

Foto M. Rendón



ARTICULO

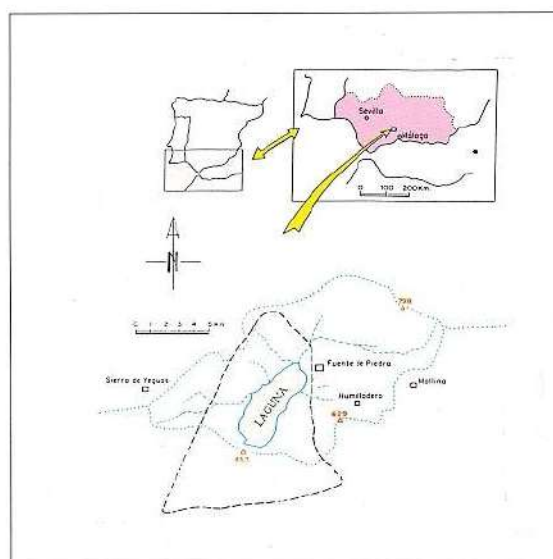
Vista aérea de la laguna y de parte de su cuenca, en la que destacan los relieves de las Sierras de Humilladero y Molina.

La Laguna de Fuente de Piedra

Caracterización hidrogeológica

Luis LINARES GIRELA

Dr. en Ciencias Geológicas
Instituto Tecnológico GeoMinero de España



Situación geográfica.

Aspectos generales

La laguna de Fuente de Piedra, que se sitúa al norte de la provincia de Málaga, y ocupa una superficie de 13 km², es la mayor de Andalucía, y puede considerarse como uno de los complejos salino-lagunares más extensos y característicos de España.

Esta laguna constituye el enclave más importante, de la Península Ibérica, para la nidificación y supervivencia del flamenco rosa y es, en la actualidad, una de las tres zonas húmedas españolas (junto con Doñana y las Tablas de Daimiel), incluida en la lista del *Convenio de Ramsar*, que reúne los humedales de interés mundial. El Parlamento Andaluz la declaró, en 1984, Reserva Integral.

El agua de esta laguna presenta elevados contenidos en cloruros y sodio, durante la mayor parte del año.

Su fondo es prácticamente horizontal, y la lámina de agua excepcionalmente supera los dos metros de altura, incluso en las condiciones más favorables de aportes hídricos. El fondo mantiene aún algunas modificaciones, que se introdujeron a finales del pasado siglo, como infraestructura necesaria para la explotación salina que aquí se desarrolló. Dichas irregularidades son aprovechadas, actualmente, para el asentamiento de la colonia de aves.

Esta laguna constituye el nivel de base y el drenaje natural de una cuenca endorréica de algo más de 150 km², que se localiza a caballo en la divisoria atlántico-mediterránea. Los cursos existentes en esta cuenca son de corto recorrido y régimen irregular. Destaca el arroyo de Santillán, con unos 7 km de longitud, que desemboca en el extremo septentrional de la laguna.



Vista aérea de la laguna al final del estiaje. Puede observarse una pequeña superficie inundada, depósitos de sal y el espigón central donde se asienta la colonia de aves.

En los últimos años la laguna ha sufrido desecaciones estacionales, que hicieron pensar en alteraciones de su régimen hidrológico, debidas a la sobre-explotación de los acuíferos próximos, lo que dio origen a la investigación hidrogeológica que constituye el objeto de este trabajo. Con él se ha pretendido caracterizar este ámbito, desde los puntos de vista climatológico e hidrológico, y definir los acuíferos presentes, así como su funcionamiento y su relación con la laguna.

En base a todo ello se proponen iniciativas para incrementar la disponibilidad de recursos hídricos, y para contribuir a resolver el problema ecológico que supone su desecación.

Rasgos climáticos

La pluviometría anual media de la zona (período 1948/87), es de unos 460 mm. Diciembre y febrero son los meses más lluviosos, y en ellos la precipitación media oscila entre 60 y 70 mm. El mes más seco es julio, con valores medios inferiores a 5 mm, seguido de agosto con 5 a 6 mm.

La temperatura media anual (1951/87) es de 16,9 °C. El mes más frío es enero con 9 °C, seguido de diciembre (9,3 °C) y febrero (10,1 °C); el más caluroso es agosto con 26,1 °C, seguido de julio

(25,9 °C) y septiembre (23 °C).

