

ESTUDIOS PRELIMINARES DE LA HIDROGEOQUÍMICA DE UNACUÍFERO FRACTURADO URUGUAYO: ESTUDIO DE CASO PUNTA ESPINILLO

PRELIMINARY HYDROGEOCHEMICAL STUDY OF A FRACTURED AQUIFER SYSTEM IN URUGUAY: PUNTA ESPINILLO CASE STUDY

Aurora Del Rosário Guerequiz¹
Ernani Francisco da Rosa Filho²
Andre Virmond Lima Bittencourt³
Ethel Morales Perez⁴
Eduardo Chemas Hindi⁵

RESUMO

A zona de Punta Espinillo está situada ao NW da cidade de Montevidéu, capital do Uruguai, na margem do rio Santa Lucia perto de sua foz no Rio da Prata. Trata-se de um sistema fissurado desenvolvido em rochas do embasamento precambriano uruguaio. Esta zona está afetada por uma intensa atividade agrícola desde o começo do século XX. Neste arcabouço, com o desenvolvimento tecnológico têm sido incrementadas as captações de água subterrânea e paralelamente a eficiência dos sistemas de irrigação. Em função do tamanho das parcelas, minifúndios menores a 3 hectares, e na necessidade de ter um poço por produtor, a densidade de poços que captam água subterrânea é muito alta, gerando que alguns deles fiquem localizados na mesma fenda produtora. Isto levou os produtores a aumentar as vazões e os tempos de bombeamento dos poços, sem o necessário controle. O resultado é o rebaixamento dos níveis estáticos de maneira surpreendente, alguns dos poços secaram, e em outros o nível estático estabilizou-se abaixo do nível do mar, sugerindo a entrada da cunha salina para justificar os elevados teores de sais nestas águas. Todavia, os estudos geoquímicos das águas, apresentados neste trabalho, indicam que é improvável uma origem marinha, mas sim continental. Por outro lado, o aumento da salinidade gera uma diminuição da absorção dos nutrientes pelas plantas, induzindo um aumento no uso de fertilizantes, principalmente os de origem animal, e alguns inorgânicos nitrogenados (NPK), e com eles o aumento dos teores de nitratos.

Palavras-chave: Sistema fraturado, hidrogeoquímica, pré-cambiano, Uruguai.

1 Geóloga, Mestranda em Geologia Ambiental – Recursos Hídricos, UFPR, e Professor Assistente do Departamento de Geologia – UDELAR – Uruguai. E-mail: rosario@fcien.edu.uy

2 Professor Doutor do Departamento de Geologia- UFPR. E-mail:ernani@ufpr.br

3 Professor Doutor do Departamento de Geologia- UFPR.

4 Estudante de Graduação em Geologia – UDELAR – Uruguai.

5 Mestre, Geólogo, Doutorando em Geologia Ambiental – Recursos Hídricos, UFPR.

EXTENDED ABSTRACT

Punta Espinillo area is located in the Northwest of Montevideo district/Uruguay, besides the right margin of Santa Lucia River, in the mouth of it, into the *Río de la Plata* river. The territory structure is built in small plots which vary from 3 to 5 hectares. This zone is characterised by an intense agronomic activity, which produces a large amount of the vegetables consumed in Montevideo City. It has a high demand of water for irrigation systems, which has not been rationally planned. Nowadays, in every plot there is a well, and some are located in the same fracture. The water is extracted from a fractured aquifer system that has exceptional characteristics because of its water amount. However, its intense exploitation generated high drawdowns in wells, even coming to the extreme of their complete depletion. In connection, there is an increase of ionic concentrations of sodium, chloride, sulphates and nitrates well above of the national and international sanitary standards, which ones are suspicious of been associated with non appropriate agronomic practices and the possibility of marine water intrusion. These hypotheses were tested with the study of chemical analyses represented by geochemical contour maps and some geochemical indexes. On one hand, the sodium and chlorates geochemical contour maps (show that there is an increase in their concentration in wells who are located too far away from the Río de la Plata river, to have a connection with it. On the other hand, the virtual potentiometric contour maps show that the water flow directions are NS, to the Río de la Plata. In addition, the geochemical indexes calculated were Mg^{++}/Ca^{++} , K^+/Na^+ y $Cl^-/HC03^-$. These relations show that all the waters has a continental origin in opposite to the suspected marine water intrusion. On the other hand, in relation to nitrates, all the wells have very high concentrations, some of them above 300 mg/L. The higher concentrations are associated with plots which generally use natural animal fertilisers. These concentrations of sodium, chlorates and nitrates qualify these waters as non drinkable, for the international standards, and non acceptable for the national standards. In relation with irrigation, they have severe restrictions due to of the risk of alcalinization and salinization of the soils.

Key-words: Fractured System, hydrogeochemistry, Precambrian, Uruguay.

INTRODUCCIÓN

La degradación progresiva del acuífero fisurado de Punta Espinillo se debe a un descontrolado aumento en la cantidad de captaciones de agua subterránea sin el debido estudio ambiental previo y sin el asesoramiento obligado a los usuarios de los pozos. La misma se evidencia por varios efectos como ser un descenso importante de los Niveles Estáticos, acompañados de un aumento muy por encima de los límites de potabilidad de las concentraciones de nitratos, sodio, cloruros y sulfatos.

OBJETIVO

El objetivo principal es realizar una contribución al conocimiento hidroquímico del Acuífero fracturado de Punta Espinillo.

UBICACIÓN

La zona donde se desarrolla el presente estudio posee un área aproximada de 12 Km² y se ubica al Sur-Oeste de Uruguay, en el borde Oeste del Departamento de Montevideo, en la confluencia del Río de la Plata (aguas estuarinas salobres), y el Río Santa Lucía. Las coordenadas del centro de la zona son: X = 446.176; Y

=6147.509 situadas en la Hoja K-29; Servicio Geográfico Militar de Uruguay; Sistema de proyección Gauss.

ANTECEDENTES GEOLÓGICOS

El área se encuentra en el borde suroeste del Lineamiento Santa Lucia-Aiguá-Merín (SaLAM) definido por Rosello et al. (1999). En la zona de estudio las litologías más antiguas corresponden a la Formación Montevideo de edad Proterozoica (Bossi et al. 1998) y están constituidas por rocas metamórficas de grado bajo a medio que ocupan cerca del 90% del área. Se desarrollan en una faja de aproximadamente 30 km de ancho con un rumbo general E-NE. Es un cinturón metamórfico situado al sur del Cratón del Río de la Plata, actualmente denominado Terrane Piedra Alta. El resto corresponde a depósitos Terciarios (Formación Fray Bentos), Cuaternarios (Formación Libertad) y depósitos actuales (Dunas y arenas costeras) localizados en la zona costera del Río de la Plata (Bossi et al. 1998).

En el registro tectónico se aprecian varias etapas de deformación. Dichos eventos afectaron preponderantemente a las rocas del basamento y controlaron los procesos de deposición sedimentaria.

