

**PRIMER CONGRESO IBEROAMERICANO DE PROTECCIÓN, GESTIÓN,  
EFICIENCIA, RECICLADO Y REÚSO DEL AGUA  
PRIMER SEMINARIO DE UNIVERSALIZACIÓN DEL ACCESO AL AGUA APTA  
PARA EL CONSUMO HUMANO**

**MODELADO GEOQUÍMICO Y CALIDAD DE AGUAS EN CUENCAS HÍDRICAS  
CON IMPACTO ANTRÓPICO, SIERRAS CHICAS, CÓRDOBA, ARGENTINA**

*Melina Kinen<sup>1</sup>, Stella M. Formica<sup>1,2</sup>, Gabriela, A. Sacchi<sup>1</sup>, Verena Campodonico<sup>2</sup>, Marcela A. Cioccale<sup>1</sup>, Andrea I. Pasquini<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup> Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Universidad Nacional de Córdoba. Av. Vélez Sarsfield 1611, Córdoba. Argentina. X5016GCA. [sformica@efn.uncor.edu](mailto:sformica@efn.uncor.edu)

<sup>2</sup> Centro de Investigaciones en Ciencias de la Tierra (CICTERRA, CONICET-UNC), Av. Vélez Sarsfield 1611. Córdoba. Argentina. X5016GCA. [apasquini@efn.uncor.edu](mailto:apasquini@efn.uncor.edu)

**RESUMEN:** Las cuencas de los ríos Ceballos y Salsipuedes son típicos sistemas hídricos de montaña desarrollados en las Sierras Chicas de Córdoba. Constituyen la principal fuente de abastecimiento de agua para consumo y recreación para las localidades y municipios de la zona. En esta región el desarrollo urbano se ha incrementado notablemente durante los últimos años, impactando directamente en la calidad del recurso hídrico. En este trabajo se utilizaron técnicas de muestreo, métodos analíticos estándares y modelados geoquímicos para analizar la calidad de las aguas e identificar los factores naturales y antrópicos que determinan su naturaleza y dinámica. El agua del río Ceballos es bicarbonatada-cálcica con una tendencia a sulfatada-mixta en las zonas urbanas, mientras que el río Salsipuedes mantiene su carácter bicarbonatado-cálcico en toda la cuenca. Esta composición tiene como fuente natural la hidrólisis de los silicatos y la disolución de carbonatos. Elevadas concentraciones de sulfato, cloruro, sodio, nitrato, fósforo y bacterias coliformes 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 aguas QUAL2Kw permitió analizar la variación espacial de los parámetros físico-químicos y modelar las probables fuentes de aportes, que corresponden principalmente a fuentes difusas provenientes de efluentes urbanos.

**ABSTRACT:** The Ceballos and Salsipuedes river basins are typical mountain hydrological systems located in the eastern slope of the Sierras Chicas, Córdoba Province, Argentina. They supply fresh water for drinking and recreation to several towns in the region. During the last decades water quality has been severely affected due to a notable population growth in this area. Standard sampling methods and analytical techniques were employed in order to analyze, classify and model water chemistry of Ceballos and Salsipuedes rivers, indentifying natural and anthropogenic factors that control its nature and composition. Ceballos River waters are bicarbonate-calcium type evolving to sulfate-alkali type in urban zones; whereas Salsipuedes River waters maintain its bicarbonate-calcium nature in the whole drainage basin. The hydrolysis of silicates from the regional rocks, and the dissolution of  $\text{CaCO}_3$  from marbles and loessic sediments are the natural sources of solutes in both, Ceballos and Salsipuedes waters. High concentrations of sulphate, chloride, sodium, nitrate, phosphorus and pathogens (coliform bacteria) were measured in urban areas, clearly showing the anthropogenic influence over the natural environment. Ceballos River basin is more polluted than Salsipuedes River. The use of QUAL2Kw modeling software allowed evaluating the spatial variation of water chemistry and modeling the possible sources of pollution that mainly correspond to diffuse sources of urban effluents.

**PALABRAS CLAVES:** Hidroquímica, QUAL2Kw, ríos Ceballos y Salsipuedes

## INTRODUCCIÓN

Los constituyentes químicos de las aguas naturales son el resultado de una serie de factores, como el clima y las condiciones hidrológicas de las cuencas de drenaje, la composición química del regolito y la rocas subyacente, la actividad biológica; así como también de una serie de procesos físicos, químicos, y biológicos. Desde el punto de vista geoquímico, una cuenca fluvial 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. Las actividades humanas causan, asimismo, múltiples y complejos cambios en la composición química de las aguas naturales debido al aporte de contaminantes a los sistemas hídricos (por ej., Meybeck, 2005; Li *et al.*, 2009).

Este trabajo forma parte de un estudio integral que se está llevando a cabo en las cuencas hídricas de la vertiente oriental de las Sierras Chicas de Córdoba, con el fin último de analizar la hidrogeoquímica de estos sistemas y determinar la calidad de los recursos hídricos. Los sistemas hídricos de los ríos Ceballos y Salsipuedes constituyen la principal fuente de abastecimiento de agua para consumo y recreación para las localidades de la zona. En esta región la calidad del recurso hídrico se encuentra seriamente comprometida, como consecuencia, entre otras razones, de un notable crecimiento demográfico en las últimas décadas. Los objetivos propuestos en este trabajo son: definir la calidad del agua de los ríos Ceballos y Salsipuedes, determinar las fuentes naturales y antrópicas de los constituyentes disueltos y analizar la dinámica actual de los sistemas modelando las fuentes de contaminación.

