

## Caracterización hidroquímica del Valle de Tafí, provincia de Tucumán, República Argentina

D'Urso, C.<sup>1</sup>; M. Rodríguez Areal<sup>2</sup>; P. Marchisio<sup>2</sup>; M. Rodríguez<sup>2</sup>; J. P. López<sup>3</sup>; G. Rodríguez<sup>1</sup>; A. Sales<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Cátedra de Hidrogeología. Facultad de Ciencias Naturales e I.M.L. - Universidad Nacional de Tucumán. INSUGEO - CONICET. Miguel Lillo 205. San Miguel de Tucumán. Argentina.

<sup>2</sup> Instituto de Química Analítica, Facultad de Bioquímica, Química y Farmacia. Universidad Nacional de Tucumán. Ayacucho 471. San Miguel de Tucumán. Argentina.

<sup>3</sup> Cátedra de Petrología. Facultad de Ciencias Naturales e I.M.L. - Universidad Nacional de Tucumán. INSUGEO - CONICET. Miguel Lillo 205. San Miguel de Tucumán. Argentina.

► **Resumen** — La cuenca de Tafí del Valle se ubica al oeste de la provincia de Tucumán, formando un valle tectónico elongado en dirección submeridional, sobre el que discurre el río Tafí. En el sector de piedemonte y en el fondo del valle se depositaron sedimentos cuaternarios, constituidos por loess, con desarrollo de paleosuelos y niveles cineríticos, que sirven de base a importantes depósitos de sedimentos gruesos en conos aluviales. Este complejo sedimentario está formado por materiales gruesos de elevada permeabilidad, que permiten la acumulación de importantes reservorios de agua subterránea económicamente explotables. El objetivo del presente trabajo es determinar las características hidroquímicas de las aguas superficiales y subterráneas de la región del valle de Tafí y determinar su calidad para consumo humano y riego. Para ello se analizaron un total de 19 muestras de aguas superficiales y subterráneas. En la mayoría de los casos, las aguas son del tipo bicarbonatadas mixtas, con bajos contenidos de solutos, característica propia de ríos de montaña que circulan por basamento cristalino, a excepción de dos muestras bicarbonatadas sódicas que circulan por sedimentos finos limo loésicos, que permiten un intercambio catiónico. Son aguas de muy buena calidad, libres de contaminación, tanto para consumo humano como para bebida de animales y riego. La excepción la constituye un pozo freático, que tiene un contenido de arsénico por encima del límite establecido por la OMS, relacionada probablemente por la presencia de cenizas volcánicas en el sustrato.

**Palabras clave:** Hidroquímica, Valle de Tafí, Tucumán, Argentina.

► **Abstract** — "Hydrochemical characterization of Tafí Valley, Tucumán province, Argentina". The Tafí del Valle basin, located in western Tucumán province, forms an elongated north to south tectonic valley. In the piedmont area and valley floor quaternary deposits (consisting of loess with development of paleosols and cineritic levels), underlie thick alluvial fan deposits.

This sedimentary sequence consists of highly permeable materials that allow the accumulation of large reservoirs of economically exploitable groundwater.

The aim of this paper is to carry out the hydrochemical characterization of surface and groundwater in Tafí del Valle area and to determine the quality for human consumption and irrigation. 19 samples of surface and groundwater were analyzed. In most cases, the water is mixed bicarbonate type, with low solute contents, characteristic of mountain streams that circulate over crystalline basement. Two water samples are classified as sodium bicarbonate type which circulate over fine loessic sediments, allowing cation exchange. They are good quality waters, without contamination, for both human consumption and for livestock and irrigation. Only one groundwater sample has an arsenic content above the limit established by the WHO probably related to volcanic ash.

**Keywords:** Hydrochemistry, Tafí del Valle, Tucumán, Argentina.

## INTRODUCCIÓN

La región de Tafí del Valle se ubica en el Departamento Tafí del Valle en la Provincia de Tucumán en el Noroeste Argentino, a 100 km al oeste de la ciudad capital de San Miguel de Tucumán. Esta zona corresponde a un valle tectónico elongado en dirección submeridional que se caracteriza por sus bellezas naturales y sus riquezas arqueológicas y culturales. Las principales actividades económicas están asociadas a la producción agrícola (papa semilla, lechuga, acelga y poroto aluba), agroindustria (fabricación de quesos), artesanías y al turismo rural y de aventura.

El departamento de Tafí del Valle cuenta con una población de 14.933 habitantes y una densidad de 5,1 hab/km<sup>2</sup> (INDEC, 2010) la cual se incrementa notablemente en los meses de verano por la gran afluencia de turistas.

En el valle existen tres plantas potabilizadoras principales, las de El Churqui y La Quebradita, que abastecen de agua potable superficial a las poblaciones de Tafí del Valle y la planta de El Mollar, que provee de agua a la localidad homónima. El resto de la zona se abastece a través de servicios de cooperativas que gestionan el agua superficial mediante tomas rudimentarias y también a través de perforaciones. Sin embargo, uno de los mayores problemas que presenta el valle, está relacionado con el abastecimiento de agua potable para el consumo de la población y el requerimiento agrícola-ganadero.

El estudio hidroquímico de las aguas no sólo tiene un interés científico sino que también resulta de importancia para determinar la calidad del agua de la región y determinar lugares adecuados para su explotación destinada a diferentes usos.

Numerosos autores abordaron el tema con diversos enfoques. Por ejemplo, Nicolli *et al.* (2005) pusieron énfasis en la distribución del arsénico en cenizas volcánicas que se encuentran en la región de Los Pereyras, al este de la provincia de Tucumán. Por otro lado, Lecomte *et al.* (2011) y Pasquini *et al.*

(2004) estudiaron la geoquímica de ríos de montaña en la provincia de Córdoba.

El equilibrio químico del agua con el medio se alcanza después de grandes períodos de tiempo de contacto, durante el cual el agua se mineraliza por la disolución de sales que se encuentran presentes en las formaciones geológicas.

El agua de lluvia tiene un leve contenido de sales provenientes de la disolución de gases de la atmósfera, razón por la cual en áreas continentales, el agua tiene una composición bicarbonatada cálcica. A medida que circula por las formaciones geológicas experimenta numerosas reacciones químicas que producen un aumento en su mineralización hasta saturarse en los diferentes iones.