El valor anual medio de la evapotranspiración potencial (ETP) (según Thornthwaite) es de 830 mm. Los meses de julio y agosto son los que presentan mayor índice de ETP, seguidos de junio (los valores acumulados de estos tres meses representan prácticamente el 50 % del total anual).

Los valores medios de evapotranspiración real (ETR) (calculados por el método del mismo autor), están comprendidos entre un mínimo de 259 mm (para una reserva útil de 25 mm) y un máximo de 332 mm (para una reserva útil de 100 mm). La ETR representa, en general, entre un 30 y un 40 % de la ETP, a causa de la falta de disponibilidad de agua en los meses de estiaje.

La lluvia útil oscila entre mínimos alrededor de los 117 mm (para reserva útil de 100 mm) y máximos del orden de 190 mm (para reserva útil de 25 mm). Estas cifras representan, por término medio, entre el 26 y el 43 % respectivamente de la precipitación total.

La tasa media de evaporación (para el período 1962/82), medida en evaporímetro Piché, es de 1.318 mm/año, con valores extremos comprendidos entre 1.164 mm y 1.620 mm. La variación, a lo largo del año, es importante, con mínimos alrededor de los 40 mm en los meses de



diciembre y enero, y máximos de más de 200 mm en los de julio y agosto.

Características geológicas e hidrogeológicas

El substrato impermeable, de la cuenca de Fuente de Piedra, lo constituyen los materiales del Triás, de carácter arcilloso-evaporítico. En una serie de relieves aislados (Sierras Subbéticas de Humilladero, La Camorra y los Caballos), afloran materiales fundamentalmente carbonatados, de edad jurásica, que son, junto con el Triás, los tramos observables de la cobertura mesozoica. Tanto el Triás como el resto de esta cobertura corresponden a mantos de corrimiento, que han sufrido un importante desplazamiento, desde regiones más meridionales.

La mayor parte de la cuenca está ocupada por formaciones postorogénicas, de edad Mioceno-Cuaternario, que reposan discordantes y horizontalmente sobre el substrato mesozoico. Se trata, en su mayoría, de materiales detríticos, entre los que predominan las areniscas calcáreas, que pueden alcanzar un espesor cercano al centenar de metros.

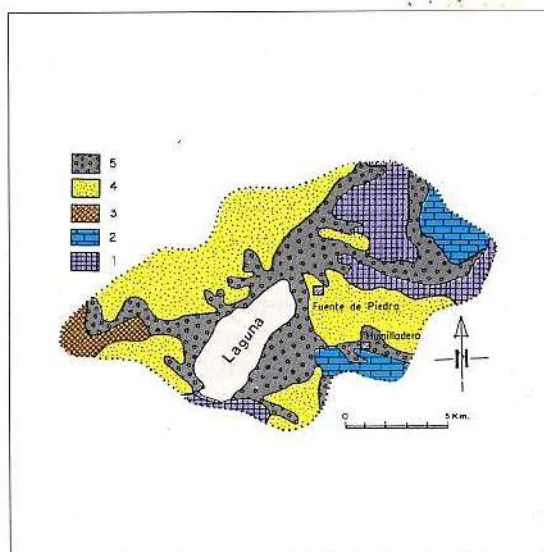
El carácter geomorfológico más significativo de este área es su endorreísmo, fenómeno posiblemente relacionado con la karsificación del substrato triásico, al disolverse materiales evaporíticos (halita y yeso).

