

Actualización hidrogeológica del acuífero aluvial urbano de Zaragoza e impacto en la recarga por evento de precipitación extraordinario.



Trabajo fin de Grado Geología

Autor: Diego Sampietro Lardiés

Director: José Ángel Sánchez Navarro

Codirector: Eduardo Garrido Schneider

24/06/2013

Índice:

1. Abstract	p.2
2. Planteamiento.....	p.3
3. Objetivos.....	p.3
4. Metodología.....	p.4
5. Contexto Geográfico, Geológico e Hidrogeológico.....	p.6
5.1 Marco Geográfico.....	p.6
5.2 Marco Geológico	p.7
5.3 Marco Hidrológico	p.7
5.3.1 Contexto general: Acuífero aluvial del Ebro (Zaragoza-Gelsa)	p.7
5.3.2 El acuífero aluvial urbano de Zaragoza	p.9
6. Presentación y discusión de resultados	p.12
6.1 Primera parte: Análisis de la recarga del acuífero por eventos de precipitación en Zaragoza.	p.12
6.1.1 Descripción del evento.	p.12
6.1.2 Descripción e interpretación de los efectos en la recarga.	p.13
6.1.3 Resultados.	p.17
6.2 Análisis de la recarga del acuífero por las Crecidas del río Ebro.	p.19
6.2.1 Descripción del evento de crecida.	p.21
6.2.2 Cuantificación del proceso y nuevo mapa de isopiezas	p.23
7. Conclusiones	p.27
8. Bibliografía.....	p.29
9. Anexos	p.31

1. Abstract

The use of Zaragoza aquifer has increased in last year by the introduction of thermal interchanger systems, which use the aquifer's water to change the temperature. The effects of these systems are being studied by an IGME project. For this study has implemented a high detail control network of piezometers (ten-minute frequency measurements and low error). This essay is been realized with the objective of use this data for studying in detail the aquifer, especially the recharge of it.

Exist three recharge forms for this aquifer: The lateral water flow, the rainfall infiltration and the infiltration during fluvial floods. In this essay the last two forms have been studied.

For study of rainfall event, is selected the rainfall that occurs on 20th October of 2012, with a rainfall of 66 mm. A piezometer level study shows a low effect in recharge related with the catch capacity of the non saturated ground (Higher in the dry months).

The Ebro flood that has been studied occurs on March of 2011. This flood produces an increase of 2, 05 meters in the water level. This increase generates a flow direction inversion from river to the aquifer. During the avenues the Ebro actuates how an influent river (or loser) whereas in time of no avenue acts as effluent (or winner). This process can be explained through a change in the isopiestic map.

In conclusion, in the area affected by the flooding of the river (Approximately the old Zaragoza, inner second belt) the recharge generated by floods is greater than that generated by rainfall. By that, it's been concluded that near the river, the aquifer dynamic is controlled by it.

Keywords: Zaragoza, Aquifer, recharge, rainfall, flood y piezometer.

2. Planteamiento

En el casco urbano de Zaragoza, se dispone desde el año 2010 de una red de piezómetros de control geotérmico instalada por el IGME; la finalidad de esta red es la evaluación del impacto hidrogeológico y térmico de un conjunto de captaciones de uso geotérmico sobre el acuífero aluvial del río Ebro y su tramo urbano. La citada red genera datos de nivel piezométrico del acuífero con una frecuencia diez minutas. Se pretende con este trabajo la utilización de estos datos para determinar la importancia que en la recarga del acuífero tiene la precipitación directa sobre el mismo, y en su caso la incidencia que el río Ebro tiene en los momentos de crecida sobre la recarga de este acuífero.

Con el fin de analizar las dos formas de recarga del acuífero urbano de Zaragoza (excluyendo la recarga procedente de regadíos externos) el estudio realizado en este trabajo se ha dividido en dos partes:

- En la primera de ellas se ha estudiado el impacto en la recarga del acuífero por un evento de precipitación extraordinario, en este caso se seleccionan las precipitaciones que tuvieron lugar en Zaragoza durante el mes de Octubre del año 2012, en concreto en los días 19,20,21 en los que se recogieron 61,6 mm.
- En la segunda parte se analizará el efecto que tienen las crecidas del río en la recarga del acuífero, valorando su importancia tanto cuantitativa como cualitativa para ello se ha seleccionado la crecida que tuvo lugar a finales de Febrero principios de Marzo del 2011.

3. Objetivos

Se pueden distinguir tres objetivos principales:

1. Aplicar la metodología de investigación hidrogeológica en acuíferos en entornos densamente habitados, en la cual la elevada urbanización modifica los procesos que naturalmente suceden en los entornos no antropizados e impide tener acceso a datos geológicos superficiales por lo que se precisa de otros métodos para realizar la investigación, en nuestro caso como se explica más adelante se realiza mediante una red de piezómetros.

2. Aplicar esa metodología de investigación en el estudio de la recarga directa del acuífero por efecto de la precipitación, para ello se estudia un evento excepcional de precipitación, acontecido el 20 de Octubre del 2012.
3. Dentro de la actualización hidrogeológica se realiza una evaluación del efecto que tiene el río Ebro en la recarga del acuífero durante las crecidas que experimenta el río Ebro a su paso por la ciudad de Zaragoza, evaluando el almacenamiento en ribera que se produce durante dichas crecidas y realizando una actualización de la piezometría para momentos puntuales pero importantes como son las avenidas.

4. Metodología

La metodología empleada para la realización de este trabajo se puede resumir en los siguientes pasos:

- 1- **Revisión y recopilación de datos bibliográficos** sobre la zona de estudio (Acuífero aluvial urbano de Zaragoza) y sobre los métodos y formulaciones matemáticas existentes tanto para la recarga por precipitación, como en la relación río-acuífero (ecuaciones de flujo aplicadas en el almacenamiento en ribera).
- 2- **Recopilación de datos de campo:** Para la realización del trabajo se han utilizados datos hidrológicos de precipitación quinceminutales, niveles de agua en piezómetros con periodicidad diezminutal, y caudales de agua en ríos con frecuencia quinceminutal; además se dispone de datos de temperatura y conductividad tanto de las aguas del acuífero, como del río frecuencia diezminutal y quinceminutal respectivamente.

Los datos referidos al río Ebro se han obtenido del SAIH (Sistema automático de información hidrológica) dependiente de la Confederación Hidrográfica del Ebro (<http://saihebro.com/saihebro/index.php>). Los datos obtenidos muestran información sobre el caudal del río y la altura de la lámina de agua en la estación de aforo situada en Zaragoza a la altura del puente de Santiago (Estación A011 de la confederación Hidrográfica del Ebro).