El objetivo del presente trabajo fue determinar las características hidroquímicas de las aguas superficiales y subterráneas de la región del valle de Tafí y establecer su calidad tanto para consumo de la población como para riego. Para alcanzar dicho objetivo se realizó el análisis de iones fundamentales y algunos elementos minoritarios y trazas importantes.

## MARCO GEOLÓGICO

La Cuenca de Tafí cubre una superficie aproximada de 400 km<sup>2</sup>, pertenece a la Provincia Hidrogeológica de los Valles Intermontanos de Sierras Pampeanas y está influenciada por el aporte de material grueso de sedimentación aluvial.

El valle de Tafí se encuentra limitado por la sierra del Aconquija al oeste con una altitud máxima de 4.437 m en el Cerro Muñoz y las Cumbres Calchaquíes hacia el este, en las que se destacan el Cerro Negro, de 4.300 m y las Cumbres de Mala Mala, con 3.500 m. En su extremo meridional, el Cerro Ñuñorco Grande, de 3.321 m de altura, cierra el valle mientras que el Abra del Infiernillo marca su límite septentrional (fig. 1).

El área de estudio ocupa una depresión tectónica con rumbo submeridional y está limitada por bloques de basamento cristalino, de edad paleozoica, que está constituido por esquistos biotíticos y gneisses bandeados

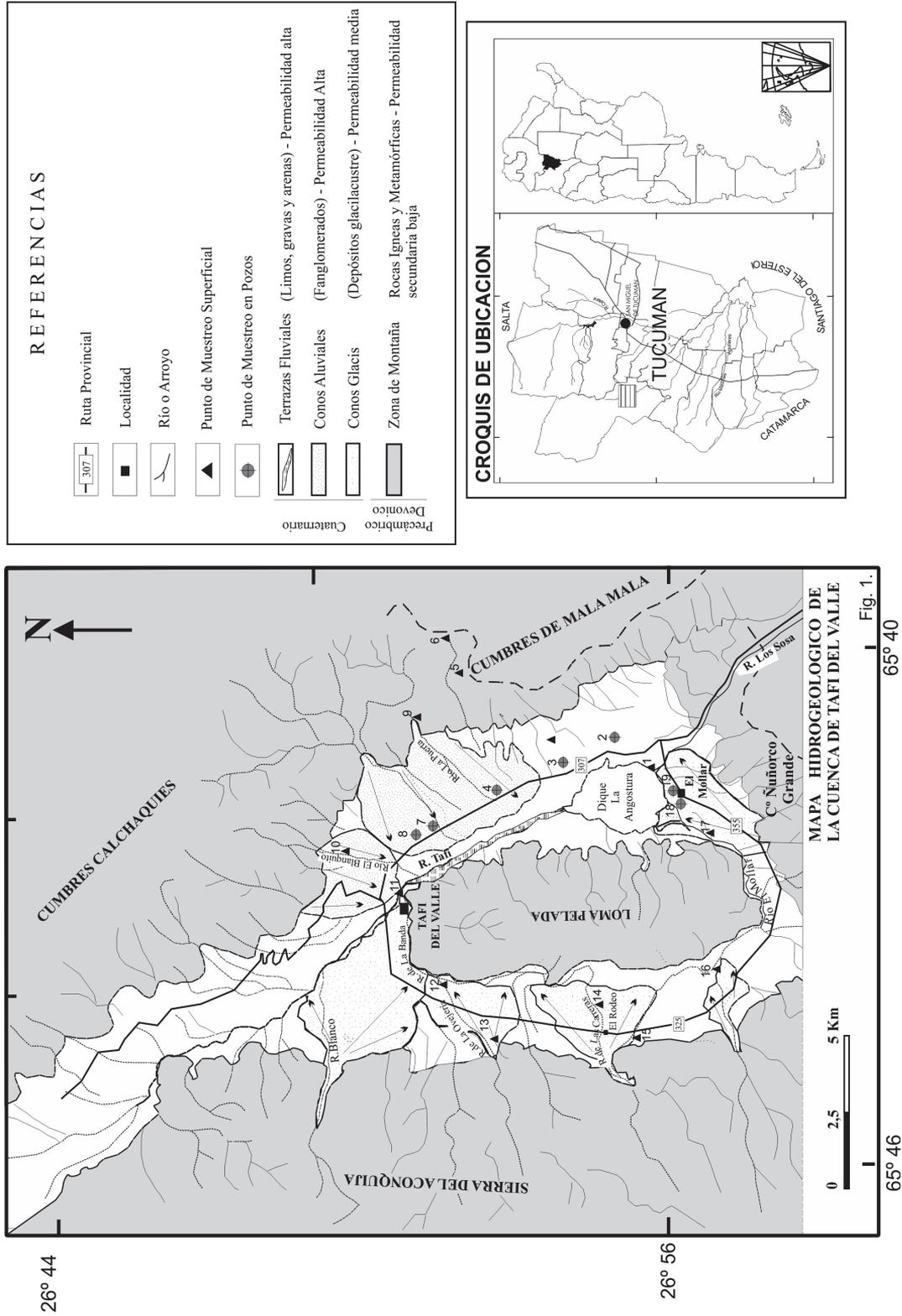


Figura. 1. Mapa Hidrogeológico de la Cuenca de Tafi del Valle.

de bajo grado metamórfico, cuya asociación mineral típica es cuarzo-biotita-muscovita-clorita-oligoclasa ácida-granate, para la región de Cumbres Calchaquíes y esquistos de cuarzo-plagioclasa-biotita-muscovita, también de bajo grado metamórfico, para la zona comprendida en el sector centro-oriental de sierra de Aconquija (Toselli y Rossi de Toselli, 1998). Intruyendo a estas metamorfitas se reconocen distintos cuerpos, entre los que se destacan la tonalita La Ovejería, que aflora en el margen oriental de la sierra de Aconquija, los granitos Los Cuartos y La Angostura, que se reconoce en la ladera occidental de Cumbres Calchaquíes y los intrusivos de Loma Pelada, que se eleva en la zona central del valle de Tafi, dividiéndolo en dos sectores: al oeste, el valle del río Las Carreras y Los Alisos, y al este, el valle del río Tafi y El Mollar. El Granito Ñuñorco Grande se eleva en el sector sur de la región estudiada. Dichos intrusivos presentan biotita y muscovita, como accesorios principales, junto a escasa turmalina y epidoto y son de clara tendencia calcoalcalina y peraluminosa, ricos en K y P y con bajos tenores de Ca y Na (López y Bellos, 2010).

