

## Resultados preliminares de la investigación hidrogeológica del acuífero aluvial del río Guadaiza (Marbella, España)

Manuel Argamasilla Ruiz<sup>1</sup>, Bartolomé Andreo Navarro<sup>2</sup>

**Resumen** Los acuíferos detríticos costeros pliocuaternarios del sector Marbella – Estepona (provincia de Málaga) constituyen la segunda fuente de abastecimiento de agua en dichos términos municipales, después del embalse de la Concepción. Durante las últimas décadas, los acuíferos han sido objeto de explotación y, dada la cercanía al mar, han sufrido intrusión marina. Este hecho ha conllevado un empeoramiento de la calidad química del agua que impacta de forma negativa en el aprovechamiento del recurso. Con el objetivo de realizar una primera aproximación sobre el funcionamiento hidrogeológico del acuífero aluvial del río Guadaiza, se instalaron –en un piezómetro cercano al cauce del río– dos equipos de registro continuo. Las variables que se controlan son tres: profundidad del nivel piezométrico (cada media hora), temperatura y conductividad eléctrica (con periodicidad horaria). A partir de los datos obtenidos por ambos equipos se ha analizado el comportamiento hidrodinámico e hidroquímico del acuífero frente a eventos pluviométricos de distinta intensidad. En menos de un día desde el inicio de las lluvias se produjeron rápidos ascensos de nivel piezométrico (de más dos metros) y diluciones de hasta 300  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . La duración de los efectos positivos de la recarga depende, en gran medida, de la distribución de la precipitación. La presencia de infraestructuras de regulación aguas arriba del acuífero disminuye la potencial infiltración de recursos superficiales. Los resultados preliminares obtenidos tienen repercusiones directas en la gestión de los acuíferos y determinan en gran medida su inclusión en sistemas de uso conjunto de recursos hídricos.

---

<sup>1,2</sup> Departamento de Geología y Centro de Hidrogeología de la Universidad de Málaga (CEHIUMA), 29071, Málaga. [margaruiz@uma.es](mailto:margaruiz@uma.es), [andreo@uma.es](mailto:andreo@uma.es)

## 1. Introducción

El acuífero aluvial del río Guadaiza forma parte del conjunto de acuíferos costeros de Marbella – Estepona, los cuales ocupan una estrecha franja litoral que se extiende a lo largo de unos 40 km en el extremo occidental de la Costa del Sol, en la provincia de Málaga. La población que se concentra en esta zona se abastece principalmente de las aguas procedentes del embalse de La Concepción, aunque los acuíferos son utilizados como complemento para abastecimiento de urbanizaciones, instalaciones de recreo, riego de campos de golf, etc.

En épocas de escasez de recursos hídricos la presión que se ejerce sobre las aguas subterráneas es mayor y puede llevar asociada procesos de intrusión marina. Así, por ejemplo, durante la denominada Metasequía de los años 1994-1995, en la práctica totalidad de los acuíferos del municipio de Marbella, las aguas subterráneas alcanzaron valores de conductividad eléctrica comprendidos entre 10.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y 30.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (Pozos Reunidos S.L., 1996).

La evolución histórica de la concentración de  $\text{Cl}^-$  en dos captaciones del acuífero aluvial del río Guadaiza se muestra en la figura 1. En dicha evolución se pueden distinguir dos tramos fundamentales: uno primero, de 1983 a 1991, con máximos más marcados (se supera el valor máximo permitido en varias ocasiones) y otro a partir del año 1996, con valores de cloruros que no alcanzan los 100 mg/l.