Respecto a los datos de nivel de agua y temperatura en el acuífero, estos se han obtenido a partir de mediciones en piezómetros; existen dos redes de piezómetros en

el entorno de Zaragoza, por un lado se encuentra la red del Ayuntamiento de Zaragoza y por otro lado la red de piezómetros de control del IGME implantada con el estudio “Análisis del impacto térmico generado por los pozos de climatización en las aguas subterráneas de la ciudad de Zaragoza”. Se ha decidido emplear únicamente los datos facilitados por el IGME en su red de control puesto que la frecuencia de medición muestra mucho más detalle que la red de ayuntamiento, mediciones diez minutas frente a mensuales o bimensuales; además de que el error de las mediciones del IGME es del orden de 1 cm. La situación de los piezómetros empleados en el presente trabajo está reflejada en el mapa incluido en los anexo 1.

Por último de los datos de precipitación únicamente se analiza el evento de lluvias acontecido el 20 de Octubre de 2012 ya que las crecidas del río en este caso no dependen de la precipitación recogida en Zaragoza. Al igual que los datos del río la fuente de recopilación de estos datos ha sido el SAIH y los datos solicitados son los de los pluviómetros situados en Paseo Sagasta (PC04) y en la Estación de Aforos del río Gállego en Zuera (A089).

3- Tratamiento de datos: Incluyendo corrección por presión en los niveles piezométricos registrados, conversión de cotas, conversión de unidades, distintos tratamientos estadísticos, realización de gráficas para visualizar los datos. Por último con los datos obtenidos y una vez tratados, se realizara el estudio en detalle de los datos, relacionaran y se intentara realizar con los datos extraídos un mapa de isopiezas para un evento de crecida particular.

4- Síntesis y conclusiones.

5. Contexto Geográfico, Geológico e Hidrogeológico.

5.1 Marco Geográfico

El presente trabajo se centra en el estudio del acuífero Aluvial urbano de Zaragoza, este se encuentra bajo en la ciudad de Zaragoza, en el centro de la depresión del Ebro, a una cota de 217 m.s.n.m (metros sobre el nivel del mar) (Moreno et al, 2008) Figura 1. La ciudad se emplaza entre tres ríos: el Ebro, el principal de ellos, que la cruza en dirección este-oeste aproximadamente, a partir de cuyos márgenes se dispone la ciudad, el Gállego, afluente del Ebro en su margen izquierda y el Huerva, afluente en su margen derecha, Figura 1.

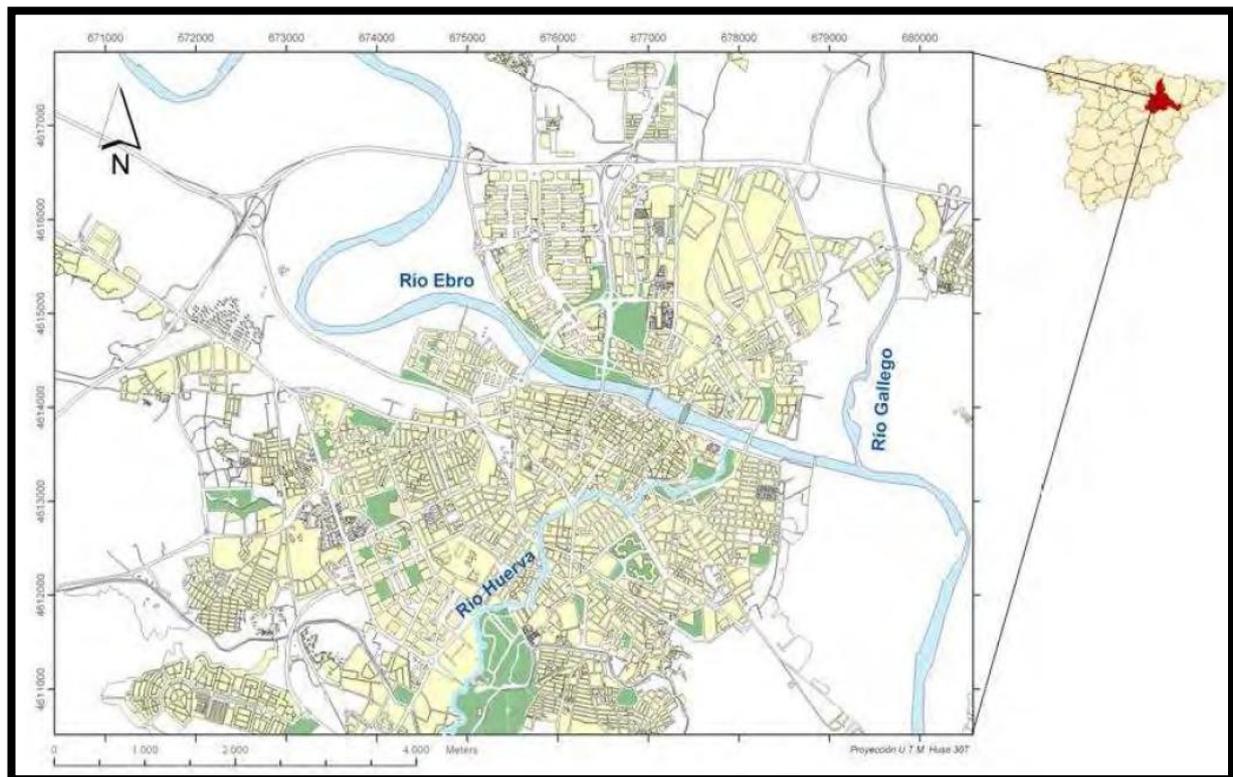


Figura 1. Mapa con la situación de la ciudad de Zaragoza.

La topografía de la ciudad es predominantemente plana y marcada principalmente por la transición entre las distintas terrazas del río Ebro que en algunas zonas enlazan a veces sin solución de continuidad con los glaciares de los principales relieves de la zona (plana de María, de la Muela,...).

5.2 Marco Geológico

La zona de estudio se sitúa dentro de la cuenca terciaria del Ebro, fruto del orógeno Pirenaico y limitada al norte por este y al sur por la cordillera Ibérica (A. Barnolas et al, 1991). El relleno de esta cuenca se caracterizó por materiales detríticos que hacia el centro de la cuenca pasan a materiales finos y evaporitas (lutitas, margas, yesos, halita).