La estructura más importante de la región la constituye la Megafractura de Tafi (Baldis *et al.*, 1975), una falla inversa con inclinación al NE sobre cuyo trazo se localiza el valle de Tafi y que habría producido el cabalgamiento de Cumbres Calchaquíes sobre la sierra del Aconquija (González y Barreñada, 1994; Sosa Gómez, 2000).

Suprayacen al basamento ígneo-metamórfico descripto, relictos de sedimentos terciarios, cuyos afloramientos pueden observarse sobre la ladera occidental de Cumbres Calchaquíes, en las Cumbres de Mala Mala.

Finalmente, los sedimentos de edad cuaternaria rellenan el fondo del valle y están formados por sedimentos aluviales gruesos que constituyen niveles de glacis, depósitos de loess antiguos, conos y terrazas de acumulación, con desarrollo de paleosuelos y niveles cineríticos (Collantes y Sayago, 1987).

## HIDROGEOLOGÍA Y CLIMA

El principal colector del valle de Tafi es el río homónimo, que nace en el Abra del Infiernillo (3.042 m.s.n.m) y corre con dirección NNW-SSE, hasta desembocar en el embalse de La Angostura. El río Tafi recibe el aporte de numerosos afluentes. Por su margen izquierda recibe el aporte de los ríos El Blanquito y La Puerta como los más importantes. Por su margen derecha colecta los ríos Blanco, de La Ovejería y de Las Carreras (Tineo *et al.*, 1984).

Este río es el más importante del área con un caudal medio anual de 1,3 m<sup>3</sup>/seg y con un volumen anual de 41 hm<sup>3</sup>.

Al Sur del valle se encuentra el río El Mollar, que desemboca en el dique de La Angostura y es colector de los cauces provenientes del cerro Ñuñorco Grande y del sector sudoeste de la Loma Pelada.

Sobre la base de las características geológicas, geomorfológicas e hidrogeológicas se identificaron tres zonas en el área de estudio.

### ZONA DE TAFÍ DEL VALLE

Ubicada entre la Loma Pelada al oeste y los bordes de Cumbres Calchaquíes y Mala Mala, al este. En este sector los ríos que bajan del borde occidental de las Cumbres Calchaquíes forman conos coalescentes hacia la parte baja, entre los que se destacan el del río El Blanquito y río La Puerta (fig. 1). Esta zona constituye una de las mejores áreas para la explotación y aprovechamiento del agua subterránea con niveles entre los 20 a 30 metros bajo boca de pozos y caudales del orden de los 100 a 150 m<sup>3</sup>/h. Los acuíferos son semiconfinados, formados por arenas y gravas gruesas intercalados con limos y arcillas de mediana a alta permeabilidad. La recarga se ubica en la parte alta de las Cumbres Calchaquíes y la descarga es hacia el río Tafi, que posteriormente desemboca en el embalse La Angostura.

### ZONA DEL VALLE DEL RÍO LAS CARRERAS

Los Alisos: constituye un valle muy estrecho, con pendientes abruptas, sobre el que se

desarrollan los conos-glacís de los ríos Blanco —de La Ovejería— y Las Carreras, que se circunscriben al piedemonte de las Sierras del Aconquija. Van Zuidam (1976) define a estas geoformas como un tipo de glacís de acumulación, con pendientes de entre 3° y 7°, con formas de conos o abanicos y que se desarrollan sobre una cuenca relativamente pequeña, por actividad fluvial y escurrimiento mantiformes. Esta zona tiene muy pocos antecedentes hidrogeológicos y el único dato disponible corresponde a un perfil de pozo de 104 m de profundidad, que realizó la Dirección Provincial del Agua (DPA) en la localidad de El Rodeo (fig. 1) no dando buenos resultados razón por la cual no se entubó. La descripción litológica muestra materiales de granulometría muy gruesa, gravas y arenas, donde los niveles de agua se encontrarían a mayor profundidad. El agua que utilizan en la zona proviene principalmente de tomas, ubicadas en las laderas altas de las sierras del Aconquija. Allí se construyeron pequeños diques para el almacenamiento, los que abastecen de agua potable y para riego a pequeñas poblaciones vecinas.

#### ZONA DE EL MOLLAR

Ubicada sobre la ladera septentrional del cerro Ñuñorco Grande, esta zona se caracteriza por la presencia de glacís cubiertos desarrollados a partir de la coalescencia de conos, cuyos materiales fueron transportados pendiente abajo por flujos de detritos, proveniente de las partes más alta de las laderas, y que dieron lugar a la cubierta clástica (Collantes, 2001). Sobre la parte distal de estas paleoformas se ubican perforaciones con niveles entre los 10 a 20 metros bajo boca de pozo y caudales entre los 20 a 40 m<sup>3</sup>/h. Están formados por sedimentos gruesos, arenas y gravas, con abundantes intercalaciones de una matriz arcillosa fina, típica de estas paleoformas. La recarga se produce en la parte alta de los faldeos del cerro Ñuñorco y la descarga es en dirección al embalse de La Angostura. Esta zona presenta características favorables para la explotación del agua subterránea, principalmente en las regiones in-

termedia y distal de las paleoformas mencionadas.

La zona de trabajo se caracteriza por presentar un clima seco de estepa, frío con invierno seco, que de acuerdo a la clasificación de Koppen es BSkwb (Torres Bruchman, 1978). Las precipitaciones llegan hasta los 400 mm anuales con una temperatura media que varía de 14 a 18 °C, con mínimas de -10°C en invierno y máximas de 30°C en verano.

#### METODOLOGÍA

En una primera etapa se realizó un mapa geológico-geomorfológico e hidrogeológico de la región, utilizando como base cartografía existente, fotografías aéreas a escala 1:50.000 e imágenes satelitales.

A partir de la información disponible se seleccionaron los puntos de muestreo de agua. Se recolectaron un total de 19 muestras, 10 correspondientes a aguas superficiales de ríos, 6 de pozos profundos, 1 de vertiente, 1 de embalse y 1 de pozo freático. Además, se analizaron los datos de las perforaciones existentes en todo el valle, con detalles de profundidad, litologías, niveles y caudales, a fin de establecer las características regionales.

Se tomaron muestras de las tres zonas descriptas y la ubicación geográfica de los puntos de muestreo se indica en la fig. 1.