EL evento orogénico Transamazónico, afecta a la Formación Montevideo, generando deformaciones en régimen dúctil-rúptil (Bossi et al. 1998). La dirección prin-

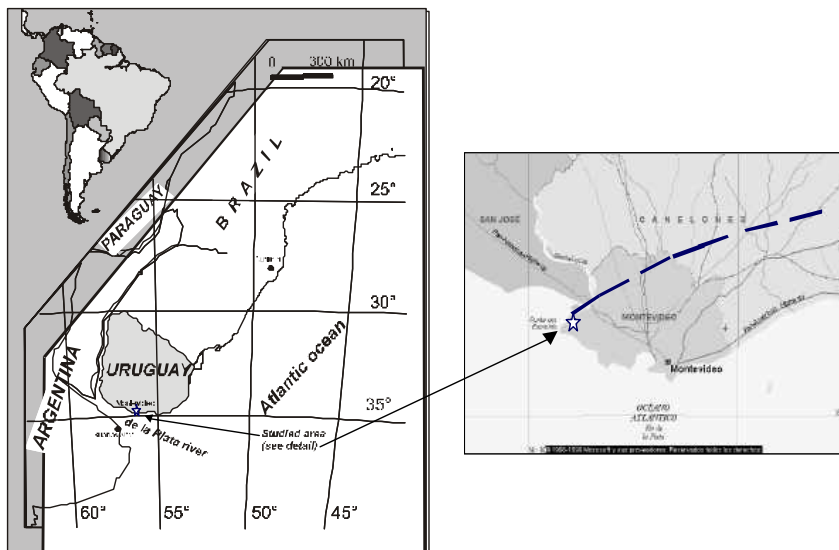


Figura 1: Ubicación de la zona de estudio indicada por una estrella A) Ubicación de Uruguay en la región, B) Ubicación de la zona de estudio en Montevideo. Location of the studied area, indicated by a star A) location of Uruguay in the region, B) location of the studied area in Montevideo.

cial de éste fenómeno es NS y su complementaria EW. No ha sido posible distinguir apropiadamente la deformación en régimen rúptil de este evento, puesto que actualmente se superponen otras posteriores; sin embargo Cardelino y Ferrando (1969, apud Bossi et al. 1998), estiman que serían las de dirección N30/40NW, por estar rellenas de filones pegmatíticos. Esto implica una fase distensiva hacia el final del evento, en régimen dúctil-rúptil, puesto que algunos de éstos filones generan pliegues y formas irregulares (Montaño et al. 2001).

La fracturación N70E con buzamientos varios, principalmente subverticales, constituye la principal dirección del Lineamiento SaLAM en el que se incluye la Cuenca *Pull Apart* de Santa Lucía (Cretácica) (Veroslavsky 1999) que se encuentra como límite a la zona de estudio. Es el evento regional más importante, siendo las restantes lineaciones las conjugadas y subsidiarias de ella. Paralelamente a esta cuenca, se han formado otras de menor tamaño generadas por hundimiento o levantamiento de bloques, producidos por los sistemas de fallamientos lítricos asociados a la génesis y evolución transpresional - transtensional del Lineamiento SaLAM y a reactivaciones durante el Terciario inferior (Veroslavsky 1999).

En la zona de estudio se observan tres tipos de fracturas principales:

- Diaclasas de Tensión, con escasa o nula interconexión limitando la capacidad de almacenamiento, generando el desarrollo de acuíferos pobres.
- Diaclasas de Tensión, con gran capacidad de almacenamiento debido a su origen extensional y a que forman redes de fracturas interconectadas que constituyen grandes espacios para la circulación y almacenamiento de agua. Son las más frecuentes dentro de la región y los pozos de mayor rendimiento están ubicados en su ámbito, presentando rumbos generales NS.
- Fracturas de Cizalla, las cuales presentan características diversas. En algunos casos, debido al efecto de las presiones residuales se presentan relativamente cerradas. Mientras que en otros se presentan abiertas y rellenas, ligadas a una intensa fracturación y alteración. Los materiales de relleno, comprenden desde arcillas que limitan la permeabilidad a arenas que mejoran las cualidades hidrogeológicas y las transforman en acuíferos (Montaño et al. 2001).

Puede suceder que dos o más fallas o diaclasas se corten formando un eje de intersección creando grandes espacios, permitiendo obtener caudales excepcionales (Montaño et al. 2001). Estas interconexiones pueden estar generando un sistema de fracturas cuya inclinación no ha podido ser identificada, pero se presume que mayormente su dominio sea subhorizontal.

ANTECEDENTES HIDROGEOLÓGICOS

En la mayoría del área el agua subterránea se almacena y circula principalmente en fracturas. Los niveles alterados son de poco espesor, no mayor a los cinco metros, sin importancia hidrogeológica (Staff et al. 2001). En estas regiones las estructuras de drenaje se emplazan generalmente a lo largo de sistemas de fracturas. La acumulación y circulación de aguas subterráneas en la zona de Punta Espinillo se desarrolla en un sistema geológico discontinuo formado por rocas metamórficas de bajo a mediano grado (micaesquistos, cuarcitas, anfibolitas y gneis). Las fracturas portadoras son de tipo tensional, con direcciones preferenciales N-S y E-W. Las rocas gneisicas presentan mayor densidad de fracturas y porosidad efectiva, son las que tienen mejor capacidad de almacenamiento (Montaño et al. 2001, Staff et al. 2001).

Debido a que la mayor parte del Basamento Cristalino está cubierto por sedimentos de baja permeabilidad (Formación Libertad), la recarga se da principalmente por la infiltración de los arroyos y cañadas

encauzadas en fracturas (Montaño et al. 2001), pero este tipo de litologías limo arcillosas, en tiempos de sequía, experimentan fenómenos de contracción y fracturación que permite la recarga eventual por las mismas.

MATERIALES Y MÉTODOS

La metodología utilizada se basa principalmente en el análisis multitemporal fundamentalmente desde la óptica química tratando de evaluar las diferencias ocurridas en el periodo otoño 2002 a otoño 2003. La misma fue conducida mediante la realización de un banco de datos georeferenciados. Los datos químicos fueron obtenidos mediante un muestreo estacional de agua subterránea y para ello se realizó la selección de 22 pozos. Los criterios utilizados fueron: (i) representatividad del sistema acuífero, (ii) posible interferencia de factores de origen antrópico en la calidad de las aguas, (iii) proximidad al Río de la Plata y (iv) antecedentes de contenidos elevados de determinados elementos o compuestos químicos.

El muestreo fue llevado a cabo según el protocolo de la Administración de Obras Sanitarias del Estado (OSE), en envases de plástico con tapas de rosca adecuadas, con cierre hermético y lavando previamente el envase tres veces con el agua a analizar. Las muestras fueron inmediatamente refrigeradas y llevadas al Laboratorio de Higiene Ambiental de la Intendencia Municipal de Montevideo, donde fueron analizadas.

La etapa siguiente a la colecta de muestras consistió en la realización de análisis físico-químicos de las mismas de acuerdo a las técnicas establecidas por

Tabla 1: parámetros físico-químicos analizados.
Physic-chemical analysed parameters.

PARÁMETRO ANALIZADO	UNIDAD
Color	{intensidad}
Color	{unidades de platino - cobalto}
Turbidez	{FTU}
PH	
Temperatura	{° C}
Conductividad Eléctrica	{µS/cm ² }
Dureza Total	CaCO ₃ (mg/L)
Dureza Permanente	CaCO ₃ (mg/L)
Dureza Temporal	CaCO ₃ (mg/L)
Alcalinidad Total	CaCO ₃ (mg/L)
Cloruros	{mg/L Cl}
Nitratos	{mg/L NO ₃ ⁻ }
Nitritos	{mg/L NO ₂ ⁻ }
Sulfatos	{mg/L SO ₄ ²⁻ }
Sodio	{mg/L Na ⁺ }
Potasio	{mg/L K ⁺ }
Calcio	{mg/L Ca ⁺⁺ }
Magnesio	{mg/L Mg ⁺⁺ }

Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA – Greenberg et al. 1998) de los Estados Unidos de América. Los parámetros analizados se listan en la tabla 1.

También, cuando la situación del pozo lo ha permitido, se han medido y acotado los niveles estáticos para estudiar la potencimetría en estas épocas.

Una vez obtenidos los resultados se procedió a su interpretación mediante el uso de diagramas, gráficas e índices hidrogeoquímicos.

PRESENTACIÓN DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos fueron representados en gráficas de curvas de isovalores, las primeras representadas en la figura 2 (a, b y c) corresponden a la evolución de los niveles potenciométricos virtuales durante las estaciones de muestreo. Se debe tener en cuenta que se trata de curvas potenciométricas virtuales pues nos encontramos frente a un sistema fracturado, por lo cual, solamente son utilizadas para determinar direcciones de flujo, asociadas a las fracturas reconocidas.