En la zona se encuentra conformada por materiales de origen continental Terciario (Mioceno), conformados por las unidades de yesos terciarios (Fm. Zaragoza), cubiertos por glaciares y terrazas de edad (Pleistocenos y Holocenos); terrazas constituidas por conglomerados arenas y limos de origen fluvial y glaciares constituidos por cantos con matriz limo-arcillosa, ver Figura 2.

La existencia de estos materiales evaporíticos por debajo de los materiales cuaternarios, es importante porque son la causa de la existencia de una elevada actividad kárstica, que afecta a todo el entorno de Zaragoza. (Simón et al, 2009).

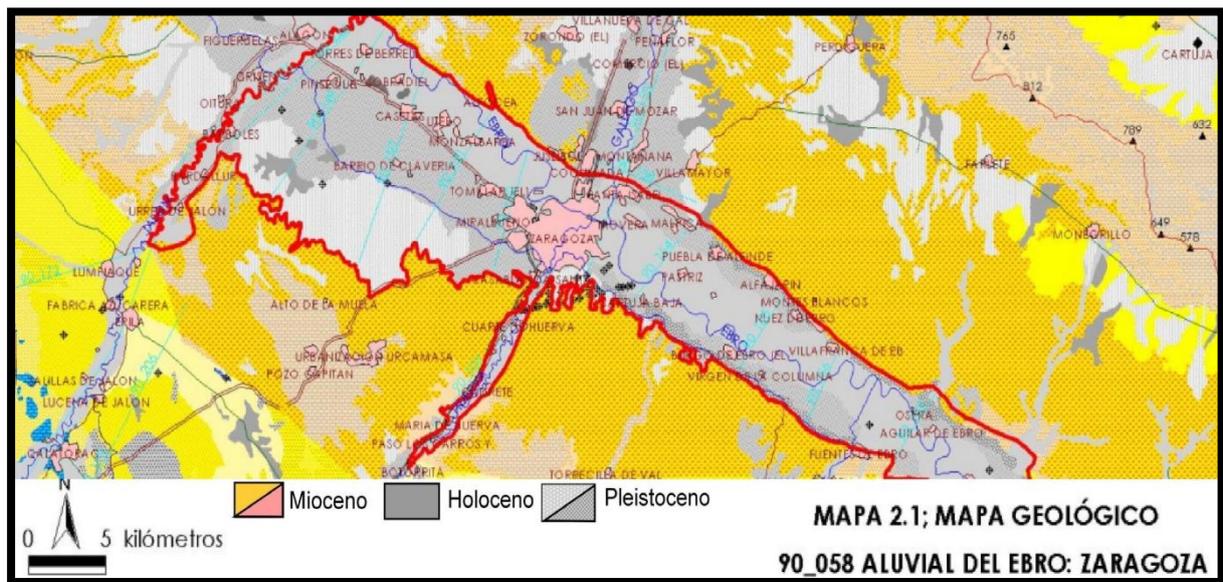


Figura 2. Mapa Geológico de la localidad de Zaragoza. Modificado IGME-DGA 2009.

5.3 Marco Hidrogeológico.

5.3.1 Contexto general: Acuífero aluvial del Ebro (Zaragoza-Gelsa).

El acuífero urbano de Zaragoza se engloba en el acuífero aluvial del Ebro, Zaragoza (masa de agua subterránea nº58 para la Confederación Hidrográfica del Ebro) Figura 3. Este presenta una superficie de 632 km² y se alinea a lo largo de los márgenes del río Ebro. Los materiales que conforman el acuífero son depósitos de terrazas aluviales cuaternarias

conectadas hidráulicamente con el río y de glaciares asociados a los niveles de. En menor medida también forman parte del acuífero los conos de deyección Holocenos y los valles de fondo plano o vales también Holocenos (Figura. 2.)

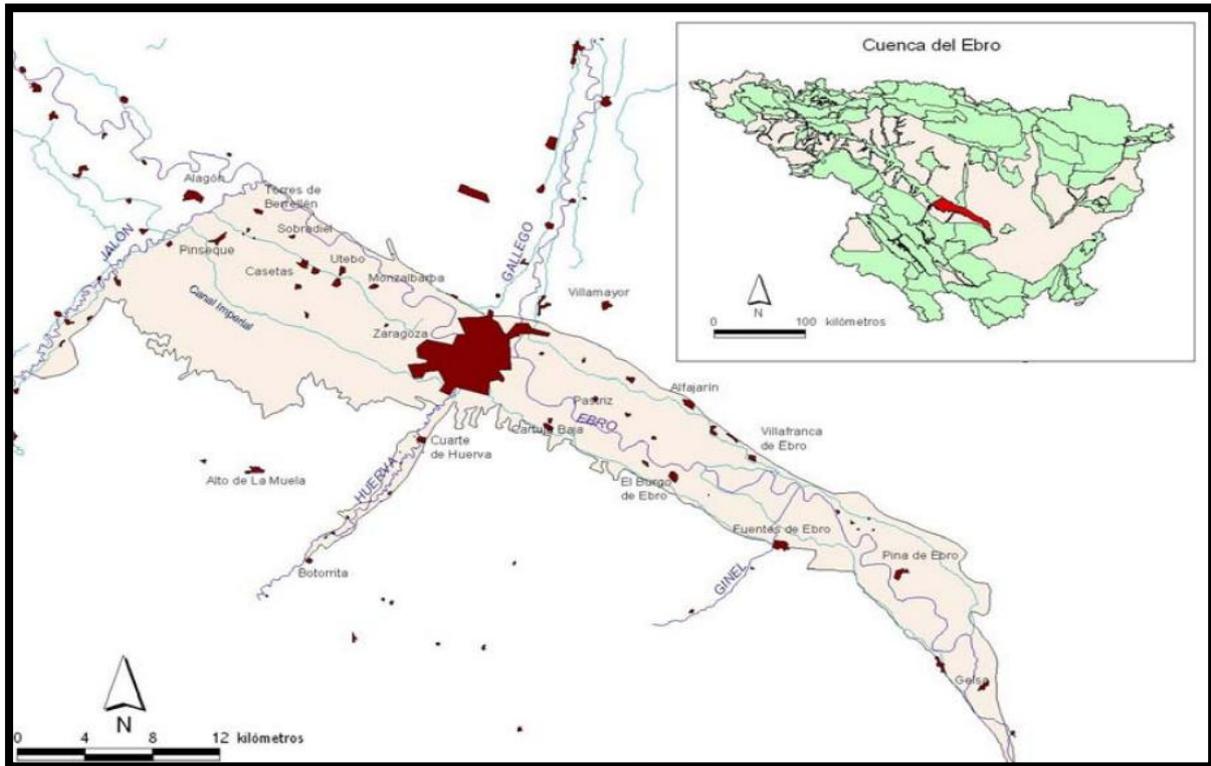


Figura. 3. Situación y límites de la masa de agua subterránea. nº 58 "Aluvial del Ebro: Zaragoza – Gelsa" (Fuente: Catalogo Masas de agua subterráneas. Confederación Hidrográfica del Ebro.)