En la zona de Tafí del Valle se tomaron muestras superficiales de los ríos La Puerta (N° 9), El Blanquito (N° 10), Quebrada Río Los Chorros (N° 6) y Tafí (N° 11), de la vertiente de La Banda (N° 5), del dique La Angostura (N° 1) y de los pozos de La Siringuilla (N° 3), Barrio Los Mimbres (N° 4), Campamento de Vialidad (N° 7) y Sociedad Aguas de Tucumán (SAT) (N° 8). Además se tomó una muestra de un acuífero libre en Las Nubes (N° 2).

En la zona del valle del río Las Carreras – Los Alisos las muestras corresponden a los ríos La Ovejería (N° 12), Molle Solo (N° 13), Las Carreras (N° 14), Quebrada Los Alisos (N° 15) y quebrada Mirador Los Cóndores (N° 16).

En la zona de El Mollar se tomaron muestras del río El Mollar (N° 17) y de los pozos de la Piscifactoría El Mollar (N° 18) y Camping Safari (N° 19).

Las muestras se tomaron en botellas plásticas de 1 L., descontaminadas con ácido nítrico al 30% y enjuagadas con agua destilada y desionizada.

En el campo se realizaron medidas de temperatura, pH y conductividad eléctrica (CE). Las aguas se almacenaron refrigeradas a 4°C en la heladera.

En cada una de las muestras se realizaron determinaciones químicas de las especies principales  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$  y  $\text{SO}_4^{2-}$ , así como el análisis bacteriológico y el análisis químico de elementos minoritarios y trazas tales como Mn, As, metales pesados y especies como fluoruros y nitratos para determinar su calidad para consumo. Se realizaron también medidas de conductividad y pH además del cálculo de la dureza total.

Se usaron para el análisis químico las técnicas normatizadas sugeridas en el APHA, AWWA y WPCF, 1992.

La determinación del pH en el laboratorio se realizó mediante el método electrométrico (APHA, AWWA, WPCF, 1992. Método 4500- $\text{H}^+$ ). Se usó un pHmetro Mettler-Toledo MP220 con ATC y un electrodo combinado de vidrio Mettler Toledo inlab 413 pH.

La conductividad eléctrica se leyó en un conductímetro Tacussel con ATC y celda de conductividad de inmersión, de constante de celda igual a  $0,76 \text{ cm}^{-1}$  (APHA, AWWA, WPCF, 1992. Método 2510 B).

La determinación de carbonatos y bicarbonatos se realizó mediante una volumetría de neutralización usando ácido clorhídrico estandarizado como solución valorante y la técnica de sucesión de indicadores, fenolftaleína y verde de bromo cresol, sugerida por Warder (Rodier, 1981).

La determinación de cloruros se realizó por el método argentométrico modificado (APHA, AWWA, WPCF, 1992. Método 4500- $\text{Cl}^-$  B) en el que se usó como valorante nitrato de plata y  $\text{K}_2\text{CrO}_4$  como indicador.

El sulfato se determinó por turbidimetría

(APHA, AWWA, WPCF, 1992. Método 4500- $\text{SO}_4^{2-}$  E), método modificado, en el que los sulfatos se precipitaron en medio clorhídrico con iones  $\text{Ba}^{2+}$  formando cristales de  $\text{BaSO}_4$ . El precipitado se estabilizó por medio de una solución de CMC 1% (Carboximetil celulosa). Las suspensiones homogéneas se midieron en un espectrofotómetro Metrolab 1700, a  $\lambda = 390 \text{ nm}$ .

Las determinaciones de los constituyentes catiónicos sodio y potasio se llevaron a cabo por la técnica de fotometría de llama usando un fotómetro Metrolab 315. (APHA, AWWA, WPCF, 1992. Método 3500-K D y 3500-Na D).

El contenido de calcio y magnesio se obtuvo por el método titulométrico de EDTA (APHA, AWWA, WPCF, 1992. Método 3500-Ca D y 3500-Mg E), usando una combinación de indicadores, NET y murexida.

Los metales tales como Mn, Pb, Cu, Ni y Cd se realizaron con la técnica de espectrometría de absorción atómica mediante construcción de una recta de calibración a partir de soluciones estándares de cada elemento y aplicando los controles de calidad de las medidas como el uso de estándares internos y externos, determinación de reproducibilidad y exactitud, etc.

En todos los casos el equipo no detectó la presencia de estos elementos siendo los límites de detección los siguientes: Mn-LOD: 0,06 mg/L; Pb-LOD: 0,20 mg/L; Cu-LOD: 0,30 mg/L; Ni-LOD: 0,09 mg/L; Cd-LOD: 0,03 mg/L.

Los fluoruros se determinaron por espectrofotometría UV-Visible por el método de Megregian-Maier mientras que para los nitratos se usó un kit comercial.

Se realizó la detección de coliformes totales y su diferenciación mediante la técnica del número más probable (NMP).

En todos los casos el error analítico no superó el 5% para los componentes mayoritarios con una reproducibilidad menor al 2%.

Se volcaron los datos obtenidos en los diagramas de Piper, Hill, Langelier (in Custodio y Llamas, 1983) para clasificar las aguas y de Wilcox (1955) para definir su aptitud para riego.

Tabla 1. Análisis fisicoquímicos de Muestras de Agua.

