

**Área de Consolidación: Métodos cuantitativos de investigación
agropecuaria**

**Caracterización del recurso hídrico subterráneo de la
provincia de Córdoba**

Franca Giannini

Tutor: Mariano Augusto Córdoba

Córdoba, 20 de febrero de 2015

Introducción

En la Tierra el agua abunda pero aquella de utilidad para uso antrópico es escasa. Si bien a nivel global la cantidad de agua es invariable y se define al recurso hídrico como renovable; el estado, la composición y su disponibilidad en distintos ambientes varían. Particularmente para el recurso hídrico subterráneo el tiempo de renovación puede fluctuar entre semanas a cientos o miles de años y además puede agotarse, a escala temporal humana, en muchos ambientes hidrológicos. Así mismo, a causa de la actividad del hombre puede darse la incorporación de sustancias tóxicas o de organismos potencialmente patógenos que tornan impropia el agua para el uso al que se la destina.

El hombre tiene derecho a utilizar el recurso hídrico subterráneo, pero tiene el deber de preservarlo y conservarlo. Es necesario, para administrar el recurso bajo esta consigna, caracterizar profundamente el mismo y entender la complejidad de su dinámica.

La caracterización de la calidad del agua subterránea en la Provincia Córdoba adquiere particular relevancia ya que, con excepción de la ciudad de Córdoba, son el recurso más utilizado en amplias regiones de la provincia para todas las actividades que impliquen consumo de agua (domésticas, ganaderas, industriales y riego). Entre estas actividades el riego de cultivos extensivos es la que más agua subterránea insume (Blarasin *et al.*, 2014a). En este contexto, se destaca el crecimiento sostenido de las áreas bajo riego suplementario observado en los últimos años en la provincia (Barrionuevo *et al.*, 2013), alertando sobre los posibles impactos no deseados al recurso hídrico subterráneo, en particular en zonas marginales.

La composición físico-química natural del agua subterránea varía fundamentalmente en función de aspectos geológicos y puede verse alterada en diferente grado por procesos de contaminación los cuales pueden estar asociados a la actividad productiva que se realice y el tipo de manejo. La contaminación del agua puede deberse a diferentes causas, siendo una de la más importante la de origen agropecuario. Las prácticas de cultivo con grandes aplicaciones de agroquímicos pueden contaminar el suelo y cuando las tasas de infiltración del agua son importantes, los compuestos derivados de tales aplicaciones pueden llegar al acuífero. Si los cultivos son regados artificialmente habrá más agua para la lixiviación de sales, nutrientes y plaguicidas que pueden alcanzar el agua subterránea. Además, la descarga de efluentes procedentes de la ganadería intensiva, tambos, corrales de aves, depósitos de agroquímicos, entre otros, puede producir localmente una contaminación orgánica o inorgánica muy significativa en el agua subterránea.

El agua subterránea que se almacena y llena completamente las fracturas o poros formados por las rocas fracturadas y los sedimentos (arenas, gravas, limos), forma un sistema denominado acuífero. Existen dos tipos de acuíferos: los freáticos y los confinados. El acuífero freático o libre es el más cercano a la superficie y el

agua se mueve debido a la fuerza de la gravedad. La base de este acuífero es una capa de material impermeable, arcillas y rocas, que puede ubicarse a distinta profundidad. El nivel superior es el nivel freático, definido como la altura que alcanza el agua en el acuífero y se encuentra sometido a la presión atmosférica ascendiendo o descendiendo en respuesta a los cambios de infiltración del agua de lluvia o por bombeo durante una extracción de agua. Los acuíferos confinados se encuentran a mayor profundidad y cubiertos por importantes espesores de sedimentos, por lo que el agua está sometida a una presión mayor que la atmosférica. La base y el techo de los acuíferos confinados son sedimentos de gran espesor prácticamente impermeables se denominan capas confinantes y están compuestos mayoritariamente por arcillas. El acuífero freático es el más afectado por procesos de contaminación difusa en áreas agrícolas a causa de la aplicación de fertilizantes, y también por contaminación puntual en sitios de ganadería intensiva o urbanización con saneamiento *in situ* (Blarasin *et al.*, 2014b). Así mismo, aquellos que tienen el nivel freático cercano a la superficie y/o presentan sedimentos muy gruesos en la zona no saturada *i.e.* muy permeables, son más vulnerables a la contaminación (Blarasin & Barrionuevo, 2005).

La descripción de los tipos de suelo y el tipo de uso de los mismos son de gran importancia y de frecuente uso en la agronomía. Junto a las características topográficas y climáticas determinan el tipo y rendimiento de la producción agropecuaria, como así también el grado de susceptibilidad ante las distintas alternativas de manejo. Consecuentemente surge la hipótesis de que la variabilidad de las características del suelo puede impactar la estabilidad de parámetros estructurales y de calidad de las aguas subterráneas.

Existen normas que fijan un criterio de calidad del agua de acuerdo a requerimientos científicos referidos a aspectos físicos, químicos y biológicos, según el uso determinado. La Organización Mundial para la Salud propone una clasificación de calidad en donde se diferencian siete clases de acuerdo a su uso: 1) aguas para el uso doméstico; 2) aguas para usos agropecuarios; 3) aguas marinas y costeras para la pesca; 4) aguas para recreación; 5) aguas para usos industriales; 6) aguas para la navegación y generación de energías; 7) aguas para el transporte y la dispersión (Guevara Vera, 1996). La calidad del agua para fines agropecuarios está establecida por las propiedades de dureza, salinidad y la toxicidad para el consumo animal. La dureza se define como la capacidad del agua para consumir jabón o producir incrustaciones y es determinada por la presencia de los elementos alcalinotérreos, fundamentalmente calcio y magnesio, y en menor medida iones tales como hierro, aluminio, manganeso, estroncio y zinc. El agua puede naturalmente poseer mala calidad para el consumo humano si presenta algunos elementos químicos que, al encontrarse por encima de los límites de aptitud establecidos, resultan tóxicos para la salud. Entre los elementos más importantes para determinar la calidad para consumo humano, se destacan el contenido de arsénico, flúor y nitratos. El Código Ali-

mentario Argentino (CAA) establece como límites para consumo humano 50 µg/L para arsénico, 1,3 mg/L para flúor y 45 mg/L para nitratos (Jarsun et al., 2008).