La base del acuífero presenta una superficie muy irregular destacando dos surcos muy acusados: uno que va paralelo al Canal Imperial en el tramo Garrapinillos - Zaragoza y otro en la zona de confluencia con la masa de agua del aluvial del Gállego, este último presenta los mayores espesores, superiores incluso a los generados por el Ebro por lo que se postula un origen asociado a mecanismos de disolución del sustrato salino y subsidencia por colapso para dar explicación a espesores tan elevados(Pueyo et al, 2013) (Figura.5).

Aguas abajo de Zaragoza el acuífero presenta una geometría más sencilla, con una base homogénea que decrece de forma regular hasta su desaparición en la localidad de Gelsa.

Los parámetros hidrodinámicos que define la CHE para este acuífero lo caracterizan como un acuífero muy heterogéneo, dando valores de transmisividad que varían entre 3000 y 7500 m²/d.

Un análisis del comportamiento temporal de los niveles piezométricos pone de manifiesto una característica excepcional del acuífero aluvial del Ebro y es su estacionalidad inversa. En la cuenca del Ebro la evaporación excede a la infiltración por lo que existe una gran

cantidad de sistemas de riego para el regadío, estos actúan principalmente durante los meses estivales; asociado al riego esta la infiltración de parte de esa agua que recarga el acuífero (90% de la recarga total) (Figura 4). Debido a este tipo de estacionalidad, el acuífero se recarga durante las épocas de riego (meses estivales) en contraposición con los acuíferos que se recargan por precipitación natural (recarga más abundante en los meses invernales).

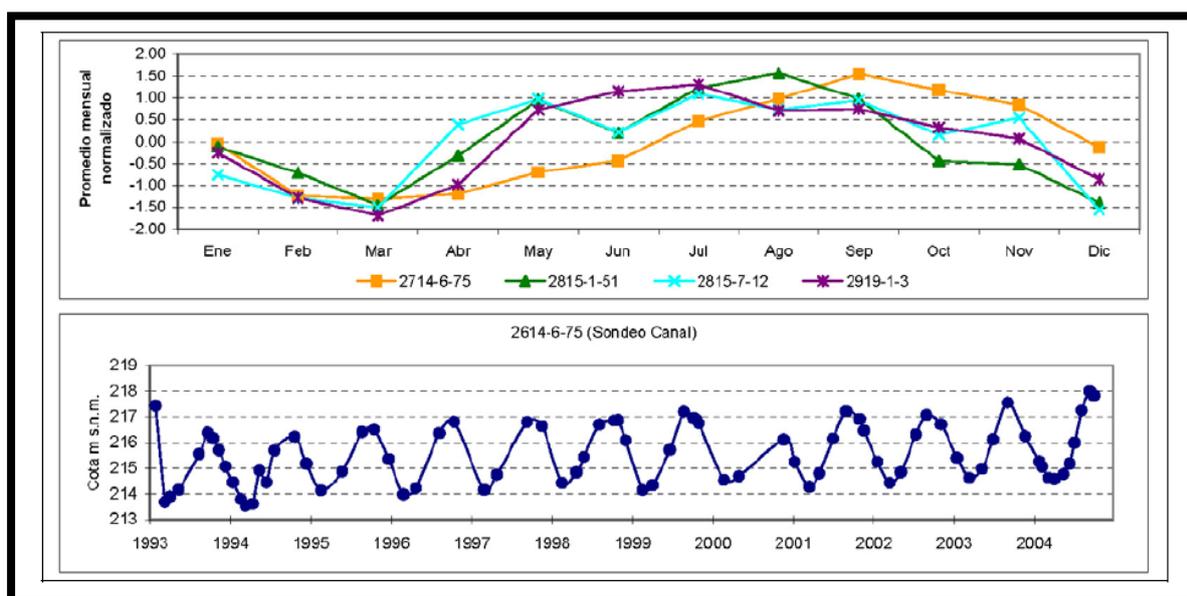


Figura 4. Evolución temporal de los niveles piezométricos donde se pone de manifiesto la estacionalidad inversa (la recarga es mayor en verano). (Fuente: CHE Catalogo M.A.S)

En cuanto a sus propiedades hidroquímicas se trata de aguas muy mineralizadas con facies que son mayoritariamente de tipo sulfatado cálcico, con valores de conductividad eléctrica habituales entre 1500-2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ llegando a alcanzar los 5000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en ocasiones, los datos de la CHE también citan que existe una contaminación generalizada de compuestos de nitrógeno, DQO y productos químicos industriales.

En general el 77% de la superficie ocupada por el acuífero está ocupada por suelos agrícolas y solo el 14% está ocupada por áreas urbanas e industriales.

5.3.2 El acuífero aluvial urbano de Zaragoza.

Por acuífero aluvial urbano de Zaragoza se conoce a la parte del acuífero aluvial del Ebro que se encuentra situada bajo la ciudad. Como características generales Garrido et al, 2008 explican que se encuentra conformado por dos masas de agua subterráneas, provenientes de los aluviales de los ríos Ebro y Gallego generando un único acuífero de naturaleza detrítica que abarca las terrazas de dichos ríos, este acuífero está constituido por depósitos de gravas, arenas y limos que más al sur enlazan con los depósitos de glaciares provenientes

de los depósitos meridionales. En su paso por Zaragoza el río Ebro ha generado 8 niveles de terrazas de los que 5 están conectados hidráulicamente.