Los modelos de calidad de aguas constituyen herramientas que ayudan a la toma de decisiones para planificar acciones de preservación de la calidad del recurso frente a un uso inadecuado. El programa QUAL2Kw desarrollado por Pelletier *et al.* (2006) es numéricamente preciso y de aplicabilidad para modelar la calidad del agua de ríos con diferentes condiciones ambientales. El seguimiento espacial y temporal de las variables involucradas en el modelo, facilita la identificación de fuentes puntuales o difusas de contaminación típicas en ambientes urbanizados (por ej., Pasquini *et al.*, 2012). A través de este programa se ha simulado y modelado el comportamiento de diferentes variables físico-químicas y biológicas en las cuencas de los ríos Ceballos y Salsipuedes. La información generada puede resultar de utilidad para una eficiente gestión de los recursos hídricos en la región.

## CARACTERÍSTICAS DEL AREA DE ESTUDIO

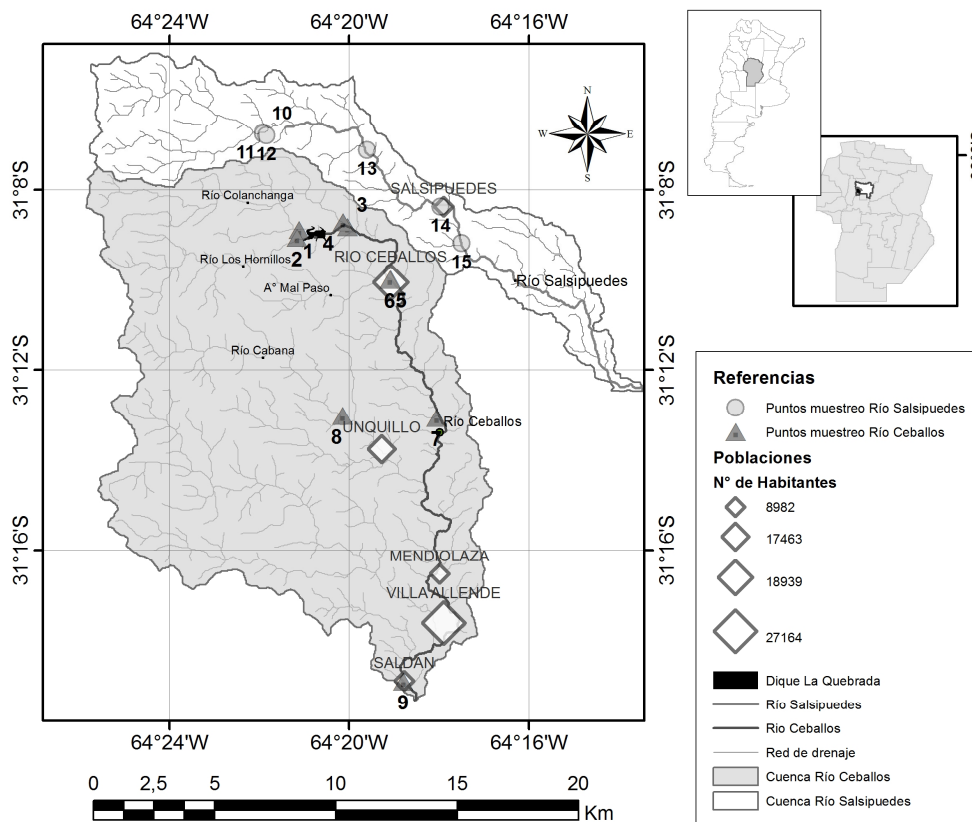
La región de estudio está ubicada sobre la pendiente oriental de la Sierras Chicas de Córdoba, entre los 64° 15' y 64° 25' O y 31° 06' y 31°18' S. (Figura 1). Esta unidad morfoestructural, de orientación norte-sur, constituye el bloque más oriental del sistema de Sierras Pampeanas.

El Río Ceballos nace en la ladera media de las Sierras Chicas a aproximadamente 1.000 m s.n.m. Sus principales afluentes serranos son los arroyos Los Hornillos y Colanchanga. El río Ceballos fluye con dirección este, hasta la localidad homónima, donde recibe las aguas de los arroyos Tello y Mal Paso; luego cambia su curso hacia el sur donde recibe sus principales afluentes desde el oeste, los arroyos Cabana y Villa Allende. A partir de la unión con el arroyo Villa Allende, toma el nombre de Río Saldán, recorre unos 4 km y desagua en la margen izquierda del río Suquía. La cuenca del río Salsipuedes, de menor extensión, tiene sus nacientes en las proximidades de Cerro El Cuadrado a 1.250 m s.n.m., su cuenca presenta una forma alargada con el eje mayor de dirección noroeste-sureste. Discurre por el piedemonte de las sierras, pasando por la localidad homónima y se infiltra antes de alcanzar la llanura.

Geológicamente la región está caracterizada por un basamento cristalino dominante en el área serrana y sedimentos psamítico-psefíticos y loésicos en el piedemonte proximal. El primero consiste en un complejo ígneo metamórfico que data del Cámbrico compuesto por gneis, tonalitas, esquistos, anfíbolitas y mármoles (Gordillo y Lencinas, 1979; Lyons *et al.*, 1997), instruido por

granitoides cámbricos y devónicos. El piedemonte está integrado por afloramientos de conglomerados, gravas y limos mesozoicos y cenozoicos de origen fluvial que apoyan discordantemente sobre el basamento y gradan hacia el este a una llanura fluvio-eólica conformada por depósitos cuaternarios fluviales y loésicos.