Las formaciones carbonatadas jurásicas, las areniscas calcáreas miocénicas y

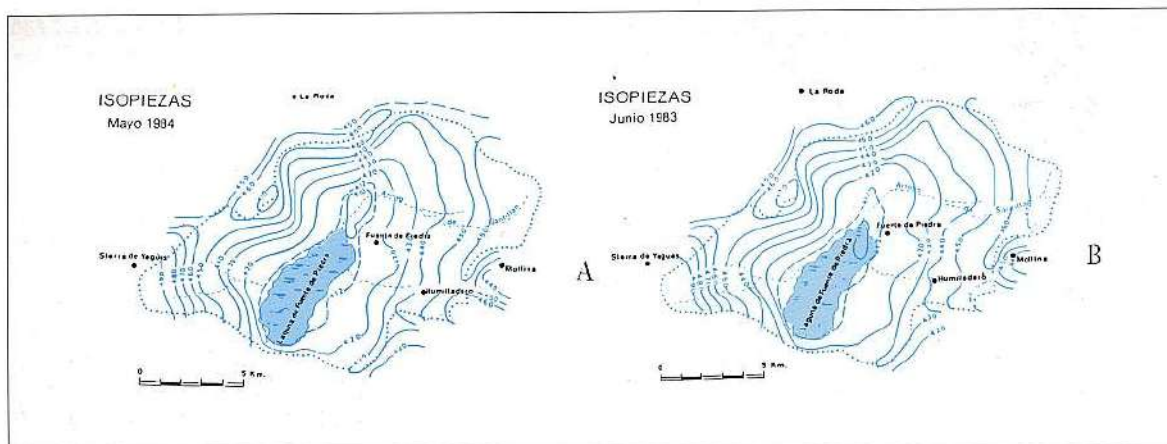


los rellenos cuaternarios son materiales permeables, que se hallan hidráulicamente conectados, formando un único conjunto, que puede considerarse como un sistema aislado del resto de los que existen en la región, y cuyos límites coinciden, con bastante aproximación, con los límites de la cuenca endorréica de Fuente de Piedra.

Los bombeos de ensayo han puesto de manifiesto valores de transmisividad excepcionalmente altos (superiores a 800 m²/h) en los acuíferos carbonatados de las sierras de Mollina y Humilladero, confir-



Esquema geológico de la cuenca de Fuente de Piedra.
5: Aluviales (Cuaternario).
4: Areniscas calcáreas (Mioceno).
3: Margas (Paleógeno).
2: Rocas carbonatadas (Jurásico).
1: Arcillas y evaporitas (Triás).



Piezometría del acuífero en la cuenca de Fuente de Piedra. A: Isopiezas en época de recarga. B: Isopiezas en estiajes prolongados.

mando su carácter kárstico. En los materiales miocénicos las transmisividades están comprendidas entre 2 y 80 m²/h, habiéndose considerado entre 5 y 35 m²/h los valores medios representativos del área próxima a la laguna. El coeficiente de almacenamiento que se puede considerar representativo, muestra un valor del orden de $1,3 \cdot 10^{-2}$. A partir de la desaturación producida en el acuífero, entre 1973 y 1984, se han obtenido valores de porosidad eficaz comprendidos entre 4 y 6 %.

El inventario de puntos de agua y las encuestas sobre explotaciones que se han realizado, permiten establecer que el número total de captaciones existentes en la cuenca de Fuente de Piedra supera las 400, de las que, en la actualidad, sólo la mitad poseen equipo de extracción. Gran parte de las captaciones que actualmente se utilizan se concentran en un área de unos 30 km², situada al noreste de la laguna y en el sector próximo a Humilladero.

El volumen total de agua bombeada en 1983 fue de 3 hm³, habiendo disminuido en relación con el año 1974, en el que se estimó en unos 7 hm³. En 1989 las extracciones se mantenían similares a las de 1983. La mayor parte del agua bombeada se destina a usos agrícolas (2,4 hm³/año) y el resto (0,6 hm³/año) para abastecimiento de núcleos urbanos.

El análisis de las isopiezas, de este sistema hidrogeológico, pone de manifiesto que existe un flujo general hacia el centro de la cuenca, observándose claramente

que la laguna constituye el nivel de base del sistema, que descarga en ella de modo natural. La divisoria superficial de la cuenca endorréica de Fuente de Piedra se corresponde, sensiblemente, con umbrales piezométricos, lo que permite afirmar que, a grandes rasgos, coinciden las divisorias de aguas superficiales y subterráneas. Sólo localmente existen pequeñas diferencias.

Se puede observar, también, una clara continuidad entre la superficie piezométrica de los macizos carbonatados jurásicos, de las Sierras de Molina y Humilladero, y la del recubrimiento miocénico-cuaternario, confirmando la conexión hidrogeológica existente entre estos acuíferos que se pueden considerar, por tanto, integrados en un único sistema hidrogeológico.

Por el contrario, el afloramiento jurásico de la Sierra de Los Caballos se halla desconectado, hidrogeológicamente, del



El carácter más destacable de la vegetación es la presencia de comunidades halófilas, entre las cuales destaca la Sosa (*Acthrocnemum glaucum* y *Suaeda vera*).

