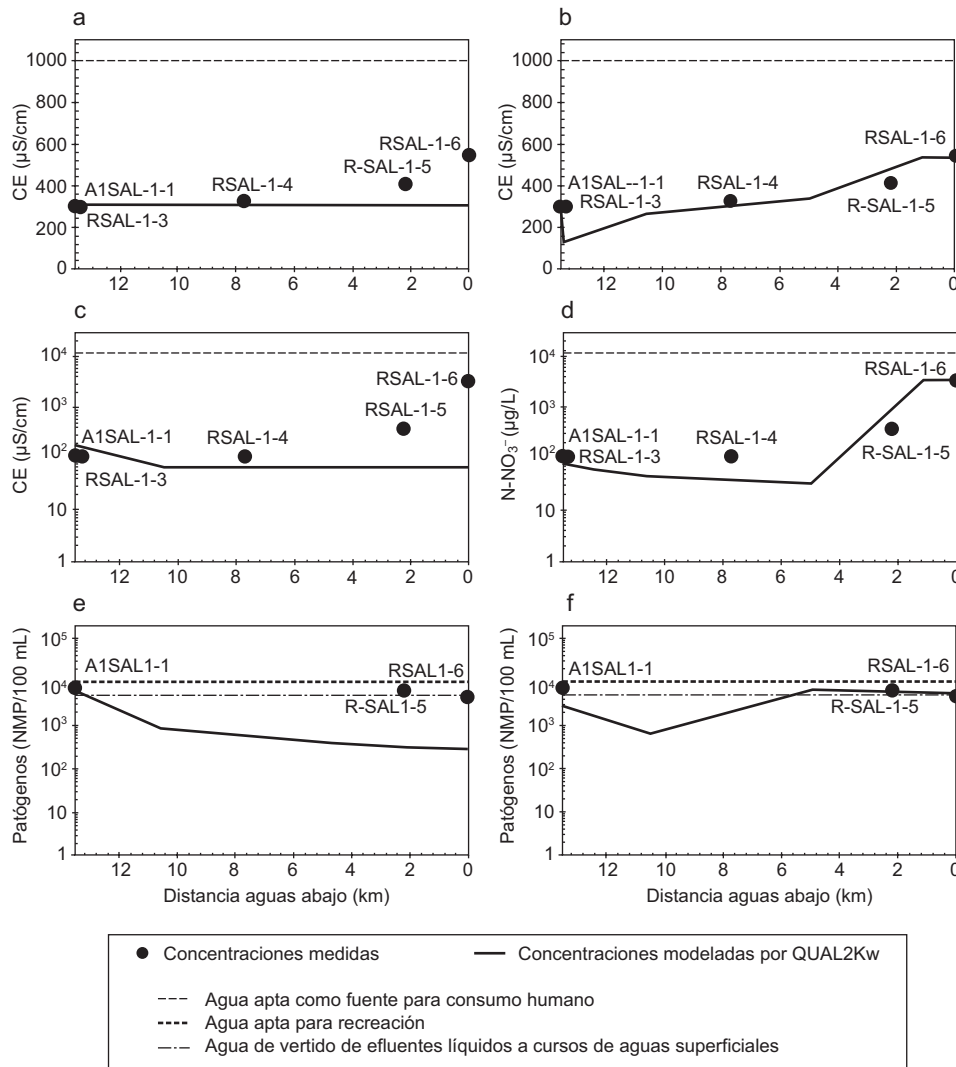


Fig. 7. Modelado de calidad de agua del río Salsipuedes con QUAL2Kw: a), c) y e) datos de campo; b), d) y f) curva modelada con la simulación de fuentes difusas

**figuras 6 y 7** incluyen los valores límites admisibles establecidos en las legislaciones analizadas. Los valores de CE en las cuencas de los ríos Ceballos y Salsipuedes, no exceden el valor guía establecido para la calidad de agua superficial como fuente para la producción de agua potable (**Figs. 6a y 7a** respectivamente). En el caso del  $\text{N-NO}_3^-$ , las concentraciones medidas en la cuenca del río Ceballos, a partir de la muestra RCEB-1-7, se ubicaron en el límite admisible para su uso como fuente para la producción de agua potable (**Fig. 6c**). En la cuenca del río Salsipuedes los valores medidos de este parámetro no exceden los límites admisibles (**Fig. 7c**). Los patógenos excedieron los límites admisibles en las normas para descarga de efluentes líquidos a cursos de agua superficial (5000 NMP/100 mL, **Fig. 6e**) en toda la cuenca del río Ceballos, con excepción de los arroyos de la cabecera donde los contenidos de patógenos son inferiores a lo legislado. En el río Salsipuedes esta variable excedió los valores admitidos sólo en la cabecera, lo cual puede atribuirse a una descarga eventual en dicha zona. En cuanto a la legislación referida para uso recreacional, los patógenos superaron ampliamente los límites admisibles en toda la cuenca del río Ceballos (**Fig. 6e**), mientras en la cuenca del río Salsipuedes son ligeramente inferiores a los límites establecidos (**Fig. 7e**).