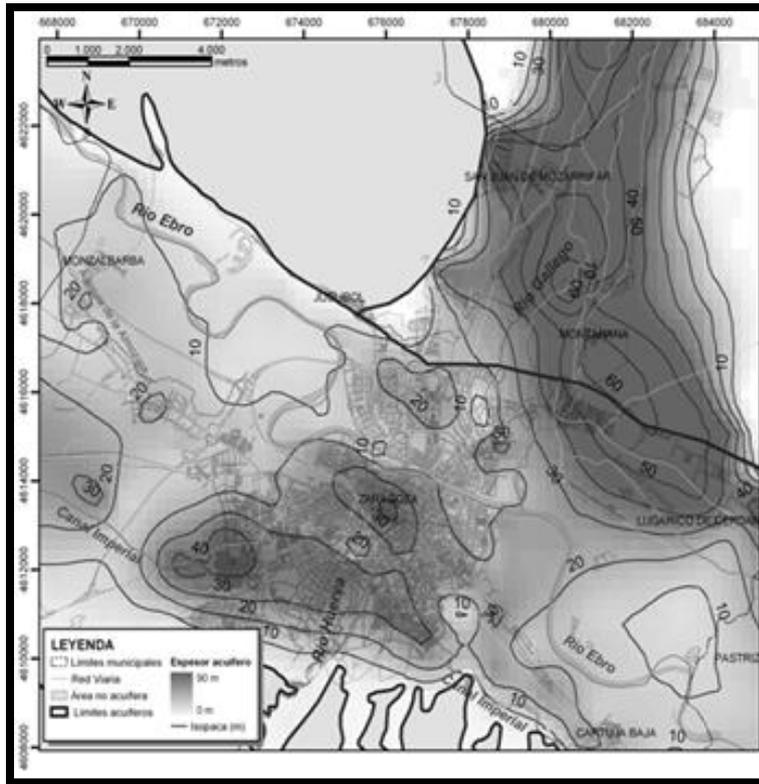


Figura 5. Mapa de isopacas (m) para el acuífero aluvial del Ebro. (Fuente: Garrido et al, 2010).

si bien actualmente el uso más importante es el geotérmico. Cabe destacar que tal y como puede verse en la Figura 6 si bien el uso principal es el geotérmico el mayor consumo corresponde no obstante al citado de riego de jardines, ya que el agua en geotermia se utiliza como intercambiador térmico y luego se devuelve al acuífero por lo que el consumo es nulo.

El sustrato del acuífero está formado por yesos y lutitas terciarios, impermeables pero muy solubles; y es esta solubilidad la que condiciona la geometría de la base del acuífero y por tanto su espesor, también condiciona la calidad química de las aguas por eso es habitual las variaciones muy acusadas del espesor a lo largo de su extensión. Ver Figura 5.

El uso más habitual del agua en este entorno urbano ha sido históricamente para uso industrial y dentro de la ciudad también para riego de jardines,

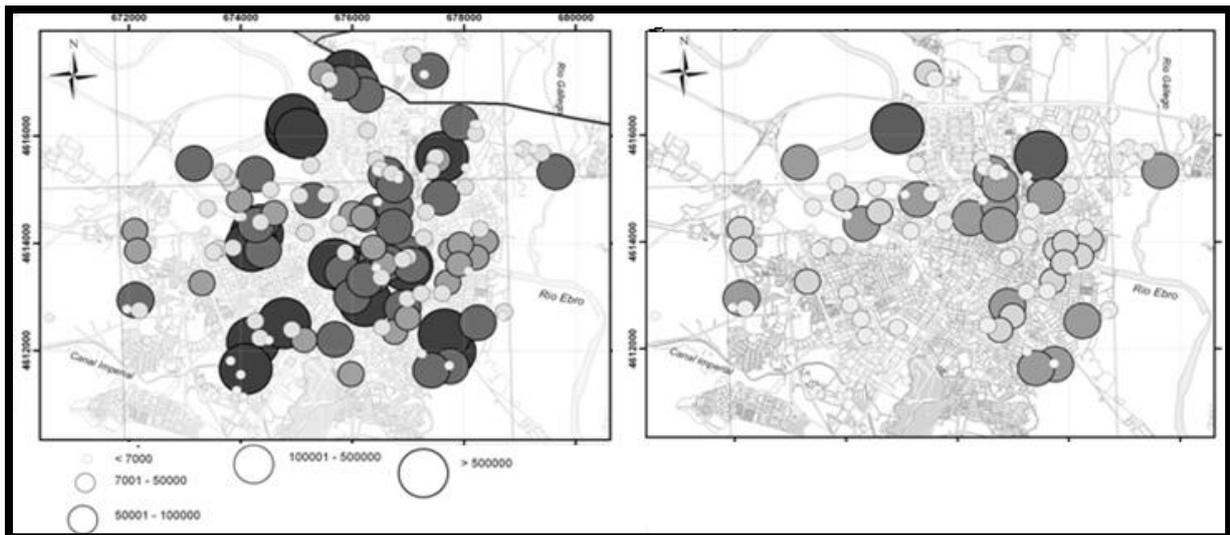


Figura 6. Izquierda: distribución de los puntos de explotación de aguas subterráneas en la ciudad de Zaragoza y volúmenes bombeados (en m³/año según leyenda). Derecha: distribución del consumo de agua subterránea. (Fuente: Garrido et al. 2011)

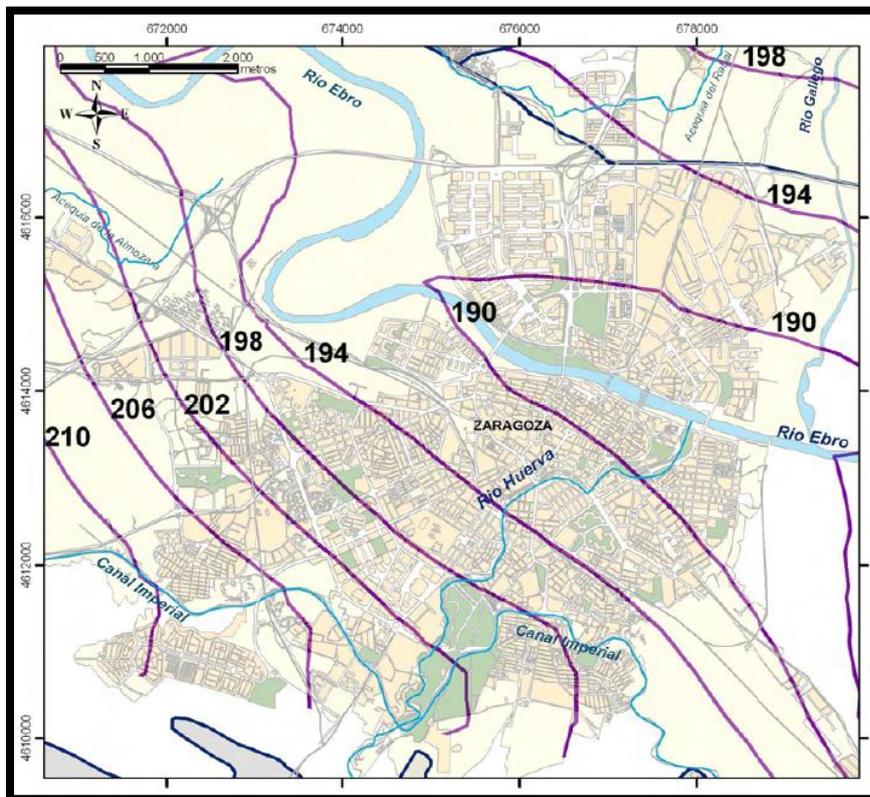


Figura 7. Distribución de líneas de isopiezas (m.s.n.m) en aguas altas (Septiembre 2002) deducidas de un modelo de flujo de régimen transitorio. Fuente: Garrido et al, 2008.

