

# Caracterización Hidroquímica de la Cuenca de Santa Rosa con Métodos Multivariados y Predicción Espacial de Contaminantes

*Battistella, Romina*<sup>(1)</sup>; *Ortega, Irene*<sup>(1)</sup>; *Morvillo, Monica*<sup>(2)</sup> & *Patricia Luna*<sup>(1)</sup>

(1) Instituto Nacional del Agua-Centro Regional de Aguas Subterráneas

(2) Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales-Universidad Nacional de San Juan

E-mail: [rbattistella](mailto:rbattistella@ina.gob.ar); [iortega](mailto:iortega@ina.gob.ar) { @ina.gob.ar }

**RESÚMEN:** La exploración de nuevas zonas para la explotación del agua subterránea en la cuenca de Santa Rosa, provincia de Catamarca, está motivado por el creciente aumento de la frontera agrícola y la necesidad de afrontar períodos de bajas precipitaciones. Los recursos hídricos subterráneos de esta cuenca, revisten un interés estratégico ya que son utilizados para consumo humano, ganadería y riego. La detección de contaminantes de origen antrópico y natural, es de especial importancia para determinar la aptitud del agua subterránea y así mejorar la calidad de vida de los pobladores y sus actividades agrícolas. Las mediciones físico-químicas determinadas en el CRAS (Centro Regional de Agua Subterránea), a partir del muestreo de 72 perforaciones pertenecientes al acuífero libre con profundidades máximas de 400 metros, fueron analizadas con métodos estadísticos multivariados –Componentes Principales y Clúster- y tomadas como base para la construcción de mapas predictivos del Arsénico, Boro, Fluoruro y conductividad eléctrica, con la técnica geostadística Kriging. Del análisis multivariado se dedujeron dos clases de aguas en la región, sódica bicarbonatada y sódica sulfatada bicarbonatada, cuyas caracterizaciones iónicas fueron representadas con diagramas circulares. Por otra parte, se determinó para cada perforación el grado de restricción de uso para riego según la guía de la Food and Agriculture Organization (FAO).

Palabras clave: Hidrogeoquímica, Análisis Multivariado, Predicción Espacial, Kriging

## 1 INTRODUCCIÓN

El presente trabajo refiere a la caracterización hidroquímica de la Cuenca de Santa Rosa con aplicación de técnicas del análisis estadístico. La información surge en el marco del Acuerdo Especifico N° 01/12 del Convenio I.N.A.- Gobierno de Catamarca, para el “Estudio Hidrogeológico de las Cuencas de Santa Rosa y Cuenca de Aconquija”, firmado para determinar la disponibilidad del recurso hídrico subterráneo y zonas potencialmente aptas, en base a un relevamiento hidrogeológico de pozos, análisis hidroquímico, medición de precipitaciones y prospección geoeléctrica (Torres *et al*, 2014).

La provincia de Catamarca se encuentra emplazada en un sistema de 9 cuencas (ETISIG, 2014) dentro de las cuales se encuentra nuestra zona de estudio (Figura 1). La misma se localiza sobre depósitos aluviales e indiferenciados y fanglomerados del cuaternario. Contiene los acuíferos más importantes de la región, explotados actualmente para riego, consumo humano y ganadería. Las localidades más importantes corresponden a Los Altos, Alijilán y Bañado de Ovanta (Figura 2). En este tipo de cuencas, los recursos hídricos subterráneos revisten un interés estratégico. La exploración de zonas de aptitud de agua de riego está fundada en el creciente aumento de la frontera agrícola, y en la necesidad de afrontar períodos de bajas precipitaciones.

La extracción de agua subterránea por bombeo de pozos, responde en general a la necesidad de riego complementario para la explotación agrícola. La soja, el maíz y el trigo son los cultivos que predominan en el área de estudio (según informes de monitoreo de cultivos del NOA para el período 2001 a 2014

correspondientes al INTA). Para otros usos, como el industrial, o humano y ganadero, no es significativa. El riego se realiza principalmente con sistema de aspersión a pivote central, aplicado con mayor densidad en el centro, centro-norte y noroeste del área. Por otra parte, el abastecimiento de agua en la zona sur y área urbanizada, se realiza mediante sistema de canales que distribuyen el agua procedente de los diques La Cañada y Sumampa.

Entre las problemáticas más importantes para determinar la calidad de agua, están la salinidad y la detección de contaminantes de origen antrópico y de origen natural. La presencia de contaminantes disueltos en el agua, puede producir afecciones a la salud de personas y animales que la consumen, y limitar el crecimiento de determinados cultivos. De ahí que surge la necesidad de estudios vinculados principalmente a la calidad de los recursos hídricos, que resulte no sólo un aporte al conocimiento científico sino también conducente al mejoramiento de la calidad de vida de la población y el medioambiente.

En consecuencia, el presente trabajo tiene por objetivo la caracterización hidroquímica del recurso hídrico subterráneo de la Cuenca de Santa Rosa empleando técnicas de análisis estadístico.

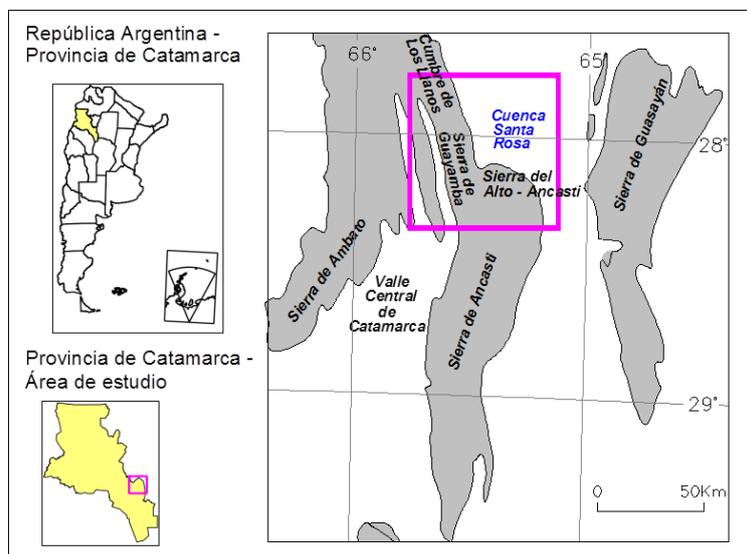


Figura 1: Ubicación geográfica

## 2 UBICACIÓN Y MARCO HIDROGEOLÓGICO

La Cuenca de Santa Rosa forma parte de la cuenca del río Salí-Dulce cuyo límite sur, en el área de trabajo y fuera del área montañosa, pasa aproximadamente a latitud de la localidad de Cortaderas. Integra la provincia geológica de Sierras Pampeanas y comprende la llanura desarrollada al este de los bloques montañosos que integran la Sierra del Alto o de Ancasti y la continuación al norte en la denominadas sierra de Guayamba - Cumbre de Potrerillo y Cumbre de Los Llanos. Esta llanura de la provincia de Catamarca forma parte de una mayor con nivel base local en el embalse de Río Hondo y limitada al oeste con las elementos orográficos antes mencionados y al este con la Sierra de Guasayán, abarcando parte de las provincias de Catamarca, Tucumán y Santiago del Estero.