Nº	Lugar	Características	Latitud	Longitud	Cota (metros)	pH	CE (°)	Dureza (mg/L)	RAS (**)	Ca <sup>2+</sup> (mg/L)	Mg <sup>2+</sup> (mg/L)	Na <sup>+</sup> (mg/L)	K <sup>+</sup> (mg/L)	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/L)	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/L)	Cl <sup>-</sup> (mg/L)
1	Embalse La Angostura	Superficial	26°55'51.60"S	65°41'14.46"O	1866	7,8	202	73	0,76	21	5	15	5	129	6	11
2	Las Nubes	Libre	26°55'0.54"S	65°40'53.88"O	1885	8,8	788	25	16,15	5	3	185	20	449	9	14
3	La Stringuilla	Semicontinado	26°54'7.50"S	65°41'14.58"O	1883	7,6	252	45	2,51	15	2	39	4	129	12	12
4	Bº Los Mimbres	Semicontinado	26°53'2.16"S	65°41'32.58"O	1893	7,8	249	94	0,81	26	7	18	7	160	5	9
5	La Banda	Superficial	26°52'27.80"S	65°39'30.40"O	2199	8,3	370	127	0,88	35	10	23	4	203	11	15
6	Quebrada Río Los Chorrros	Superficial	26°52'18.32"S	65°39'10.59"O	2241	7,4	174	63	0,43	16	6	8	2	92	2	8
7	Campamento Viabilidad	Semicontinado	26°51'48.60"S	65°41'48.50"O	1918	7,8	180	66	0,75	18	5	14	5	120	2	9
8	Sociedad Aguas de Tucumán	Semicontinado	26°51'33.20"S	65°41'49.60"O	1925	7,7	175	68	0,75	18	5	14	4	117	3	7
9	Río La Puerta	Superficial	26°51'32.60"S	65°40'6.20"O	2138	8,6	158	63	0,61	19	4	11	3	92	4	7
10	Río Blanquito	Superficial	26°49'58.00"S	65°42'26.80"O	2234	7,5	120	41	0,54	12	3	8	2	61	3	7
11	Río Tafi	Superficial	26°51'28.02"S	65°42'41.40"O	1946	8,0	221	103	0,71	23	11	16	3	138	7	3
12	Río La Ovejera	Superficial	26°51'52.20"S	65°44'23.10"O	2065	8,1	216	94	0,81	24	9	15	4	136	8	5
13	Río Molle Solo	Superficial	26°51'54.12"S	65°45'14.10"O	2149	7,8	99	54	0,36	6	5	6	2	51	1	5
14	Río de Las Carreras	Superficial	26°54'15.42"S	65°45'40.68"O	2223	7,7	94	39	0,36	8	4	5	2	50	3	2
15	Quebrada de Los Alisos	Superficial	26°56'2.70"S	65°46'35.64"O	2286	7,7	100	46	0,33	7	7	5	2	56	2	4
16	Mirador Los Condores	Superficial	26°56'46.44"S	65°46'17.10"O	2214	7,5	107	43	0,46	8	6	7	3	62	4	6
17	Río El Mollar	Superficial	26°56'21.72"S	65°42'54.96"O	1918	8,0	165	75	0,57	16	8	11	3	97	12	5
18	Piscifactoría El Mollar	Semicontinado	26°56'22.14"S	65°42'7.02"O	1894	7,6	327	139	1,12	34	13	30	6	208	4	11
19	Camping Safari El Mollar	Semicontinado	26°56'24.90"S	65°41'49.92"O	1898	7,8	238	86	0,85	19	9	18	3	136	7	5

(\*) C.E. Conductividad Eléctrica

(\*\*) RAS: Relación de Adsorción de sodio

Muestras con carbonato

Muestras con carbonato

2- Las nubes

9- La puerta

Muestras con Arsénico

2- Las nubes

Límites de Detección de Metales determinados por la

técnica de Espectrometría de Absorción Atómica

Mn-LOD:0,06 mg/L

Pb-LOD:0,20 mg/L

Cu-LOD:0,30 mg/L

Ni-LOD:0,09 mg/L

Cd-LOD:0,03 mg/L

Coliformes: Ausencia Total

Fluoruros En todos los casos Valores entre 0,4 y 0,8 mg/L y

Nitratos entre 0,4 y 6,8 mg/L

En todos los Pozos menores al límite establecido por el Código Alimentario Argentino