La generación de sistemas de información geográfica (SIG) que albergan datos espaciales multivariados o de múltiple variables, para un conjunto de sitios de una región, constituyen la base de mapeos de variables que definen la calidad del agua y que pueden resultar relevantes para la planificación sustentable del uso de los recursos.

El Análisis de Componentes Principales (ACP) constituye una herramienta analítica útil para el abordaje de datos multivariados (Balzarini *et al.*, 2008). Esta técnica permite identificar las variables que explican la mayor parte de la variabilidad total contenida en los datos, explorar las correlaciones entre variables y reducir la dimensión del análisis al combinar todas las variables en nuevos índices (variables sintéticas) denominados componente principal (CP). La incorporación de la información geográfica puede realizarse a posteriori del ACP mediante el uso de herramientas de la geoestadística (Webster & Oliver, 2007) para lograr mapas de variabilidad espacial multivariados por interpolación de las CP (Córdoba et al., 2012).

Se deben establecer unidades de análisis ambiental homogéneas y representativas del recurso que resulten más útiles para el ordenamiento territorial y de la gestión de los medios de producción.

Para el estudio de la dinámica del agua la unidad por excelencia es la cuenca hidrográfica. Una cuenca se define como un territorio que drena sus aguas a un mismo punto. Las cuencas a su vez se pueden agrupar en sistemas mayores según donde aporten sus aguas. Estos sistemas se denominan sistemas hidrográficos. (Dombeck, 2015)

Por otro lado, para describir ambientes orográficos también se han definido lo que son las áreas hidrogeológicas homogéneas, que son áreas definidas a partir de características geomorfológicas. (Blasarin et al., 2014a)

En la provincia de Córdoba la sistematización de datos necesarios para análisis de correlación entre múltiples variables distribuidas espacialmente a escalas regionales, es aún incipiente. No obstante se encuentra en camino y las instituciones estatales están encabezando este proceso. Por ello es necesario aportar a esta sistematización para generar insumos que permitan inferir conclusiones que ayuden a tomar decisiones de manejo relativas al uso de los recursos hídricos subterráneos y su relación con la actividad agrícola.

Objetivos

- Caracterizar los principales sistemas hidrográficos, áreas hidrogeológicas y tipo de suelo de la provincia en función de la calidad y composición del agua subterránea.
- Identificar correlaciones entre variables características del recurso hídrico subterráneo con datos de tipo de suelo y otros parámetros descriptivos de la superficie como la topografía.
- Estudiar la variabilidad espacial multivariada de los parámetros que definen la calidad y composición del acuífero y las características del terreno.

Materiales y métodos

Datos

La base de datos se construyó a partir de una grilla de sitios georreferenciados pertenecientes al muestreo de calidad de agua subterránea de la provincia de Córdoba. Para cada punto de muestreo se obtuvieron mediciones de pH, concentración de diferentes iones (Magnesio, Calcio, Sodio, Potasio Sulfatos, Cloruros, Nitratos, Arsénico y Fluoruros) conductividad eléctrica, cantidad de sólidos totales y profundidad del nivel estático del agua (Figura 1). A cada sitio de muestreo se le asignó la serie de suelo, las características topográficas del sitio (altimetría, pendiente y exposición), sistema hídrico superficial y el área hidrogeológica a la que pertenecen.

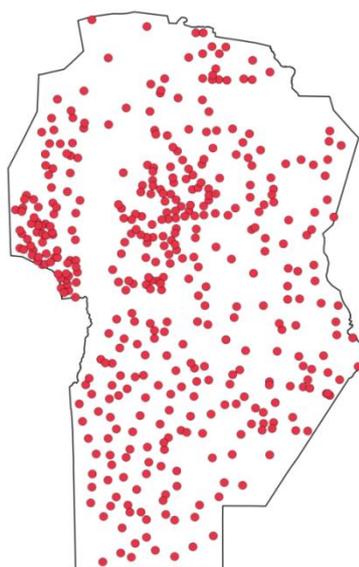


Figura 1: Puntos de muestreo. Adaptado de Dinámica, calidad y reservas de aguas subterráneas de la provincia de Córdoba.

Los puntos y las variables de calidad de agua y área hidrogeológica a la que pertenecen (Figura 2) se extrajeron de un SIG web pertenecientes a/ Proyecto de Investigación y Desarrollo PID 35_08 “Dinámica, calidad y reservas de aguas subterráneas de la provincia de Córdoba”. Las series de suelo se obtuvieron a partir del mapa de suelos de la provincia de Córdoba escala 1:500.000, elaborado por la Estación Experimental INTA Manfredi (Jarsun et al, 2008). La asignación de las cuencas y sistemas hidrológicos superficiales se realizó utilizando una adaptación del mapa de cuencas de Córdoba del Instituto Geográfico Nacional (Figura 3). Los

parámetros topográficos se calcularon a partir de un Modelo Digital de Elevación generado con tecnología de radar con una resolución 40 metros.



Figura 2: Áreas Hidrogeológicas.



Figura 3: Sistemas hídricos superficiales de la provincia de Córdoba adaptado de mapa de cuencas de Córdoba del Instituto Geográfico Nacional.