Los terrenos aflorantes en la región de estudio corresponden a rocas metamórficas e intrusiones de rocas ígneas del Precámbrico – Paleozoico y una cubierta sedimentaria que comprende sedimentitas y sedimentos del Terciario y del Cuaternario. Los depósitos de piedemonte comprenden materiales gruesos en

proporciones variables, bloques, gravas, arenas y finos en menor magnitud y pasan a los depósitos aluviales que forman la planicie aluvial y las granulometrías presentes son arenas, gravas y limos, desarrollándose también acumulaciones eólicas en forma de loess.

La geometría de la cuenca sedimentaria en el subsuelo está conformada, desde abajo hacia arriba, por tres unidades: *Basamento Resistivo*, constituido por rocas ígneas y metamórficas del Precámbrico - Paleozoico conocidas como Basamento Cristalino, consideradas no acuíferas y correspondientes al basamento hidrogeológico de la cuenca de agua subterránea; *Relleno Conductivo*, se correlaciona con los terrenos del Terciario, Mioceno; y se considera acuífero secundario y *Relleno Resistivo*, éste último comprende sedimentitas y sedimentos del Terciario (Plioceno), sedimentos porosos y permeables del Cuaternario. Esta última unidad contiene los acuíferos más importantes de la región, explotados actualmente para riego, consumo humano y ganadería. Estos acuíferos son de tipo libre y en profundidad del subsuelo las intercalaciones de materiales finos entre capas de mayor permeabilidad, favorecen las condiciones de semiconfinamiento. Posee espesores máximos de unos 404 m y en la región donde se encuentra la mayoría de los pozos del área, varía en general entre unos 200 m y 350 m (extraído IT-329, 2014). Estos terrenos presentan las mejores condiciones hidráulicas para almacenar y conducir agua, constituyendo los principales acuíferos del área de estudio.

La mayoría de las perforaciones relevadas para el proyecto están en uso y cerca del 60% bajo la modalidad de riego complementario de explotaciones agrícolas. El caudal extraído por los pozos destinados a riego, es de aproximadamente 200 m<sup>3</sup>/h promedio, llegando a un máximo de unos 370 m<sup>3</sup>/h. La profundidad media de las perforaciones es de unos 180 m y la profundidad media de entubación de unos 170 m. Los filtros de los pozos normalmente son de más de un tramo, con un máximo de 15 tramos de filtros por pozo. La longitud total promedio de filtros de 40 m por pozo, con un máximo de 66 m y un mínimo de 13 m.

El flujo del agua subterránea tiene un sentido general suroeste – noreste en dirección a las partes más bajas del valle de Santa Rosa y egresa de éste hacia las provincias de Tucumán y Santiago del Estero. Asimismo se pone en evidencia que el área de recarga de la cuenca de agua subterránea del Valle de Santa Rosa se vincula a las sierras del borde sur y suroccidental (sierras de El Alto – Ancasti y Guayamba) a partir de las precipitaciones pluviales que allí ocurren, (Figura 2).

En cuanto a la profundidad del nivel estático del agua subterránea, es mínima en cercanías de las sierras del borde sur con profundidades menores a 10 m y en el sector noroeste del área de estudio con profundidades inferiores a 30 m. En los sectores restantes se profundiza el nivel de agua subterránea hasta máximos de 80 m en el sector centro y centro –este.

### 3 METODOLOGIA

#### *Muestreo*

Dentro del Acuerdo Específico 01/12 se identificaron 181 perforaciones y 11 pozos excavados. Para la realización del presente estudio se tomaron 72 muestras de agua subterránea a partir de 66 perforaciones y 6 pozos excavados, de propiedades privadas y estatales, en diferentes períodos del año 2014. Dependiendo del

lugar de ubicación en la cuenca, los pozos explotan horizontes permeables comprendidos entre 10 y 323 metros de profundidad. La extracción de agua se hizo según la técnica descrita en “Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater” (APHA, AWWA, WEF, 1998). Se determinaron *in situ* la conductividad eléctrica, pH y temperatura del agua. La muestra principal fue acompañada en todos los casos de dos muestras complementarias: una para el análisis de nitrato, y la otra para las determinaciones por absorción atómica, preservadas a pH < 2, a 4°C.

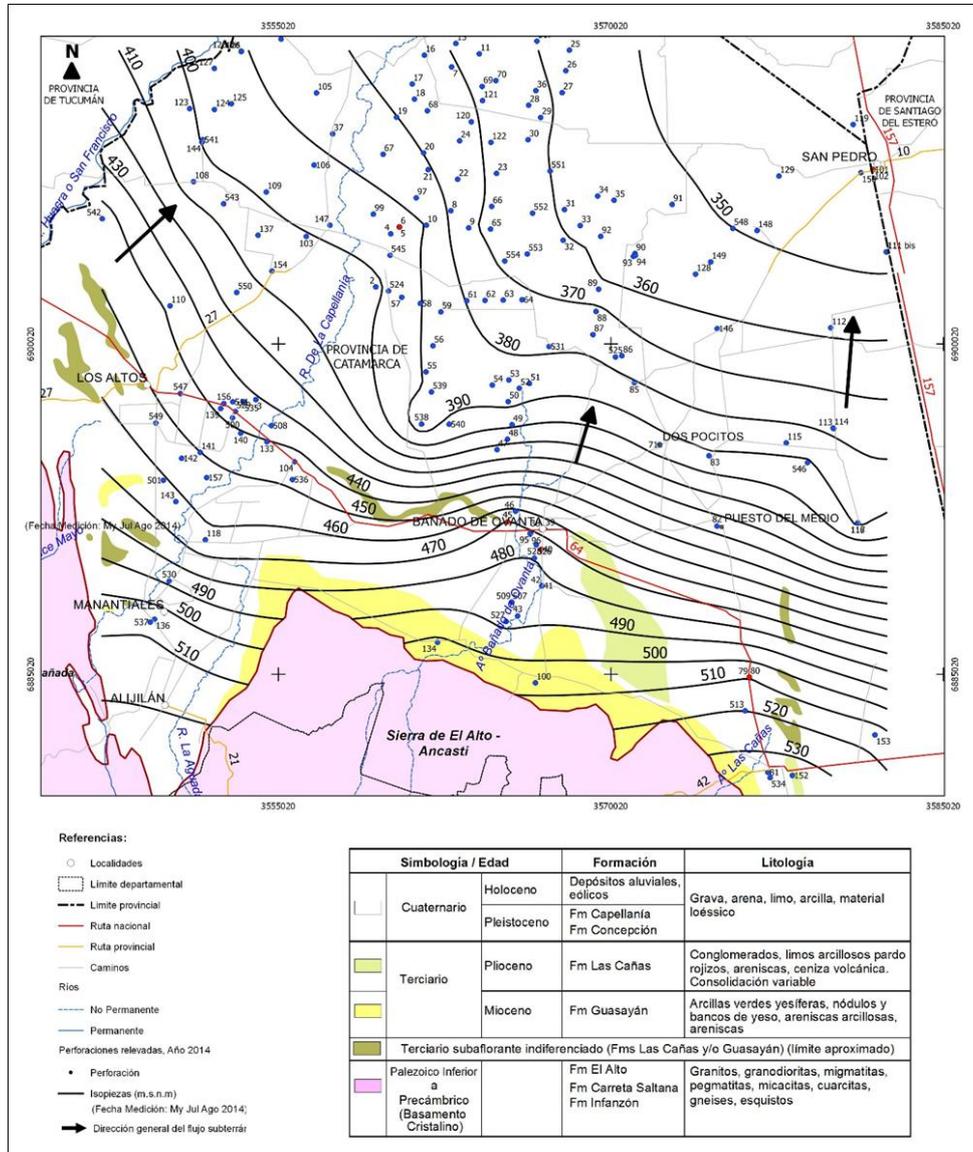


Figura 2: Área de estudio, Cuenca de Santa Rosa

Los análisis realizados en el laboratorio del CRAS, incluyen las determinaciones que se mencionan a continuación:

- Propiedades físicas y de agregación: C.E. (Conductividad eléctrica), pH (Potencial Hidrógeno), alcalinidad total, dureza total y de no carbonatos y sólidos disueltos calculados.
- Iones principales: Ca<sup>++</sup> (Calcio), Mg<sup>++</sup> (Magnesio), Na<sup>+</sup> (Sodio), K<sup>+</sup> (Potasio), CO<sub>3</sub><sup>=</sup> (Carbonatos), HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> (Bicarbonato), SO<sub>4</sub><sup>=</sup> (Sulfato) y Cl<sup>-</sup> (Cloruro).

- Constituyentes inorgánicos menores no metálicos: SiO<sub>2</sub> (Sílice), B (Boro), NO<sub>3</sub><sup>-</sup> (Nitrato) y F (Fluoruro).
- Metales traza disueltos: Fe (Hierro), Mn (Manganeso), As (Arsénico), Zn (Zinc), Cd (Cadmio) y Cu (Cobre).

### *Métodos Estadísticos*

#### ➤ *Análisis Exploratorio Multivariado*

Este análisis se aplicó sobre el conjunto de variables más completas desde el punto de vista de la detección de sus mediciones. Es decir, existen variables determinadas para varios pozos que no han sido incluidas en este estudio. Con este criterio se conformó una matriz de datos, disponiendo en filas a las 72 perforaciones y en columnas a sus coordenadas geográficas con sus determinaciones en trece variables: pH, Ca<sup>++</sup>, Mg<sup>++</sup>, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>-</sup>, Cl<sup>-</sup>, SiO<sub>2</sub>, F, B, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, As.

El procesamiento se realizó con el software libre R versión 3.3.1 (2016) cuyo entorno y lenguaje es el más utilizado actualmente en investigación, para la aplicación estadística.

En primera instancia se aplicó la técnica conocida como Análisis de Componentes Principales (ACP). Esta metodología permite reducir la dimensión de variables y convertirlas a un nuevo sistema de componentes independientes, definidas como una combinación/rotación de las originales y ordenadas de mayor a menor importancia según la mayor cantidad de información o entropía (varianza/autovalor) que concentran. Cada variable original aporta en mayor o menor grado a cada componente principal, con un peso o ponderación en la componente, que es proporcional al coeficiente de correlación lineal con ésta, permitiendo interpretar la correspondencia de las variables originales con las componentes conceptualizadas como grupos de variables (Peña, 2002).

Esta metodología se apoya en los coeficientes de correlación lineal de los pares de variables originales, por lo que, en forma previa se debe explorar la condición de linealidad con escalas en lo posible simétricas en cada variable. La falta de simetría puede ser indicio de relaciones no lineales y de coeficientes de correlación lineal “falsos y bajos”. En estos casos se deben considerar las transformaciones logarítmicas del tipo log (X+C) ó log (C-X), según la asimetría sea positiva o negativa respectivamente, para mejorar la performance de los resultados.

El análisis estadístico multivariado es un enfoque cuantitativo e independiente de la clasificación de las aguas subterráneas que permite el agrupamiento de muestras y la creación de correlaciones entre los parámetros químicos (Cloutier et al., 2008). A posteriori del ACP, se aplicó Análisis de Clúster o de Conglomerados a fin de agrupar y clasificar las perforaciones en grupos homogéneos, en función de las similitudes o similaridades entre estas desde el punto de vista de un conjunto variables, que para el caso se tomaron a las dos primeras componentes principales (CP1 y CP2). Existen dos tipos de análisis de agrupamiento: los jerárquicos y partitivos.

Los *métodos jerárquicos* son algoritmos secuenciales en los que en cada etapa se enlazan las unidades o grupos de ellas hasta integrar o separar a la última unidad, (aglomerativo o divisivos), tomando como información la matriz de distancias o similitudes entre los elementos. Dentro de esta metodología, existen diversos criterios (simple, completo, promedio, centroide y Ward) según se defina la distancia de enlace o encadenamiento entre grupos (height), a partir de la cual se representa todo el proceso de agrupamiento en el dendrograma o árbol jerárquico. Entre los criterios de enlace más recomendados está el simple, -distancias mínimas- que permite distinguir los últimos elementos integrados como posibles unidades atípicas y de Ward, que produce grupos más compactos o densos. Como medida de similitud global del agrupamiento, se aporta el coeficiente aglomerativo, que surge de restar a 1 el promedio de las distancias relativas de enlace de cada elemento con el resto. Dicho coeficiente (Agglomerative Coefficient) toma valores entre 0 y 1, resultando el agrupamiento más compacto (disimilitud mínima) cuanto más aproximado a 1 se encuentre (Peña, 2002).

Por otra parte, los *métodos partitivos* (K-means), parten de predeterminar el número K de grupos y trabajan con la matriz de datos, asignando las unidades en forma secuencial en uno u otro grupo, hasta que cada grupo se estabiliza según un criterio de optimalidad.

#### ➤ *Predicción espacial de contaminantes*

En términos generales kriging es un método geoestadístico de predicción (interpolación) espacial, a partir del cual se construyen los mapas de curvas de nivel. Éste define para cada sitio  $s$  no muestreado –definido en una grilla regular sobre el dominio geográfico  $D$ - un valor predicho  $V_k(s)$  que combina linealmente los valores observados o disponibles  $v_{s_1}, \dots, v_{s_n}$ , considerando el carácter aleatorio de los datos georreferenciados  $V(s)$  (1) más otros dos aspectos característicos de los procesos espaciales, estos son, la tendencia  $\mu(s)$  y la autocorrelación espacial parametrizada por la función semivariograma  $\gamma(h)$ , expresados a través de un modelo aditivo o estructural  $V(s) = \mu(s) + \delta(s)$ , Cressie (1991).

$$V_k(s) = \lambda_1 v_{s_1} + \dots + \lambda_n v_{s_n} \quad (1)$$

La función semivariograma  $\frac{1}{2} \text{Var}(\delta(s) + h) - \delta(s) = \gamma(h)$ , es el sello propio de la geoestadística y mide en términos generales la variabilidad de los incrementos de la variable, en función de la separación  $h$  entre los sitios.

La ventaja del krigeado es que, a diferencia de los criterios de interpolación determinística como “vecino más cercano”, “triangularización con interpolación lineal”, considera las distancias y direcciones en que rige la influencia o autocorrelación espacial, produciendo representaciones más ajustadas a la realidad y aporta una medida de error mínima de la predicción.

