

CARACTERIZACIÓN HIDROQUÍMICA DEL AGUA DE LAS LAGUNAS DE ALCAUDETE (JAÉN), CON OBJETO DE DETERMINAR LA RELACIÓN ENTRE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS Y EL QUIMISMO LAGUNAR

FERNÁNDEZ ESCALANTE, Enrique. TRAGSATEC
BUIL GUTIERREZ, Belén. CIEMAT
MARTÍNEZ RUBIO, Juan. TRAGSATEC

Palabras clave: Laguna Honda, Laguna del Chinche, Reserva Natural, Alcaudete, hidroquímica, caracterización, Jaén.

Resumen

El estudio de la influencia de las aguas subterráneas en la composición química de las aguas que constituyen los humedales puede ser determinado mediante procedimientos hidroquímicos análogos a los empleados en estudios de tendencia evolutiva convencionales. Algunas de estas “herramientas hidroquímicas” han sido aplicadas para el estudio de la influencia de las aguas subterráneas en la composición química del agua de las Lagunas Honda y Chinche de Alcaudete (Jaén), dentro de un contexto olistostrómico, partiendo de la premisa de que las reacciones agua-roca son condicionantes de la alta especificidad del ecosistema asociado. Entre ellas cabe destacar la caracterización y especiación de las muestras, con disponibilidad de análisis, comprendidas entre los polos extremos (meteórico y subterráneo) y la estimación de la existencia de procesos de mezcla mediante procedimientos indirectos, como punto de partida para, en un futuro y ante la disponibilidad de nuevos datos, establecer sus pautas de reacción y estudiar la composición de las aguas intermedias empleando códigos específicos. El método requiere un conocimiento hidrogeológico profundo del sistema en el que se producen estos procesos de mezcla, así como técnicas complementarias, por ejemplo la paleopalinología, etc.

Introducción

Las lagunas de Alcaudete (Laguna Honda y Laguna Chinche) pertenecen al grupo de humedales considerados tradicionalmente como adicionalmente “endorreicos”. La Reserva Natural Laguna Honda es una laguna esteparia de cuenco semicircular poco profundo y cuyo sustrato está constituido por margas abigarradas y yesos, con un alto porcentaje de arcillas de tonalidad rojiza y alto contenido en hierro. La Reserva Natural Laguna del Chinche es también una laguna esteparia de cuenco elíptico con una extensión actual que oscila entre 4,25 y 5 hectáreas. Dicha laguna se encuentra intercalada en un relieve alomado con sustrato litológico de margas abigarradas y yesos con elevada proporción de limos grisáceos.

En últimos años, se ha percibido un alto deterioro medioambiental en estas Reservas Naturales, influyendo en la calidad de las aguas en la primera, mientras que la segunda experimenta inundaciones ocasionales como consecuencia de su drenaje antrópico desde la década de los 50, por lo que su valor ecológico es muy escaso en la actualidad. La preocupación suscitada ha llevado a la promulgación del Decreto 241/2000 (Andalucía), de 23 de mayo, por el que se aprueba el Plan de Ordenación de los Recursos Naturales de las Reservas Naturales Laguna Honda y Laguna del Chinche (BO Andalucía, núm. 73, de 27 de junio de 2000) que en su Capítulo VII aborda las actividades de investigación, considerando como una de las líneas prioritarias los estudios encaminados a determinar el comportamiento de las lagunas y las interrelaciones con las cuencas de alimentación.

En este sentido, el objetivo principal de este trabajo es el estudio y caracterización hidroquímica de los humedales de Alcaudete (Laguna Honda y Laguna Chinche) con el fin de evaluar el grado de contribución de las aguas superficiales y/o subterráneas en su origen y evolución temporal.