Valores entre 0,4 y 0,8 mg/L y

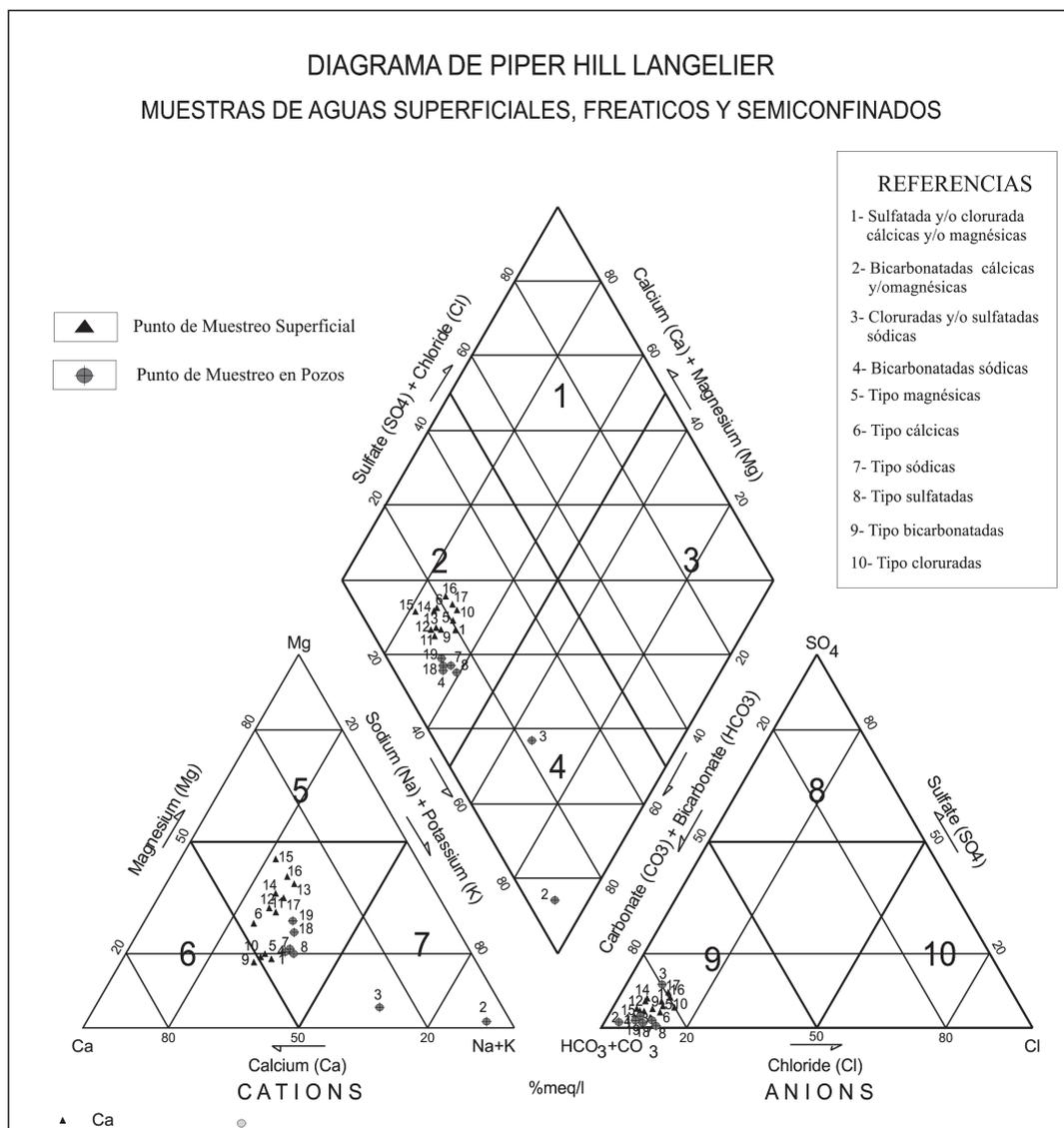
## RESULTADOS

En la tabla 1 se presentan los resultados de los análisis fisicoquímicos obtenidos de las muestras de aguas superficiales y de las perforaciones del lugar.

En el área de estudio, las aguas, tanto superficiales como subterráneas son relativamente jóvenes y con escaso tiempo de residencia, por lo que en general son del tipo bicarbonatadas cálcicas o magnésicas (fig.

2). Los valores de pH varían entre 7,4 y 8,8, de neutros a levemente alcalinos.

En la zona definida como Valle de Tafi, los valores de conductividad varían entre 80 y 300  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Esta zona está caracterizada por el desarrollo de conos aluviales con materiales de granulometría mediana a gruesa. En la parte alta, zona de recarga, se encontraron valores de conductividad bajos, como el caso del río El Blanquito con 120  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (Muestra N° 10) y a medida que se



**Fig. 2.** Diagrama de Piper Hill Langelier. Muestras de Aguas Superficiales, Freáticas y Semi-confinados.

aleja del área de aporte, el agua se infiltra, recargando a los acuíferos y aumentando el valor de conductividad (Muestra N° 7 con valores de 180 uS/cm).

Las aguas superficiales de esta zona tienen como anión predominante al bicarbonato, con concentraciones entre 60 y 200 mg/L; mientras que el catión que predomina levemente es el calcio con valores entre 10 y 35 mg/L por encima del sodio (8 a 23 mg/L) y magnesio (3 a 10 mg/L).

Estos valores son característicos de aguas con muy poca evolución. Su escasa mineralización es debida a que el agua circula sobre rocas del basamento metamórfico (esquistos micáceos) en las que adquiere poco contenido de sales.

En las perforaciones de B° Los Mimbres (Muestra N° 4), Campamento de Vialidad (Muestra N° 7) y la SAT (Muestra N° 8) también predomina el bicarbonato con concentraciones entre 90 y 160 mg/L, con un leve aumento del calcio (18 a 26 mg/L) sobre el sodio (14 a 18 mg/L).

Dos casos particulares en esta zona lo constituyen las perforaciones de Las Nubes (Muestra N° 2) y La Siringuilla (Muestra N° 3) que se clasifican como bicarbonatadas sódicas (fig. 2). El pozo Las Nubes se ubica sobre el borde occidental de las Cumbres de Mala Mala. Es un acuífero de características libres, que se recarga por el agua de lluvia. Esta perforación se encuentra en un ambiente característico de un glacis de erosión constituido por sedimentos finos limo-loésicos, presencia de cenizas volcánicas y desarrollo de paleosuelos (Collantes, 2001). Tiene un valor de conductividad alto, de 788 uS/cm. El anión predominante es el bicarbonato (449 mg/L) y el catión, el sodio (185 mg/L). Además se determinó una concentración de arsénico de 0,5 mg/L, valor que supera el límite establecido por la Organización Mundial de la Salud. Muchos autores adjudican el origen del arsénico en el agua subterránea a la presencia de cenizas y vidrios volcánicos en los sedimentos limos loésicos de la región (Nicolli *et al.*, 2005, entre otros).

El pozo La Siringuilla se ubica en la parte distal de los conos que descienden del

flanco occidental de las Cumbres Calchaquíes. Es un acuífero semiconfinado con valores de bicarbonato de 129 mg/L y sodio de 39 mg/L. El incremento en los valores de sodio se debe a que el mismo se encuentra influenciado por el aporte de los sedimentos finos, limo-loésicos, provenientes de las Cumbres de Mala-Mala.

Con respecto a la zona definida como Valle de Las Carreras – Los Alisos, las muestras de aguas tomadas son todas superficiales y los datos de los análisis químicos indican que el anión que predomina es el bicarbonato con valores entre 60 y 140 mg/L mientras que los cationes son mixtos, predominando levemente el calcio sobre el sodio, con valores entre 5 y 30 mg/L. Las aguas que circulan por este sector lo hacen sobre rocas metamórficas y graníticas, por lo que poseen bajos contenidos de sales.