Garrido et al, 2008. en el estudio “Caracterización del medio Hídrico subterráneo en la ciudad de Zaragoza” realizan un modelo de flujo del acuífero aluvial del Ebro que incluye la ciudad de Zaragoza, los resultados obtenidos para el tramos urbano se reflejan en la Figura 7 donde puede verse que el comportamiento hidráulico está condicionado por el funcionamiento del

acuífero aluvial del Ebro en su conjunto y por su interacción con el aluvial del Gallego en su zona de confluencia (parte nororiental del mapa).

El acuífero del Ebro se comporta de una manera anómala como se ha indicado anteriormente debido a que la mayor recarga que obtiene es a través de los regadíos que lo pueblan en superficie por lo que los mayores ascensos se producen durante los meses de

verano. La extensión de la zona urbanizada de la ciudad de Zaragoza, a costa de eliminación de superficie en regadío, puede constituir una modificación relevante de la recarga, que en este trabajo puede ser inicialmente evaluada.

6. Presentación y discusión de resultados.

6.1 Primera parte: Análisis de la recarga del acuífero por eventos de precipitación en Zaragoza.

6.1.1 Descripción del evento:

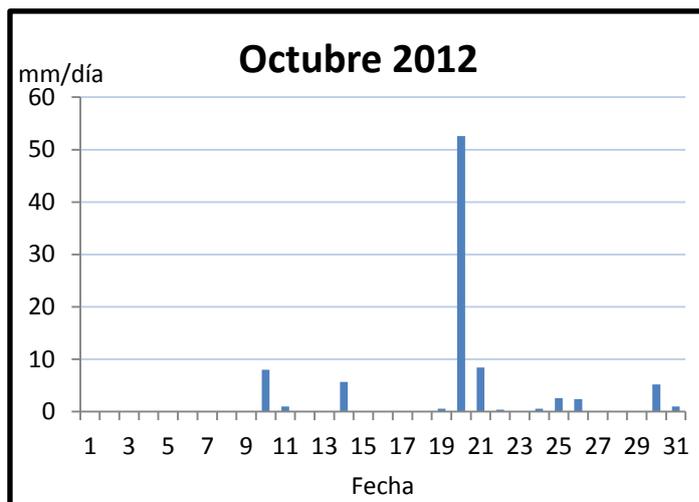


Figura 8. Precipitación diaria en mm/día para el mes de Octubre. (Datos: SAIH; Fuente: Autor).

Como se ha citado anteriormente se ha centrado esta parte del trabajo en el estudio de los efectos que tiene sobre el acuífero aluvial de Zaragoza un episodio de precipitaciones extraordinario; en el caso de este estudio se ha escogido las precipitaciones que tuvieron lugar en los días 19-20-21-22 de octubre.

En la Figura 8 pueden verse las precipitaciones registradas en el mes de octubre en Zaragoza (observatorio de la CHE, en Paseo Sagasta), como puede verse la mayor precipitación se produjo el día 20.

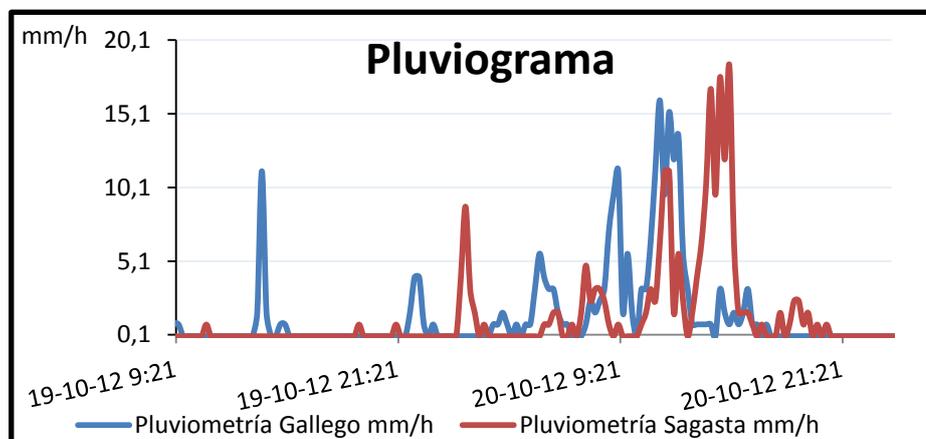
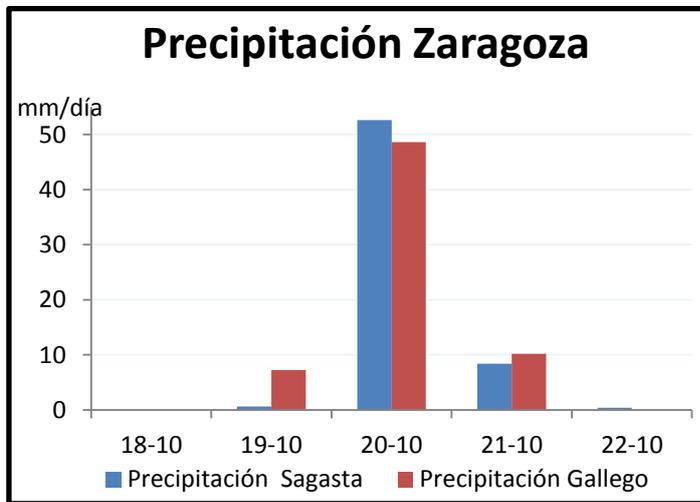


Figura 9. Pluviograma del evento de precipitación. Datos en mm/h obtenidos a partir de datos quinceminutales. (Datos: SAIH, Fuente: Autor). Observatorios de Paseo Sagasta y río Gallego (Zuera).

En el pluviograma de la Figura 9. puede verse la distribución de la precipitación en el evento considerando, destacando el día 20/10/2012, con un total de 55 mm. La intensidad máxima registrada fue de 18,4 mm/h calculada a partir de datos quinceminutales.



A modo de resumen se muestra en la Figura 10. La precipitación total registrada en los tres días del evento.

Figura 10: Gráfica con los datos de precipitación diaria en mm/día. (Datos: SAIH, Fuente: Autor).