Las características climáticas más sobresalientes de la región son la irregular distribución anual de las precipitaciones y la ausencia de verano térmico. Las Sierras Chicas y su piedemonte oriental, presentan condiciones térmicas que responden al incremento de altura. Las temperaturas medias anuales varían entre los 17°C y 14°C, las máximas medias anuales fluctúan entre 20°C y 25°C, mientras que las mínimas medias anuales lo hacen entre 10°C y 9°C (Capitanelli, 1979). La estación húmeda se extiende de noviembre a marzo y concentra más del 80% de las lluvias, mientras la estación seca abarca los meses de abril a octubre. La precipitación histórica mensual (1960-2011) varía entre 120 mm durante el período húmedo a 10 mm en la estación seca. La precipitación media anual promedio para ese período de registro fue de 936 mm (Cooperativa de Aguas, Obras y Servicios Públicos de Unquillo (<http://www.unquillomendiola.com.ar/datos-tecnicos-de-interes/precipitaciones-rio-ceballos.html>)).



**Figura 1.--** Ubicación geográfica de las cuencas de los ríos Ceballos y Salsipuedes. Se indica la ubicación de las estaciones de muestreo y se representa la densidad demográfica de las principales localidades.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Se tomaron muestras de agua superficial en las cuencas de los ríos Ceballos y Salsipuedes. Se extrajeron un total de quince muestras; nueve pertenecientes a la cuenca de río Ceballos y seis a la cuenca del Salsipuedes. La ubicación geográfica de los puntos de muestreo se presenta en la Figura 1. Los muestreos se realizaron en diferentes épocas del año con el fin de analizar la

variabilidad estacional de los constituyentes disueltos. En este trabajo se analizan las muestras tomadas en el mes de octubre del 2010, dado que las condiciones hidrológicas responden directamente al régimen climático y por lo tanto representan el caudal de base. En estas condiciones, la concentración de las variables analizadas es más elevada. En todos los puntos de muestreo se realizaron determinaciones *in situ* correspondientes a pH, conductividad eléctrica (CE), sólidos totales disueltos (STD), temperatura del agua (T°), oxígeno disuelto (OD) y alcalinidad (como CaCO<sub>3</sub>), mediante métodos potenciométricos y volumétricos estándares (Eaton *et al.*, 1995). Las muestras fueron filtradas en campaña con filtros de celulosa de 0,22 µm de tamaño de poro y almacenadas y refrigeradas para las posteriores determinaciones analíticas. En laboratorio se determinaron cloruros (Cl<sup>-</sup>), sulfatos (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>), nitrógeno de nitratos (N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) y fósforo total (PT) por métodos volumétricos y espectrofotométricos estándares. Cationes mayoritarios fueron determinados por espectrometría de masa con plasma inductivamente acoplado (ICP-MS). La determinación de los organismos patógenos (coliformes totales) se realizó mediante la estimación por el Método del Número más Probable (NMP). A fin de determinar la situación ambiental de los ríos estudiados, se analizaron algunas variables en relación con los valores límites máximos admisibles establecidos en la legislación vigente: Decreto 415/99 de la Norma Provincial para descarga de efluentes líquidos a cursos de aguas superficiales (<http://www.cba.gov.ar/imagenes/fotos/DECRETO415-99.pdf>), Real Decreto 927/1988 para fuentes de agua para consumo humano ([http://www.boe.es/boe/consultas/bases\\_datos/doc.php?id=BOE-A-1988-20883](http://www.boe.es/boe/consultas/bases_datos/doc.php?id=BOE-A-1988-20883)) y la Directiva 76/160/CEE para recreación (<http://www.cma.gva.es/admon/normativa/legislacion/legis/001019000388.html>).

Para modelar la química del agua mediante el programa QUAL2Kw (Pelletier *et al.*, 2006) se consideraron variables físico-químicas y biológicas (pH, CE, T°, N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, alcalinidad, PT, OD y patógenos) y variables hidráulicas (caudal -Q-, velocidad -V- y profundidad del cauce -H-), determinadas para cada tramo definido sobre el cauce principal de los ríos Ceballos y Salsipuedes. Los afluentes fueron considerados, a los fines del modelado, como fuentes puntuales. Se consideraron además datos de profundidad del cuerpo de agua y profundidad del dique La Quebrada, ubicado en la cuenca alta del río Ceballos (Figura 1).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 1- HIDROQUÍMICA

En las Tablas 1 y 2 se presenta la composición mayoritaria de agua y los principales parámetros físico-químicos y biológicos determinados en las aguas estudiadas. Las concentraciones de STD, se encuentran dentro del límite establecido para aguas no salinas (<1000 mg/L). En la cuenca del río Ceballos varían entre 133 mg/L y 473 mg/L, mientras que para la cuenca adyacente de Salsipuedes los límites son 140 mg/L y 273 mg/L. Las aguas son ligeramente alcalinas a alcalinas con pHs variables entre 7,7 y 8,3. Los valores de CE se encuentran dentro del rango comprendido para aguas naturales (por ej., Chapman, 2003) y, como es lógico esperar, se correlacionan con el aumento de iones mayoritarios y STD aguas abajo (Tablas 1 y 2). La clasificación geoquímica de Piper (1944) indica que la composición aniónica de los ríos estudiados es bicarbonatada en las dos cuencas, mientras la composición catiónica evidencia una dominancia de Ca<sup>+2</sup>. En la cuenca del río Ceballos, se observa un aumento relativo de Na<sup>+</sup> y K<sup>+</sup> y una tendencia hacia términos sulfatados aguas abajo. El río Salsipuedes mantiene un carácter bicarbonatado-cálcico en toda la cuenca.