En el marco de una investigación en curso se ha actualizado la información existente sobre la calidad de las aguas del acuífero aluvial del río Guadaiza. Durante los meses de noviembre de 2012 y abril y septiembre de 2013 se llevaron a cabo campañas de control hidroquímico en las principales captaciones que explotan el acuífero. La composición química de sus aguas se presenta en la tabla 1. Los valores de conductividad eléctrica (C.E.) varían entre 746 y 956  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . La concentración de  $\text{Cl}^-$  está comprendida entre 33 y 66 mg/l, con un valor medio de 54 mg/l. Los contenidos medios en  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{HCO}_3^-$  son de 66 y 416 mg/l, respectivamente. El valor medio de  $\text{NO}_3^-$  es de 20 mg/l, alejado del máximo permitido para abastecimiento urbano (50 mg/l). Por lo que respecta a los cationes, los valores medios son los siguientes: 35 mg/l de  $\text{Na}^+$ , 96 mg/l de  $\text{Mg}^{2+}$ , 29 mg/l de  $\text{Ca}^{2+}$  y 3 mg/l de  $\text{K}^+$ .

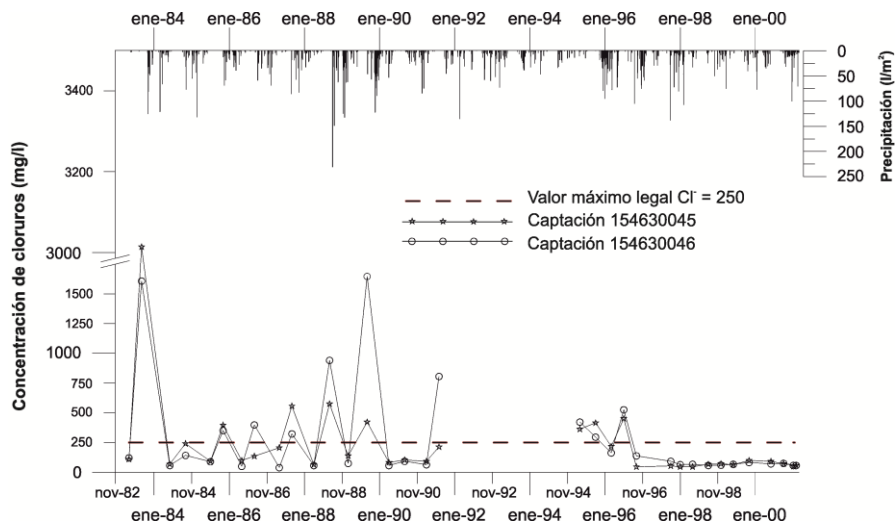


Figura 1. Evolución histórica de la concentración de Cl<sup>-</sup> en dos captaciones del acuífero aluvial de río Guadaiza. Fuente: Base de datos de puntos de agua (IGME).

No se han detectado grandes diferencias en la composición química de las aguas del acuífero durante las tres campañas de control. La campaña correspondiente al mes de abril de 2013 es la que presenta aguas de mejor calidad, con menores valores medios en los principales iones analizados. Esto se debe a la elevada recarga que tuvo lugar durante los meses invernales (741 mm).

Tabla 1. Composición química de las aguas muestreadas en el acuífero aluvial del río Guadaiza. Unidades C.E. =  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

		Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Na <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>		
		(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	Ph	C.E.
nov-12	CB Parcela	48	61	408	19	32	94	24	2	7,4	845
	CB Higuera	52	71	499	15	42	104	28	2	7,2	956
	Media aritmética	50	66	454	17	37	99	26	2	7,3	901
abr-13	CB Parcela	33	62	378	18	28	89	25	2	7,6	746
	CB Higuera	50	70	437	19	37	102	26	2	7,4	880
	Media aritmética	42	66	408	19	32	96	25	2	7,5	813
oct-13	CB Parcela	64	70	376	24	36	94	26	2	7,3	845
	CB Higuera	54	69	398	22	34	96	25	2	7,4	850
	CB Los Pinos	66	64	437	32	36	97	40	5	7,2	938
	Piezómetro	66	63	391	7	32	91	41	3	7,7	844
	Media aritmética	62	66	400	21	34	95	33	3	7,4	869

El objetivo principal de este trabajo es realizar una primera aproximación sobre el funcionamiento hidrogeológico del acuífero aluvial del río Guadaiza, considerado como acuífero piloto de los aluviales cuaternarios del sector Marbella-Estepona. Dada la importancia que los acuíferos costeros de tienen en esta zona a la hora de complementar el abastecimiento de algunos municipios, una mejora en la comprensión de los procesos que afectan a la cantidad y calidad del agua de estos acuíferos es fundamental para plantear modelos de gestión conjunta de recursos hídricos.