Los diversos escenarios simulados y la comparación de los parámetros medidos con los límites establecidos en la legislación vigente analizada, permitió establecer que el río Ceballos se encuentra más comprometido en relación a su uso que el río Salsipuedes, debido a las descargas de origen antrópico. Esta situación resulta al considerar que el incremento en las concentraciones de parámetros en las descargas difusas del río Salsipuedes debieron ser efectuados en los 2 km finales de su recorrido antes de su infiltración (**Fig. 7a, c y e**). Mientras que en el río Ceballos el ejercicio de modelación, requirió la simulación de fuentes difusas a lo largo de 20 km de su recorrido, en coincidencia con las zonas más urbanizadas (**Figs. 6a, c y e**).

## CONCLUSIONES

El agua de los ríos Ceballos y Salsipuedes presenta pH variable entre 7.6 y 8.6 y valores de STD entre 130 y 473 mg/L, con menores concentraciones en los afluentes y mayores concentraciones aguas abajo. La composición química del agua tiene como fuente natural la meteorización química de los aluminosilicatos de las rocas del basamento y la disolución del  $\text{CaCO}_3$

presente en mármoles y sedimentos loésicos en la región. El aumento de las concentraciones de  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ , FT, CT y CF después de atravesar las áreas urbanas evidencia la influencia antrópica sobre el medio natural. Los valores medidos de  $\text{NO}_3^-$  y patógenos (CT y CF) exceden a los legislados respecto al uso del agua para recreación y como fuente para consumo humano en el río Ceballos, mientras que en el río Salsipuedes ambos valores se mantuvieron dentro de los límites.

El modelado realizado mediante el programa QUAL2Kw permitió cuantificar la magnitud de descargas puntuales y difusas. El mayor desajuste entre las curvas de los datos reales medidos y los simulados por el programa, se encontró principalmente en el área urbana, lo cual se atribuye a descargas difusas de origen antrópico. En las zonas urbanas del río Ceballos se estimaron aportes de patógenos cercanos al 100 % respecto a la zona prístina, mientras que en el río Salsipuedes el exceso alcanzó el 90 %.

El uso del modelado geoquímico y de calidad de aguas, como el utilizado en este trabajo, resulta ser una valiosa herramienta para la toma de decisiones en la gestión de los recursos hídricos (planeamiento de la urbanización, mejoras o construcción de plantas de tratamiento de efluentes domiciliarios, supervisión de tomas de agua de río, etc), ya que permite diagnosticar la situación actual de los sistemas y predecir su comportamiento frente a diferentes cambios en los escenarios ambientales.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado con fondos provenientes de un proyecto de investigación de la Secretaría de Ciencia y Técnica de la Universidad Nacional de Córdoba, un PIP (N° 112-200801-03160) del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET, Argentina) y un PICT (N° 2012-275) de la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica (ANPCyT, Argentina). Los datos de precipitaciones fueron proporcionados por la Cooperativa de Obras y Servicios Públicos de la ciudad de Río Ceballos. Las autoras desean agradecer a los geólogos Iván Biscarreta y Melina Kinen por su colaboración en la obtención de los datos de campo. Expresan también su agradecimiento a los dos revisores anónimos cuyos aportes y sugerencias permitieron mejorar sustancialmente el manuscrito. AIP es miembro de la CICyT del CONICET.