La meteorización química de los silicatos y la disolución de carbonatos constituye la principal fuente natural de solutos en las aguas estudiadas (Biscarreta, 2012; Kinen, 2012). Diversas relaciones químicas, como la variación de HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> / SiO<sub>2</sub> y Mg<sup>2+</sup>+Ca<sup>2+</sup> / Na<sup>+</sup>+K<sup>+</sup>, indican claramente la señal de las rocas sobre la química de estas aguas. La variación de la alcalinidad en relación con los contenidos de Ca<sup>2+</sup> disuelto pone también de manifiesto que la hidrólisis de las plagioclasas y la disolución de CaCO<sub>3</sub> son los procesos de meteorización dominantes. Biscarreta (2012) y Kinen (2012) analizaron la concentración de elementos traza disueltos en estos ríos y establecieron

también la influencia de los sedimentos loésicos como fuente de solutos en la cuenca media y baja del río Ceballos. El aumento de  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$  y  $\text{SO}_4^{2-}$  (Tabla 1) en las zonas urbanas de la cuenca del río Ceballos puede atribuirse a fuentes de origen antrópico, como efluentes de servicio.

Con respecto a la concentración de nutrientes, Chapman (2003) señala que, en general, las aguas naturales sin polución presentan concentraciones de  $\text{N-NO}_3^-$  inferiores a 5 mg/L; mientras que en relación al PT, Wetzel (1992) establece un valor de 0,05 mg/L como límite superior para aguas prístinas. En el área de estudio, las concentraciones medidas de estos nutrientes exceden estos valores en las zonas urbanas de la cuenca del río Ceballos (Tabla 2), y en menor medida en el río Salsipuedes, que presenta una densidad demográfica menor en relación a las demás localidades (Figura 1). Las principales fuentes de aporte de  $\text{N-NO}_3^-$  son las excretas animales, desechos municipales, domésticos y de transporte. Respecto del PT, la descomposición de materia orgánica se considera la principal fuente natural, ya que no existen en la zona de estudio rocas fosfatadas. El aumento de las concentraciones de PT en las regiones urbanas de las cuencas estudiadas (Tabla 2) se atribuye además a efluentes domésticos.

Los organismos patógenos (Tabla 2) llegan a los cursos de agua en la zona de estudio a través de las descargas de aguas residuales sin tratar o con tratamiento deficiente, escorrentías provenientes de los corrales de ganado y áreas urbanas. Su presencia en el cuerpo de agua constituye un indicador de contaminación bacteriana reciente (Rivera *et al.* 2010), por lo que aguas aún con bajos niveles de patógenos son consideradas como contaminadas (USEPA, 1986).

Los valores de OD no presentan una variación significativa en las cuencas estudiadas (Tabla 2) y son indicativos de una buena disponibilidad de oxígeno en el cuerpo de agua. Por ejemplo, en un ambiente con descargas de efluentes cloacales con tratamiento deficiente, como la planta de tratamiento Bajo Grande de la ciudad de Córdoba, el OD alcanza valores del orden de 4,0 a 6,0 mg  $\text{O}_2/\text{L}$  (Pesce y Wunderlin, 2000; Pasquini *et al.*, 2012), muy inferiores a los determinados aquí.

**Tabla 1.-** Composición mayoritaria del agua de los ríos Ceballos y Salsipuedes. Las concentraciones están expresadas en mg/L. B: Balance en %. El N° de estación (N° est.) corresponde a las estaciones indicadas en la Figura 1.

N° est.	Río o arroyo	Muestra	$\text{HCO}_3^-$	$\text{CO}_3^{2-}$	$\text{Cl}^-$	$\text{SO}_4^{2-}$	$\text{Na}^+$	$\text{K}^+$	$\text{Mg}^{+2}$	$\text{Ca}^{+2}$	B
1	A° Colanchara	ACOL1-1	190,3	-	1,4	2,1	13,1	2,2	7,3	42,3	1,7
2	A° Los Hornillos	AHOR1-2	152,5	-	1,2	1,5	9,9	2,6	5,7	32,1	-0,4
3	R. Ceballos	RCEB1-3	215,9	-	2,5	3,2	14,7	2,8	7,9	50,5	2,5
4	A° Tello	ATEL1-4	226,9	-	1,9	3,6	19,6	3,3	7,8	53,8	4,9
5	R. Ceballos	RCEB1-5	274,5	-	12,5	15,1	29,1	5,3	13,7	80,4	7,8
6	A° Mal Paso	AMAL1-6	323,3	-	16,1	22,1	37,7	7,2	15,2	86,6	4,2
7	R. Ceballos	RCEB1-7	320,9	12,6	21,1	26,0	43,6	7,6	20,0	93,2	4,5
8	A° Cabana	ACAB1-8	135,9	6,6	1,7	3,1	14,5	3,5	8,0	42,7	6,7
9	R. Ceballos	RCEB1-9	224,6	11,4	23,0	70,1	72,1	9,6	23,9	86,6	4,1
10	Afuente 1	ASAL1-1	167,1	-	1,3	1,6	12,4	2,2	6,9	39,3	4,8
11	Afluente 2	ASAL1-2	175,7	-	1,3	1,7	11,9	2,2	6,6	38,7	2,1
12	R. Salsipuedes	RSAL1-3	165,9	-	1,3	2,0	13,2	2,1	6,4	39,0	3,9
13	R. Salsipuedes	RSAL1-4	158,6	9,0	1,7	3,9	14,4	2,4	7,3	42,4	5,5
14	R. Salsipuedes	RSAL1-5	176,9	10,2	2,9	5,6	16,1	2,8	8,6	53,6	8,6
15	R. Salsipuedes	RSAL1-6	251,3	9,0	5,3	8,4	23,6	4,4	12,3	68,1	5,0

**Tabla 2.-** Parámetros físico-químicos e hidráulicos determinados en los ríos Ceballos y Salsipuedes. LD: límite de detección, *n.dt.*: no determinado, Q: caudal, V: velocidad, H: profundidad. El N° de estación (N° est.) corresponde a las estaciones indicadas en la Figura 1 (ver nombre de los ríos o arroyos en la Tabla 1.