#### ➤ *Caracterización química*

Además de la salinidad total, pH, alcalinidad y dureza del agua, para la clasificación según la composición química de las muestras se consideran los iones mayoritarios presentes. El método utilizado en el CRAS es una modificación a partir del método de Kurlov, basado en el criterio de considerar en la denominación del

agua, aquellos aniones y cationes que sobrepasan el 20 % de miliequivalentes por litro (meq/l). Siendo  $Ca^{++}$ ,  $Mg^{++}$  y  $Na^+$  los cationes, y  $HCO_3^-$ ,  $SO_4^{--}$  y  $Cl^-$ , los aniones (Fagundo, 1996).

Las mediciones del laboratorio obtenidas en mg/l, se convierten en meq/l y en porcentaje de meq/l (% meq/l). El porcentaje de cada uno de estos iones se calcula como sigue (2):

$$X^{+/-} \% meq = X^{+/-} meq/l \times 100 / (\Sigma X^+ + \Sigma X^-) meq/l \quad (2)$$

Donde:

$X^{+/-}$  Cación o anión X cuya concentración relativa vamos a determinar

$\Sigma X^+$  Sumatoria de los cationes principales en me/l (calcio + magnesio + sodio)

$\Sigma X^-$  Sumatoria de los aniones principales en me/l (bicarbonato + sulfato + cloruro)

### ➤ *Clasificación de agua para riego*

Entre los sistemas desarrollados para alertar del peligro de salinización o sodificación del suelo a partir de algunos parámetros medidos en el agua de riego, uno de los más utilizados en nuestro país es el propuesto por Richards (1954) para el Laboratorio de Salinidad de los Estados Unidos (Riverside, California) (USLS). Este sistema se basa en la medida de la C.E. del agua para determinar el riesgo de salinización del suelo y en el cálculo de la Relación de Adsorción de Sodio (RAS) para definir el riesgo de sodificación o alcalinización. Sin embargo, existen otras metodologías como la desarrollada por Ayers y Westcot (1985) para la FAO, quienes amplían los rangos de restricción de uso del agua, basado en el análisis conceptual de la relación RAS/C.E. y su influencia en la infiltración. En la Tabla 2 se muestra una extracción de dicha guía con los valores de C.E. y RAS, la cual se adoptó como criterio de clasificación para éste trabajo.

La ecuación que mide la relación de las concentraciones relativas de  $Na^+$  con respecto al  $Ca^{++}$  y al  $Mg^{++}$  (RAS) es la de Gapón (3), que junto a la C.E. son los principales parámetros para definir la restricción del uso de agua para riego.

$$RAS = \frac{[Na^+]}{\sqrt{\frac{[Ca^{++}] + [Mg^{++}]}{2}}} \quad (3)$$

## 4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En primer lugar presentamos el resultado de aplicar Componentes Principales. El número de componentes tenidas en cuenta son las que presentan varianzas mayores a la de sus variables estandarizadas, es decir mayores a 1. En el diagrama de barras de la Figura 3, se representan las varianzas decrecientes del nuevo sistema y una línea de puntos horizontal superpuesta en el nivel 1, a partir del cual se deducen tres componentes significativas. La componente CP1, de mayor importancia por la varianza o información (entropía) que concentra, está explicada (compuesta) mayormente por el  $Na^+$ ,  $SO_4^{--}$ ,  $Cl^-$ ,  $Ca^{++}$ ,  $Mg^{++}$  y B, según se deduce de los coeficientes más elevados de la primera columna en la matriz de rotación, que arroja el software "R" (Figura 4). Las variables agrupadas en ésta componente están relacionadas íntimamente con la C.E. En segundo lugar, con menor entropía, el As,  $HCO_3^-$ ,  $F^-$  y pH conforman la componente CP2, y por

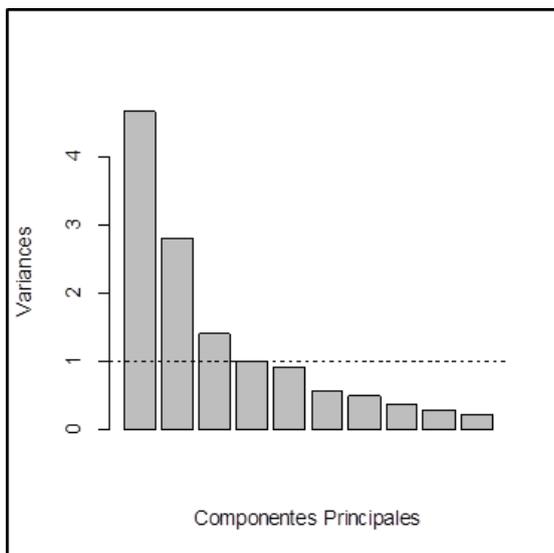
último, el  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SiO}_2$  y  $\text{K}^+$  justifican la componente CP3. Como resultado, son las variables predominantes que determinan las características hidroquímicas del agua subterránea de las perforaciones analizadas.

**Tabla 2:** Guía para la interpretación de calidad de agua para riego

Problema Potencial de Riego			Unidad	Grado de restricción de uso		
				NINGUNO	MODERADO	SEVERO
<b>Salinidad (afecta la disponibilidad de agua para el cultivo)</b>						
C.E.			dS/m	< 0.7	0.7 – 3.0	> 3.0
o						
SDT			mg/l	< 450	450 – 2000	> 2000
<b>Infiltración (afecta la tasa de infiltración de agua en el suelo)</b>						
SAR	= 0 – 3	y C.E.	=	> 0.7	0.7 – 0.2	< 0.2
	= 3 – 6		=	> 1.2	1.2 – 0.3	< 0.3
	= 6 – 12		=	> 1.9	1.9 – 0.5	< 0.5
	= 12 – 20		=	> 2.9	2.9 – 1.3	< 1.3
	= 20 – 40		=	> 5.0	5.0 – 2.9	< 2.9

En segundo lugar, como resultado de aplicar análisis de clúster aglomerativo con enlace simple, se pudieron identificar en el dendrograma correspondiente (Figura 5), tres pozos con datos hidroquímicos “atípicos”. En el sector derecho del dendrograma, donde se ubican los últimos agrupamientos, se observan el pozo cavado ‘45’ de 8.3 metros de profundidad, y a las perforaciones ‘509’ (180 mts) y ‘532’ (235 mts), como los más distintos con respecto a la totalidad de pozos estudiados. Excepto el pozo cavado 45, el resto son perforaciones entubadas profundas multifiltradas.

Asimismo, se realizó el agrupamiento de las perforaciones con enlace de Ward, cuyo dendrograma se muestra en la Figura 6. Del mismo, se desprende una clasificación en dos grupos de perforaciones/pozos; el Grupo 1 (color negro) y el Grupo 2 (color rojo).