Si bien las mismas presentan diferentes configuraciones en las distintas épocas muestreadas, todas muestran un padrón de flujo preferencial con

dirección aproximada NS, que coincide con algunas de las direcciones de fracturación del ciclo orogénico transamazónico.

En función de los valores obtenidos en los análisis físico-químicos se realizaron mapas de iso-concentraciones de sodio y cloruros, para tres de las cuatro estaciones muestreadas, los datos de otoño no se utilizaron debido a que algunos pozos importantes como el 27 y el 32 no fueron muestreados, por lo cual las curvas generadas no son representativas.

En las figuras 3 (a, b y c) se presentan los gráficos correspondientes a cloruros y sodio en las diferentes épocas.

En las curvas de iso-concentración tanto para cloruros como para sodio en las distintas estaciones puede observarse un padrón de distribución relativamente semejante. Para el caso del cloruro se destaca un aumento de las concentraciones en dirección NE, encontrándose un máximo en el pozo 69, el más alejado de la costa del Río de la Plata, verificándose *a priori* una disminución de las concentraciones de cloruros en la dirección SW, hacia el mencionado río.

En referencia al sodio ocurre para invierno un aumento del sodio hacia el SW, mientras que en primavera y verano ocurre un pico de concentración en el centro de la zona (pozo 53), con mayores concentraciones en el pozo 27 que en el pozo 69. Esta

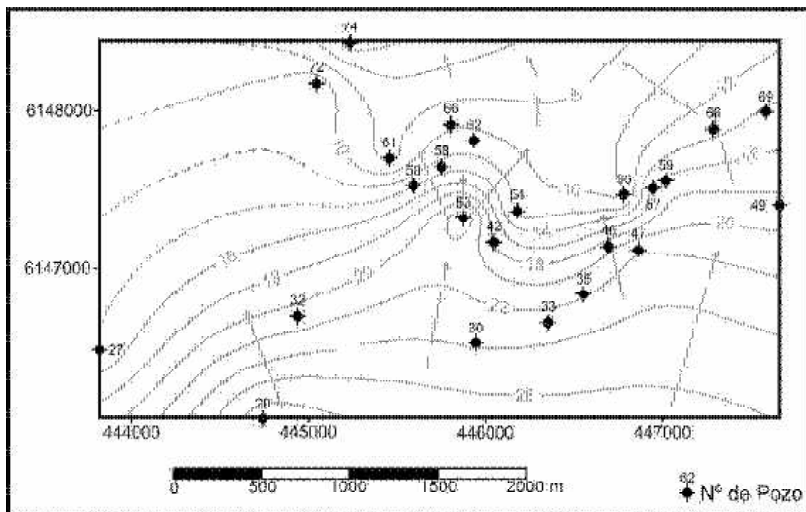


Figura 2a: Mapa potenciométrico virtual de invierno. Potenciometric winter virtual map.

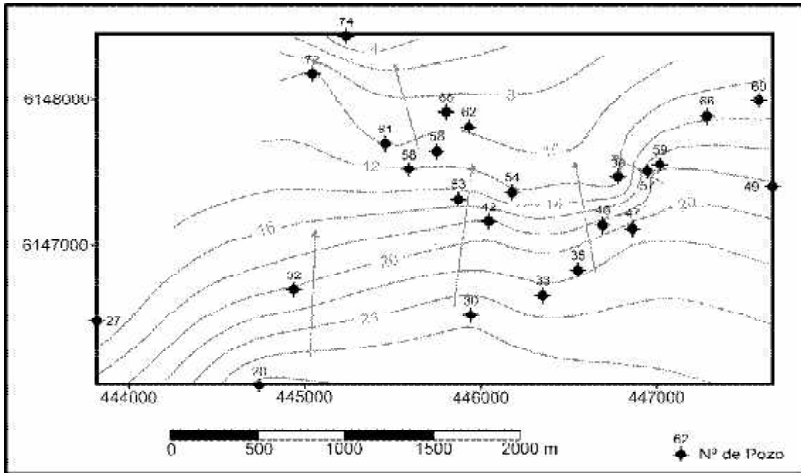


Figura 2b: Mapa potiométrico virtual de primavera. *Potentiometric spring virtual map.*

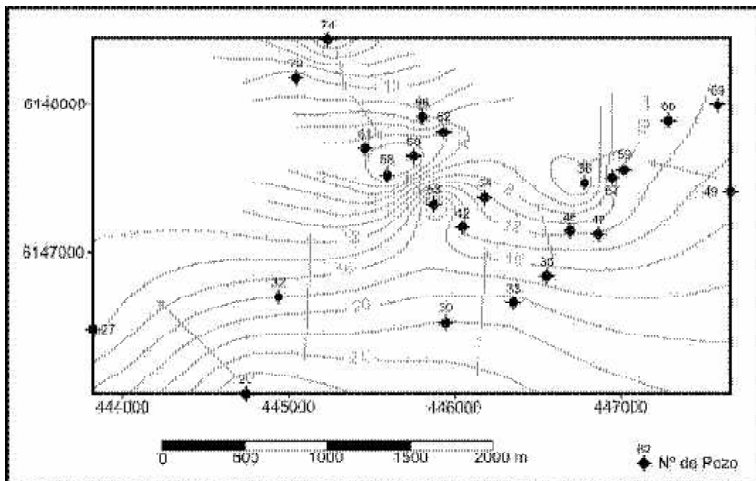


Figura 2c: Mapa potiométrico virtual de verano. *Potentiometric summer virtual map.*

Tabla 2: Parámetros físicos y químicos analizados en invierno y primavera de 2002. *Winter and spring 2002 physic and chemical analysed parameters.*

Invierno	pH	Turbidez	Ca a 25°	TDS	Ca+2	Na+	K+	Mg+2	HCO3-	Cl-	NO3-	SO4-2
Unid	A 25°	NTU	µS/cm	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
Pozo 20	7,9	0,7	1634	1062,1	44	382	5	23,38	750	173	79,74	45
27	7,4	0,8	2039	1326,3	64	447	6	33,09	630	176	314,00	80
30	7,2	0,9	1526	981,9	53	372	5	24,45	630	111	83,03	70
32	7,1	0,5	1356	881,4	44	308	4	10,71	730	75	39,87	30
33	7,2	0,7	1240	806,0	26	339	5	13,14	750	51	48,73	15
36	7,2	0,6	1736	739,4	34	273	4	16,36	640	45	36,54	25
42	7,6	2,7	1674	1039,1	71	372	5	36,13	740	147	84,17	70
46	7,5	1,1	1457	847,0	26	307	5	13,03	710	55	75,37	26
47	7,5	0,8	1400	870,0	31	373	5	15,45	850	141	68,45	35
48	7,7	2,9	1747	745,5	75	304	4	14,48	850	47	31,86	40
53	7,7	0,4	1767	1168,0	62	470	6	22,38	750	164	116,18	85
54	7,2	0,9	1627	1057,5	42	379	5	22,38	650	166	79,74	40
57	7,0	0,5	1785	757,2	38	298	4	19,22	850	94	43,44	20
58	7,4	0,7	1597	1034,1	40	387	5	21,95	710	128	106,32	40
59	7,3	0,9	1269	824,8	43	312	4	22,51	680	51	75,37	20
61	7,7	1,0	1369	889,8	40	326	5	21,65	730	99	39,82	30
62	7,5	0,4	1384	859,6	36	332	5	19,48	675	90	70,88	40
65	7,1	0,8	1335	867,7	42	313	4	21,90	630	118	108,32	35
66	7,4	0,7	1222	794,3	37	288	4	19,59	680	40	48,73	20
68	7,2	1,9	1840	1190,3	59	405	6	31,27	630	236	48,73	50
72	7,3	0,9	1452	943,8	22	307	5	13,38	775	51	53,18	40
74	7,5	3,6	1578	1025,7	42	361	5	24,33	625	151	106,32	35