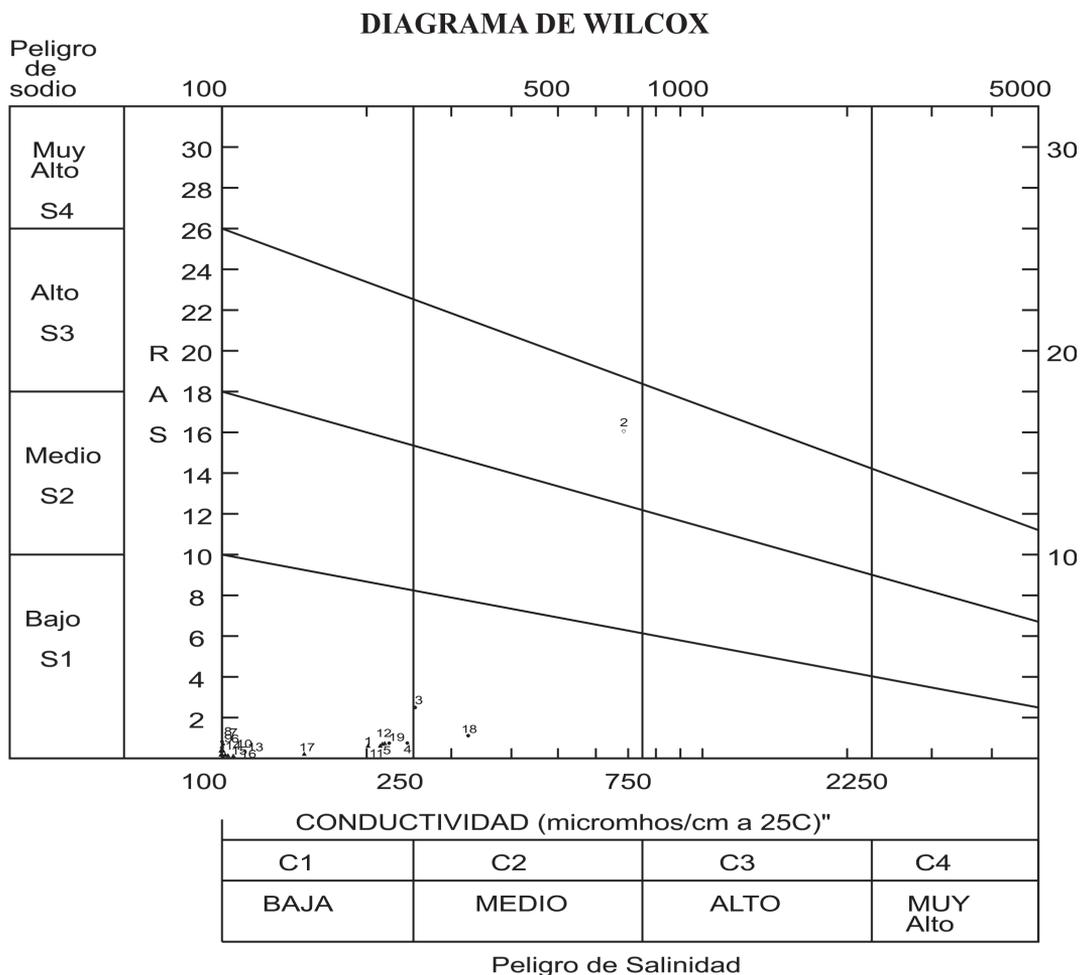
Finalmente en la zona de El Mollar, el río homónimo presenta aguas bicarbonatadas cálcicas y/o magnésicas, característica que comparte con el resto de las aguas de la región de Tañi del Valle.

En la muestra del pozo de la Piscifactoría los cationes dominantes son el calcio (34,4 mg/L) y el sodio (30,36 mg/L) mientras que el anión es el bicarbonato (208 mg/L). En el caso del pozo del Camping Safari también el anión que predomina es el bicarbonato (136 mg/L) y los cationes, calcio (19,35 mg/L) y sodio (18,06 mg/L), con contenidos levemente menores.

Estas perforaciones se encuentran sobre materiales desarrollados en conos aluviales, con mayor participación de materiales finos.

#### APTITUD DEL AGUA PARA RIEGO Y CALIDAD PARA CONSUMO HUMANO

Para determinar la aptitud de agua para riego se utilizó el Diagrama de Wilcox (1955) (fig. 3) que realiza una clasificación de acuerdo al alto o bajo riesgo para la salinización o alcalinización del suelo. Así se encontró que la mayor parte de las muestras, tanto superficiales como subterráneas, se ubican dentro de la Clase I (C1S1), que corresponde a salinidad baja y baja condi-



REFERENCIAS	
▲	Superficial
○	Pozo Freático
●	Pozo Semiconfinado

CLASIFICACION			
MUESTRA N°	CLASE	APTITUD	PELIGROSIDAD SALINA PELIGROSIDAD SODICA
1, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17 y 19	I	Buena a Regular	C1 S1
3 y 18	II	Buena a Regular	C2 S1
2	III	Regular a Mala	C2 S3

**Fig. 3.** Diagrama de Calidad de aguas superficiales y subterráneas en los distintos puntos de muestreo para determinar su aptitud para riego.

ción sódica, aptas para todo tipo de cultivos y pueden usarse en todos los suelos con pocas posibilidades de alcanzar elevadas concentraciones de sodio intercambiable.

Las muestras del Barrio Los Mimbres (N°4) y de la Piscifactoría del Mollar (N°18) pertenecen a la Clase II (C2S1), con salinidad media y baja condición sódica, aptas para todo tipo de cultivo con moderado grado de lavado de suelo (plantas moderadamente tolerantes).

La muestra del pozo freático Las Nubes (N°2) pertenece a la Clase III (C2S3), correspondiente a salinidad media y alta condición sódica, aptas para plantas moderadamente tolerables a la salinidad y no pueden usarse en suelos con drenajes deficientes.

Para determinar la calidad de las aguas de la zona para consumo humano se obtuvieron los siguientes resultados: los análisis bacteriológicos dieron negativos para la presencia de Coliformes Totales. El límite determinado por el CAA es de 3NMP/100mL ya que si se supera este valor indica riesgo sanitario para consumo.

Los fluoruros dieron valores entre 0,4 y 0,8 mg/L, valores inferiores al límite máximo permitido por el CAA de 1,3 mg/L de acuerdo a la temperatura media promedio del área geográfica considerada.

Los nitratos dieron valores bajos entre 0,4 y 6,8 mg/L, por lo que también se encuentran por debajo del límite permitido de 45 mg/L.

Los metales tales como Mn, Pb, Cu, Ni y Cd también dieron por debajo del límite establecido por el CAA.

Con respecto al arsénico se obtuvieron en todos los casos valores inferiores al límite permitido de 0,01 mg/L a excepción de la muestra N° 2, Las Nubes, con un valor de 0,5 mg/L que supera dicho límite.

## CONCLUSIONES

Según los resultados obtenidos se puede concluir que, en general, las aguas del valle de Tafí son diluidas con características propias de ríos de montaña que circulan por basamento cristalino. Estas se clasifican en

su mayoría como bicarbonatadas mixtas. Dos muestras ubicadas en la zona de las Cumbres de Mala-Mala se clasifican como bicarbonatadas sódicas, ya que pertenecen a un ambiente de glacis de erosión donde predominan los sedimentos finos limo loésicos, e indica un intercambio catiónico con las aguas que circulan sobre dicho sedimento.

La zona del Valle de Tafí es un área excelente para la explotación y aprovechamiento del agua subterránea con acuíferos de elevada a alta permeabilidad. Desde el punto de vista químico, son aguas poco evolucionadas y de composición catiónica mixta, con poco tiempo de residencia en el acuífero.