**Figura 3:** Varianzas de las primeras diez componentes principales.

```
Standard deviations:
      PC1    PC2    PC3
      2.1581 1.6692 1.1865

Rotation:
      PC1    PC2    PC3
pH      0.119 -0.423  0.044
Ca..    0.363 -0.197 -0.087
Mg..    0.365 -0.085 -0.126
Na.     0.435  0.057  0.064
K.      0.187  0.128 -0.232
HCO3.   0.111  0.434 -0.119
SO4.    0.428 -0.013  0.065
Cl.     0.430 -0.020  0.052
SiO2    -0.050  0.317  0.541
F.      0.099  0.427 -0.267
B       0.321  0.104  0.368
NO3.    0.026  0.183 -0.605
As...   0.011  0.490  0.175
```

**Figura 4:** Salida de R, desvío estándar de las tres CP y coeficientes o pesos de las variables en los 3 componentes principales.

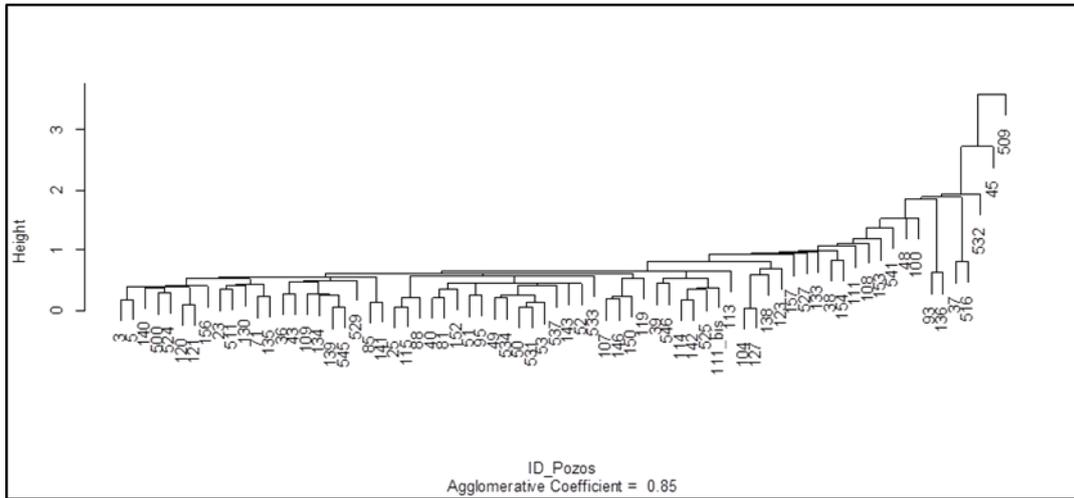


Figura 5: Dendrograma de agrupamiento de las perforaciones con enlace simple.

La Figura 7 es una representación geográfica de los puntos muestreados ubicados espacialmente por sus coordenadas geográficas, donde se graficó también el recorrido del Río San Francisco y Río de la Capellanía, las localidades de Los Altos, Alijilán y Bañado de Ovanta. Cabe destacar que las representaciones cartográficas producidas con el software R están delimitadas por defecto al interior de un dominio geográfico cuadrangular, definido por las coordenadas extremas de las perforaciones, no pudiéndose visualizar aspectos geográficos que se encuentren externos al mismo.

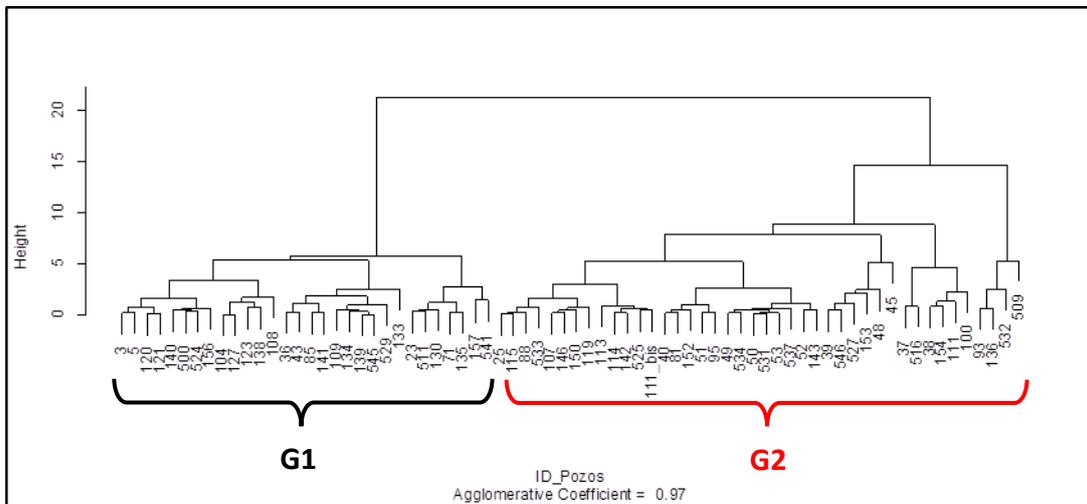


Figura 6: Dendrograma de agrupamiento de las perforaciones con enlace de Ward

Puede visualizarse que los puntos negros, correspondientes al G1 se encuentran más o menos desplazados con respecto a los puntos rojos del G2, esto podría indicar ciertas similitudes de la hidrogeoquímica de los pozos cercanos a los recorridos de los ríos y a la zona de recarga del acuífero.

Las perforaciones del G2 se encuentran mayormente desplazadas hacia el centro y sureste del área de estudio. Los pozos detectados como atípicos pertenecen al G2. Dichos pozos pertenecen a empresas agrícolas (45 y 509) y al gobierno de Catamarca (532). Las características distintivas de los tres casos fueron valores elevados de CE, particularmente elevadas concentraciones de los iones  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{++}$ ,  $\text{SO}_4^-$  y  $\text{Cl}^-$ .

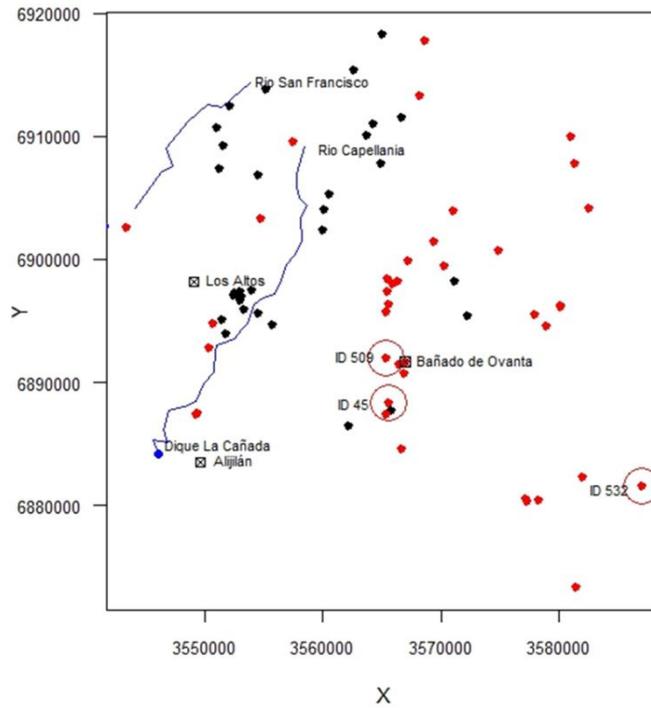


Figura 7: Posición geográfica de los pozos atípicos.