ARTICULO

Foto M. Rendón



Flamencos en Fuente de Piedra.

sistema de Fuente de Piedra, quedando fuera del umbral piezométrico existente en la divisoria NW de la cuenca.

La superficie piezométrica, al final de los estiojes, presenta las cotas más bajas en el sector situado al norte de Fuente de Piedra, donde se concentra la mayor parte de las captaciones; en estas circunstancias dicha superficie llega a situarse por debajo de la cota de la laguna. Sin embargo, una vez interrumpidos los bombeos, y después de las lluvias de otoño, los mínimos piezométricos se localizan de nuevo en la laguna, recuperando el flujo subterráneo su sentido natural.

La consecuencia más significativa, que se obtiene del análisis de los gráficos de evolución piezométrica, especialmente de aquellos que corresponden a puntos controlados desde 1974, es el paralelismo que existe entre ellos y el régimen de precipitaciones de la zona.

El período de sequía, que se inició a partir de los últimos años de la década de 1960 y culminó en 1983, supuso un déficit pluviométrico acumulado, como consecuencia del cual la recarga del acuífero, dentro de dicho período, fue evidentemente inferior no sólo a la del período precedente (claramente más húmedo), sino

incluso a la que se produciría en condiciones de pluviometría media.

Es significativo que unos años ligeramente más favorables, desde el punto de vista de aporte pluviométrico, como han sido los últimos (1988-1990), tienen una respuesta positiva rápida en los piezómetros de la mayor parte del acuífero. El año hidrológico 1987/88, notablemente más lluvioso que los anteriores y con precipitaciones que superan de modo más claro la media, propició, por ejemplo, un generalizado ascenso piezométrico, en relación con el año anterior; idénticas circunstancias han concurrido en el año 1989/90.

Tarro blanco (*Tardona tardona*).

Las áreas que presentan registros piezométricos anómalos, respecto a los que pueden considerarse como representativos de la evolución natural del acuífero, son aquellas en las cuales se concentran los bombeos, concretamente en las proximidades de Humilladero y de Fuente de Piedra.

En el área de Humilladero, próxima a la divisoria que delimita el acuífero, se ponen de manifiesto descensos progresivos de modo continuo. Sólo en los últimos años, más húmedos que el período anterior, se observa una interrupción del proceso, que permite la estabilización, sin que se produzca una recuperación efectiva, al menos hasta finalizar 1988.

En la zona de Fuente de Piedra, el fenómeno es similar, aunque aquí se observa mayor facilidad para la recuperación, posiblemente debido al flujo subterráneo que se produce hacia este área y a la

una evolución negativa, como consecuencia de los bombeos en las captaciones de abastecimiento a Mollina.

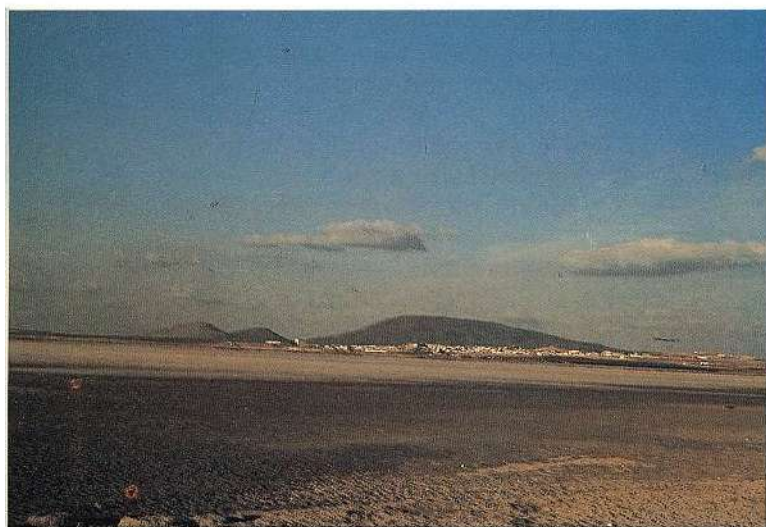
Balances hídricos

Se ha establecido el balance hídrico global de la cuenca de Fuente de Piedra, basado en los cálculos correspondientes al acuífero y a la laguna. Los datos se refieren a un período de veinticinco años (1962/87), que puede considerarse representativo de las condiciones medias.