Caracterización hidroquímica de las aguas

Con objeto de ver la posible contribución de las aguas superficiales y/o subterráneas como fuente de alimentación de las lagunas se ha procedido al muestreo, análisis y caracterización del agua de las lagunas y del pozo más cercano a la Laguna Honda (Pozo Tumba la Granja), para poder llevar a cabo un estudio comparativo de las facies hidroquímicas y poder determinar su posible vinculación hidrogeológica. Así mismo, se ha recopilado información de registros de análisis históricos, procedentes del IGME, lo que posibilita ver la tendencia evolutiva de las distintas facies hidroquímicas. Los análisis disponibles (Tablas 1, 2, y 3) son los siguientes: análisis del agua de laguna Honda en los años 1988 y 2001 y Chinche del 2001 (contando con parámetros inestables para 1988 en ambas), análisis del pozo "Tumba la Granja" (1839-1-0006), cercano a la laguna Honda por el noreste, de 1967 y 2001 y de un sondeo ubicado al sudeste de la laguna del Chinche en el sentido del gradiente hidráulico (1839-1-0007).

MUESTRA	FECHA	pH	C (µS/cm)	Na	K	Mg	Ca	Cl	SO ₄	NO ₃	HCO ₃	CO ₃
Laguna del Chinche	22/01/01	7.3	1323	109	23	73	90	104	622	< 1	259	0
Laguna Honda	22/01/01	7.9	19670	2518	66	1816	268	6795	5290	5	191	6
Pozo Tumba La Granja	22/01/01	7.2	698	26	7	24	89	26	135	17	142	0

Tabla 1.- Resultados analíticos de las muestras de Laguna Chinche, Honda y del pozo Tumba la Granja realizados en Enero del 2001

CODIGO	FECHA	Cl	SO ₄	HCO ₃	Na	Mg	Ca	K	C (µs/cm)	R. SECO	Tª
1839-1-0004	01/11/67	39	60	1230	18	30	64		650	360	12
1839-1-0005	01/11/67	284	575	1560	46	130	244		1880	1465	11
1839-1-0006*	01/11/67	128	623	1860	90	133	160		1760	1400	10
	01/11/67	852	1920	159	317	363	524	8	5100	4270	10

Tabla 2.- Resultados analíticos de los puntos de agua procedentes del IGME (fecha de muestreo 1967).

Parámetro	Laguna del Chinche	Laguna Honda		Laguna Honda
DATOS FISCOQUÍMICOS	Datos de 14-ENERO-1988, excepto los (*)		DATOS ANALÍTICOS	
Color	Ocre-opaco	Amarillento	Sodio	391.500
Temperatura del agua (feb'90)	19 °C	11,5 °C	Potasio	2.200
Transparencia	0,3 m	0.6 m	Calcio	20.000
'pH (feb'90)	8	7.5	Magnesio	398.300
'pH (ene'88)	8	9	Cloro	470.900
Conductividad (feb'90)	2.870	4.880	Sulfatos	295.600
Conductividad (ene'88)	2.870	62.000	Carbonatos	1.400
alcalinidad	-	5.200	Bicarbonatos	3.900
Concentración	Subsalina-hiposalina	Mesosalina	Salinidad	47.500
	-		Oxígeno disuelto	8,80

Tabla 3.- Resultados analíticos de los puntos de agua procedentes del MIMAM (fecha de muestreo 1988).

• Relaciones entre los parámetros fisicoquímicos

Los parámetros físico-químicos determinados se caracterizan por presentar un amplio rango de variabilidad en los distintos puntos de agua, así como asociado al período de muestreo de los mismos (variabilidad temporal). Comentando brevemente estos resultados, cabe destacar:

-La **temperatura** del agua oscila entre 10 y 12°C, estando fuertemente influenciada por la temperatura ambiental dada la batimetría de las lagunas y el carácter somero de los pozos.

-La **conductividad** oscila entre límites amplios. En el caso de las lagunas se han medido valores de 4.880 a 62.000 µS/cm, en Laguna Honda, y de 1323 a 2870 en la Laguna del Chinche. En los puntos de agua también hay un amplio rango de variabilidad, entre 650 y 5100 µS/cm.

-El **pH** oscila entre 7.3 y 7.9 en condiciones lluviosas, ascendiendo hasta 9 en la Laguna Honda en enero de 1988 (año tipo seco-medio). La variabilidad de este parámetro es mucho mayor en la Laguna Honda que en la del Chinche.