Uno de los problemas clásicos de degradación de la tierra que ha tenido que enfrentar el hombre, ha sido el de controlar, prevenir o mejorar los suelos afectados por la salinidad. En las regiones áridas, semi áridas y estepas, donde la evaporación es mayor que las precipitaciones, se ubican las regiones más afectadas por sales (Kovda, 1964). Las sales se encuentran en el agua de riego a partir de la meteorización de las rocas, además de la disolución lenta del carbonato de calcio, sulfato de calcio y de otros minerales, transportadas por el agua de riego y depositadas en el suelo en donde se acumulan en la medida que el agua se evapora o es consumida por los cultivos. La solubilidad de los cationes y aniones de las sales disueltas ocurre en forma equivalente. La suma de cationes es igual a la suma de aniones. Para determinar las diferencias en cada grupo, G1 y G2, se analizó la composición del agua, según los miliequivalentes de sus iones principales. El resultado se muestra en la Figura 8, dando agua de tipo sódica bicarbonatada en el G1 con un 36% de  $\text{Na}^+$  y 35% de  $\text{HCO}_3^-$  sobre el total de iones principales. Y el agua del G2 es de tipo sódica sulfatada bicarbonatada con 38% de  $\text{Na}^+$ , 24% de  $\text{SO}_4^{=}$  y 19 % de  $\text{HCO}_3^-$ .

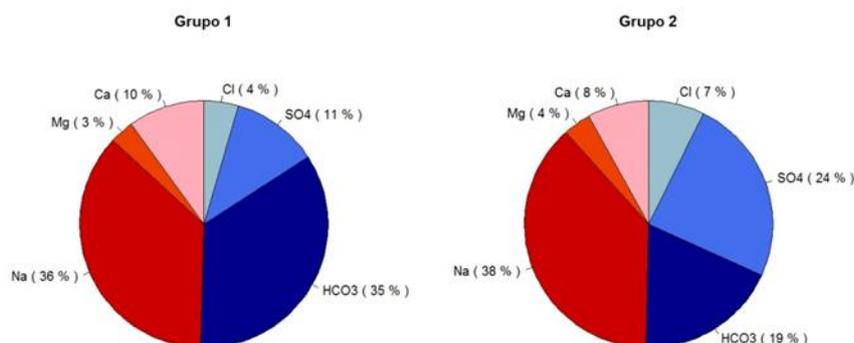


Figura 8: Composición iónica del agua de los pozos del G1 y G2.

Los dos factores más comunes de calidad de agua que afectan la infiltración, son la salinidad y el contenido de  $\text{Na}^+$  en relación al  $\text{Ca}^{++}$  y al  $\text{Mg}^{++}$ . Una elevada salinidad puede favorecer la infiltración. Una baja salinidad o agua con alto contenido de  $\text{Na}^+$  con respecto al  $\text{Ca}^{++}$  puede disminuir la infiltración. Ambos factores pueden operar al mismo momento. Cerana *et al.* (2006) investigaron el efecto del incremento del catión  $\text{Na}^+$ , por medio del riego con aguas bicarbonatadas sódicas, y su relación con la conductividad hidráulica, en vertisoles, y demostraron que el aumento del  $\text{Na}^+$  de intercambio provocó la dispersión de arcillas y la consiguiente inestabilidad estructural. A mayor valor de RAS, mayor potencial de expansión y dispersión de arcillas, y menor conductividad hidráulica del suelo (Pérez, 2002).

Regando con agua de alto contenido de  $\text{Na}^+$  y bajo contenido de  $\text{Ca}^{++}$  y  $\text{Mg}^{++}$  existe una dispersión de los agregados provocada por el  $\text{Na}^+$  que obtura en parte los macro y mesoporos disminuyendo la infiltración (Sánchez, *et al.* 2015). Debido a que el agua subterránea de esta zona se utiliza de forma complementaria para abastecer el riego con pivote central, deberían tenerse ciertas precauciones ya que afecta en el transcurso del tiempo la estructura del suelo y en consecuencia, el rendimiento de los cultivos, lo que haría indispensable tener obras de drenaje para mitigar dicho problema.

En base a la guía de restricción del uso de agua para riego de Ayers y Westcot (1985) se elaboró con el software R un gráfico (Figura 9) con las pautas de clasificación según el RAS y la C.E., brindando una herramienta sencilla de utilizar para cualquier caso que se cuente con las dos variables para una determinada muestra de agua. En dicho gráfico se encuentra el RAS en el eje de las ordenadas y la C.E. en las abscisas, los colores indican el grado de riesgo de infiltración, donde el naranja es el más severo, el amarillo leve a moderado y el verde sin riesgo de infiltración. Por último se ubicaron en el gráfico los 72 pozos del presente estudio según sus valores en RAS y C.E., dando como resultado una zonificación evidente del G1 y G2, dentro del grupo de riesgo leve a moderado. En el caso de la perforación 516, con un  $\text{RAS}=17$  y una  $\text{C.E.}=1560 \mu\text{S}/\text{cm}$ , es el único pozo que se ubica en la zona roja de riesgo de infiltración. Los pozos atípicos junto a 6 pozos más se localizaron en el sector verde. En estos pozos en cuanto al RAS y la C.E. no hay riesgo de infiltración, siendo evidente que el problema del agua de riego es la salinidad del agua.

Por otro lado, el gráfico de la Figura 9 pone en evidencia que el G1 posee los valores más bajos de C.E. y RAS y distribuidos de forma más compacta, mientras que en el G2 los valores de ambas variables son superiores y más dispersos. No obstante, casi la totalidad de las perforaciones entran en la zona amarilla. Similares resultados son descriptos en el IT-329, donde Torres, *et al* (2014), concluyen que de acuerdo a su conductividad eléctrica el agua de la mayoría de las perforaciones es de clase C2 y C3 es decir que poseen una peligrosidad salina entre media y moderada según el criterio del laboratorio del Riverside, mientras que los valores de RAS clasifican a la mayoría de estas muestras entre S2 y S3 (peligrosidad sódica entre media y alta). Estos resultados indican que debería realizarse un buen manejo en el tiempo con este tipo de agua, para no tener problemas de infiltración del suelo.

Por último se realizaron mapas predictivos de C.E., F<sup>-</sup>, As y B, en base a los datos de esos elementos, no obstante no se tuvieron en cuenta los pozos atípicos para realizar la predicción. Ello en virtud de la

consideración de estos valores como excepcionales respecto a las similitudes entre variables hidroquímicas que evidencian los grupos identificados.

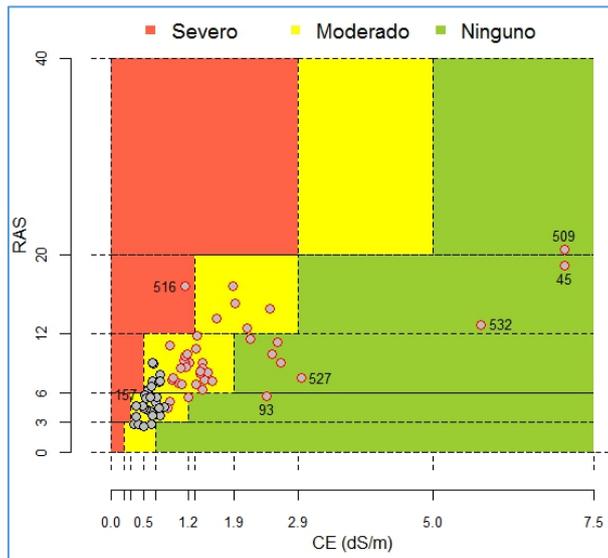


Figura 9: Grado de riesgo de infiltración en el suelo.