Se sugiere, como lugar más adecuado para la ubicación de perforaciones, la parte distal de las paleoformas presentes en la zona. Estos estudios deberían complementarse con la realización de sondeos eléctricos verticales, para definir la profundidad y espesor de los posibles niveles saturados.

Se concluye también que son aguas de buena calidad para su utilización para consumo humano, ya que los parámetros que la determinan se encuentran dentro de los límites establecidos por la Organización Mundial de la Salud. Desde el punto de vista de su aptitud para riego, las aguas analizadas son aptas para todo tipo de cultivos. La excepción la constituye un pozo freático localizado sobre sedimentos limo-loésicos, el que no es apto para la provisión de agua por su alto contenido de As.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su agradecimiento al Consejo de Investigaciones de la Universidad Nacional de Tucumán (CIUNT) que financió esta investigación en el marco del Proyecto G/427.

## BIBLIOGRAFÍA

- Aceñolaza, F. G. y A. Toselli. 1981. Geología del noroeste argentino. Publicación Especial N° 1287 de la Facultad de Ciencias Naturales. Universidad Nacional de Tucumán. 212 p.

- APHA, AWWA y WPCF. 1992. Standard Methods For the Examination of Water and Wastewater. Ed. Díaz de Santos. España.
- Baldís, B. A. J.; J. G. Viramonte y J. A. Salfity. 1975. Geotectónica de la comarca comprendida entre el Cratógeno Central Argentino y el borde austral de la Puna. II Congreso de Geología Económica, Actas 4: 25-44, Buenos Aires.
- Bossi, G. 1969. Geología y estratigrafía del sector sur del Valle de Choromoro. Acta Geol. Lilloana 10 (2): 19-61.
- Caminos, R. 1979. Sierras Pampeanas Noroccidentales, Salta, Tucumán, Catamarca, La Rioja y San Juan. En: Leanza, A. (Ed), Geología Regional Argentina 2: 225- 291. Academia Nacional de Ciencias de Córdoba.
- Collantes, M. 2001. Paleogeomorfología y geología del Cuaternario de la cuenca del Río Tafi, Departamento Tafi del Valle, provincia de Tucumán, Argentina. Tesis Doctoral. Facultad de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Salta. (Inédito), 273 pp. Salta.
- Collantes, M. y J. Sayago. 1987. Paleogeomorfología del valle de Tafi, provincia de Tucumán. X Congreso Geológico Argentino. Tomo 3: 221-224. Tucumán.
- Custodio y Llamas. 1983. Hidrología subterránea. Tomo I. Ed. Omega. Madrid, España. 1060 pp.
- González, O. E. y O. Barreñada. 1994. Geología y estructura de las nacientes del Río Amaicha y El Infiernillo, provincia de Tucumán. XII Congreso Geológico Argentino y II Congreso de Exploración de Hidrocarburos. Actas 3: 72-81. Mendoza.
- Instituto Geográfico Militar. 1998. Carta de Imagen Satelitaria de la República Argentina. 1ª Edición. E. 1: 250.000, San Miguel de Tucumán. 2766-II.
- Instituto Geográfico Militar. 1998. Carta de Imagen Satelitaria de la República Argentina. 1ª Edición. E. 1: 100.000, San Miguel de Tucumán. 2766-17.
- INDEC (Instituto Nacional de Estadísticas y Censo). 2010. <http://www.indec.mecon.ar/>. Argentina.
- Lecomte, K.; G. García; S. Förmica y P. Depetris. 2011. Hidroquímica de ríos de montaña (sierra de Córdoba, Argentina): elementos mayoritarios disueltos. Latin American Journal of Sedimentology and Basin Analysis. 18 (1): 43-62.
- López, J. P. y L. Bellos. 2010. Petrología y Geoquímica del granito Los Cuartos, Tafi del Valle, Tucumán, Noroeste de Argentina: su integración al esquema magmático regional. Estudios Geológicos 66 (2): 147-156.
- Nicolli, H.; A. Tineo; C. Falcón y J. García. 2005. Distribución del Arsénico y otros elementos asociados al agua subterránea en la comarca de Los Pereyra, Provincia de Tucumán. II Seminario Hispano-Latinoamericano sobre Temas actuales de Hidrología Subterránea y IV Congreso Hidrogeológico Argentino. Acta: 83-91. Río Cuarto.
- Pasquini, A.; K. Lecomte y P. Depetris. 2004. Geoquímica de ríos de montaña en las Sierras Pampeanas: II. El río Los Reartes, sierra de Comechingones, provincia de Córdoba. Revista de la Asociación Geológica Argentina. 59 (1): 129-140.
- Rodier, J. 1981. Análisis de las Aguas. Editorial Omega, Buenos Aires, Argentina. 253 pp.
- Santillán de Andrés, E. y T. Ricci. 1980. Geografía de Tucumán. Publicación N° 1299 de la Facultad de Filosofía y Letras de la Universidad Nacional de Tucumán. 177 pp.
- Secretaría de Recursos Hídricos de la Nación y EVARSA. 2000. Estadística hidrológica del siglo XX. República Argentina. 291 pp.
- Sosa Gómez, J. A. 2000. La terminación austral de cordillera Oriental. 17 Simposio sobre la Geología de Latinoamérica. Revista Perfil Band 18: 4. Stuttgart.
- Tineo, A.; R. Fernández; C. Guerrero y E. De la Vega. 1984. Hidrogeología. En: Colegio de Graduados en Ciencias Geológicas de Tucumán (Ed.), Geología de Tucumán: 155-170, Tucumán.
- Toselli, A. y Rossi de Toselli, J. 1998. El basamento metamórfico-ígneo de las Sierras Pampeanas de la provincia de Tucumán. En: Colegio de Graduados en Ciencias Geológicas (Ed.), Geología de Tucumán: 47-55, Tucumán.
- Torres Bruchmann, E. 1978. Las clasificaciones climáticas de Koppen y Thornthwaite. Serie Didáctica N° 48. Facultad de Agronomía y Zootecnia, Universidad Nacional de Tucumán, Tucumán, 27 pp.
- Van Zuidam, R. 1976. Geomorphological development of the Zaragoza Región, Spain processes and landforms related to climatic changes in a large Mediterranean river basin. International Institute for Aerial Survey and Earth Sciences (ITC). The Netherlands, 211 pp.
- Wilcox, L. V. 1955. Classification and use of irrigation water. U.S. Department of Agriculture. USA. Circular N° 969, 19 pp.