## 2. Características de la zona de estudio

En el sector costero comprendido entre Estepona (al oeste), Marbella y las dunas de Cabopino (al este) existen un conjunto de acuíferos detríticos, cuya superficie permeable total es del orden de 80 km<sup>2</sup>. La franja costera en la zona de estudio presenta cotas topográficas que no superan los 200 metros de altitud y está limitada, al norte, por relieves más elevados. Estos macizos constituyen la cabecera de muchos ríos de régimen irregular, entre los que cabe citar, de oeste a este, los siguientes (figura 2): Padrón, Guadalmana, Guadalmina, Guadaiza, Verde y Real.

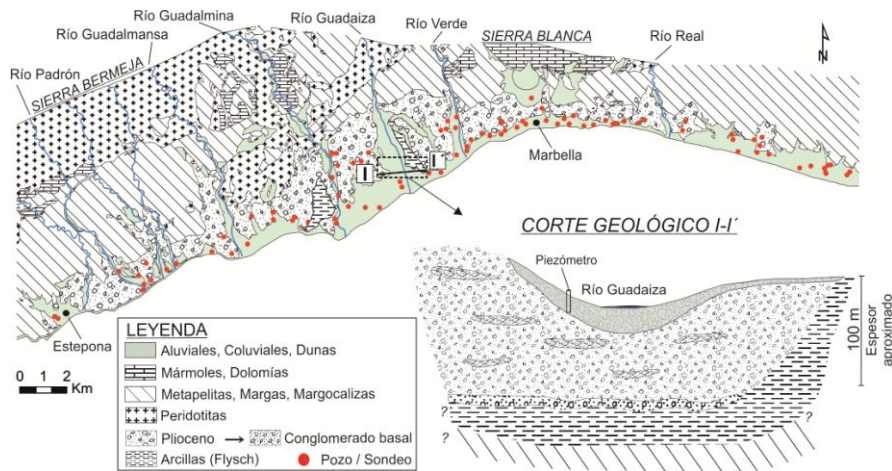


Figura 2. Mapa hidrogeológico de los acuíferos costeros de Marbella-Estepona y corte geológico en el sector del río Guadaiza.

Desde el punto de vista geológico, los acuíferos están formados por dos conjuntos sedimentarios principales: uno inferior, de edad Plioceno, y otro superior, del Cuaternario, que se apoyan, discordantes, sobre un

sustrato de peridotitas y gneises del Complejo Alpujárride y pizarras y grauvacas del Maláguide.

Dentro del conjunto plioceno, a su vez, se pueden distinguir dos tramos: uno basal, que aflora principalmente entre los ríos Verde y Guadaiza y en las inmediaciones de Estepona, tiene 20-40 m de espesor y está formado por conglomerados; y un tramo superior, con arenas en la base y margas, más o menos arenosas, hacia techo y hacia el mar. El conjunto de materiales pliocenos se encuentra ligeramente basculado hacia el sur, con un buzamiento generalizado de 5 a 10°, y alcanza los mayores espesores (hasta 150 m) en la línea de costa, aunque la potencia media es de 100 a 120 m (Lupiani, 2007).

Los sedimentos cuaternarios se encuentran discordantes sobre los pliocenos y son fundamentalmente de dos tipos: fluviales y eólicos. Los primeros están formados por cantos rodados, gravas y arenas, con una escasa matriz limo-arcillosa, y han sido depositados por los ríos actuales. Los principales afloramientos se localizan en los ríos Padrón, Guadalmanza, Guadalmina, Guadaiza y Verde (figura 2), donde llegan a alcanzar anchuras de 500 m y potencias cercanas a 20 m (DHGO, 1995) en algún caso. Los sedimentos eólicos son arenas, de granulometría homogénea, que constituyen un antiguo manto de dunas situado en el extremo oriental de Marbella, de hasta 500 m de anchura y 12 m de espesor.