Las diferentes variables o capas de información se procesaron en Quantum GIS (Cita Qgis versión) para asignar a cada punto de muestreo la información de cada variable.

Procedimientos de Análisis

Los datos fueron sometidos a procedimientos de depuración vía la construcción de gráficos *box-plot* para la identificación de valores aberrantes. Para

caracterizar la composición y calidad del agua en función a las diferentes unidades de clasificación (sistemas hídricos superficiales, área hidrogeológica y tipo de suelo), se realizaron análisis de la varianza (ANAVA) para cada variable. Dado a que las variables pueden presentar autocorrelación espacial, los ANAVA se realizaron bajo un Modelo Lineal Mixto (MLM) que permite contemplar la correlación espacial que pudiera existir entre los puntos de muestreo. Para el ajuste de los MLM se utilizaron funciones de correlación espacial exponencial, esférica y gaussiana. La selección del modelo con mejor ajuste se realizó mediante el criterio de información de Akaike (AIC) (Akaike, 1973). El modelo de correlación espacial seleccionado se comparó con el modelo que supone independencia para el término de error (sin correlación espacial) utilizando también el AIC.

Para el estudio de la correlación entre variables se utilizó un análisis de componentes principales ACP. Los resultados del PCA se graficaron en un Biplot que permite representar, en un plano óptimo para el estudio de variabilidad, las diferencias entre los puntos muestreados y las variables que mejor explican las principales variaciones. Las componentes principales (CP) fueron posteriormente mapeadas utilizando la técnica de interpolación geoestadística kriging. Todos los análisis fueron realizado utilizando el *software* estadístico Infostat (Balsarini et al., 2008) y su interfaz que lo conecta con el *software* R (R Core Team, 2014).

Resultados y Discusión

Caracterización del agua subterránea

En todas las variables analizadas tanto por sistemas, áreas hidrogeológicas, orden de suelo y tipo de suelo, los Modelos Lineales Mixtos con estructura de correlación espacial del tipo exponencial presentaron el mejor ajuste de acuerdo al criterio de AIC. En los análisis por sistemas hidrográficos se mostraron diferencias significativas entre ellos para todas las variables de calidad y composición del agua, productividad de suelo y no así para las topográficas.

En las Tablas 1 y 2 se presentan los valores promedio de las variables. Los sistemas de Rio Quinto y General Roca, ubicados en el sur de la provincia, tuvieron los valores promedios más altos de pH (8,07 y 8,11), HCO_3^- (648,11 y 882,08 mg/L), Mg^{++} (47,74 y 61,7 mg/L), Na^+ (994,61 y 949,93 mg/L), Cl^- (718,35 y 1912,61 mg/L) y NO_3^- (54,56 a 121,7 mg/L). Los valores de Relación de Absorción de Sodio (RAS) (57,6 y 25,91) y Conductividad Eléctrica (CE) (8928,58 y 4383,88 μL) observados son también los más altos, incluso las medias de resumen arrojan valores para RAS superiores a 20, lo que implica serios riesgos de salinización de suelos si se utilizan estas aguas para riego (Jarsun, 2008). A estos inconvenientes se les suma los altos valores que se registran de F^- (4,09 y 3,19 mg/L), sobrepasando los límites que define la FAO, como aceptable (García, 2012). Esta es la región donde la napa se encuentra más cercana, entre 3 y 6 m, y debido a sus problemas de calidad genera problemas en años húmedos por afloramiento de napas en superficie. La escasa calidad de este acuífero con fines de riego podría estar influyendo de manera considerable en la productividad de los suelos de la zona ya que las medias del Índice de Productividad de los Cultivos (IPC) de ambos sistemas son bajos, 28,3 % y 30,83 % (Jarsun, 2008).

Los sistemas del norte de la provincia, Salinas Grandes que vierte hacia el oeste y Morteros que vierte hacia el este, presentan niveles elevados de Ca^{++} (48,98 mg/L). Ambos sistemas desembocan en puntos con aguas superficiales de alto tenor salino, Salinas Grandes y Marchiquita, por lo que es de esperarse que los indicadores de salinidad sean marcados. En la Tabla 1 se puede observar que las medias de conductividad son las menores. Esto se debe a que la unidad de análisis, engloba una heterogeneidad de cuencas superficiales y de acuíferos en distintas etapas de desarrollo (Blasarin et al., 2003).

Tabla 1. Contenido promedio de variables de calidad y composición de agua, productividad de suelo y topografía según sistemas hídricos superficiales.

Sistema	pH	HCO ₃ ⁻ (mg/L)	Mg ⁺⁺ (mg/L)	Ca ⁺⁺ (mg/L)	Na ⁺ (mg/L)	K ⁺ (mg/L)	SO ₄ ⁻ (mg/L)	Cl ⁻ (mg/L)	NO ₃ ⁻ (mg/L)
Rio Quinto	8,11†	684,11a	47,74a	48,98a	949,93a	24,11a†	24,11a†	718,35b	54,56b
General Roca	8,07	882,08a	61,7a	51,92a†	994,61a	36,49a	36,49a	1912,61a	121,7a
Carcaraña	7,78	630,93a	48,17a	72,93a†	755,55b	28,51b	28,51bc	524,89c	79,75b
Morteros	7,66	451,28b	26,72b	94,25a†	494,63bc	16,98c	16,98c	268,72c	28,64c
Salinas grandes	7,39	326,89c	15,91b	98,17†	309,78c	8,82c	8,82c	210,86c	14,67c

† Letras distintas indican diferencias estadísticamente significativas (p<0.05). Las áreas sombreadas corresponden a las medias informadas en el análisis.