Primavera	pH	Turbidez	Ca a 25°	TDS	Ca+2	Na+	K+	Mg+2	HCO3-	Cl-	NO3-	SO4-2
Unid	A 25°	NTU	µS/cm	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
Pozo 20	7,4	0	742	1132,3	43	354	4	22,76	611	109	116,73	85
27	7,3	0	2262	1476,3	62	436	6	30,80	528	187	310,30	165
30	7,2	0	638	1103,7	54	304	5	22,14	595	102	100,30	65
32	7,2	0	547	1005,5	45	295	5	17,84	641	67	39,87	55
33	7,2	0	4110	816,5	26	298	4	10,77	685	54	53,18	45
36	7,5	0	260	810,0	34	243	4	15,09	573	12	37,65	30
42	7,3	0	538	1233,7	72	394	5	33,82	640	160	97,40	95
48	7,6	0	832	1177,3	31	431	5	14,48	621	132	94,17	80
47	7,6	0	582	1078,3	30	382	5	14,60	561	133	53,16	80
49	7,6	0	370	890,5	29	284	2	13,02	552	62	39,87	70
53	7,6	0	580	1222,0	49	453	4	22,02	636	151	110,76	90
54	7,5	0	736	1125,4	44	396	4	27,65	560	171	94,17	50
57	7,4	0	285	841,7	38	248	2	22,02	558	48	38,50	40
58	7,4	0	779	1166,3	44	368	2	27,66	584	136	132,90	70
59	7,5	0	512	982,8	43	230	3	19,59	576	77	75,31	50
61	7,4	0	447	940,5	39	340	2	20,80	587	89	39,87	40
62	7,4	0	486	957,8	38	338	3	19,22	558	84	75,31	50
65	7,3	0	726	1127,5	48	363	4	26,06	511	187	84,17	55
66	7,4	0	311	857,1	37	303	3	16,87	565	58	48,73	50
68	7,2	0	2137	1309,0	78	403	5	38,69	479	327	44,30	50
72	7,5	0	536	988,4	23	405	3	11,07	637	75	53,16	85
74	7,5	0	583	1028,9	37	367	3	16,13	646	136	70,88	50

anomalía en el pozo 53 puede deberse a los diferentes manejos de los pozos que se han dado en la zona.

Los diagramas anteriores no evidencian una correlación directa entre las máximas concentraciones de sodio y cloruros y las direcciones de flujo virtuales, generando una inconsistencia con la hipótesis manejada de la entrada de la cuña salina. Por esta razón, se han calculado para cada época y para cada pozo algunos índices hidrogeoquímicos representativos, los cuales se presentan en las tablas 4 y 5.

INDICES HIDROGEOQUÍMICOS

Los índices hidrogeoquímicos constituyen relaciones entre iones disueltos en las aguas subterráneas, las cuales guardan relación con el terreno por el cual circulan o permiten indicar la acción de fenómenos modificadores o alguna característica específica del agua considerada (Custodio & Llamas 1983).

Las relaciones que se calcularon en este trabajo son las que diferencian la procedencia de las aguas entre

Tabla 3: Parámetros físicos y químicos analizados en verano de 2002 y otoño de 2003. *Summer 2002 and autumn 2003 physic and chemical analysed parameters.*

Verano	pH		Turbidez NTU	Ca 25° µS/cm	TDS mg/L	Ca+2 mg/L	Na+ mg/L	K- mg/L	Mg+2 mg/L	HCO3- mg/L	Cl- mg/L	NO3- mg/L	SO4-2 mg/L
	U-td	A 25°											
Pozo 20	7,4		0	2050	1352	44	347	4	22	605	105	119,61	105
27	7,6	0	0	2031	1320	57	429	5,6	30	558	166	177,2	80
30	7,1	0	0	1740	1131	55	352	8	27	602	114	97,46	10
32	7,1	0	0	1400	910	43	314	5	19	625	70	40,31	90
33	7,3	0	0	1358	881	27	327	4	12	508	60	57,59	85
36	7,1	0	0	1333	866	38	263	5	16	543	85	57,59	60
42	7,3	0	0	2038	1325	71	396	5,7	33	625	190	88,0	70
46	7,6	0	0	1693	1079	28	365	5,4	13	605	123	56,45	85
47	7,6	0	0	1582	1028	30	382	5	15	561	133	53,16	80
48	7,6	0	0	1870	1191	29	384	2	13	550	89	39,87	70
53	7,6	0	0	1850	1222	49	453	4	22	678	151	110,75	90
54	7,2	0	0	1827	1058	40	360	3	20	570	119	89,6	90
57	7	0	0	1470	956	40	322	2	20	501	67	84,17	80
58	7,4	0	0	1627	1056	38	384	2,7	17	553	121	49,44	55
59	7,2	0	0	1446	940	42	327	2	22	563	89	75,31	65
61	7,3	0	0	1524	991	42	364	2,9	18	600	92	40,31	65
62	7,4	0	0	1503	977	35	345	3,4	16	546	97	70,88	85
66													
68	7,3	0	0	1258	818	34	303	4,1	16	571	33	31,50	50
69	7,3	0	0	1900	1235	58	377	5	30	600	276	44,3	30
72	7,3	0	0	1604	1043	25	385	3	13	655	93	82,09	90
74	7,3	0	0	1808	1115	43	367	3	20	616	221	39,37	95

Otoño	pH		Turbidez NTU	Ca 25° µS/cm	TDS mg/L	Ca+2 mg/L	Na+ mg/L	K- mg/L	Mg+2 mg/L	HCO3- mg/L	Cl- mg/L	NO3- mg/L	SO4-2 mg/L
	U-td	A 25°											
20													
27													
30	7,1	0	0	1527	985	72	246	18	29	660	80	97,46	105
32	7,2	0	0	1547	1005	43	295	5	18	671	67	59,57	55
33	7,4	0	0	1378	854	24	313	4,2	12	598	61	53,16	40
36	7,2	0	0	1655	1076	35	333	5,5	19	564	131	88,6	70
42													
46													
47	7	0	0	1803	1042	27	343	5,7	15	557	137	56,45	80
49	7,5	0	0	1781	1033	23	272	2,2	12	501	57	35	55
53	7,4	0	0	1664	1096	47	339	5,4	22	632	129	48,13	80
54													
57	7,5	0	0	1479	961	38	307	2,9	21	560	91	75,31	55
58	7,5	0	0	1688	1096	38	335	3	17	553	138	116,39	70
59	7,1	0	0	1462	963	39	300	3,7	18	567	87	49,44	60
61	7,9	0	0	1527	993	38	307	2,9	18	601	94	41,64	60
62	7,6	0	0	1478	959	33	311	3,5	15	555	89	75,31	50
66	7,2	0	0	1664	1082	41	324	4	23	613	86	84,17	55
68													
69	7,1	0	0	2013	1308	55	369	4,9	31	607	295	48,73	30
72													
74	7,4	0	0	1659	1078	34	333	3,5	17	525	172	38,54	75

continentales y marinas y las que indican la posibilidad de intrusión marina (Lloyd & Hethcote 1985), ellas fueron: Mg⁺⁺/Ca⁺⁺, K⁺/Na⁺ y Cl⁻/HCO₃⁻. Todas las concentraciones están expresadas en meq/L.

RELACIÓN Mg⁺⁺/CA⁺⁺

En aguas continentales esta relación generalmente varía entre 0,3 y 1,5; valores próximos a 1 indican la posible influencia de terrenos dolomíticos o con serpentina y valores mayores a 1 están a menudo asociados a gabros y basaltos (Custodio & Llamas 1983).