- **Relaciones entre los componentes químicos elementales. Diagramas hidroquímicos**

En el conjunto de puntos de aguas considerados (lagunas y pozos), los aniones mayoritarios son los cloruros y sulfatos y los cationes el magnesio y sodio, lo que parece indicar la gran influencia de los lentejones yesíferos y de las margas con abundancia de carbonatos, así como la cierta escasez de calizas y dolomías en la subcuenca hidrográfica (en vista de la baja concentración en carbonatos, bicarbonatos y calcio).

La mayor variabilidad entre los distintos análisis corresponde al contenido en sulfatos, que está directamente vinculada a la proporción de calcio, según se desprende de las relaciones iónicas calcio/sulfato (Ca/SO_4) calculadas. Esta relación es de 0.068 en 1988 y de 0.051 en 2001. Las restantes relaciones calculadas (Ca/Mg y Na/Cl) presentan un rango de variabilidad menor y más cercano a la unidad, y los iones tienen una interdependencia muy inferior a la de los implicados en las reacciones calcio-sulfatos.

La tipología de las aguas objeto de estudio (Fig. 1) se caracteriza por presentar, a su vez, una gran variabilidad, correspondiendo en el caso de las lagunas, a *facies clorurado-sulfatado-magnésico-sódicas*, en la Laguna Honda, y a *facies sulfatado-bicarbonatado-magnésico-sódico-cálcicas*, en la Laguna del Chinche. En el caso de los pozos, las aguas correspondientes al pozo Tumba la Granja responden a la tipología de aguas *sulfatado-bicarbonatado-calcico-magnésicas*, mientras que las aguas del pozo ubicado junto a la laguna del Chinche corresponden a una *facies sulfato-clorurada-magnésica-cálcica y sódica*.

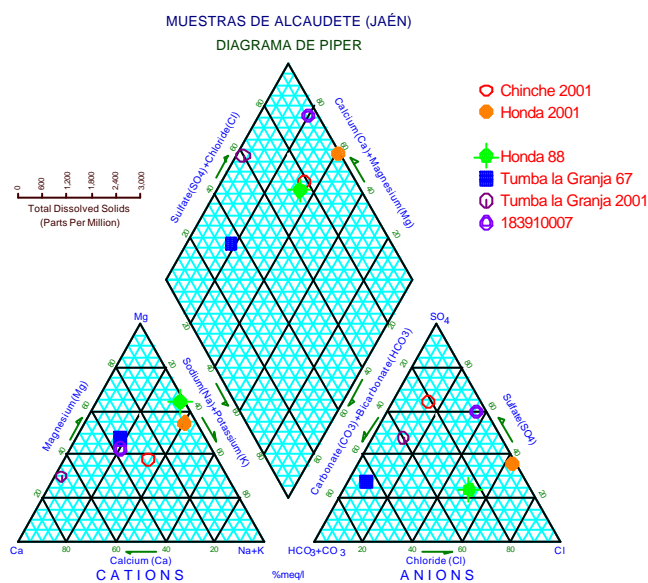


Figura 1.- Diagrama de Piper-Hill-Langelier para los análisis correspondientes a las aguas de las lagunas y los pozos en los distintos muestreos considerados.

- **Modelización hidrogeoquímica: Cálculos de especiación-solubilidad**

Los cálculos de especiación solubilidad se han realizado en las muestras de agua de las lagunas y de los pozos, en las que los métodos de validez analíticos satisfacen los intervalos de permisibilidad admitidos, mediante el código de modelización hidrogeoquímica EQ3NR. El objeto de estos cálculos ha sido a) determinar la distribución de especies presentes en equilibrio mutuo en el agua, sus concentraciones y actividades y b) comprobar el estado de equilibrio/desequilibrio de determinadas reacciones heterogéneas (agua-fase mineral).

a) Distribución de especies en disolución

Los resultados obtenidos muestran una gran homogeneidad en la distribución de especies acuosas en las aguas de las lagunas y los pozos. La distribución de especies en disolución, de aquellos elementos cuya especiación está controlada por sus propias características químicas