A pesar de las dificultades para obtener datos fiables, particularmente en lo que se refiere a escorrentía y evaporación, los datos obtenidos son coherentes y se adaptan bastante bien a las variaciones que se producen en el volumen de agua almacenado en la laguna, por lo que puede considerarse que se ha conseguido establecer el modelo cuantitativo de funcionamiento de la cuenca, en su comportamiento general.

El esquema logrado permite conocer, de modo orientativo, la incidencia relativa de los diferentes parámetros hidrológicos en las variaciones del agua almacenada en la laguna, y podrá ser punto de partida de un modelo, más ajustado, para establecer previsiones de evolución o de almacenamiento de la laguna, a partir de determinadas situaciones climáticas, y para estudiar la influencia que puede ejercer sobre ella la modificación de cualquiera de los elementos hidrológicos que intervienen en el balance (precipitación, explotación, etc).

Los recursos hídricos totales de la cuenca de Fuente de Piedra varían entre 20 y 24 hm³/año. De ellos unos 6 hm³/año corresponden a precipitación directa sobre la laguna (con variaciones entre 3,5 y 10 hm³/año, en el período 1962/87). El resto (14-18 hm³/año) corresponde a lluvia útil sobre la cuenca vertiente; este valor medio es poco representativo para un año concreto, si se tiene en cuenta que en el período 1962/87 ha variado entre 0 y 58 hm³/año. Se estima que, aproximadamente, dos tercios de los recursos medios de la cuenca se infiltran en el acuífero. En



Laguna de Fuente de Piedra seca.
Al fondo la Sierra de Mollina.

Foto M. Rendón



Grupo de flamencos (*Phoenicopterus ruber roseus*).

mayor recarga de la misma, a partir de la infiltración del arroyo de Santillán.

Finalmente, el área próxima al antiguo manantial de Santillán, parece sufrir

ARTICULO

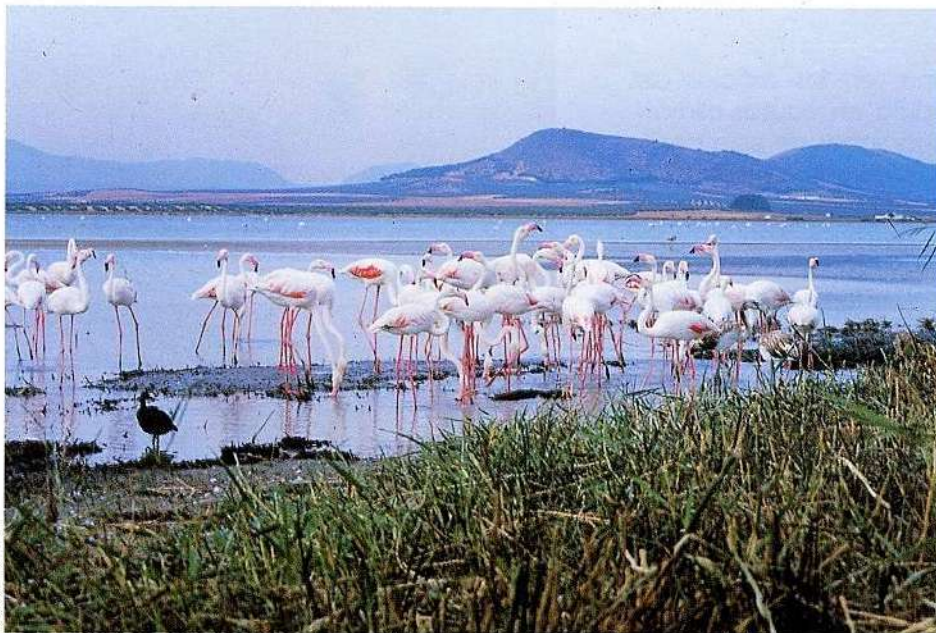


Foto M. Rendón

Colonia de flamencos en Fuente de Piedra.

los años 1962 a 1987 esta cifra ha variado entre 0 y 20 hm³/año, con un valor medio de 12 hm³/año. La extracción por bombeo, en 1983, fue de 3 hm³/año, habiendo descendido progresivamente, desde 1974, en que era de 7 hm³/año.

La escorrentía superficial se ha estimado, aproximadamente, en un tercio de los recursos de la cuenca (6 hm³/año), variando entre 0 y 36 hm³/año en el período 1962/87. Esta escorrentía alcanza la laguna inmediatamente después de las precipitaciones, sin ningún tipo de regulación.