6.1.2 Descripción e interpretación:

En el medio urbano moderno predomina la impermeabilización de la superficie del terreno, las aguas de precipitación (pluviales) son recogidas por colectores y llevadas a depuradoras o más frecuentemente directamente a los cauces superficiales. En la ciudad de Zaragoza, son zonas de recarga por precipitación, las zonas verdes y la existencia de pérdidas de agua en el alcantarillado. La Figura 11 muestra los ascensos del nivel de agua producidos en los piezómetros de control para diferentes periodos de tiempo posteriores al inicio del periodo de lluvias más intensas (12:00 del día 20 de Octubre). Se muestran los ascensos en metros a 12, 24, 48 y 72 horas del evento. Se acompaña también el ascenso que se produce en el nivel del agua del río Ebro en el aforo A011 situado en el puente de Santiago.

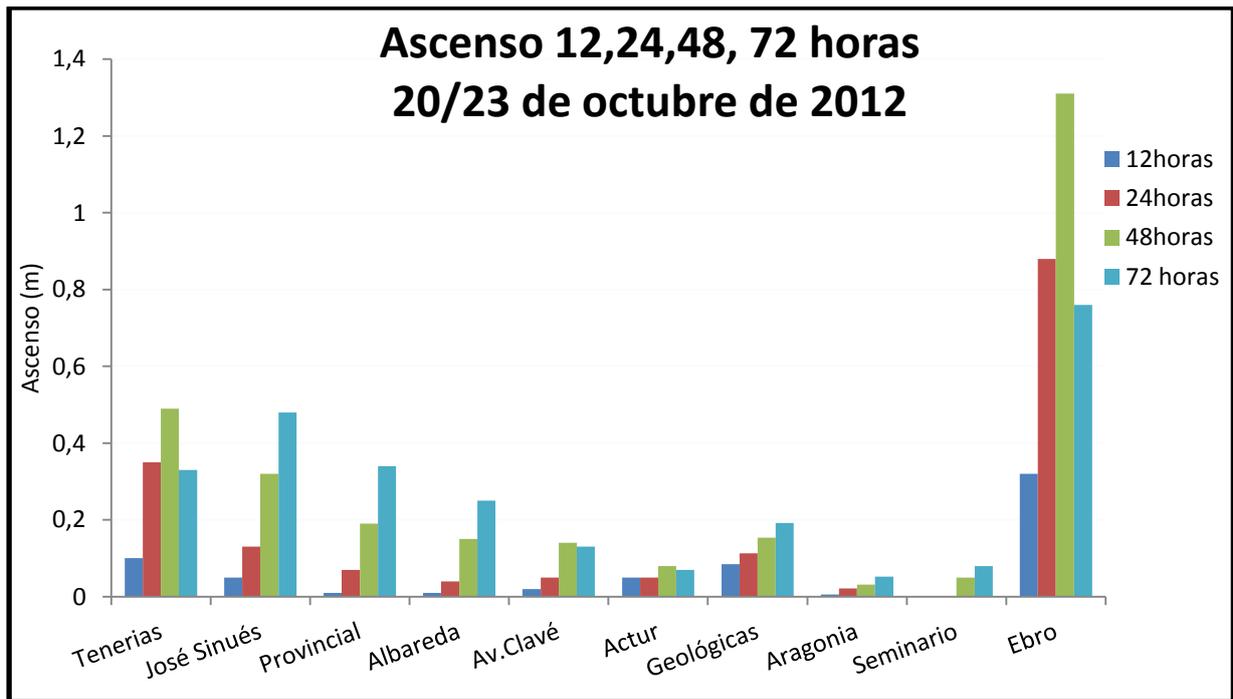
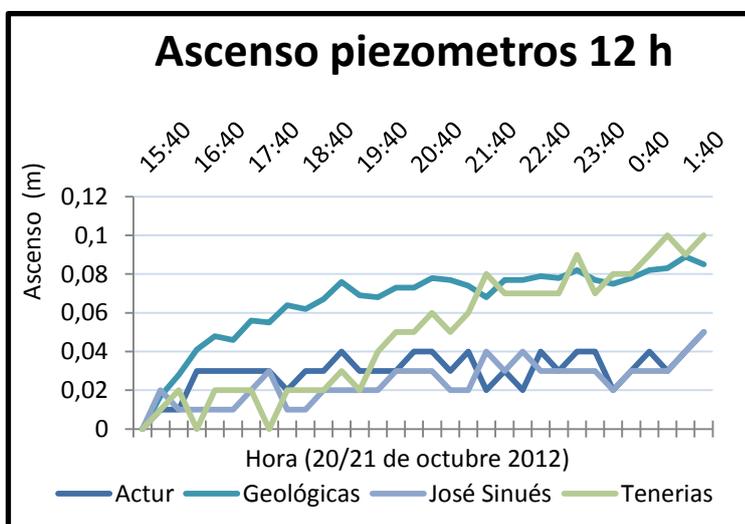


Figura 11. Ascenso del nivel en los distintos piezómetros durante el evento de lluvia analizado ordenados según distancia al río. (Datos: IGME-SAIH, Fuente: Autor)

1) **A las 12 horas** del inicio del episodio de precipitación principal precipitación (día 20) se observa un ascenso en casi todos los niveles piezométricos, el mayor ascenso se produce en el piezómetro Tenerías con un ascenso de 10 cm. seguido por el piezómetro de Geológicas con un ascenso de 8,5 cm. Ascensos de 5 cm se observan en los piezómetros de José Sinués y Actur, el resto de piezómetros tienen ascensos iguales o inferiores a un centímetro e incluso como en el caso del piezómetro de Seminario no llega a notarse.

Para este periodo hay que reseñar también que el río Ebro sufrió un ascenso de 32 centímetros de su lámina de agua.



En la Figura 12 se muestra en detalle la evolución de los ascensos en las primeras 12 horas para los piezómetros más sensibles a la recarga (los que ascienden más de 50 mm).

Figura 12. Ascenso piezométrico para el intervalo de 12 horas siguientes al inicio de la precipitación. (Datos: IGME, Fuente: Autor.).

De la evolución observada en las primeras doce horas se puede hacer la siguientes tipología:

Piezómetros de José Sinués y del Actur: muestran una tendencia de ascenso lineal, con un ascenso de 50 mm. Las oscilaciones observadas pueden deberse a los bombeos de agua para uso geotérmico.

Piezómetro de Tenerías: situado a menos de 50 metros del río Ebro, está influenciado por el nivel de agua del río y del azud. Tiene un ascenso inicialmente exponencial que se estabiliza cuando el río alcanza la conta máxima del azud .