N° est.	Muestra	pH	STD (mg/L)	CE ( $\mu\text{mS/cm}$ )	N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/L)	PT (mg/L)	OD (mg/L)	Patógenos (NMP/100 ml)	Q m <sup>3</sup> /s	V m/s	H m
1	ACOL1-1	8,0	162	324	<LD	0,056	8,5	2400	0,08	0,14	0,15
2	AHOR1-2	8,3	133	266	0,1	<i>n.dt.</i>	<i>n.dt.</i>	<i>n.dt.</i>	0,38	0,11	0,48
3	RCEB1-3	8,3	190	379	0,1	0,048	9,7	13000	0,05	0,14	0,14
4	ATEL1-4	8,2	208	410	<LD	<i>n.dt.</i>	<i>n.dt.</i>	<i>n.dt.</i>	0,01	0,09	0,08
5	RCEB1-5	8,1	330	650	5,6	0,144	8,6	90000	0,03	0,14	0,12
6	AMAL1-6	8,1	380	770	8,0	<i>n.dt.</i>	<i>n.dt.</i>	<i>n.dt.</i>	0,01	0,15	0,08
7	RCEB1-7	8,2	420	840	11,4	0,164	8,4	8000	0,02	0,15	0,05
8	ACAB1-8	8,1	171	338	<LD	<i>n.dt.</i>	<i>n.dt.</i>	<i>n.dt.</i>	0,01	0,07	0,13
9	RCEB1-9	8,2	473	948	12,7	0,219	8,5	50000	0,02	0,15	0,09
10	ASAL1-1	7,9	154	308	<LD	0,035	8,8	7000	0,02	0,11	0,04
11	ASAL1-2	7,7	150	300	0,1	<i>n.dt.</i>	<i>n.dt.</i>	<i>n.dt.</i>	0,04	0,13	0,04
12	RSAL1-3	8,0	140	300	0,1	<i>n.dt.</i>	<i>n.dt.</i>	<i>n.dt.</i>	0,05	0,19	0,05
13	RSAL1-4	8,3	167	323	0,1	<i>n.dt.</i>	<i>n.dt.</i>	<i>n.dt.</i>	0,05	0,17	0,10
14	RSAL1-5	8,3	204	408	0,4	0,068	9,6	5000	0,01	0,14	0,04
15	RSAL1-6	8,0	273	545	3,4	0,105	8,4	3000	0,01	0,18	0,06

## 2-MODELADO CON QUAL2Kw Y CALIDAD DE LAS AGUAS

Con el fin de analizar el comportamiento espacial de los parámetros físico-químicos y biológicos (Tablas 1 y 2) indicativos de la calidad de las aguas se utilizó el programa de modelado QUAL2Kw (Pelletier et al., 2006). Los parámetros hidráulicos utilizados para alimentar el modelo se presentan en la Tabla 2. Los resultados obtenidos a través del modelado para los ríos Ceballos y Salsipuedes se presentan en las Figuras 2 y 3 respectivamente, donde se grafican las curvas modeladas por el programa, sobre la base de los datos medidos (curva modelada sin calibración: CMSC) y las correspondientes a la calibración realizada simulando diferentes entradas al sistema a través de fuentes difusas y puntuales (curva modelada con calibración: CMCC). Numerosas simulaciones de entradas difusas (en las zonas urbanas y suburbanas) fueron llevadas a cabo a fin de ajustar los parámetros medidos a la variabilidad modelada por el programa. De esta forma se cuantificó la magnitud de las cargas de contaminantes que aportarían estas fuentes. Las variables que presentaron mayor discrepancia entre las CMSC y las CMCC fueron la CE, N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> y organismos patógenos.

La Figura 2 muestra, a modo de ejemplo, el mejor ajuste obtenido para las variables mencionadas en la cuenca del río Ceballos. Los valores de CE medidos aquí no ajustan a los valores de calidad modelados por el QUAL2Kw en las zonas urbanas (Figura 2a). El mejor ajuste se logró simulando un incremento en la CE, aportado por fuentes difusas, comprendido entre 1,4 y 3,3 veces superior al medido (Figura 2b). Por su parte, la carga real correspondiente a la fuente puntual AMAL1-6 (ubicación en Figura 1) representa un aporte de CE de 2,6 veces las CMSC. Los valores de N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> (Figura 2c) en las zonas urbanas del río Ceballos se alejan de los valores modelados por

el QUAL2Kw (CMSC), excepto en las muestras de las cabeceras. Las fuentes difusas simuladas que mejor ajustan al modelo corresponden a un incremento de  $\text{N-NO}_3^-$  comprendido entre 6,8 y 15,2 veces las CMSC, mientras que el arroyo Mal Paso (AMAL1-6), considerado como fuente puntual, representa un aporte 9,8 veces mayor a la CMSC. Los organismos patógenos presentan un comportamiento similar a las otras variables analizadas. Las concentraciones medidas en las zonas urbanas del río Ceballos se alejan de los valores modelados por el QUAL2Kw (CMSC) (Figura 2e). Las fuentes difusas simuladas en este caso ajustan el modelo considerando un incremento de patógenos comprendido entre 53,6 y 1338 veces las CMSC (Figura 2f).