El aluvial cuaternario presenta mayor interés por el rendimiento de las captaciones, dadas sus características hidrogeológicas y la alimentación que recibe por la infiltración en los cursos de agua superficiales (Linares y Trenado, 1988). Las salidas se producen mediante bombes y descarga hacia el mar.

En la década de los años sesenta del pasado siglo las aguas del acuífero aluvial del río Guadaiza fueron aprovechadas para regadío por la antigua colonia agrícola de San Pedro de Alcántara (cultivos maíz y algodón). Con el paso de los años la colonia se reconvirtió en comunidad de regantes, cuya toma principal para riego se encuentra en el cauce del río. No obstante, en la actualidad, la principal explotación que soporta el acuífero está ligada al abastecimiento de distintas urbanizaciones con un consumo anual aproximado de 0,5 hm<sup>3</sup>/año.

El piezómetro de control utilizado en la presente investigación se ubica a escasos metros del cauce del río y tiene una profundidad aproximada de 18 m. El río se encuentra regulado aguas arriba por una presa de derivación conectada –mediante un túnel– con el principal embalse de la Concepción, que abastece a la Costa del Sol Occidental. Aguas abajo de

dicha presa se encuentran las tomas para riego de la citada comunidad de regantes.

### **3. Metodología**

Con el objetivo de conocer el comportamiento hidrodinámico e hidroquímico del acuífero aluvial del río Guadaiza se han instalado, en un piezómetro cercano al cauce, dos equipos de registro continuo. Así, para el control de la profundidad del nivel piezométrico, se ha utilizado un sensor *Odyssey*, que registra medidas con periodicidad de 30 minutos. Por otro lado, con una sonda *HOBO*®, se han medido las variaciones de temperatura y conductividad eléctrica con periodicidad horaria. Los datos de precipitación utilizados en este trabajo corresponden a la estación meteorológica situada en el embalse de la Concepción (norte de Marbella).

A partir de los datos obtenidos entre los meses de enero y mayo de 2014, se han llevado a cabo gráficos de evolución de cotas piezométricas, conductividad eléctrica, temperatura y precipitación. Con el fin de caracterizar el funcionamiento hidrogeológico del acuífero se han analizado, por separado, las respuestas hidrodinámicas e hidroquímicas frente a eventos pluviométricos de distinta intensidad.

### **4. Resultados y discusión**

En la figura 3 se observa la evolución de las tres principales variables hidrogeológicas registradas frente a la precipitación. En este gráfico se indican los periodos que van a ser objeto de un análisis más detallado.

La piezometría y la C.E. presentan respuestas opuestas. A las pocas horas del inicio de las lluvias la cota piezométrica comienza a ascender mientras que la C.E. sufre fuertes diluciones. Los máximos y los mínimos de una y otra coinciden prácticamente en el tiempo. La temperatura responde del mismo modo que la C.E. en el evento A, pero muestra un patrón diferente en el B y en el C.

A continuación se realiza un análisis más pormenorizado de los distintos eventos de recarga que se han registrado en el año hidrológico 2013/2014.