El mapa de predicción de la C.E. (Figura 10) muestra que las menores C.E. se encuentran hacia la zona centroeste y noroeste, coincidentemente con la localización del G1 y los abanicos aluviales del Río San Francisco y Río de la Capellanía. Se observan C.E. crecientes hacia la zona suroeste y noroeste, donde se distribuyen mayormente las perforaciones del G2, en correspondencia con la proximidad de afloramientos de depósitos de edad terciaria (Figura 2) y con la dirección de flujo subterráneo y descarga (Figura 2).

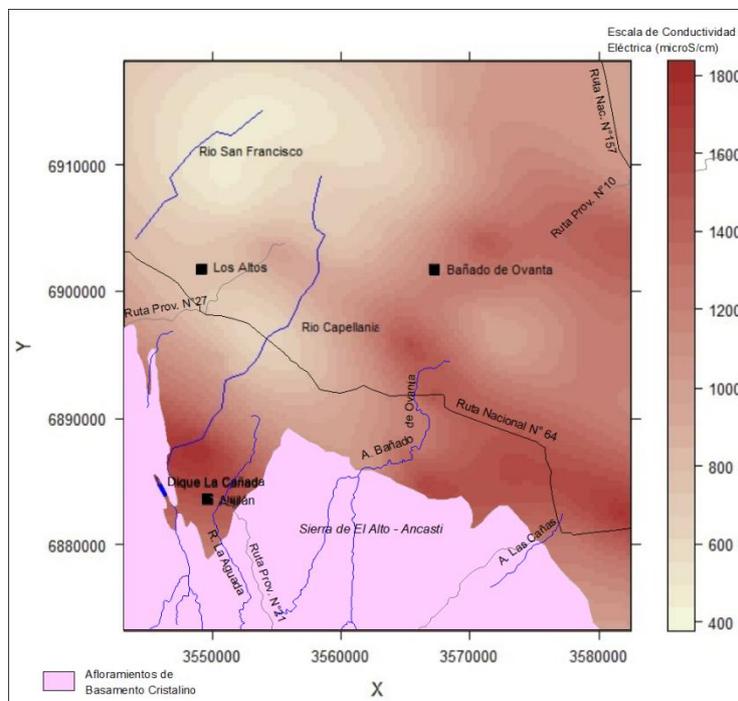


Figura 10: Predicción espacial de conductividad eléctrica

Los mapas de predicción, se hicieron en función a los límites propuestos por los organismos de control de aguas para consumo humano (OMS, 2006), ganadero y agrícola (FAO, 1985). Solamente se incluyeron en las predicciones a las variables químicas cuyos valores excedieron los mencionados límites (Tabla 3), dentro de los 72 pozos que formaron parte de este análisis.

Se muestran en la Figura 11 los mapas de predicción de F<sup>-</sup>, As y B respectivamente, donde las zonas claras corresponden a las menores concentraciones y las zonas más oscuras a altas concentraciones dentro de los rangos medidos de esas variables.

El flúor es un elemento común en la naturaleza, que forma parte constitutiva de la mayoría de los organismos, sin embargo en exceso puede provocar efectos adversos en la salud humana. La máxima concentración recomendada en cultivos es 1 mg/l en suelos ácidos, sin embargo a pH neutros y alcalinos, el efecto de éste ion queda inactivado, y pueden tolerarse concentraciones mayores (Pratt y Suarez, 1990). En el área de estudio las mayores concentraciones de F<sup>-</sup> se ubican en el sector centro-sur, en adyacencias de afloramientos de depósitos de edad terciaria, como puede observarse en el mapa izquierdo de la Figura 11.

La presencia de As en toda la región chacopampeana y sus efectos sobre la salud de la población ha sido ampliamente documentada (Merino 1999; Nicolli et al 1985; Concha et al 1998). Debido a que la enfermedad presenta características particulares en Argentina, los médicos la llamaron HACRE (hidroarsenismo crónico regional endémico). En la mayoría de estos trabajos, se hace referencia a una fuerte contaminación en aguas de escasa profundidad (entre 6 y 20 metros), y prácticamente no se mencionan datos de aguas profundas. Sin embargo en el trabajo realizado por Garcia, *et al* (1998) en la cuenca del Salí Dulce en la provincia de Tucumán, se hallaron valores elevados de As en aguas profundas. En este estudio, aproximadamente el 50% de las detecciones en los pozos superan los límites de As permitidos para consumo humano, y la mayoría superan los 100 metros de profundidad, reafirmando lo descripto por los autores mencionados anteriormente. El mapa de predicción de As de la Figura 13, muestra casi la totalidad de la cuenca posee valores > 0,01 mg/l de As en las aguas subterráneas.

El B es un importante micronutriente de difícil manejo debido a que su movilidad en los vasos conductores de las plantas varía, marcadamente, entre las especies vegetales con síntomas de deficiencia y toxicidad en un rango bastante estrecho (Malave y Carrero, 2007). No obstante, la toxicidad en cultivos es una de las principales limitaciones que tienen algunos suelos. El maíz, el trigo y la soja se encuentran clasificados como semitolerantes al B. Puede observarse en el mapa predictivo (Figura 13), que la zona noroeste es la que tiene valores más bajos de B, con moderado aumento en dirección este y sureste.

**Tabla 3:** Límites establecidos por organismos de control

Variable (mg/l)	Consumo Humano	Ganadería	Riego
<b>Fluoruro</b>	1.5	2	1
<b>Arsénico</b>	0.01	0.5	0.1
<b>Boro</b>	0.5	5	0,5 - 15

El análisis estadístico multivariado, en particular ACP, es un método esencialmente descriptivo que junto al análisis de Clúster, permitió agrupar espacialmente las perforaciones relevadas relacionando las variables físico-químicas estudiadas, lo que aportaría información valiosa al conocimiento de nuestros sistemas hidrogeológicos.