Hay que tener precaución con la precipitación y disolución de CaCO₃ la cual puede hacer aumentar o disminuir respectivamente esta relación, sin ninguna vinculación con los terrenos atravesados. Una elevación del contenido de cloruros y un aumento de ésta relación en general pueden indicar intrusión marina (Custodio & Llamas 1983).

En todas las muestras la relación Mg⁺⁺/Ca⁺⁺ presenta valores cercanos a la unidad, lo cual podría estar asociado a la disolución de concreciones de CaCO₃ vinculadas a la Formación Libertad suprayacente, lo cual se hace más evidente en el pozo 72 en invierno. Por demás todos los valores se corresponden con aguas continentales.

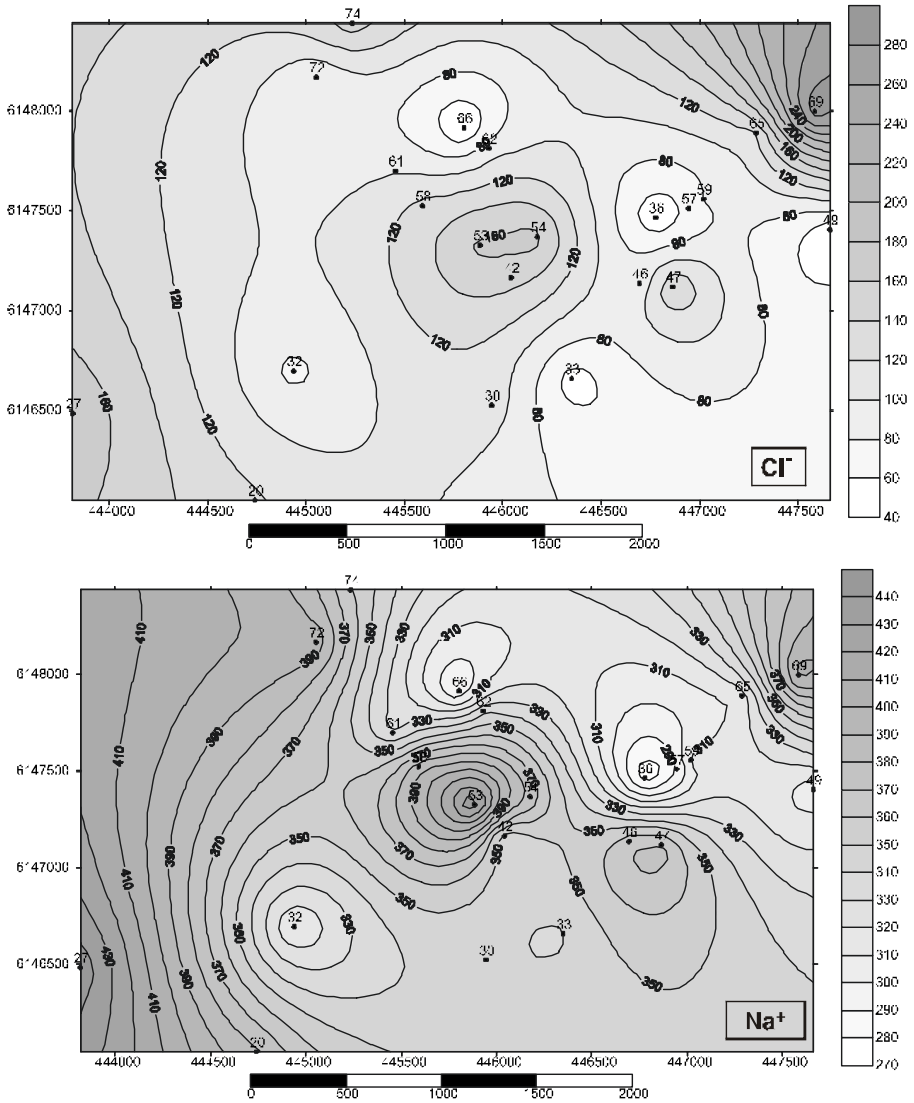


Figura 3a: Curvas de isovalores de cloruros y sodio (en mg/L) para invierno. *Chlorates and sodium (mg/L) winter contour maps.*

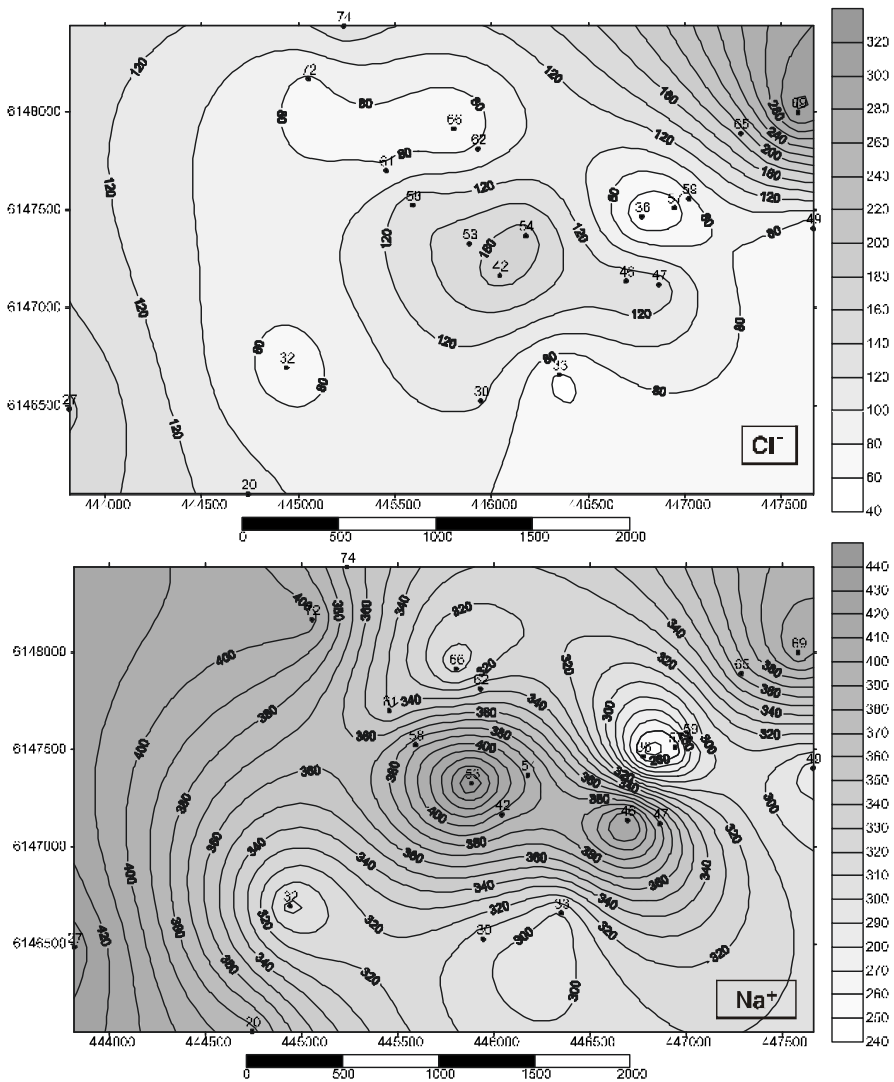


Figura 3b: Curvas de isovalores de cloratos y sodio (en mg/L) para primavera. Chlorates and sodium (mg/L) spring contour maps.