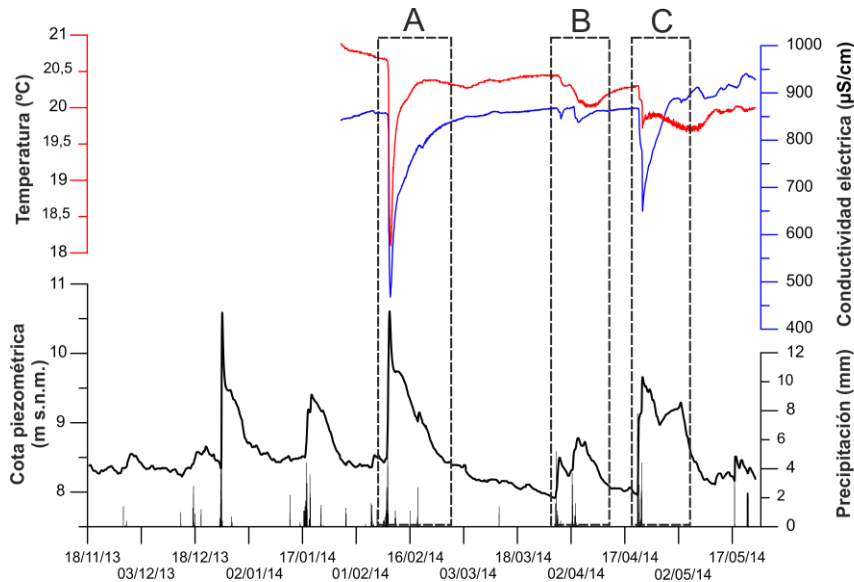


Figura 3. Evolución de la piezometría, conductividad eléctrica y temperatura en un piezómetro del acuífero aluvial del río Guadaiza.

#### 4.1 Primer evento (A)

El primer evento pluviométrico tuvo lugar los días 8 y 9 de febrero. La precipitación acumulada fue de 37 mm, aunque la mayor parte de la lluvia (30 mm) se concentró en las 12 horas transcurridas entre las 9:00 y las 21:00 del día 9 de febrero (figura 4). La intensidad de la precipitación durante este periodo fue de 2,5 mm/h.

Se constata un desfase mínimo entre las respuestas hidrodinámicas e hidroquímicas del acuífero ante un evento pluviométrico ( $T_{r_{Pz}} \approx T_{r_{C.E.}}$ ).

La cota piezométrica máxima se alcanza antes que los correspondientes mínimos de C.E. y temperatura. El ascenso de nivel piezométrico registrado fue de 2 m. Los cambios de temperatura y C.E. que se produjeron durante este evento estuvieron comprendidos entre 19,5 °C y 850 µS/cm (valores iniciales) y 17,8 °C y 500 µS/cm (valores al término de las lluvias). La dilución observada indica que la alimentación al acuífero pudo ser del orden del volumen almacenado en dicha formación geológica.

La tendencia de las curvas de recuperación de la piezometría, C.E. y temperatura se ve influenciada por tres eventos de recarga de 4,5, 1,6 y 5,1 mm, que se reflejan en ligeros cambios de la pendiente del gráfico.

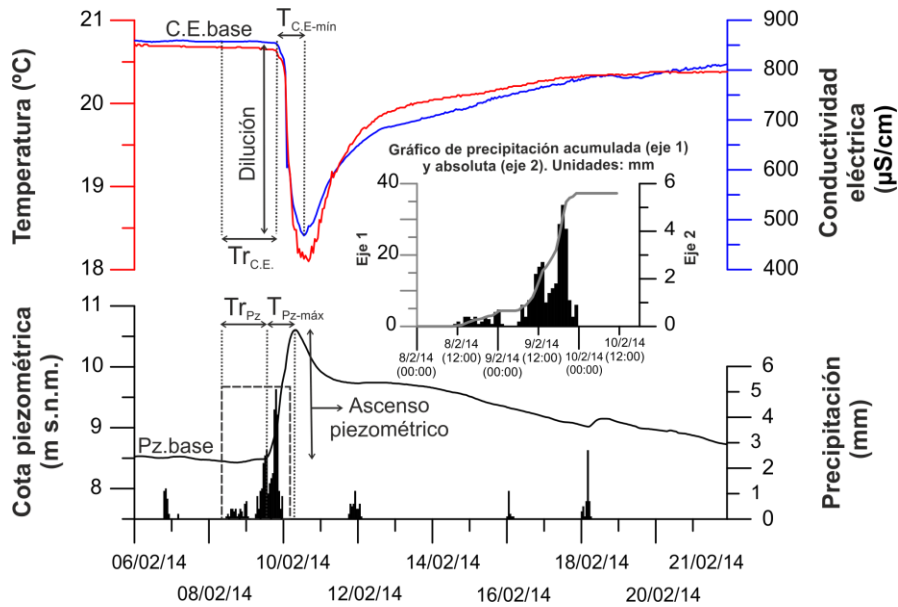


Figura 4. Caracterización del evento de recarga producido los días 8 y 9 de febrero de 2014. Nota:  $T_{C.E.-min}$  = tiempo necesario para alcanzar la conductividad eléctrica mínima; C.E. base = conductividad eléctrica al inicio de la crecida;  $Tr_{C.E.}$  = tiempo de respuesta de la conductividad eléctrica desde el inicio de la precipitación. Las abreviaturas para la piezometría responden a los mismos criterios.