La Figura 3 muestra los resultados correspondientes al modelado realizado en la cuenca del río Salsipuedes. En este caso el desajuste entre las CMSC y las CMCC, para todos los parámetros analizados, es menor que en el caso del río Ceballos. En la cuenca alta las concentraciones medidas de CE,  $\text{N-NO}_3^-$  y patógenos son similares a curva de calidad modelada por el QUAL2Kw, mientras que el desajuste se registra en las muestras RSAL1-5 y RSAL 1-6, tomadas en las zonas más urbanizadas (Figuras 3a, c y e). En este caso, las cargas difusas son 1,7 veces mayores a la CMSC lo cual explica la variabilidad de la CE (figura 3b), para las concentraciones de  $\text{N-NO}_3^-$  las cargas difusas simuladas son 5,5 veces superiores a la CMSC (figura 3d), mientras que para los patógenos un incremento por cargas difusas comprendido 14 y 18 veces los valores de la CMSC explican satisfactoriamente los valores calibrados.

Las Figuras 2 y 3 incluyen también los valores establecidos en legislaciones vigentes (antes mencionadas) en relación con los valores admisibles de calidad de aguas para diversos usos. En relación con los límites admisibles para fuentes de agua para consumo humano, los valores de CE en el río Ceballos y Salsipuedes, a lo largo de todo su recorrido, no exceden los límites establecidos. En el caso del  $\text{N-NO}_3^-$ , las concentraciones medidas en la cuenca del río Ceballos exceden los límites admisibles para este uso a partir de la localidad de Unquillo (Figura 2c, muestras RCEB1-7 y RCEB1-9, ver ubicación en la Figura 1), mientras en la cuenca del río Salsipuedes resulta apta (Figura 3c). Respecto de las normas referidas al uso del agua para recreación, en la cuenca del río Ceballos los patógenos exceden los límites admisibles en las localidades de Río Ceballos y Saldán (Figura 2e, muestras RCEB1-3, RCEB1-5 y RCEB1-9, ver ubicación en Figura 1). En la cuenca del Salsipuedes los patógenos no exceden estos límites (Fig. 3e). Finalmente, en el caso de la normativa referida a efluentes líquidos, los patógenos exceden los límites admisibles normados en toda la cuenca del río Ceballos, con excepción de las cabeceras (Figura 2e), mientras por el contrario, en la cuenca del río Salsipuedes este parámetro excede los valores admitidos sólo en las cabeceras, lo cual se atribuye a una descarga eventual en dicha zona.

## CONCLUSIONES

Las aguas en los ríos Ceballos y Salsipuedes son ligeramente alcalinas, con STD que varían entre 133 mg/L y 473 mg/L. Desde el punto de vista geoquímico se clasifican como bicarbonatadas-cálcicas, aunque el río Ceballos evidencia una tendencia hacia aguas sulfatadas-mixtas aguas abajo. La hidrólisis de los silicatos y la disolución de carbonato de calcio son las principales fuentes naturales de aporte de solutos mayoritarios, mientras el  $\text{N-NO}_3^-$ , PT y los organismos patógenos derivan de la descomposición natural de materiales nitrogenados orgánicos (mediada por microorganismos), como las proteínas de las plantas, animales y excretas.

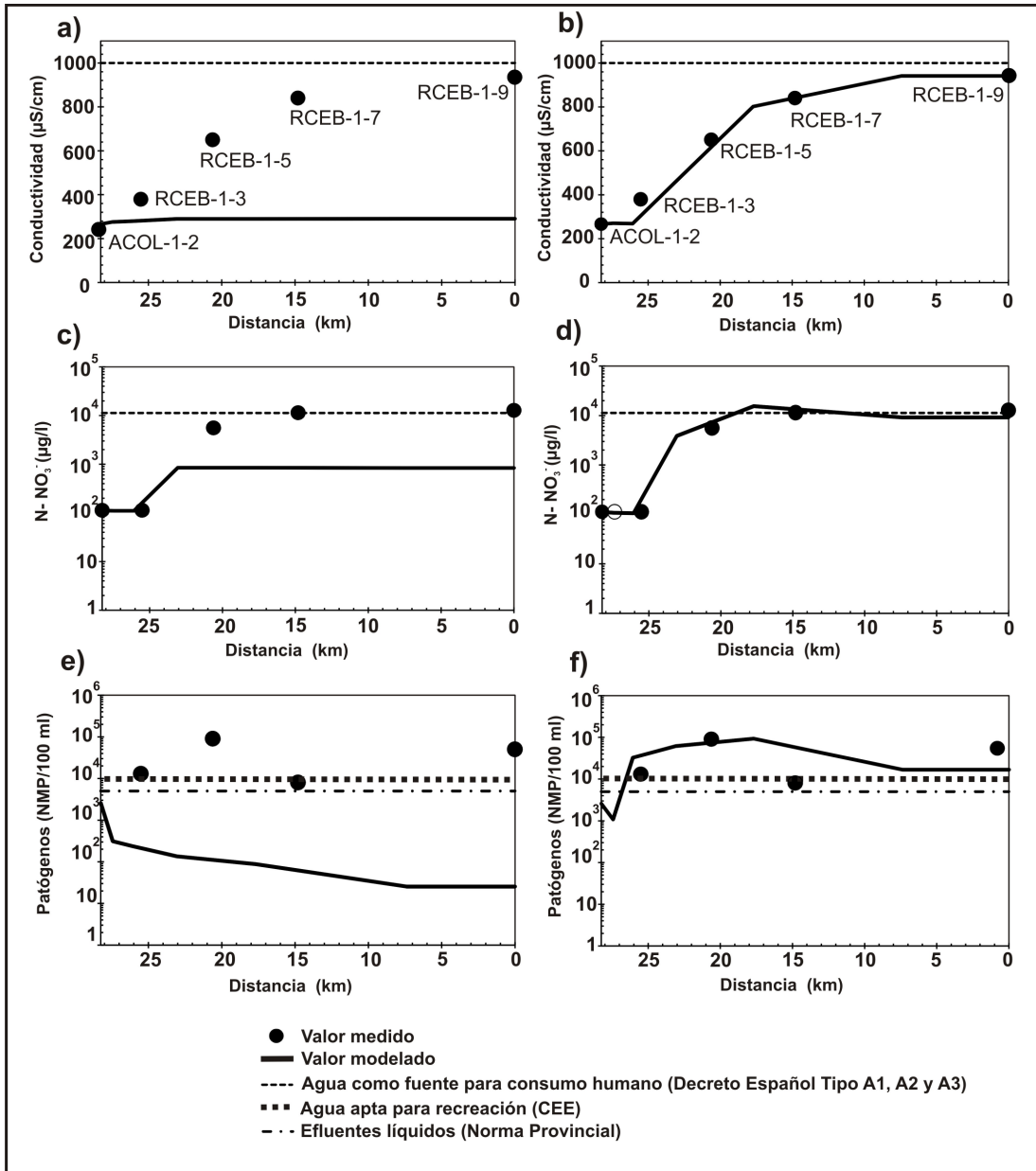
La cuenca del río Ceballos presenta un mayor grado de afectación antrópica, lo cual estaría ligado directamente a la densidad poblacional en esta cuenca. En relación con los iones mayoritarios, el  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Na}^+$  y  $\text{Cl}^-$  evidencian incrementos importantes en las áreas urbanas, atribuidos a fuentes provenientes de efluentes de servicio. El  $\text{N-NO}_3^-$  y los organismos patógenos también incrementan sus concentraciones significativamente. Las aguas residuales sin tratar serían su principal fuente de origen antrópico, ya que la región no posee plantas de tratamiento de efluentes cloacales ni control sobre sus descargas difusas.