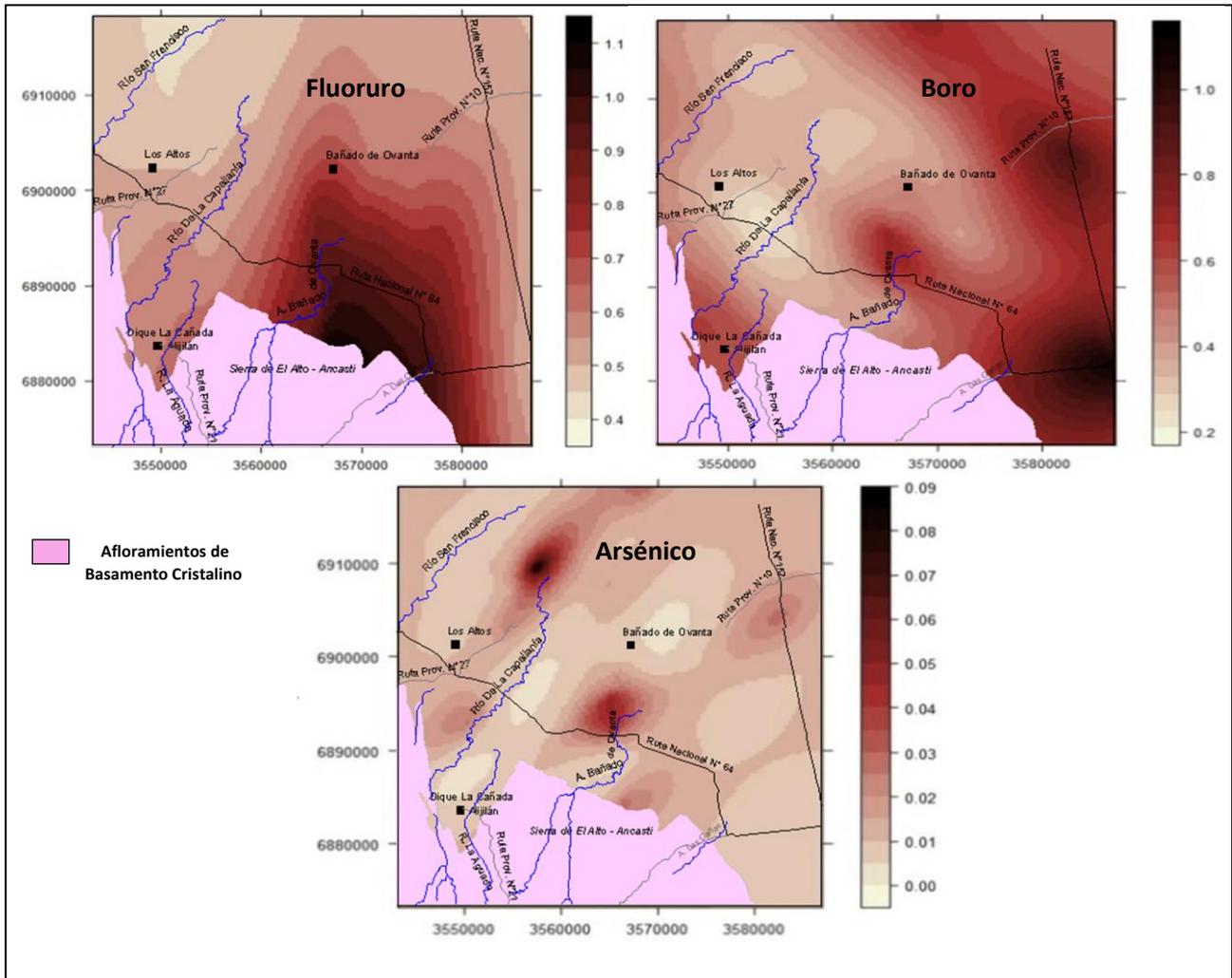


Figura 11: Mapas predictivos de Fluoruro, Arsénico y Boro

## BIBLIOGRAFIA

- APHA, AWWA, WEF, 1998. Standard methods for the examination of water and wastewater. Ed. 20, USA.
- Ayers, R.S. y Westcot, D.W., 1985. Water quality for agriculture. *FAO Irrigation and Drainage Paper* 29, Roma, 174
- Cerana, J.; Wilson, M.; De Battista, J.; Noir, J. y Quintero, C., 2006. Estabilidad estructural de los vertisoles de Entre Ríos en un sistema arrocero regado con agua subterránea. Argentina. *RIA*. Vol. 35, núm. 1, pp. 87-106.
- Cloutier, V., Lefebvre R., Therrien R., Martine M.M., 2008, Multivariate statistical analysis of geochemical data as indicative of the hydrogeochemical evolution of groundwater in a sedimentary rock aquifer system: *Journal of Hydrology*, 353, 294-313.
- Cressie, N.A.C., 1991. Statistics for spatial data, *John Wiley and Sons*, Inc., New York, 900 pp.
- Concha, G.; Nermell, B.; Vahter, M.V., 1998. Metabolism of inorganic arsenic in children with chronic high arsenic exposure in northern Argentina. *Environmental Health*.
- ETISIG (Equipo de trabajo interdisciplinario en sistemas de información geográfica), 2014. *Atlas Catamarca*. [www.atlas.catamarca.gov.ar](http://www.atlas.catamarca.gov.ar) Gobierno de Catamarca.
- Fagundo, J. R., 1996. "Química del agua kárstica". *Hidroquímica del Karst*. Ed. OSUNA, Universidad de Granada (España), 13-212.
- García, M. G.; Monserrat Aráoz, M. y Hidalgo, M del V., 1998. Contenido y distribución de metales pesados en las aguas subterráneas del S. E. de Tucumán. Centro de Investigaciones y Transferencia en Química Aplicada. Facultad de Ciencias Naturales e I.M.L. U.N.T.
- Kovda, V.A., 1964. Problems of Salinity and Waterlogging of Irrigated Land in West Pakistan; observations obtained during a ten-day visit, 16 - 26 August 1964; 29 p.
- Malave, A. y P. Carrero, 2007. Desempeño funcional del boro en las plantas. Venezuela. *UDO*. Vol. 7, núm. 1, 2007, pp. 1-14.
- Merino, M.H., 1999. Arsénico en aguas subterráneas. Un problema generalizado en la Llanura Chacopampeana. *Gerencia Ambiental*, pp. 528-569.
- Nicolli, H.B., O'Connor, T.E., Suriano, J.M., Koukharsky, M.A., Gómez Peral, M.A, Bertini, I.M., Cohen, L.I, Corradi, O.A, Baleani, O.A y Abril, E.G., 1985. Geoquímica del arsénico y de otros oligoelementos en aguas subterráneas de la llanura sudoriental de la provincia de Córdoba. *Miscelánea N°7*, Acad. Nac. Ciencias, Córdoba.
- Organización Mundial de la Salud, 2006. Guidelines for drinking water quality. Third Edition.
- Peña, D., 2002. Análisis de datos multivariantes. Mc Graw-Hill/Interamericana de España, S.A.U. *Miscelánea N°7*, Acad. Nac. Ciencias, Córdoba.
- Pérez, O., 2002. Efecto de la aplicación de aguas residuales industriales en las propiedades físicas y químicas del suelo. *Agrociencia*. Vol. 36, pp. 279-290.
- Pratt, P. y D. Suarez, 1990. Agricultural salinity assessments and management. Cap. 11. Pp 220-236. ASCE, N.Y.
- R Core Team , Version 3.3.1, (2016). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL: <http://www.R-project.org/>.
- Sánchez, R.M., Dunel Guerra, L. y M. Scherger, 2015, Evaluación de las áreas bajo riego afectadas por salinidad y/o sodicidad en Argentina. *Plan Nacional Agua, INTA*.
- Torres, C.; García, E.; Gianni, R.; Salvioli, G.; Urnicia, J.; Luna, P.; Carelli, M. 2014. IT-329, INA-CRAS, San Juan. Estudio hidrogeológico de las cuencas de Santa Rosa y del Aconquija. *Acuerdo específico N° 01/12. Convenio INA – Gobierno de Catamarca*.