Tabla 2. Contenido promedio de variables de calidad y composición de agua, productividad de suelo y topografía según sistemas hídricos

Sistema	As (µg/L)	F ⁻ (mg/L)	CE (µg/cm)	SDT (mg/L)	Prof NE	RAS	Ipc (%)	Elevación (m)	Pendiente
Rio Quinto	244,86a	4,09a	4383,88b	6039,75ab	-5,58c	25,91ab	28,38ab	330,85a	281022,78ab
General Roca	425,75a	3,16a	8928,58a	11855,12a	-3,89bc	57,6a	30,83ab	216,08a	148011,04b
Carcaraña	253,55a	2,05b	3976,03bc	5680,04bc	-9,82b	22,07bc	45,92a	252,87a	319768,63ab
Morteros	135,84b	1,33c	2521,04c	4573,2c	-20,41a	15,04cd	46,67a	313,7a	246847,48b
Salinas grandes	11,74b	1,05c	1724,31c	2339,3c	-24,43a	6,25d	21,98b	514,05a	339495,17a

† Letras distintas indican diferencias estadísticamente significativas (p<0.05). Las áreas sombreadas corresponden a las medias informadas en el análisis.

En el análisis por áreas hidrogeológicas homogéneas los resultados mostraron diferencias significativas entre ellas, para todas las variables de calidad y composición del agua, productividad de suelos y topográficas. Las Tablas 4 y 5 muestran las medias y diferencias para cada variable analizada. Las áreas hidrogeológicas Cuenca del Río Popopis, Llanura Sur eólica medanosa y humedales registraron, los valores de pH (8,19 y 8,15) y Na^+ (1310,62 y 1757,82 mg/L) más altos. Esto se corresponde con lo informado anteriormente para los sistemas hidrográficos superficiales del sur de la provincia, Río Quinto y General Roca, que son los que contienen a estas dos áreas. El área Pie de Sierra de Comechingones informa también pH básico (8,15) pero no se corresponde con altos valores de Sodio. El RAS informado (36,09) excede los recomendados para riego en las tres zonas. Para estas dos cuencas del sureste de la provincia, los valores que definen la dureza del agua como, el total de sólidos disueltos SDT (10648,98 mg/L) también manifiesta sus valores más altos. Particularmente el área Cuenca del Río Popopis muestra valores de Cl^- , As y F^- (358,57 $\mu\text{g/L}$, 3,81 mg/L y 1465,51 mg/L) perjudiciales para el consumo animal y el humano (García, 2012). En el noreste de la provincia las áreas periféricas a la laguna Marchiquita son las que presentan valores a considerar para el uso de sus aguas subterráneas para riego y consumo, estas son las áreas de Altos de Morteros, Cuenca de Río Dulce y Cuenca Río Xanaes, esto se refleja en RAS (38,73, 15,22 y 26,44), la CE (4138,57, 4412,25 y 2617,22 $\mu\text{g/cm}$), SDT (591224, 16354 y 6222,99 mg/L). Un resultado a tener en cuenta, es que la media de Arsénico para el área Cuenca de Río Xanaes es considerablemente alta (332,52 $\mu\text{g/L}$) (Tabla 5).

Las zonas bajo riego en la provincia de Córdoba se encuentran principalmente sobre el área hidrogeológica Valle de Conlara, Pie este de la sierra central, Cuenca inferior de Río Suquia, Llanura este de interfluvios, Pie de sierra norte y Cuenca de Río Xanaes. En función de esto podemos ver en las Tablas 3 y 4 que el área hidrogeológica de Valle de Conlara cuenta con muy buenas calidades de agua subterránea para riego, registrando un valor de pH de 7,26 y un RAS de 6,44, también se puede observar que la profundidad del acuífero es la mayor siendo de alrededor de 28 m. El resto de las áreas hidrogeológicas homogéneas en zonas de riego, se ubican al este del sistema hídrico de Morteros, y se caracterizan por tener altos valores de RAS entre 10 y 20 por lo que la utilización del acuífero para estos fines implicaría ciertos inconvenientes.

Al comparar los resultados de los análisis de los sistemas hidrográficos con las áreas hidrogeológicas homogéneas, podemos ver que en el norte de la provincia las medias de las áreas hidrogeológicas no se corresponden con las medias de los sistemas hidrográficos que las contienen (Figura 4). Por ejemplo, la media de RAS para el sistema de Morteros es de 15,04 y las medias del área de Cuenca Río Xanaes y el área de Alto de Mortero son de 26,44 y 38,73, respectivamente. Esto ocurre porque existen otras zonas como el área Cuenca de Río Sequía que registra un valor de RAS

de 10,94, que atenúan el valor de la variable. Esto ocurre con prácticamente todas las variables. A raíz de lo cual se puede decir que los sistemas hidrográficos como unidad de análisis no serían representativos ya que abarcan una zona excesivamente amplia y heterogénea que se encuentra mejor descrita por unidades más pequeñas y con características más homogéneas como las áreas hidrogeológicas.

Tabla 3. Contenido promedio de variables de calidad y composición de agua, productividad de suelo y topografía según áreas hidrogeológicas homogéneas.