La laguna se recarga con la precipitación directa sobre la misma, con la aportación de la escorrentía superficial, sobre la cuenca vertiente y con el flujo subterráneo que procede del acuífero. Su única descarga es por evaporación. En general, entre noviembre y marzo las aportaciones superan a la evaporación potencial, mientras que entre abril y octubre la evaporación potencial es mayor que las aportaciones (frecuentemente sólo descarga subterránea). La posibilidad de tener agua en la laguna en el período de estiaje depende, por tanto, de la existencia de excedentes en la estación húmeda.

El volumen de agua almacenado en la laguna se ha estimado en una media

de 7,6 hm³ (período 1962/87), distinguiéndose el período 1962/71 con un volumen medio de 18 hm³, sin secarse la laguna en los estiajes, y el período 1972/87 con un almacenamiento medio de 2 hm³ y frecuentes agotamientos de la laguna entre los meses de julio y octubre. En el período de 25 años entre 1962 y 1987 (bastante representativo en cuanto a precipitaciones), se estima que la laguna se secó el 22 % de los meses.

La razón más importante del agota-



Antiguas salinas.

miento de la laguna, en los estiajes del periodo 1962/87, radica en causas climáticas, ya que las aportaciones de este periodo (precipitaciones y escorrentía superficial) fueron sensiblemente inferiores a las del periodo 1962/71, permaneciendo prácticamente constante el aporte subterráneo.

Aspectos hidroquímicos

Las aguas subterráneas de la cuenca se hallan, en general, bastante mineralizadas. Las mayores concentraciones, de todos los iones significativos, se localizan en la laguna y su prolongación nororiental, coincidiendo, a grandes rasgos, con los afloramientos triásicos más extensos de la cuenca. Las concentraciones más bajas, por el contrario, se presentan al este de Fuente de Piedra, en la depresión existente entre las Sierras de La Camorra y Humilladero, ocupada por un extenso afloramiento de materiales miocénicos. Otros sectores con concentraciones iónicas bajas coinciden también, en general, con los sectores marginales de la cuenca, en las proximidades de su divisoria.

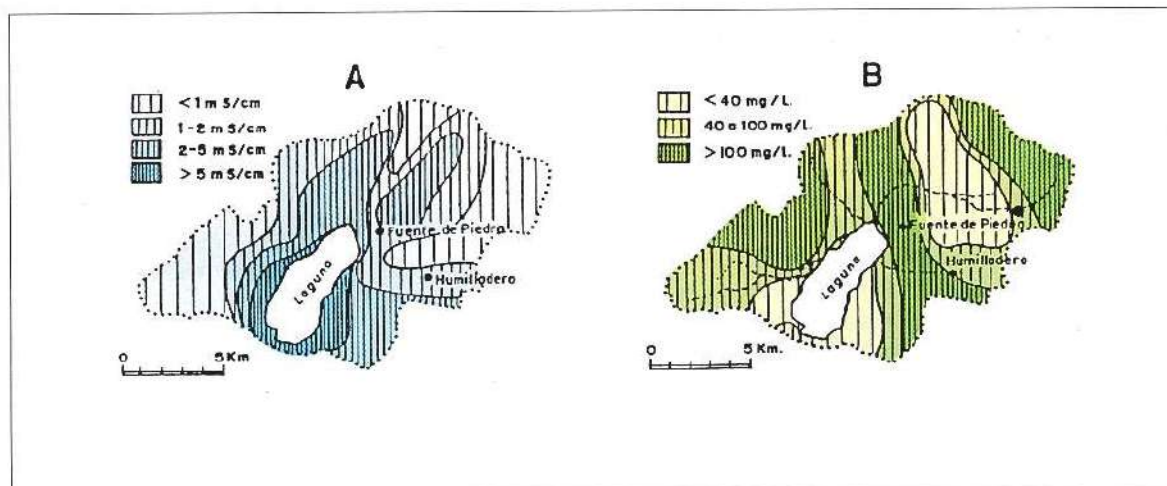
En conjunto predominan las facies cloruradas (59 % de los puntos muestreados) y, de acuerdo con los cationes, las facies mixtas (81 %).