El modelado geoquímico realizado mediante el programa QUAL2Kw permitió analizar la variabilidad espacial de las concentraciones y cuantificar la magnitud de descargas difusas que

explican esta variabilidad en las dos cuencas estudiadas. Por su parte el río Ceballos también se encuentra afectado por fuentes puntuales, en este sentido el arroyo Mal Paso es la más importante.

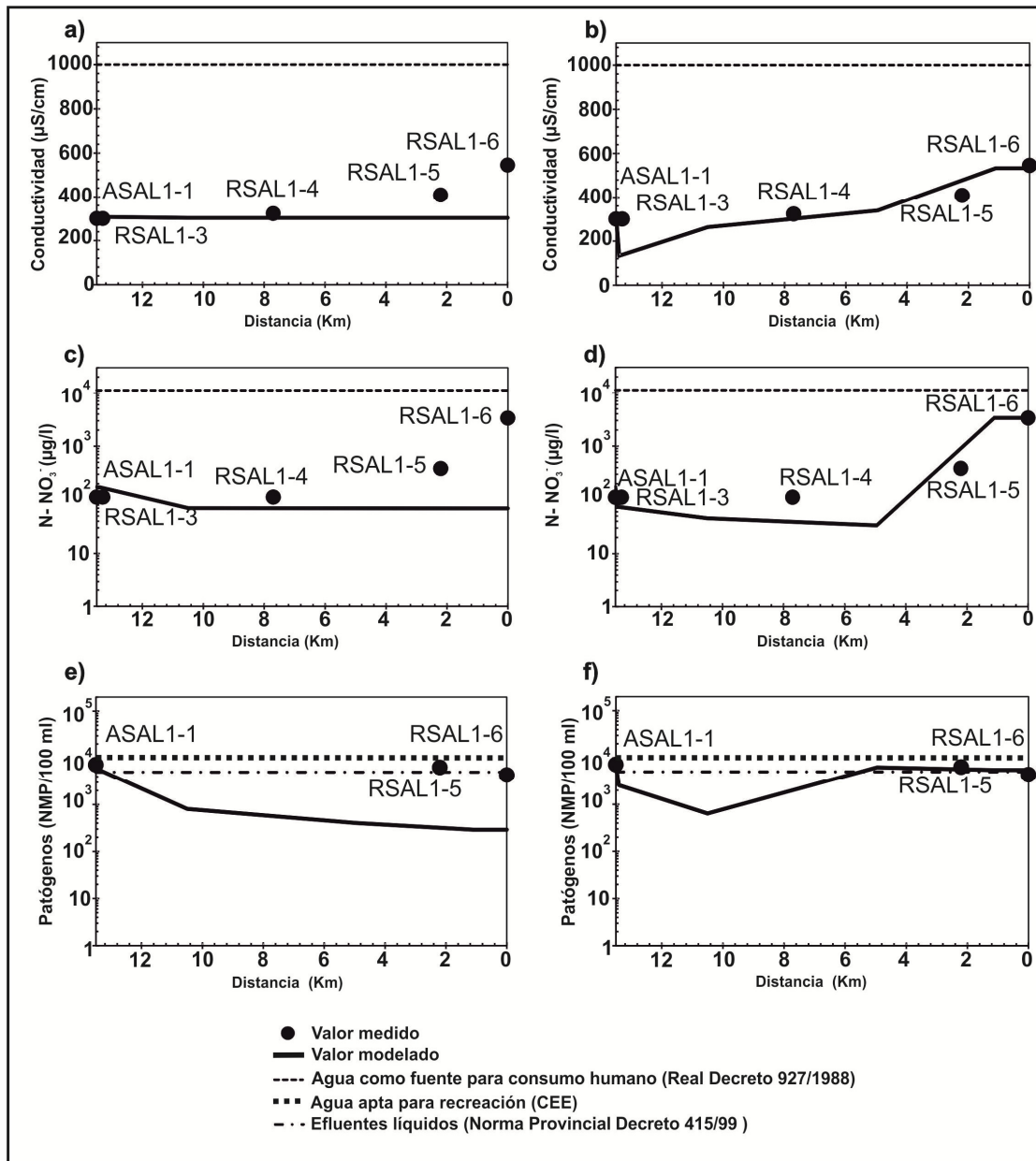
El modelado realizado indica que, en las dos cuencas estudiadas, la calidad del agua se encuentra afectada por la presencia elevada de patógenos, fuentes de descomposición que aportan nitrógeno y un aumento de la conductividad, que refleja un incremento de sólidos totales disueltos.