Áreas hidrogeológicas	pH	HCO ₃ ⁻ (mg/L)	Mg ⁺⁺ (mg/L)	Ca ⁺⁺ (mg/L)	Na ⁺ (mg/L)	K ⁺ (mg/L)	SO ₄ ⁼ (mg/L)	Cl ⁻ (mg/L)	NO ₃ ⁻ (mg/L)
Cca Rio Suquia	7,65cd	362,02cde	18,56bc	82,35ab	276,46cd	13,68b	455,06abcd	136,61bc	16,99cde
CCa Rio Xanaes	7,77bcd	635,97bc	18,03c	61,5bc	623,87c	19,54b	582,65bcd	272,44bc	39,04abc
CCa Rio Calamuchita	7,62cd	687,25bc	35,04b	72,27ab	956,69c	30,08ab	868,79abc	533,49bc	102,59a
CCa Rio Chocancharava	7,76bcd	563,83c	61,09bc	73,06ab	819,44c	27,28ab	959,94abcd	545,67bc	108,89a
CCa Rio Popopis	8,19a	800,63ab	85,92a	70ab	1757,82a	33,95a	1190,89a	1465,51a	62,22a
Pie E de las sierras norte	7,81bcd	303,12cd	51,71b	129,5a	447,11bc	22,77ab	829,57ab	269,93bc	35,36ab
Pie de las sierras Comechingones	8,15a	511,91bc	13,04bc	23,24bc	366,91c	12,21ab	259,06cd	92,92bc	41,18cd
Sierras y valles Intermontan	7,52de	403,15cd	17,47bc	84,67ab	179,92d	9,75bc	158,71d	48,29c	20,67bcde
CCa de Salinas Grandes	7,6cde	340,42de	19,28bc	88,11ab	408,91cd	8,08c	476,97bcd	363,41bc	16,8abcd
Valle de Conlara	7,26e	270,8e	15,49c	104,41ab	273,72cd	7,15bc	332,15d	251,35ab	8,4de
Cca del Rio Dulce	7,79abcd		15,75bc	73,25ab	566,75ab	5abc	400,75abcd	612,75ab	12,25abcd
Llanura este de interfluvios	7,83abc	532,22c	35,79b	86,9ab	691,7abc	21,21ab	798,12ab	416,97ab	41,97e
LLanura S eolica medanosa	7,92ab	794,33a	57,53b	67,21bc	1310,62a	34,27a	984,13ab	1008,59ab	87,24a
Altos de Morteros		756,88abc	21,1bc	27c	886abc	26,33ab	420,23abcd	592,77abc	43,55e

† Letras distintas indican diferencias estadísticamente significativas (p<0.05). Las áreas sombreadas corresponden a las medias informadas en el análisis

Tabla 4. Contenido promedio de variables de calidad y composición de agua, productividad de suelo y topografía según áreas hidrogeológicas homogéneas.

	As (µg/L)	F⁻ (mg/L)	CE (µg/cm)	SDT (mg/L)	Prof NE	RAS	Ipc (%)	Elevación (m)	Pendiente
Cca Rio Suquia	106,67bc	1,68bc	1787,58b	4204,81abc	-9,93cde	10,94bc	56,05b	96,32abc	222384,61b
CCa Rio Xananés	332,52ab	1,65bc	2617,22b	6222,99abc	-8,01de	26,44a	39,58d	99,34abc	235766,15b
CCa Rio Calamuchita	323,48ab	1,25bc	3886,75b	5552,5bc	-5,09de	26,43ab	47,06bc	93,96abc	191605,77b
CCa Rio Chocancharava	283,13bc	1,66abc	4008,72b	5726,75abc	-6,65de	20,31ab	46,38bc	164,92abc	346814,71b
CCa Rio Popopis	358,57ab	3,81a	7454,29ab	10648,98a	-2,94ef	36,09a	22,86bcd	59,4abc	280351,33b
Pie E de las sierras norte	20,04c	1,13bc	2840,98b	4058,54a	-35,11a	8,79ab	48,77bc	119,14ab	228254,01b
Pie de las sierras Comechingones	193,8ab	3,65abc	1582,45ab	2260,65abc	-10,51bcd	16,35ab	31bcd	138c	338747,76b
Sierras y valles Intermontañas	31,17c	1,44bc	1104,49b	1577,84bc	-14,96bc	4,93c	22,71bcd	198,04abc	539696,08a
CCa de Salinas Grandes	3c	1,04bc	2710,71ab	3118,92bc	-26,05ab	8,92bc	18cd	97,45bc	275109,38b
Valle de Conlara	8,44c	0,82c	1710,21b	2443,16c	-28,01a	6,44bc	24,11cd	153,8abc	257953,9b
Cca del Rio Dulce		1,1abc	4412,25ab	16354a	-1,26f	15,22ab	18d	2,28bc	198249,99b
Llanura este de interfluvio	192,27bc	1,84ab	3465,66ab	4950,95a	-25,58abc	20,22ab	51,69bc	120,55abc	250927,27b
LLanura S eólica medana	269,26a	3,48a	5799,53ab	7920,28ab	-5,82e	32,19a	42,48bc	75,17ab	247123,79b
Altos de Morteros	60abc	1,62abc	4138,57b	5912,24c	-8,1bcde	38,73a	71,86a	6,28a	176590b

† Letras distintas indican diferencias estadísticamente significativas ($p < 0.05$). Las áreas sombreadas corresponden a las medias informadas en el análisis

Al analizar la calidad del acuífero según las características de suelo se hizo hincapié en el orden de suelo y en el tipo de drenaje reportado para ese suelo.

El ANAVA mostró diferencias significativas entre orden y tipo de drenaje para las variables de calidad y composición del agua (pH, Na⁺, As, SDT y RAS), las variables de productividad de suelos y las variables topográficas. Las medias y su significancia se describen en las Tablas 6 y 7. Para las variables de pH 8,09 y Na⁺ 1330,87 mg/L los alfisoles registraron medias significativamente mayores. Sabiendo de las propiedades dispersantes del sodio, sobre todo sobre suelos arcillosos, el riego con estas aguas o la cercanía de estas napas implica serios problemas en la permeabilidad de los suelos. Otro aspecto a tener en cuenta es que en este tipo de suelos es donde el acuífero se encuentra más superficial, alrededor de los 3 m de profundidad. Estos problemas son los más significativos a la hora de definir la productividad agrícola, es por eso que el IPC resulta significativamente menor.