#### 4.2 Segundo evento (B)

El segundo evento de estudio está formado por dos periodos de lluvia (B1 y B2), en los que se registró una cantidad de lluvia de 31 mm, similar a la del evento A. La principal diferencia entre ambos periodos, A y B, está relacionada con la distribución de la precipitación. En el periodo A, la mayor parte de lluvia cayó en 12 horas; en el segundo, dicha cantidad se repartió en 1 y 2 días, con precipitaciones acumuladas de 15 mm cada uno (figura 5).

Los dos periodos de lluvia registrados dieron lugar a sendos picos piezométricos con sus respectivas diluciones. El ascenso piezométrico



total fue de 0,8 m, más de un metro inferior al alcanzado en el evento A (2 m). De igual modo, los valores de C.E. y temperatura no disminuyeron más de 40  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y 0,5  $^{\circ}\text{C}$ , respectivamente.

Por lo que respecta al desfase entre el inicio de la precipitación y la respuesta de la piezometría y C.E., sólo en esta última fue posible percibir cierto retraso. El máximo piezométrico, al igual que en el evento A, fue anterior a los valores mínimos de C.E. y temperatura.

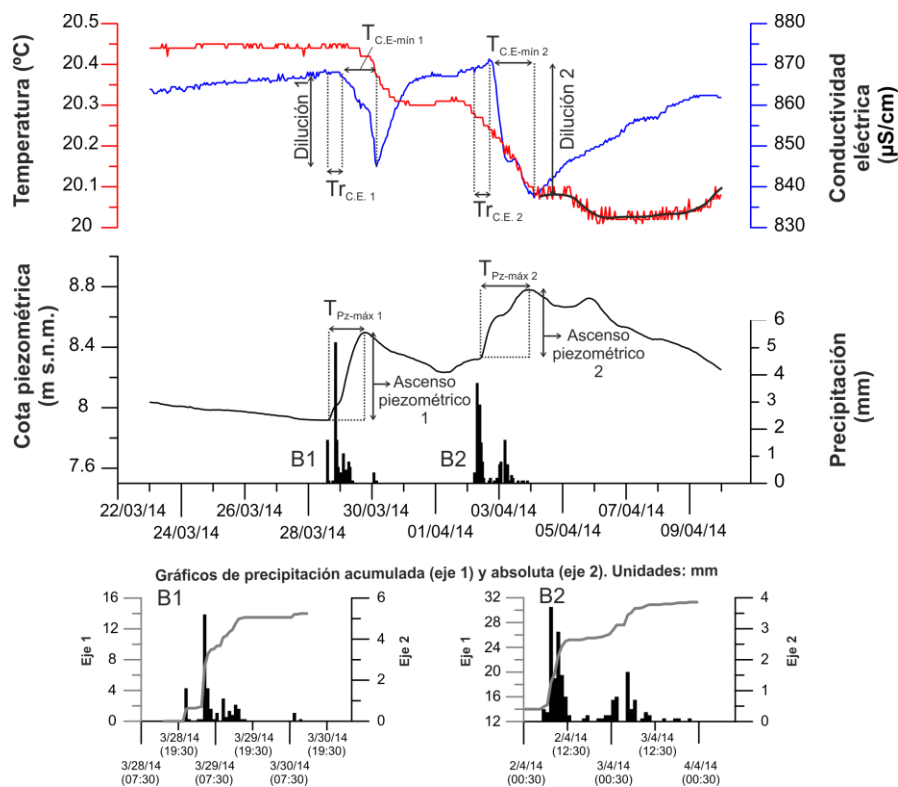


Figura 5. Caracterización de los eventos de recarga producidos entre los días 28 de marzo y 4 de abril de 2014.