La conductividad eléctrica presenta valores generalmente superiores a los $2.000 \mu\text{S}/\text{cm}$, y en áreas próximas a la laguna se llegan a superar los $5.000 \mu\text{S}/\text{cm}$. Los

cloruros varían entre 17 y $1.800 \text{ mg}/\text{l}$, los sulfatos entre 15 y $1.100 \text{ mg}/\text{l}$ y el sodio entre 10 y casi $800 \text{ mg}/\text{l}$. El ion bicarbonato registra variaciones más moderadas (entre 200 y $400 \text{ mg}/\text{l}$), al igual que el calcio (entre 20 y $240 \text{ mg}/\text{l}$). Las concentraciones de nitratos oscilan entre 40 y $100 \text{ mg}/\text{l}$, con valores puntuales superiores a los $200 \text{ mg}/\text{l}$; las áreas con mayor contenido de nitratos coinciden con las de cultivos más intensos y con los núcleos de población.

En el pozo situado en el interior de la laguna las concentraciones son excepcionalmente elevadas alcanzándose, para el total de sólidos disueltos, un valor medio aproximado cercano a los $180.000 \text{ mg}/\text{l}$, con predominio de cloruros ($100.000 \text{ mg}/\text{l}$ de media), y de sodio ($49.000 \text{ mg}/\text{l}$). Más moderadas, aunque también altas, son las concentraciones de sulfatos ($18.000 \text{ mg}/\text{l}$), magnesio ($7.600 \text{ mg}/\text{l}$) y calcio ($1.300 \text{ mg}/\text{l}$). Sin duda se trata de una salmuera, relacionada con el sistema kárstico desarrollado en los materiales salinos del Triás, fenómeno frecuente en áreas próximas de la cuenca alta del Guadalhorce.

La comparación de los análisis realizados en diferentes épocas (hasta un total de ocho muestreos), a lo largo del periodo 1983/88, permite observar, con algunas excepciones, un aumento de las concentraciones al final de los estiajes, respecto a las épocas de recarga. Por el contrario, la concentración media de los nitratos se mantiene sin grandes variaciones.



Algunos rasgos hidroquímicos de las aguas subterráneas de la cuenca de Fuente de Piedra. A: distribución de la conductividad eléctrica y B: distribución del contenido en nitratos.

ARTICULO

Foto L. Linares



Detalle de instalaciones para mantener pequeñas superficies inundadas en la colonia de aves durante los estiajes prolongados.

Régimen hidrogeológico de la laguna

La comparación de los datos diarios correspondientes a los parámetros meteorológicos más significativos (precipitación y evaporación), con los registros continuos de nivel en la laguna y en el acuífero, ha permitido determinar la influencia que los primeros ejercen en el régimen de los segundos.

Las precipitaciones tienen siempre una importante e inmediata respuesta, en la elevación del nivel de agua en la laguna, observándose que, para el mantenimiento de las áreas inundadas, es mucho más eficaz una lluvia repartida homogéneamente que si esta se concentra en aguaceros ocasionales.

La evaporación es, por su parte, el fenómeno que condiciona de manera primordial el vaciado de la laguna, poniéndose de manifiesto que el descenso estacional coincide, prácticamente, con el comienzo de la época en que los índices de evaporación diaria empiezan a ser más elevados. Se ha podido observar que, incluso cuando la laguna permanece seca al final de los estiajes, la evaporación sigue influyendo sobre la superficie piezométrica del acuífero (que se mantiene a escasa profundidad respecto al fondo de la laguna), sin duda debido a mecanismos de

capilaridad. Los registros limnigráficos han permitido poner de manifiesto incluso pequeñas oscilaciones diarias (noche-día), y variaciones relacionadas con días de nubosidad permanente e intensa durante el verano.

Por otra parte, la comparación de las oscilaciones de nivel de la laguna y de la superficie piezométrica del acuífero, permite confirmar la relación entre ambos, y establecer las diferencias que existen en la dinámica de cada uno de ellos, observándose que los factores climatológicos tienen una incidencia más directa e inmediata en la laguna que en el acuífero que la alimenta, en el cual las variaciones se producen de manera más amortiguada.

Propuesta para la conservación hídrica del ecosistema

Tras el análisis detallado de las diversas alternativas que se presentan, para solucionar o paliar la eventual desecación de la laguna, no parece conveniente recomendar el aporte continuo de agua a la misma, tanto si esta procede de una cuenca ajena a la de Fuente de Piedra como si lo es de la propia cuenca. El aumento de la superficie inundada incrementaría la evaporación y, en definitiva, provocaría una pérdida de recursos adicional a la que se produce actualmente.