(Na, K, Ca, y Mg), muestra un dominio de las especies iónicas libres, representando más de un 88% para el Na y K y más de un 80% y 70% para el Ca y Mg respectivamente, salvo en las aguas del Pozo Tumba la Granja, con un 53% para el Ca y un 41% para el Mg. Este comportamiento está de acuerdo con las propiedades intrínsecas de estos elementos, siendo todos ellos cationes con bajo poder polarizante ($Z^2/r < 2.5$) por lo que se acomplejan muy débilmente presentando una especiación dominada por las formas libres. El porcentaje restante del total, en cada uno de los elementos anteriores, está representado por la formación de complejos con ligandos tipo sulfato, representando una proporción superior al 25% para el caso del Mg y al 15% para el Ca. Estos resultados son coherentes con los valores de concentración de sulfato en las aguas, siendo el anión más abundante junto con los cloruros, y en determinados puntos el bicarbonato, que sin embargo en estos sistemas presentan un carácter de ligandos débil, tal como muestra su especiación.

Por último, la distribución de especies de aniones depende además de las características propias del sistema, puesto que su carácter acomplejante de cationes está afectado por las características físico-químicas de la disolución. Los resultados obtenidos muestran el carácter de ligando débil del ion cloruro, presentándose como forma iónica libre en un porcentaje en torno al 100% en todas las muestras, y del bicarbonato, transportado preferentemente en forma de HCO_3^- , en un porcentaje superior al 72% en todas las muestras, y en una menor proporción ($< 15\%$) como CO_2 (aq). En cuanto al ion sulfato aparece mayoritariamente en la forma SO_4^{2-} , representando un porcentaje próximo al 100% en el Pozo Granja la Tumba, al 85% en la Laguna del Chinche e inferior al 65% en las muestras restantes. El porcentaje restante del total aparece como ligando acomplejante del Ca, Mg y Na fundamentalmente.

b) Grado de saturación de las reacciones heterogéneas.

La selección de la paragénesis mineral a utilizar en la evaluación del grado de saturación de las aguas con los materiales encajantes, se ha realizado a partir de los estudios de petrología y mineralogía llevados a cabo en la zona de estudio. La totalidad de los minerales seleccionados se encuentran incluidos en la base de datos Data0_com_V8_R6 del código EQ3NR empleado para la realización de estos cálculos.

Los resultados obtenidos en los puntos de agua considerados (lagunas y pozos) aparecen reflejados en la figura 2, donde se han representado los valores de los índices de saturación (comprendidos en el intervalo de 2 a -2) correspondientes a dichos puntos de agua, que aparecen ordenados según la dirección del gradiente hidráulico de la zona (del NE al SE). En esta figura puede observarse como la totalidad de las aguas se encuentran únicamente sobresaturadas respecto a la dolomita, excepto la muestra correspondiente al pozo Tumba La Granja que se encuentra subsaturada respecto a este mineral.

Las aguas correspondientes a la Laguna del Chinche y al pozo situado al SE de la misma presentan un estado de saturación similar respecto al resto de minerales carbonatados, mostrando una situación muy próxima al equilibrio en el caso de la calcita y el aragonito, este último, aunque es menos estable y corriente, puede formarse en condiciones físico-químicas de baja temperatura y en depósitos superficiales. Sin embargo, ambas aguas difieren en su estado de saturación respecto a los minerales sulfatados, mostrando una situación más próxima al equilibrio (alcanzada respecto al yeso) en el caso de las aguas correspondientes a la captación. Esta situación puede responder a la disposición que presentan los materiales yesíferos en el entorno de la Laguna Chinche, aflorando exclusivamente en las laderas de la subcuenca. Esta disposición favorecería que dichos materiales sólo se presentaran cubiertos por el agua de la laguna en épocas de máxima crecida y, por lo tanto, la interacción del agua superficial o de escorrentía con los mismos sería menor en las épocas restantes, favoreciéndose un estado de subsaturación respecto a dicha mineralogía. Por otro lado, la mayor contribución de las aguas subterráneas en la captación sería coherente con un aumento en el contenido de sulfatos en el agua, como resultado de los procesos de interacción con este tipo de

materiales (presencia de lentejones yesíferos) y, por lo tanto, podría alcanzarse una situación de equilibrio respecto a dicha mineralogía.