Con respecto a la legislación nacional y provincial existente, el Decreto 831/1998 de la Ley Nacional N° 24051 no contemplan los límites admisibles para patógenos y  $\text{NO}_3^-$  en lo referido a agua superficial como fuente para consumo humano, parámetros sí considerados en la normativa internacional aquí analizada. Además, no existen leyes nacionales y provinciales que reglamenten la calidad del agua para uso recreacional.



**Figura 2.-** Modelado geoquímico de las aguas del Río Ceballos con QUAL2Kw. a), c) y e) curva modelada sin calibración (CMSC) para los parámetros indicados en cada caso. b), d) y f) curva modelada con calibración (CMCC) para los mismos parámetros. Se incluyen en cada gráfico los valores fijados en las legislaciones indicadas en las referencias.





**Figura 3.-** Idem Figura 2 para el río Salsipuedes.

### 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 y un PIP (N° 112-200801-03160) del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET).

## REFERENCIAS

- Biscarreta, I.** (2012). “Hidrogeoquímica de las cuencas de los ríos Ceballos y Salsipuedes, Sierras Chicas, Córdoba, Argentina: un análisis mediante el uso de sistemas de Información Geográfica”. Trabajo Final, Escuela de Geología, FCEyN, UNC, pp: 105.
- Capitanelli, R.G.** (1979). Clima. En Vásquez, J.B., Miatello, R.A y Roqué, M.E. (eds): *Geografía Física de Córdoba*, p. 45-138, Ed. Bolt, Córdoba.
- Chapman, D.** (ed) (2003). *Water quality assessments*, 2nd edn. E & FN Spon, London.
- Eaton, A. D., Clesceri, L. S. y Greenberg, A. E.** (Eds.) (1995). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. A.P.H.A./A.W.W.A./W.E.F., 1108 p., Washington D.C.
- Gordillo, C.E. y Lencinas, A.N.** (1979). “Sierras Pampeanas de Córdoba y San Luis”. En: Turner, J.C. (Ed): Segundo Simposio de Geología Regional Argentina, 1:577-650, Academia Nacional de Ciencias, Córdoba.
- Kannel, P.R., Lee, S., Kanel, S.R. y Pelletier, G.J.** (2007). “Application of automated QUAL-2Kw for water quality modeling and management in the Bagmati River, Nepal”. *Ecological Modelling* 202: 503–517.
- Kinen, M.** (2012). “Estudio biogeoquímico y calidad del agua de las cuencas de los ríos Salsipuedes y Ceballos, Córdoba, Argentina”. Trabajo Final, Escuela de Geología, FCEyN, UNC. Pp: 139.
- 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”. *Chemical Geology* 264: 89-95.
- Lyons, P., Skirrow, R. y Stuart, P.** (1997). Geology and metallogeny of the Sierras Septentrionales de Córdoba. 1:250.000 map sheet, Province of Córdoba. Geoscientific mapping of the Sierras Pampeanas Argentine-Australia Cooperative Project. Servicio Geológico minero Argentino. *Anales* 27:1-131.
- Meybeck, M.** (2005) Global occurrence of major elements in rivers. En: Drever JI (ed) *Surface and ground water, weathering and soils*, vol 5. (In: Holland HD, Turekian KK (eds) *Treatise of geochemistry*, 1st edn.). Elsevier-Pergamon, Oxford, pp 207–223
- Pasquini, I.A., Formica, S.M., Sacchi, G.A.** (2012). “Hydrochemistry and nutrients dynamic in the Suquia River urban catchment’s, Córdoba, Argentina”. *Environ Earth Sci.* DOI 10.1007/s12665-011-0978-z.
- 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”. *Environmental Modeling and Software* 21, 419–425.
- Pesce, S.F., Wunderlin, D.A.** (2000). “Use of water quality indices to verify the impact of Cordoba City (Argentina) on Suquia River”. *Water Resources* 34:2915–2926.
- Piper, A.M.** (1944) “A graphic procedure in the geochemical interpretation of water analyses”. *Am Geophys Union Trans* 25:914–923
- Rivera, R; De los Rios, P. y Contreras, A.** (2010). “Relations fecal coliforms/ fecal Streptococci as indicador of the origin of fecal pollution in urban and rural water bodies of Temuco, Chile”. *Cienc. Inv. Agr.* Vol.37, n.2 [ citado 2012-10-24], pp. 141-149.
- Santa Cruz, J.N.** (1978). “Aspectos Sedimentologicos de las formaciones aflorantes al este de la Sierra Chica, provincia de Córdoba, República Argentina”. *Asociación Geológica Argentina, revista*, XXXIII(3):232-244, 1978. sciences I.T.C., Smith Publishers. The Netherlands.
- U.S. Enviromental Protection Agency.** (1986). “Ambient water quality criteria for bacteria-1986”. EPA/440/5-84-002. USEPA, Office of Water Regulation and Standards. Washington, DC, USA.
- Wetzel, R.** (2001). *Limnology. Lakes and Rivers Ecosystems*. Third Edition. Saunders College Pu. 767 pp.