## REFERENCIAS

- Aparicio Mijares F.J. (1999). Fundamentos de hidrología de superficie. Limusa, México, 302 pp.
- APHA (1995). Standard methods for the examination of water and wastewater. 19 ed. American Public Health Association. Washington, EUA, 1108 pp
- BOE (1988). Agencia Estatal Boletín Oficial de Estado. Gobierno de España. Reglamento de la Administración Pública del Agua y de la Planificación Hidrológica [en línea]. <http://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-1988-20883>
- Boletín Oficial (1993). Decreto Reglamentario de la Ley 24 051 sobre régimen de desechos peligrosos. Argentina. 23 de abril de 1993 [en línea]. [http://www2.medioambiente.gov.ar/mlegal/residuos/dec831/dec831\\_93.htm](http://www2.medioambiente.gov.ar/mlegal/residuos/dec831/dec831_93.htm)
- Camargo R., Calijuri M., Fonseca A., Aguiar de Couto E. y Dornelas Freitas Machado M. (2010). Water quality prediction using the QUAL2Kw model in a small karstic watershed in Brazil. *Acta Limnol. Bras.* 22, 486-498.
- Candiani J., Stuart-Smith P., Gaido F., Carignano C., Miró R. y López H. (2001). Hoja Geológica 3163-I. Jesús María. Programa Nacional de Cartas Geológicas de la República Argentina 1: 250-000. Servicio Geológico Minero Argentino.
- Capitanelli R.G. (1979). Clima. En: Geografía física de Córdoba (J.B. Vásquez, R.A. Miatello, M.E. Roqué, Eds.). Bolt, Córdoba, Argentina, pp. 45-138
- CEE (1976). Calidad de las aguas de baño. Comunidad Económica Europea [en línea]. <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:31976L0160&from=ES>.
- Chang H. (2005). Spatial and temporal variations of water quality in the Han River and its tributaries, Seoul, Korea, 1993-2002. *Water Air Soil Pollut.* 161, 267-284
- Chen J., Wang F., Xia X. y Zhang L. (2002). Major elements chemistry of the Changjiang (Yangtze river). *Chem. Geol.* 187, 231-255.
- Cioccale M.A. (1999). Investigación geomorfológica de cuencas serranas. Tesis Doctoral. Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Universidad Nacional de Córdoba, Argentina, 121 pp.
- Dasso C.M., Piovano E.L., Pasquini A.I., Córdoba F.E., Lecomte K.L., Guerra L. y Campodónico V.A. (2014). Recursos hídricos superficiales. En: Relatorio del XIX Congreso Geológico Argentino: Geología y Recursos Naturales de la Provincia de Córdoba (R.D. Martino, A.B. Guerreschi, Ed). Asociación Geológica Argentina, pp. 1209-1231.
- Davie T. (2002). Fundamentals of hydrology. Routledge, Londres, Gran Bretaña, 169 pp.
- Depetris P.J., Pasquini A.I. y Lecomte K.L. (2014). Weathering and the riverine denudation of continents. Springer, Holanda, 95 pp.
- DIPAS (1999). Decreto 415/99. Normas para la Protección de los Recursos Hídricos Superficiales y Subterráneos de la provincia de Córdoba. Dirección Provincial de Agua y Saneamiento, 89 pp.
- Drever J. I., (1997). The geochemistry of natural waters. Surface and groundwater environment. Prentice Hall, Nueva Jersey, EUA, 436 pp.
- Duh J., Shandas V., Chang H. y George L. (2008). Rates of urbanization and the resilience of air and water quality. *Sci. Total Environ.* 400, 238-256.
- Dupré B., Dessert C., Oliva P., Goddérís Y., Viers L. F., Millot R. y Gaillardet J. (2003). Rivers, chemical weathering and Earth's climate. *C.R. Geoscience* 335, 1141-1160.
- Garrels R. M. y Mackenzie R. T. (1967). Origin of the chemical composition of some springs and lakes. Equilibrium concepts in natural water systems. *Am. Chem. Soc. Adv. Chem. Ser.* 67, 222- 242.
- Gibbs R. J. (1970). Mechanism controlling world water chemistry. *Science* 170, 1088-1090.
- Gordillo C.E y Lencinas A.N. (1979). Sierras pampeanas de Córdoba y San Luis. En: Segundo Simposio de Geología Regional Argentina. (J.C. Turner, Ed.). Academia Nacional de Ciencias. Córdoba, Argentina, pp. 577-650.
- Gotaas H.B. (1956). Composting. Sanitary disposal and reclamation of organic wastes. World Health Organization. Geneva, Suiza, 205 pp.
- GWP (2008). Principios de gestión integrada de los recursos hídricos. Bases para el Desarrollo de Planes Nacionales. Global water partnership [en línea]. [http://www.gwp.org/Global/GWP-CAM\\_Files/Bases%20para%20el%20Desarrollo%20de%20Planes%20Nacionales.pdf](http://www.gwp.org/Global/GWP-CAM_Files/Bases%20para%20el%20Desarrollo%20de%20Planes%20Nacionales.pdf)
- Holguin González J.E., Everaert G., Boets P., Galvis A. y Goethals P.L.M. (2013). Development and application of a integrated ecological modeling framework to analyze the impact of wastewater discharges on the ecological water quality of rivers. *Environ. Modell. Softw.* 48, 27-36.
- INDEC (2010). Instituto Nacional de Estadísticas y Censos [en línea]. <http://www.censo2010.indec.gov.ar/index.asp>
- Jarrett R.D. (1992). Hydraulics of mountain rivers. En: Channel flow resistance: Centennial of Manning's formula. (B.C. Yen Ed.). Water Resources Publications, Littleton, Colorado, EUA, pp 287-298.
- Kanel S.R. y Pelletier G.J. (2007). Application of automated QUAL-2Kw for water quality modeling and management in the Bagmati River, Nepal. *Ecol. Model.* 202, 503-517.