Para analizar la calidad del acuífero según el tipo de drenaje hay que tener en cuenta que drenaje es la eliminación de agua de superficie por un conjunto de factores que son la infiltración, la permeabilidad y el escurrimiento (Jarsun, 2008). Se puede observar que los suelos pobremente drenados son los que registran altos valores de pH y sodio y la menor profundidad del nivel estático, siendo los problemas de permeabilidad causados por las aguas subterráneas sódicas. En estos la conductividad eléctrica (5623,86 μ /cm), el RAS 44,92 y los SDT presentan los mayores valores. También los suelos con menor drenaje registran los mayores valores de cloruros incluso sobrepasando los niveles permitidos, lo mismo ocurre con fluoruros y arsénico (766,87 μ /L y 3,25mg/L)(García , 2012).

Los suelos con mayor drenaje registran los valores más altos de calcio (110,46 mg/L). Estos iones generalmente derivan de sales altamente solubles por lo que esta mayor concentración puede deberse a un enriquecimiento de sales desde la superficie debido a la alta permeabilidad de los suelos. Se puede observar que el excesivo drenaje se da en los puntos de mayor pendiente y mayor profundidad del acuífero (18 m), por lo tanto, estos serían los puntos que menor contaminación puntual podrían generar pero podrían estar escurriendo materiales a otras zonas potencialmente contaminantes.

Tabla 5. Contenido promedio de variables de calidad y composición de agua, productividad de suelo y topografía según orden de suelo.

	pH	HCO₃⁻ (mg/L)	Mg⁺⁺ (mg/L)	Ca⁺⁺ (mg/L)	Na⁺ (mg/L)	K⁺ (mg/L)	SO₄⁼ (mg/L)	Cl⁻ (mg/L)	NO₃⁻ (mg/L)
Alfisol	8,09a	894,4a	41,11a	54,55b	1330,87a	29,22a	1000,01a	936,45a	58,7a
Aridisol	7,34b	334,44a	17,23a	120,14a	380,64ab	8,69a	458,63a	376,47a	21,2a
Entisol	7,61bc	431,37a	22,91a	87,02ab	393,79ab	11,62a	361,22a	262,97a	30,34a
Molisol	7,76c	548,9a	38,97a	81,3ab	712,75b	23,66a	710,13a	455,63a	54,83a

† Letras distintas indican diferencias estadísticamente significativas (p<0.05). Las áreas sombreadas corresponden a las medias informadas en el análisis

Tabla 6. Contenido promedio de variables de calidad y composición de agua, productividad de suelo y topografía según orden de suelo.

	As (µg/L)	F⁻ (mg/L)	CE (µg/cm)	SDT (mg/L)	Prof. NE	RAS	Ipc (%)	Elevación (m)	Pendiente
Alfisol	660,2a	2,92a	5623,86a	13521,18a	-3,67a	40,61a	16,57a	126,74a	223436,86b
Aridisol	8,86b	0,7a	2298,73a	2838,63ab	-24,79a	8,28ab	20,55b	320,41b	210286,53b
Entisol	72,47b	2,34a	2013,84a	2690,7ab	-11,16a	10,21b	15,22b	552,43a	458302,17a
Molisol	194,35ab	1,92a	3459,69a	5013,02b	-17,47a	19,3a	48,74c	313,56a	268311,51b

† Letras distintas indican diferencias estadísticamente significativas (p<0.05). Las áreas sombreadas corresponden a las medias informadas en el análisis

Tabla 7. Contenido promedio de variables de calidad y composición de agua, productividad de suelo y topografía según tipo de drenaje de suelo.

	pH	HCO₃⁻ (mg/L)	Mg⁺⁺ (mg/L)	Ca⁺⁺ (mg/L)	Na⁺ (mg/L)	K⁺ (mg/L)	SO₄⁼ (mg/L)	Cl⁻ (mg/L)	NO₃⁼ (mg/L)
Excesivamente drenado	7,42c	401,52c	21,5b	110,46a	252,63c	9,56c	292,31d	198,22d	15,39c
Algo excesivamente drenado	7,76b	482,72c	31,77b	63,01bc	656,69c	18,67b	521,59c	447,89c	58,7a
Bien a algo excesivamente drenado	7,81b	480,3c	35,19ab	83,75abc	529,68bc	20,42b	636,08bc	326,65bc	44,15ab
Bien drenado	7,7b	583,68b	40,38ab	105,34ab	729,31b	27,22a	762,38ab	423,23ab	71,29a
Moderadamente bien drenado	7,61bc	635,77b	29,78ab	88,62abc	856,32ab	28,95a	827,35ab	603,06a	35,21bc
Imperfectamente drenado	7,75b	516,33bc	49,97 ^a	66,06bc	843,8bc	21,96b	875,22ab	567,17a	53,38ab
Pobrementemente drenado	8,15a	912,78a	41,22 ^a	48,65c	1375,86a	32,37a	1029,55a	936,13a	67,32a

† Letras distintas indican diferencias estadísticamente significativas (p<0.05). Las áreas sombreadas corresponden a las medias informadas en el análisis.