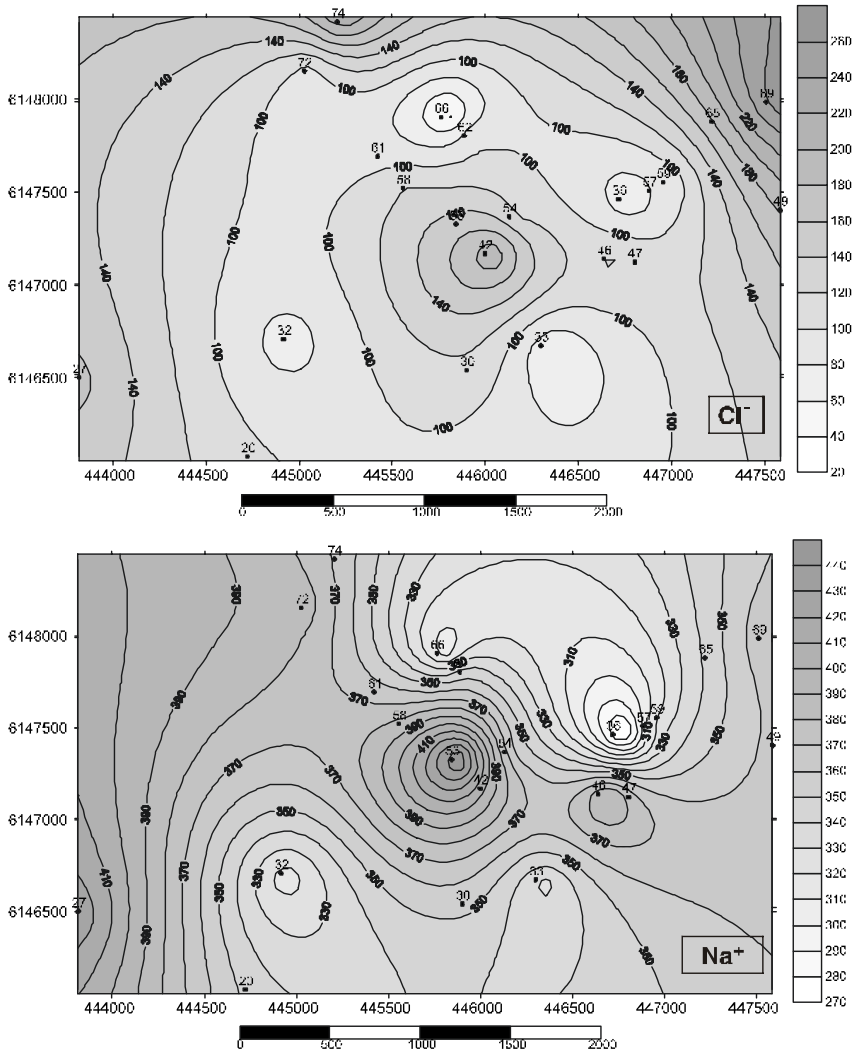


Figura 3c: Curvas de isovalores de cloruros y sodio (en mg/L) para verano. *Chlorates and sodium (mg/L) summer contour maps.*

Tabla 4: Índices geoquímicos para invierno y primavera de 2002. *Winter – spring 2002 geochemical calculated indexes.*

	r Mg+2 / r Ca+2		r K+ / r Na+		r Cl- / r HCO3-		SAR	
	Invierno	Primavera	Invierno	Primavera	Invierno	Primavera	Invierno	Primavera
20	0.87573	0.87246	0.00769	0.00612	0.28227	0.33705	11.5808	11.7851
27	0.85763	0.82189	0.00789	0.00809	0.50487	0.53359	11.5051	11.2995
30	0.78084	0.67818	0.00859	0.01547	0.27688	0.23908	9.7494	8.7097
32	0.73864	0.67651	0.0076	0.00896	0.18441	0.17990	9.7292	9.5683
33	0.83334	0.67909	0.83334	0.00794	0.17734	0.15887	13.5221	12.3376
36	0.77087	0.73187	0.0086	0.00948	0.12102	0.13312	9.8872	8.9008
42	0.83921	0.77461	0.00859	0.00716	0.37190	0.45178	8.2420	8.5997
46	0.86421	0.77912	0.00867	0.00882	0.20605	0.38585	14.5773	16.0237
47	0.82189	0.80248	0.00785	0.00789	0.37338	0.43605	13.6684	14.3067
49	0.95195	0.74021	0.00773	0.00417	0.12445	0.19332	11.9753	11.0095
53	0.70988	0.74108	0.00867	0.00519	0.37636	0.40664	12.8505	13.5066
54	0.87890	0.81160	0.00777	0.00591	0.43956	0.53512	11.7164	12.2766
57	0.83415	0.83108	0.00816	0.00474	0.10650	0.15114	9.5002	7.8699
58	0.89276	0.81160	0.00769	0.00303	0.30544	0.39117	12.2486	11.8681
59	0.88313	0.75115	0.00753	0.00800	0.20502	0.23008	9.5935	8.2035
61	0.89276	0.87964	0.00893	0.00345	0.24342	0.24330	10.4729	10.9367
62	0.89164	0.86360	0.00869	0.00525	0.22849	0.25910	11.2797	11.2461
65	0.85890	0.86099	0.00757	0.00648	0.33849	0.82806	9.7530	10.5777
66	0.87296	0.75308	0.00813	0.00582	0.09877	0.17068	9.5600	10.3950
69	0.87688	0.83943	0.00877	0.00718	0.84871	1.17495	10.6074	9.8263
72	1.00310	0.79375	0.00740	0.00435	0.17859	0.27065	16.4895	17.3645
74	0.95533	0.80790	0.00814	0.00480	0.41583	0.42586	10.9704	12.3575

Tabla 5: Índices geoquímicos para verano 2002 y otoño 2003. *Summer 2002 and autumn 2003 geochemical calculated indexes.*

	r Mg+2 / r Ca+2		r K+ / r Na+		r Cl- / r HCO3-		SAR	
	Verão	Outono	Verão	Outono	Verão	Outono	Verão	Outono
20	0.82459		0.006779		0.286716		10.66545	
27	0.867946		0.007876		0.512033		11.44963	
30	0.79608	0.864220	0.005385	0.043203	0.325938	0.245882	9.96793	8.16379
32	0.728671	0.690320	0.009307	0.009967	0.192771	0.179604	10.02962	9.52821
33	0.732933	0.824549	0.007193	0.007891	0.175332	0.178877	13.16525	13.02612
36	0.894357	0.895225	0.007180	0.006131	0.206033	0.389778	9.02841	11.25968
42	0.760182		0.008107		0.539759		9.73790	
46	0.765853		0.008039		0.348924		15.47794	
47	0.802401	0.816766	0.007687	0.009772	0.406350	0.423340	14.30610	13.13257
49	0.743218	0.800390	0.004111	0.007756	0.193520	0.198822	11.00998	11.67533
53	0.741067	0.771979	0.005192	0.008367	0.382764	0.351315	13.80661	10.29017
54	0.824549		0.004900		0.359332		11.80510	
57	0.824549	0.817544	0.005052	0.005666	0.267731	0.275266	10.38011	9.72056
58	0.737754	0.778741	0.004135	0.005265	0.376804	0.429515	13.07385	11.82399
59	0.868813	0.800407	0.003587	0.007253	0.272086	0.268896	10.17831	9.85135
61	0.708756	0.781162	0.004885	0.005555	0.263313	0.269202	11.83082	10.27862
62	0.758873	0.746590	0.005790	0.006675	0.290311	0.276006	12.12662	11.27770
65		0.825704		0.007263		0.221437		10.04338
66	0.778048		0.007957		0.099472		10.73518	
69	0.938280	0.829492	0.007925	0.007809	0.833287	1.001477	9.83018	9.96755
72	0.857531		0.004582		0.244380		15.55882	
74	0.787022	0.824549	0.004907	0.006131	0.757737	0.563889	11.59484	11.84343

RELACIÓN K⁺/NA⁺

Esta relación en aguas dulces puede variar entre 0,001 y 1, siendo el rango de variación más frecuente 0,004 y 0,3 (Custodio & Llamas 1983).

Es siempre menor en el agua que en la roca origen, dado la fijación del potasio por las arcillas, siendo el valor cada vez menor a medida que las aguas están más concentradas en sales (Custodio & Llamas 1983).