En cuanto a las aguas de la Laguna Honda y del pozo Tumba la Granja se observan diferencias notables en el grado de saturación alcanzado respecto a la paragénesis mineral considerada. En la figura 2 podemos observar como el agua de la captación Tumba la Granja se encuentra subsaturada respecto a la mineralogía encajante (carbonatos, sulfatos, y de manera extrema filosilicatos), mientras que el agua de la laguna Honda muestra una situación de sobresaturación muy importante respecto a la dolomita, encontrándose en equilibrio respecto al resto de minerales carbonatados, excepto la magnesita.

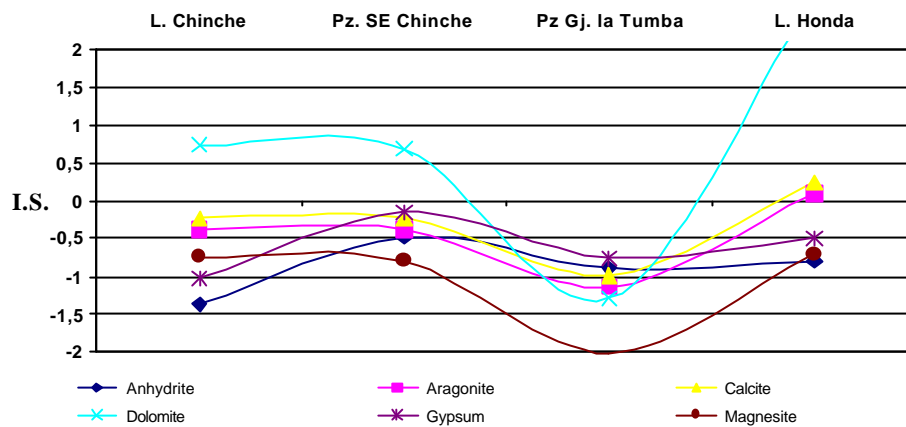


Figura 2.- Grado de saturación en fases minerales estables en las muestras de agua disponibles.

Discusión

La variabilidad observada en los parámetros-fisicoquímicos determinados en las aguas de las lagunas presenta una relación importante con los valores pluviométricos detectados en los días previos al muestreo. Así mismo, la comparación de los análisis seriados del agua permite observar, en ambas lagunas, valores de conductividad, y consecuentemente de salinidad, vinculada directamente a la pluviometría. Así, el agua de la laguna Honda presentaba un valor de conductividad de 62000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en 1988, de 4880 $\mu\text{S}/\text{cm}$ dos años más tarde y de 19670 $\mu\text{S}/\text{cm}$ doce años más tarde. La laguna del Chinche representa el caso extremo de dicha vinculación, presentando un carácter temporal periódico durante cortos periodos de tiempo, incluso en años lluviosos, siendo calificada como efímera.

En el caso de los pozos considerados también se ha detectado un amplio rango de variabilidad en los valores de conductividad que están condicionados por la pluviometría, dada la someridad de las captaciones.

Desde el punto de vista de la composición química de las aguas, parece apreciarse un aumento del grado de evolución geoquímica en la dirección del gradiente hidráulico, desde las aguas de la Laguna Chinche hasta las aguas de la laguna Honda, tal como muestra el aumento en la concentración de elementos indicativos del grado de madurez hidroquímica de las aguas (ej. Na y Cl). Sin embargo, estas diferencias observadas en la composición química de las aguas, y consecuentemente en las facies hidroquímicas, podría explicarse por el carácter heterogéneo de la litología encajante, así como de su distribución en el contexto geológico en el que se enmarcan estos sistemas.