En cualquier caso debe evitarse el aporte continuo de aguas de elevada salinidad, que puede perjudicar a la calidad del acuífero relacionado con la laguna, al provocar una inversión del flujo subterráneo durante los estiajes. Es recomendable, en todo caso, estudiar la posible incidencia que estos aportes tendrían en los procesos biológicos que tienen lugar en el ecosistema de la laguna.

Las medidas que parecen más recomendables son aquellas que permiten aportar, con un costo no demasiado elevado, pequeños caudales que pueden paliar los déficits que se producen, ocasionalmen-



Detalle de la antigua infraestructura para explotación de sal en la laguna.

te, como consecuencia de sequías prolongadas. De acuerdo con este punto de vista, sería recomendable el acondicionamiento e instalación de los pozos existentes en el interior de la laguna y la construcción de otros (o la adquisición de otros ya perforados) en los sectores cercanos a la misma, procurando evitar que se sitúen en las áreas de concentración de aprovechamientos de agua.

No es recomendable captar agua de los acuíferos carbonatados, de las Sierras de Molina y Humilladero, para ser vertida en la laguna, ya que estos acuíferos proporcionan el agua de mejor calidad de la cuenca, que debe reservarse para satisfacer las demandas urbanas actuales y futuras de la zona.

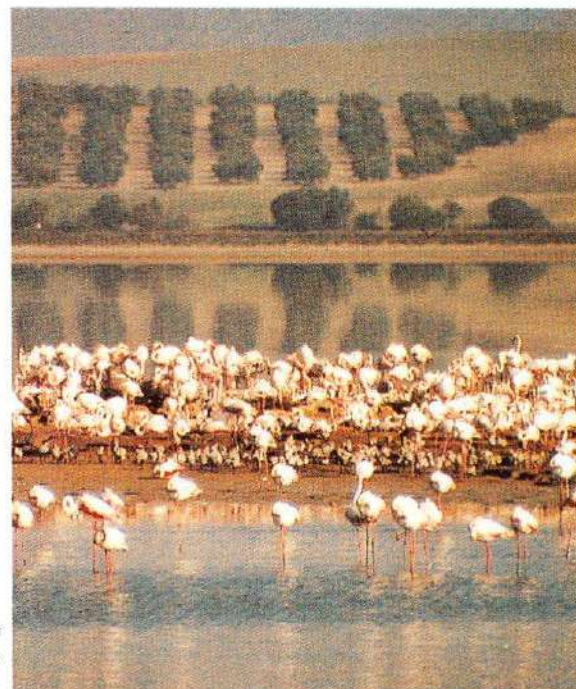
En lo que respecta al posible aporte de aguas superficiales de cuencas cercanas a Fuente de Piedra, una actuación relativamente económica, que no debe descartarse, es la construcción de un dispositivo que permita trasvasar aguas procedentes del arroyo de las Tinajas, situado a menos de un kilómetro de la laguna.

Sin embargo, la actuación que parece más recomendable, desde un punto de vista estrictamente técnico, es la que consiste en construir un dispositivo que permita trasvasar agua desde los Llanos de Antequera. Este dispositivo podría utilizarse para trasvasar aguas de cualquier procedencia (superficial o subterránea) y para satisfacer indistintamente las necesidades de la laguna o de los regadíos de la zona, sin olvidar la posibilidad de trasvasar recursos del Guadalhorce, no utilizados en invierno, para la recarga de los acuíferos de la

cuenca de Fuente de Piedra. En este caso deben tenerse en cuenta otros factores condicionantes (política hidráulica, planificación hidrológica de la cuenca, coste de las operaciones, etc).

Cualquiera de las soluciones propuestas no excluye a las demás, sino que, incluso, sería deseable compatibilizarlas y simultaneirlas con excavaciones periódicas, en el vaso de la laguna, para mantener las irregularidades del fondo de la misma, que progresivamente se va homogeneizando.

Finalmente, hay que señalar que cualquier alternativa que se aborde debe ir acompañada de la elaboración de un marco legal, en el que se contemple la totalidad de la cuenca, dada la relación hidrogeológica existente entre ésta y la laguna y que la normativa que se establezca tenga en cuenta, no sólo la conservación de la propia laguna, sino también la de los acuíferos con ella relacionados.



Colonia de flamenco común
(*Phoenicopterus ruber roseus*).