Los valores obtenidos para las muestras analizadas de la relación K⁺/Na⁺ son muy bajos dado que el potasio es fuertemente retenido por las arcillas del terreno, lo que determina que su concentración en las aguas subterráneas sea baja. A este fenómeno se le agrega que las aguas de este acuífero presentan una concentración de sodio importante, lo que hace disminuir aún más esta relación. Sin embargo el pozo 30 presenta valores altos respecto a la tendencia, destacándose el valor de otoño de 2003. Esta anomalía se justifica pues en este predio tradicionalmente se han cultivado flores cuya demanda de fertilizantes de alto potasio es mayor para estimular el desarrollo de la floración.

RELACIÓN CL⁻/HCO₃⁻

Esta es una relación que permite seguir el proceso de concentración en sales en el sentido del flujo subterráneo, dado que el contenido de HCO₃⁻ es relativamente constante en las aguas subterráneas (Custodio & Llamas 1983).

Si existen aportes de CO₂ o fenómenos de reducción de sulfatos la concentración de HCO₃⁻ puede variar y por lo tanto no conviene usar esta relación. Es una relación especialmente útil para caracterizar procesos de intrusión marina ya que en aguas continentales presenta valores que oscilan entre 0,1-5, y en agua de mar varía entre 20 y 50. Si el incremento de cloruros se debe a la concentración de sales en zonas de regadío, la relación crece mucho menos para igual incremento de cloruros por intrusión marina (Custodio & Llamas 1983).

La relación Cl⁻/HCO₃⁻ para las muestras estudiadas presenta valores que se corresponden con aguas dulces continentales. El pozo 69 presenta un incremento en esta relación en primavera y otoño, que se corresponde con un mayor contenido en cloruros encontrado en las aguas estudiadas, pero su valor se mantiene dentro de la categoría de aguas continentales.

Debido a las altas concentraciones de ciertos componentes en las aguas analizadas se evaluó la calidad de la misma para consumo y para riego.

CALIDAD DEL AGUA

La Organización Mundial de la Salud (O.M.S) en su *International Standards for Drinking Water* (1936) divide en cuatro grupos las características a tener en cuenta que afectan la calidad de las aguas. Respecto a ésta norma, en este trabajo se analizaron las sustancias químicas que afectan la potabilidad de las aguas y las sustancias químicas que pueden afectar la salud. Según ésta norma, aquellas aguas que no cumplan con alguna de las condiciones indicadas debe ser clasificada como No Potable.

Por otro lado, las normas de potabilidad vigentes en el Uruguay han sido elaboradas por la empresa estatal dedicada al abastecimiento de agua potable, Obras Sanitarias del Estado (O.S.E), de acuerdo a las "Guías para la calidad de agua potable" de la Organización Mundial de la Salud y la Organización Panamericana de la Salud (1984-1985) y a las posibilidades del país para la aplicación de las mismas. Esta norma incluye además de recomendaciones para la toma de muestras, que son parte de la metodología utilizada en el presente trabajo, y frecuencia del muestreo, criterios de calidad. En éste trabajo de acuerdo a ésta norma, se consideraron los límites para componentes químicos y características físicas que pueden afectar la calidad organoléptica de las aguas y la concentración del anión nitrato incluida entre los componentes inorgánicos que pueden afectar la salud. Según ésta norma, aquellas aguas que no cumplan con alguna de las condiciones indicadas debe ser clasificada como No Aceptable.

POTABILIDAD DE LAS AGUAS ANALIZADAS

Todas las muestras del acuífero de Punta Espinillo presentan una concentración del ión sodio que supera el límite máximo permitido de 200 mg/L, según las dos normas consideradas.

Con relación al contenido de nitratos son bajos los porcentajes de pozos que se encuentran dentro del rango de concentraciones admisibles, por debajo del límite de 45 mg/L, 18% para invierno, 22% para primavera y 28% para verano, en el otoño todos los pozos se sitúan sobre el límite, alcanzando el pozo 27 los valores más elevados con 310 mg/L en primavera. Los altos contenidos de nitratos se asocian principalmente al uso abusivo de fertilizantes de origen animal como ser abonos y en menor cantidad de fertilizantes nitrogenados, vinculados a un manejo intensivo de los predios, y a la falta de asesoramiento técnico a la hora de dosificar los mismos.

Respecto al ión cloruro, las muestras presentan, en general, contenidos altos, pero no exceden el límite de potabilidad de 200 mg/l para la O.M.S y 300 mg/L para la O.S.E., con la excepción del pozo 69 que en primavera alcanza valores de 327 mg/L y en las otras épocas se encuentra muy cerca del límite nacional con 296 mg/L en invierno, 276 mg/L en verano y 296 mg/L en otoño.

El contenido de sólidos disueltos totales (TDS) es también muy elevado, siendo el límite permitido de 500 mg/L para la O.M.S y 1000 mg/L para O.S.E. En la mayoría de los pozos en todas las estaciones se está por sobre valores de 800 mg/L, superando el límite internacional, pero por debajo del límite nacional. Solamente en los datos de invierno se han encontrado 3 pozos con valores inferiores a 800 mg/L pero muy superiores a 700 mg/L.

En resumen, de acuerdo a las normas de la O.M.S. para aguas destinadas a consumo humano, las aguas de acuífero de Punta Espinillo deben ser calificadas como No Potables y según los criterios establecidos por la norma nacional como No Aceptables.

APTITUD DEL AGUA PARA RIEGO

Clasificación de la U.S. Salinity Laboratory Staff. Índice SAR

Esta clasificación tomada de Custodio y Llamas (1983), se basa en las siguientes características:

- 1-la concentración total de sales solubles expresada mediante la conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$ a 25° Celsius);

- 2-la concentración relativa (en meq/L = r) de sodio con respecto al calcio y el magnesio, denominado, índice SAR el cual se expresa como:

$$SAR = \frac{r \cdot Na}{\sqrt{rCa + rMg}}$$

2

Al combinar ambos factores, de peligro de salinización del suelo (CE) y de alcalinización del suelo (SAR) surgen 16 categorías de agua de riego. Los valores del índice SAR se encuentran en las tablas 4 y 5.

APTITUD PARA RIEGO DEL AGUA ANALIZADA

Aproximadamente un 60% de las muestras en las distintas épocas, excepto las de otoño presentan peligro de salinización S3 que corresponde a aguas salinas, que no pueden utilizarse en suelos con drenaje deficiente, existiendo posibilidad de salinización aún con drenaje adecuado. Las plantas cultivadas tienen que ser muy tolerantes a las sales.

Aproximadamente un 10% de las muestras en las distintas épocas, excepto otoño, presentan peligro de salinización S4, definido como un agua altamente salina, no apropiada para utilizar en condiciones ordinarias de riego. Puede utilizarse con un cultivo seleccionado, en suelos permeables, de buen drenaje, y con exceso de agua para lograr un buen lixiviado.

En cuanto al peligro de alcalinización del suelo la clasificación es la siguiente:

Tabla 6: Clasificación en función del peligro de alcalinización y porcentaje de los pozos afectados en cada estación. Alcalinization danger classification and percentage of affected wells in each season.

Estaciones	Porcentaje de pozos por estación, referidos al Peligro de Alcalinización			
	S1	S2	S3	S4
Invierno	0	8 (36%)	13 (59%)	1 (5%)
Primavera	0	6 (27%)	14 (64%)	2 (9%)
Verano	0	3 (17%)	13 (72%)	2 (11%)
Otoño	0	4 (87%)	2 (13%)	0

Las características de estas categorías son:

S2: agua con un contenido medio de sodio. Puede presentar peligro en condiciones de drenaje deficiente, en terrenos de textura fina, con elevada capacidad de intercambio catiónico.

S3: agua alto en sodio. En la mayor parte de los suelos puede alcanzarse un límite de toxicidad del sodio intercambiable, por lo que es necesario un buen drenaje, lavados intensos y adiciones de materia orgánica.