- Kraemer P.E., Escayola M.P. y Martino R.D. (1995). Hipótesis sobre la evolución tectónica neoproterozoica de las sierras Pampeanas de Córdoba (30° 40' - 32° 40' LS), Argentina. *Rev. Asoc. Geol. Argent.* 50, 47-59.
- Kurissery S., Kanavillil N., Verenitchb S. y Mazumderb A. (2012). Caffeine as an anthropogenic marker of domestic waste: A study from Lake Simcoe watershed. *Ecol. Indic.* 23, 501-508.
- Lecomte K.L., Garcia M.G., Formica S.M. y Depetris P.J. (2011). Hidroquímica de ríos de montaña (Sierras de Córdoba, Argentina). *Elementos mayoritarios disueltos. Latin American Journal of Sedimentology and Basin Analysis* 18, 43-62.
- Li S., Xu Z., Wang H., Wang J. y Zhang Q. (2009). Geochemistry of the upper Han River basin, China. 3: Antropogenic inputs and chemical weathering to the dissolved load. *Chem. Geol.* 264, 89-95.
- Meybeck M. (2005). Global occurrence of major elements in rivers. En: *Surface and ground water, weathering, and soils. Treatise of geochemistry Vol. 5*, (J.E. Drever, Ed.), Elsevier-Pergamon, Oxford, Gran Bretaña, pp 207-223.
- Neal C., Jarvie H., Love A., Neal M., Wickham H. y Harman S. (2008). Water quality along a river continuum subject to point and diffuse sources. *J. Hydrol.* 350, 154-165.
- Park S.S. y Lee Y.S. (2002). A water quality modeling study of the Nakdong River, Korea. *Ecol. Model.* 152, 65-75
- Pasquini A.I., Formica S.M. y Sacchi G.A. (2012). Hydrochemistry and nutrients dynamic in the Suquia River urban catchment's, Córdoba, Argentina. *Environ. Earth Sci.* 65, 453-467.
- Pasquini A.I., Grosso L., Mangeau A. y Depetris P.J. (2002). Geoquímica de ríos de montaña en las Sierras Pampeanas: I. Vertientes y arroyos del batolito de Achala, provincia de Córdoba, Argentina. *Rev. Asoc. Geol. Argent.* 57, 437-444.
- Pelletier G.J. y Chapra S.C. (2005). QUAL2Kw theory and documentation: A modeling framework for simulating river and stream water quality, version 5.1 [en línea]. <http://www.ecy.wa.gov/programs/eap/models.html>.
- Pelletier G.J., Chapra S.C. y Tao H. (2006). QUAL2Kw, a framework for modeling water quality in stream and rivers using a genetic algorithm for calibration. *Environ. Modell. Softw.* 21, 419-425.
- Pesce S.F. y Wunderlin D.A. (2000). Use of water quality indices to verify the impact of Cordoba City (Argentina) on Suquia River. *Water Resour.* 34, 2915-2926
- Piper A.M. (1944). A graphic procedure in the geochemical interpretation of water analyses. *American Geophysical Union* 25, 914-923.
- Santa Cruz J.N. (1978). Aspectos sedimentológicos de las formaciones aflorantes al este de la Sierra Chica, provincia de Córdoba, República Argentina. *Rev. Asoc. Geol. Argent.* XXIII, 232-244.
- Torres Beristáin B., González López G., Rustrián Portilla E. y Houbron E. (2013). Enfoque de cuenca para la identificación de fuentes de contaminación y evaluación de la calidad de un río, Veracruz, México. *Rev. Int. Contam. Ambie.* 29, 135-146.
- Wiegandt E. (2008). *Mountains: Sources of water, sources of knowledge*. Springer, Holanda, 382 pp.
- Wohl E. (2000). *Mountain rivers. Water resources monograph 14*. American Geophysical Union, Washington, D.C., EUA, 320 pp.
- Wohl E. (2010). *Water resources monograph series, Vol. 19*. American Geophysical Union. Washington D.C., EUA, 573 pp.