Tabla 8. Contenido promedio de variables de calidad y composición de agua, productividad de suelo y topografía según tipo de drenaje de suelo

	As ($\mu\text{g/L}$)	F ⁻ (mg/L)	CE ($\mu\text{g/cm}$)	SDT (mg/L)	Prof NE	RAS	Ipc %	Elevación m	Pendiente
Excesivamente drenado	19,1c	1,54b	1588,92d	2269,89e	-13,31a	5,29d	14,46d	664,9a	612329,36a
Algo excesivamente drenado	202,31bc	2,54ab	2958,63c	4037,66d	-17,79a	17,17bc	26,75b	380,96b	278200,99b
Bien a algo excesivamente drenado	103,17c	1,66b	2847,03bc	4067,18cd	-20,4a	14,44c	53,13a	339,69b	284216,54b
Bien drenado	231,12b	1,84b	3718,01ab	5786,76b	-19,96a	20,78b	64,81a	283,1c	223113,73b
Moderadamente bien drenado	253,03ab	1,62b	3973,17ab	5675,96bc	-7,49b	24,71b	48,8b	182,6d	211544,93b
Imperfectamente drenado	128,48bc	1,91b	3699,46bc	6351,34bc	-5,66b	20,52b	17c	200,38d	225449,21b
Pobremente drenado	766,87a	3,25a	5670,71a	12412,86a	-3,97b	44,92a	15,5d	137,17d	212457,15b

† Letras distintas indican diferencias estadísticamente significativas ($p < 0.05$). Las áreas sombreadas corresponden a las medias informadas en el análisis

Análisis de Componentes Principales

La calidad del agua subterránea está determinada e influenciada por un número considerable de variables, el resumen de la interacción entre estas se muestra en el biplot obtenido a partir del ACP (Figura 8).

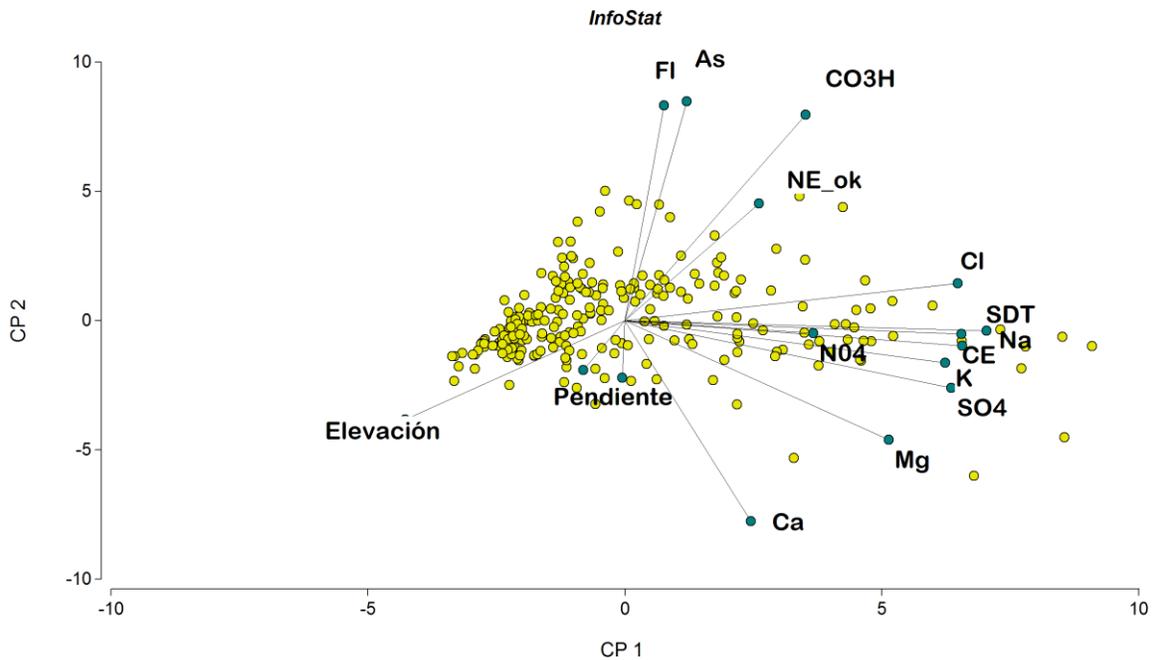


Figura 8: Análisis de Componentes Principales, conjunto de variables representativas de la calidad de agua subterránea del acuífero freático. CP 1 (41,2%). CP 2 (16,2 %)

El biplot de la Figura 8 muestra que las variables que hacen a la dureza y la salinidad del agua para riego como la concentración de los cationes en general, la concentración del ion cloruro, los solutos disueltos totales, la conductividad y la concentración de nitratos se encuentran correlacionadas positivamente, y se ven mayormente representadas en la CP1. Al analizar el eje vertical, CP2, se observa que los contenidos de fluoruros y arsénico son los que explican la mayor parte de la variabilidad, mientras que el nivel estático lo hace en menor medida.

Mapeo de la variabilidad espacial multivariada

Las componentes representan un resumen de la caracterización del acuífero de manera multivariada. Haciendo uso de la CP1 y CP2 y de la herramienta geoestadística se mapearon las componentes del ACP con la idea de resumir la información multidimensional

El mapeo se hizo para la zona sur de la provincia, que como se dijo anteriormente, es la que en general presenta mayores problemas. La zona mapeada corresponde a los sistemas hidrológicos de General Roca, Rio Quinto y Carcaraña.