La evolución de la temperatura comenzó a marcar un patrón distinto tras el primer periodo de lluvia (B1), con un descenso que se prolongó hasta el inicio del segundo (B2). El diferente comportamiento de la temperatura con respecto a la C.E. podría deberse a la influencia de la infiltración de la escorrentía superficial, con aguas de menor o igual temperatura pero de similar C.E. Aguas arriba del piezómetro, el río es ganador, pero a la altura del primero la relación río-acuífero se invierte.

Esto explicaría el ascenso continuado de la C.E. y la estabilización de la temperatura, ya que se estarían infiltrando aguas procedentes, en parte, del propio acuífero.

### 4.3 Tercer evento (C)

En el último evento pluviométrico considerado se registró la mayor cantidad de precipitación, con un total de 47 mm. La precipitación se distribuyó en los días 20 y 21 de abril, con unas lluvias acumuladas e intensidades de 28 mm – 2 mm/hora y 19 mm – 1 mm/hora, respectivamente.

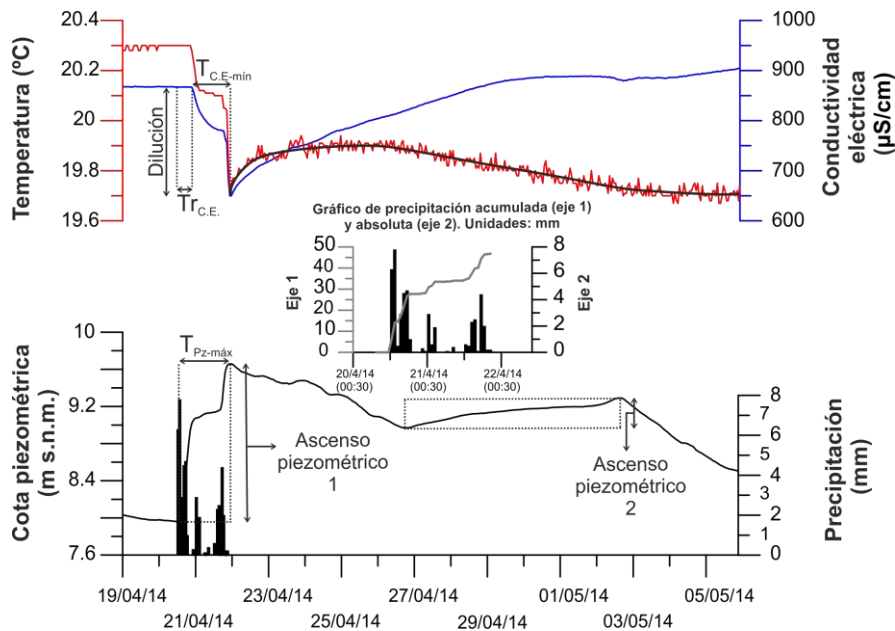


Figura 6. Caracterización del evento de recarga producido los días 20 y 21 de abril de 2014.

El ascenso piezométrico fue de 1,7 m, similar al observado en el evento A (2 m). En cambio, el descenso de C.E. y temperatura no alcanzó la magnitud del evento A. En dicho evento la diferencia entre los valores iniciales y finales de C.E. y temperatura fue de 350  $\mu\text{S/cm}$  y 1,7  $^{\circ}\text{C}$ , en comparación con los 218  $\mu\text{S/cm}$  y 0,6  $^{\circ}\text{C}$  del tercer evento de estudio. Este comportamiento puede estar relacionado con las distintas intensidades de precipitación que caracterizan ambos eventos. El

aumento de población en las urbanizaciones que explotan el acuífero con motivo de las vacaciones de semana santa (12-20 de abril) podría haber atenuado el pico de la recarga.