En este sentido, el grado de saturación de las aguas (lagunas y pozos) respecto a la mineralogía encajante no muestra una tendencia hacia situaciones de equilibrio, o sobresaturación, en la dirección del flujo (Fig. 2). Por lo tanto, las distintas muestras consideradas no parecen representar estadios intermedios de una misma tendencia evolutiva.

En lo que respecta a las lagunas, de forma aislada, si se observa una ligera tendencia hacia situaciones de equilibrio desde la Laguna Chinche hasta la Laguna Honda (Fig. 2). Sin embargo, esta situación parece estar más influenciada por el carácter efímero de la Laguna Chinche, que dificultaría la evolución de sus aguas, como consecuencia de los procesos de interacción agua-roca, hacia situaciones de equilibrio.

Del conjunto de resultados obtenidos se desprende la gran importancia del aporte del agua superficial o de escorrentía en la génesis y evolución de las lagunas, pudiéndose justificar la composición química de las mismas sin necesidad de aportaciones "importantes" procedentes del agua subterránea.

La evaluación y cuantificación de la importancia del aporte subterráneo en estos sistemas requeriría la disponibilidad de un mayor número de análisis distribuidos temporalmente, junto con los datos climatológicos correspondientes, así como el análisis del agua de lluvia y del agua subterránea *ss.* (polos extremos del sistema). La adquisición de estos datos permitirá simular, en estudios posteriores, el conjunto de procesos interacción agua-roca, procesos de mezcla de aguas, etc., mediante cálculos de pautas de reacción realizados con códigos de modelización hidroquímica.

Consideraciones finales

Las aguas de las lagunas y de los pozos muestran una gran dependencia con las características del terreno por el que discurren, y en el caso de las muestras lagunares, con su tiempo de permanencia y con el régimen pluviométrico de los meses previos al análisis. Dichas muestras presentan unas características específicas que justifican su alto valor ecológico, por tratarse de facies poco habituales en este contexto geoambiental. Son inapropiadas para el consumo humano, riego, etc., si bien son aptas para la función ecológica con la que tradicionalmente han cumplido.

El conjunto de muestras de agua consideradas no parecen representar estadios evolutivos intermedios de una misma pauta flujo, tal como muestra la ausencia de una tendencia al aumento del valor de los índices de saturación de las mismas, respecto a la mineralogía encajante, en la dirección del gradiente hidráulico. Sin embargo, es necesario un estudio más amplio, mediante la aplicación de técnicas de modelización hidroquímica, que permita simular la gran variedad de procesos geoquímicos que pueden desarrollarse en este tipo de sistemas naturales (procesos de mezcla de aguas, de evaporación y, en general, de interacción agua-roca) y poder evaluar de manera cuantitativa la importancia de los aportes subterráneos y superficiales en su alimentación, así como completar el estudio del funcionamiento hidrogeoquímico de los mismos.

Agradecimientos: A Agustín Madero Montero, por sus ideas, interés, apoyo y simpatía.

Bibliografía

- Restauración de las Reservas Naturales de Laguna Honda y Laguna del Chinche del T.M. de Alcaudete, Jaén. Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía. Jaén 2001.
- BOLETÍN OFICIAL DE LA JUNTA DE ANDALUCÍA (BOJA). Decreto 241/2000 (Andalucía), de 23 de mayo, por el que se aprueba el Plan de Ordenación de los Recursos Naturales de las Reservas Naturales Laguna Honda y Laguna del Chinche (BO Andalucía, núm. 73, de 27 de junio de 2000).
- BOLETÍN OFICIAL DE LA JUNTA DE ANDALUCÍA (BOJA). Ley 2/1989, de 18 de julio, que aprueba el inventario de Espacios Naturales y establece medidas adicionales para su protección (BOJA núm. 60, de 27 de julio de 1989).
- BOLETÍN OFICIAL DE LA JUNTA DE ANDALUCÍA (BOJA). Ley 2/1995 (Andalucía), de 1 de junio, sobre modificación de la Ley 2/1989, de 18 de julio, por la que se aprueba el inventario de espacios naturales protegidos de Andalucía y se establecen medidas adicionales para su protección (BOJA núm. 82, de 7 de junio de 1995).