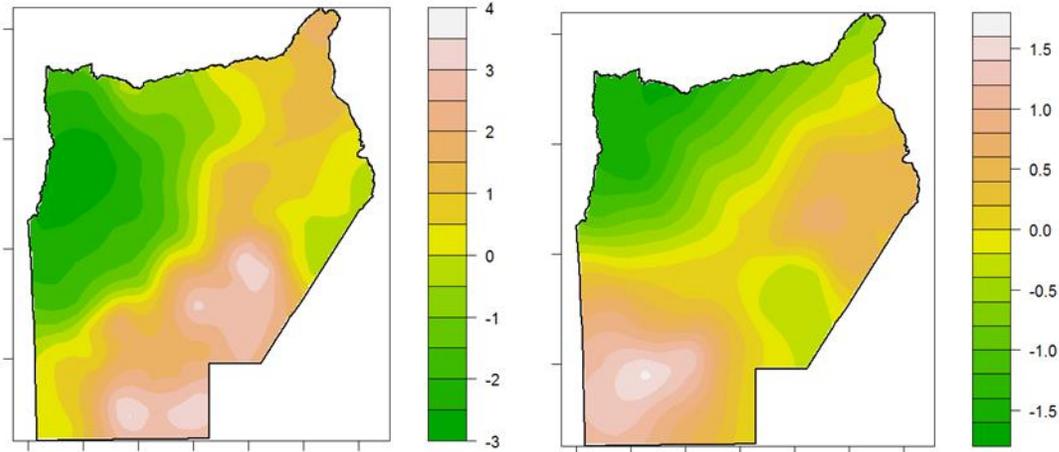


Figura 9. Mapas de variabilidad espacial multivariada obtenidos por interpolación (Kriging) de la CP1 (izquierda) y CP2 (derecha) del Análisis de Componentes Principales.

Como se dijo anteriormente el mapa de la CP1 representa la variabilidad en las variables que hacen a la calidad del agua subterránea para riego. Los resultados se corresponde con el análisis anterior que nos decía que las áreas hidrogeológicas Cuenca del Rio Popopis y Llanura sur eólica medanosa, contenidas en los sistemas hídricos superficiales de General Roca y Rio Quinto, registraba los mayores valores de RAS, CE y SDT. También se corresponde, que el área hidrogeológica homogénea Sierras y valles intermontanos que es la que menores riesgos representa para el uso de sus aguas para riego, registre menores valores para la componente.

La CP2 representa la variabilidad en las variables que hacen a la calidad de agua para consumo. En el análisis anterior arroja que los valores medios para As y FI para las dos áreas hidrogeológicas de los sistemas General Roca y Rio Quinto son los más altos. También muestra valores altos para el área Cuenca del Rio Calamuchita que también se ven representados en el mapa.

Conclusiones

La calidad del acuífero freático en la provincia de Córdoba no es homogénea y presenta serios problemas para amplias zonas de la provincia, tanto para usos con fines agropecuarios como para el consumo.

De las unidades de análisis informadas en el presente trabajo, las áreas hidrogeológicas homogéneas son las que mejor describen las diferencias de calidades de aguas subterráneas, topográficas y edáficas.

Para la zona sur de la provincia el acuífero freático presenta graves problemas por su composición, no pudiendo ser aprovechado para consumo ni para riego. Incluso en estas zonas la gran concentración de sales y los grandes valores de sodio de la napa, que se encuentra a muy poca profundidad, son los responsables de las características de baja y nula permeabilidad edáfica.

En general las áreas con mayor presencia de riego se corresponden con áreas donde la calidad del agua del acuífero libre más cercano a la superficie no presenta mayores inconvenientes para ese fin.

El uso de las CP resultantes del ACP en conjunto con técnicas de interpolación geoestadísticas permitió resumir de manera multivariada la variabilidad espacial en la calidad del acuífero. El uso de estos mapas puede ser de utilidad para mapeos de riesgo en lo que respecta al uso de las aguas del acuífero freático inmediatamente inferior.

Bibliografía

- Akaike H. "Information theory and an extension of the maximum likelihood principle". 2nd International Symposium on Information Theory and Control, Petrov, E.B.N. and Csaki, F., (ed.), pp. 267. **1973**.
- Balzarini, M.G., Gonzalez, L., Tablada, M., Casanoves, F., Di Rienzo, J.A., Robledo C.W. InfoStat. Manual del Usuario. pp 333, **2008**.
- Barrionuevo, N., Feler, M.V. y Sepulcri, M.G. "Evolución del área regada en cultivos de verano con pivot central en Córdoba". CONAGUA. San Juan, Actas 1: 248, **2013**.
- Blarasin M., Cabrera A. "Agua subterránea y ambiente". 1^{ra} ed. Córdoba: Agencia Córdoba Ciencia, **2005**.
- Blarasin, M., Cabrera, A., Matteoda, E., Frontera, H., Aguirre, M., Maldonado, L., Becher Quinodoz, F., Giuliano Albo, J. "Aspectos litológicos, hidráulicos, cambios de régimen y reservas de los principales acuíferos". *Relatorio Del XIX Congreso Geológico Argentino - Córdoba*, 1233-1261, **2014a**.
- Blarasin, M., Cabrera, A., Matteoda, E., Aguirre, M., Giuliano Albo, J., Becher Quinodoz, F., Maldonado, L., Frontera, H. "Aspectos geoquímicos, isotópicos, contaminación y aptitudes de uso". *Relatorio Del XIX Congreso Geológico Argentino - Córdoba*, 1263-1287, **2014b**.
- Córdoba, M., Bruno, C., Balzarini, M., Costa, J.L. "Análisis de componentes principales con datos georreferenciados: Una aplicación en agricultura de precisión" *Revista de la Facultad de Agrarías UNCuyo*, **2012**.
- Dombeck, M. "El agua y El agua y las Cuencas las Cuencas Hidrográficas" http://www.fs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/stelprdb5338930.pdf. Consultado febrero **2015**.
- García, O. "Criterios Modernos para la evaluación y Caidad de aguas de riego" *Revista IPNI*, pp27, **2012**.
- Guevara Vera, A., "Análisis de las normas de control de calidad de las aguas" División Salud y ambiente OMS, Lima **1996**.
- Jarsun R.O., Bustos V., Carnero M. *Manual de interpretación de agua para riego*. Secretaría de Ambiente. EEA INTA Manfredi, **2008**.
- R Core Team. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <http://www.R-project.org/>. **2014**.
- Webster R. & Oliver M.A. *Geostatistics for environmental scientists*, 2nd edn. John Wiley and Sons, Chichester UK. **2007**.