La temperatura vuelve a mostrar una respuesta dual, por un lado, descendiendo con la C.E. tras el inicio de las precipitaciones, pero cuando ésta última empieza a recuperar los valores iniciales, la temperatura asciende ligeramente en un principio, pero se estabiliza y comienza a descender con el paso del tiempo. Este descenso coincide con el segundo ascenso piezométrico, que se inició en la madrugada del 26 de abril. Este hecho ya se observó en el evento B y corrobora la existencia de una recarga diferida en el tiempo asociada a procesos de infiltración de la escorrentía superficial.

## **Conclusiones**

A partir de la información registrada por los sensores de profundidad del agua, C.E. y temperatura entre los meses de enero y mayo de 2014, se ha intentado avanzar en la caracterización del funcionamiento hidrogeológico del acuífero aluvial del río Guadaiza. El estudio se ha basado en el análisis de tres eventos pluviométricos de distinta intensidad (A, B y C).

Se constata un desfase mínimo entre las respuestas hidrodinámicas e hidroquímicas del acuífero ante un evento pluviométrico. La distribución de la precipitación juega un papel determinante en el comportamiento de las variables analizadas. Ante dos eventos pluviométricos (A, B) caracterizados por una precipitación acumulada similar pero de distinta intensidad, la diferencia entre los cambios experimentados por la piezometría, C.E. y temperatura en uno y otro caso fue significativa. En el primero, se produjo una dilución de 350  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y un ascenso piezométrico de 2 m, mientras que en el segundo apenas llegó a 40  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y 0,8 m. El estado en el que se encuentra el acuífero cuando se produce la recarga influye en la respuesta frente a eventos de lluvia sucesivos.

En los eventos B y C la temperatura mostró un comportamiento diferente al de la C.E. La explicación podría residir en los procesos de infiltración de la escorrentía superficial, la cual se encuentra regulada aguas arriba por una presa de derivación y varias tomas de riego. Este proceso se observó de forma más evidente en el evento C al producirse un segundo ascenso piezométrico en ausencia de precipitaciones.

El grado de detalle obtenido (respuestas horarias) pone de manifiesto que campañas mensuales o semestrales de control no permitirían conocer el comportamiento hidrodinámico e hidroquímico en este tipo de acuíferos.

Los resultados preliminares obtenidos sugieren que el acuífero aluvial del río Guadaiza presenta una alta porosidad y permeabilidad, lo cual permite rápidos llenados y vaciados. Este comportamiento parece ser similar en el resto de acuíferos aluviales de Marbella y Estepona. Por ello, como conclusión preliminar de esta investigación, se recomienda llevar a cabo una explotación más intensa de los acuíferos aluviales durante los meses lluviosos para cubrir el abastecimiento urbano. Ello permitiría aprovechar mayor cantidad de agua subterránea y de mejor calidad.

Estos resultados tienen repercusiones directas en la gestión de los acuíferos y determinan en gran medida su inclusión en sistemas de uso conjunto de recursos hídricos, aspecto este que constituye el objetivo general de la investigación actualmente en curso.

### **Agradecimientos**

La realización de esta comunicación ha sido posible gracias a la concesión de una beca predoctoral del Programa Nacional de Formación de Profesorado Universitario (FPU) y al Proyecto Europeo Transfronterizo "Campus EAgUa". Los autores de esta comunicación forman parte del Grupo de Investigación RNM 308 de la Junta de Andalucía.

### **Bibliografía**

Linares, L. y Trenado, L. (1988). Acuíferos Costeros de Marbella Estepona (Málaga). *1er Simposio Int. Tecnología de la Intrusión en Acuíferos Costeros*, Vol. II: 337-347. Almuñécar.

DGOH. (1995). Emplazamiento de captaciones para la planta desaladora del río Verde (Marbella). Informe técnico, 55 pp.

Lupiani, E. (2007). Marbella – Estepona (M.A.S. 060.040). Atlas Hidrogeológico de la Provincia de Málaga. Diputación de Málaga – IGME. Tomo II, 155-160.

Pozos Reunidos S.L. 1996. Optimización de las explotaciones de aguas subterráneas de suministro a Marbella. Memoria y Anexos I, II, III, IV y V. Inédito.