S4: agua muy alto en sodio. En general inadecuada para riego excepto con salinidades medias a bajas, siempre que se pueda posibilitar su empleo con la disolución de calcio en el suelo, el uso de yeso u otras sustancias (tomadas de Custodio & Llamas 1983).

De acuerdo a las consideraciones precedentes y en términos generales las aguas del acuífero de Punta Espinillo presentan restricciones importantes para su uso agrícola dado por el alto riesgo de salinización y alcalinización del terreno.

El contenido elevado de sales en las aguas representa el peligro de salinización dado que en los suelos restringen la absorción de agua por las plantas ejerciendo por lo tanto sobre los cultivos un efecto nocivo.

En general se trata de aguas que no pueden usarse en suelos con drenaje deficiente y aún con drenaje adecuado presentan restricciones, lo que se agrava aún más por la textura fina de los suelos de Punta Espinillo y el ciclo extracción — riego — infiltración (concentración) — extracción.

Los cultivos que pueden desarrollarse en estas condiciones deben ser aquellos que presentan una alta tolerancia a las sales como uva, lechuga, maíz, zanahoria y cebolla, que son los productos por los que están optando algunos productores.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

El sistema acuífero de Punta Espinillo ha sufrido una degradación en la calidad de sus aguas respecto a las características químicas en el período estudiado.

Del análisis de los mapas de curvas potenciométricas virtuales podemos inferir que las direcciones de flujo preferencial se encuentran asociadas al sistema de fracturas NS, presentando un sentido variable, principalmente norte, con variaciones al sur oeste, que es donde se encuentra el estuario del Río de la Plata. Del análisis de los mapas de curvas de iso concentraciones podemos deducir que existe una tendencia a que los pozos más alejados del Río de la Plata sean los que presentan mayores concentraciones de cloruros y sodio, iones que de acuerdo a los antecedentes tenían su procedencia en aguas marinas.

Por otra parte, los índices hidrogeoquímicos revelan que las aguas del sistema tienen características continentales y no presentan evidencias de influencia marina, se tratan en su totalidad de aguas dulces que han sufrido procesos de intercambio de bases y fijación de potasio en los suelos suprayacentes al basamento. La relación Mg^{++}/Ca^{++} presenta valores cercanos a la unidad, lo cual podría estar asociado a la disolución de $CaCO_3$, proveniente de concreciones a la calcáreas vinculadas a la Formación Libertad, suprayacente. En base al análisis expuesto no se verifica la hipótesis de procedencia de los iones sodio y cloruros por la entrada de la cuña salina del Río de la Plata.

Por esta razón y en base a la geología del área, a las direcciones de flujo preferencial, a la proximidad del Lineamiento SaLAM, y teniendo en cuenta que en la cuenca de Santa Lucía existen depósitos asociados a fuertes procesos de evaporación en ambientes continentales, particularmente constatado en niveles yesíferos asociados a la deposición de las formaciones Migues y Castellanos (Veroslavsky 1999, Rossello et al. 2001), los que en general se asocian naturalmente a niveles evaporíticos salinos; surge una hipótesis alternativa para explicar la procedencia de estos iones, la misma podría estar vinculada a la existencia de alguna conexión hidráulica del sistema fracturado con estos depósitos. Otra posible fuente es la concentración de agua de lluvia por transferencia de sales a través de aerosoles marinos (Morales Pérez 2002). Ninguna de las dos situaciones han sido estudiadas hasta el momento.

Desde el punto de vista de la Calidad de las mismas para consumo humano, surge que las aguas del acuífero de Punta Espinillo presenta tenores de sodio, cloruros y nitratos que superan los estándares de potabilidad en la mayoría de las épocas, calificando a las mismas como no potables en base a las normas internacionales y como no aceptables en base a las normas nacionales. Las concentraciones de nitratos exceden peligrosamente los límites nacionales e internacionales. El elevado valor se debe a prácticas indebidas para aumentar la fertilidad de los suelos. En cuanto a su aptitud para riego, estas aguas presentan severas restricciones para su utilización, en base al alto riesgo de salinización y alcalinización de los suelos.

TRABAJOS FUTUROS

Se planea continuar las investigaciones para determinar la procedencia de los iones sodio y cloruros, sometiendo a prueba las diferentes hipótesis planteadas. Los trabajos incluirán nuevas determinaciones químicas.

cas y bioensayos tanto de los pozos, como de las aguas superficiales y del estuario del Río de la Plata.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer a la Comunidad Agrícola de Punta Espinillo por el apoyo al proyecto, al

Laboratorio de Higiene Ambiental de la Interde???? Municipal Montevideo, por la realización de los análisis químicos en el marco del proyecto de Tesis de Maestría de la primera autora y a los Profesores, Dr. Gerardo Veroslavsky (Facultad de Ciencias- Uruguay) y PhD. John W. Lloyd (University of Birmingham -UK) por las sugerencias para el presente trabajo.

REFERENCIAS

- BOSSI J.; FERRANDO L.; MONTAÑA J.; CAMPAL N.; MORALES H.; GANCIO F.; SCHIPILOV A.; PIÑEYRO D. ; SPRECHMANN P. 1998. *Carta Geológica del Uruguay a escala 1:500.000*. CD-ROM Geoeditores SRM. Montevideo.
- CUSTODIO E. & LLAMAS M.R. 1983. *Hidrología Subterránea*. 2 ed. Tomo I y II. Barcelona, Omega.
- GREENBERG A.E.; CLESCERI L.S.; EATON A.D. 1998. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 20 ed. New York, APHA (American Public Health Association), AWWA (American Water Works Association) and WEF (Water Environment Federation).
- LLOYD J.W. & HETHCOTE J.A. 1985. *Natural Inorganic Hydrochemistry in relation to Groundwater. An introduction*. Oxford, Clarendon Press, 295p.
- MONTAÑO J.; GUEREQUIZ R., COLLAZO P., MARTINEZ PAULO S; DAROSA FILHO E. F.; HINDIE. 2001. Planificación para la recuperación de Sistemas Hidrogeológicos Discontinuos - Punta Espinillo (Uruguay). *Revista de la Asociación Latinoamericana de Hidrología Subterránea para el Desarrollo (ALHSUD)*. 1(1):15-25.
- MORALES PÉREZ E. 2002. *Caracterización hidrogeoquímica del sistema acuífero fisurado de Punta Espinillo; Montevideo, Uruguay*. Trabajo final de Hidrogeología, Udelar- FCIENT, Uruguay, 55p.
- ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD (O.M.S). 1936. *International Standards for Drinking Water*.
- _____. & ORGANIZACIÓN PANAMERICANA DE LA SALUD (OPS). 1984-1985. *Guías para la calidad de agua potable*.
- ROSSELLO E.; SANTA ANA H.; VEROSLAVSKY G. 1999. El Lineamiento Santa Lucía–Aiguá–Merín (Uruguay); ¿Un rifting transtensivo mesozoico abortado durante la apertura Atlántica?. In: Simposio sobre el Cretáceo de América del Sur, 1, Serra Negra, Brasil. *Actas...*, 321-326. Rio Claro, Unesp, 443-448p.
- STAFF M.; PENA S.; CARRIÓN R.; MASSA E.; BERGALLI L.; LARDINO G.; HEINZEN W. 2001. El acuífero fisurado de Punta Espinillo. *Revista Geológica Uruguaya*. 1 (1): 8-17. Editado por la Dirección Nacional de Minería y Geología. Montevideo.
- ROSSELLO E, VEROSLAVSKY G; DE SANTA ANA H. 2001. La Cuenca Santa Lucía (Uruguay): un pull-apart Juro-Cretácico transtensivo dextral. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 56(1): 38-50.
- VEROSLAVSKY G. 1999. *Geología da Bacia de Santa Lucía–Uruguai*. Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, São Paulo, Tese de Doutorado, 152 p.

Recebido em 27 out. 2003

Aceito em 17 dez. 2004