Piezómetro de Geológicas: presenta un elevado y rápido ascenso (forma logarítmica) que resulta difícil explicar ya que el nivel del agua se encuentra a casi 40 m de profundidad (38,4 metros. Este piezómetros presenta características anómalas no sólo en el comportamiento indicado sino también en la química del agua, evolución de niveles mensuales y anuales.. Se considera puede estar afectado por pérdida de aguas de conducciones.

2) Ascensos a las 24 horas del inicio del evento: En la Figura 13. Se muestran los ascensos producidos en los niveles de agua de los piezómetros y en el río Ebro. Como puede verse el nivel de agua del río Ebro presenta un ascenso de 88 cm, en el piezómetro de Tenerías –el más próximo al río- el nivel asciende 35 cm; los ascensos en el restos de los piezómetros son: José Sinués (13 cm), Geológicas (11 cm), Provincial (7 cm.), Av.Clavé (5 cm.) y Albareda (4cm.)

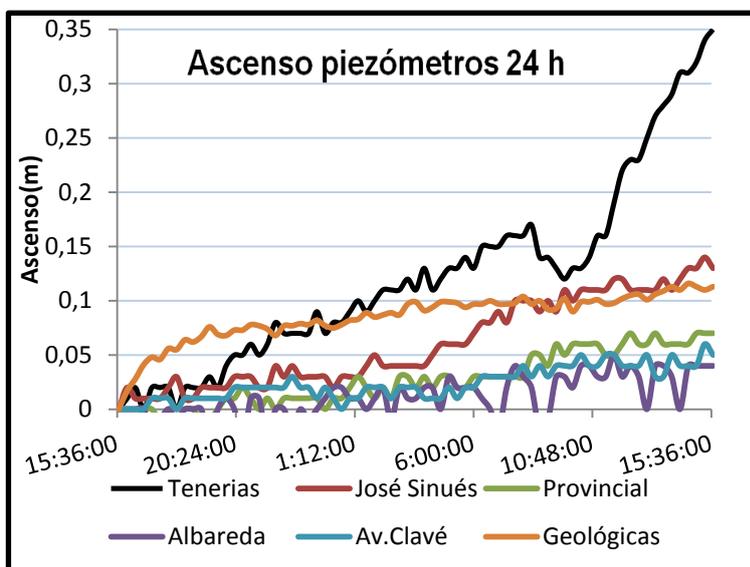


Figura 13. Ascenso piezométrico para el intervalo de 24 horas siguientes al inicio de la precipitación. (Datos: IGME, Fuente: Autor).

En el anexo se acompaña una tabla con la distancia al río de los piezómetros considerado, en general puede verse que los ascensos son mayores en los situados más cerca del río.

3) A las 48 horas: los niveles de los piezómetros siguen ascendiendo a un ritmo constante. El piezómetro de Geológicas prácticamente deja de ascender su nivel: pasa de una velocidad de ascenso

inicial (primeras 12 horas) de 0,71 cm/h, a una velocidad de 0,003 cm/h (entre las 12 y 48 horas).

4) **A las 72 horas:** la variación en los niveles se puede ver en la Figura 14. El nivel del río continúa asciendo hasta los 130 cm a las 60 horas, para a partir de ese momento descender hasta los 60 cm a las 72 horas. El piezómetro de Tenerías sigue solidariamente estas variaciones, prácticamente sin retardo, el ascenso del nivel es de 61 cm coincidiendo con el pico en el río Ebro y al final de las 72 horas el nivel ha descendido hasta 34 cm.

El resto de los piezómetros registran un ascenso prácticamente lineal, claramente relacionado con el nivel del río, si bien con un retardo que dependen de la distancia al río.

En el piezómetro de José Sinués se observa hacia las 72 horas que el nivel ha dejado de ascender, solidariamente con el inicio de la decrecida en el río. Entre estos puntos el lag (lapso de tiempo que transcurre desde la finalización de los ascensos de nivel en uno y otro punto) es aproximadamente de 12 horas. En el resto de los piezómetros este lag es mayor, además de más difícil de valorar debido al efecto de los bombeos en pozos próximos.

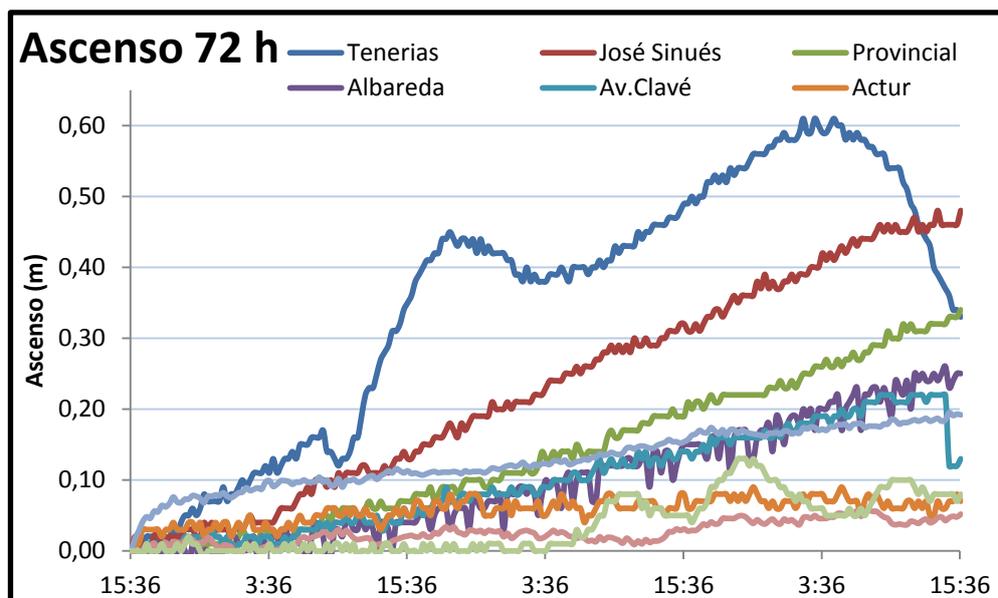


Figura 14. Ascenso piezométrico para el intervalo de 72 horas siguientes al inicio de la precipitación. (Datos: IGME, Fuente: Autor).

6.1.3 Resultados

Como resultado de las observaciones se puede afirmar que la recarga del acuífero aluvial urbano de Zaragoza, por la precipitación directa, en este caso considerada por el episodio de lluvias del 20/10/2012 es poco relevante, al menos en relación con otras formas de recarga como son las aportaciones laterales y –como se observa aquí- la recarga por el río Ebro en periodos de crecida.

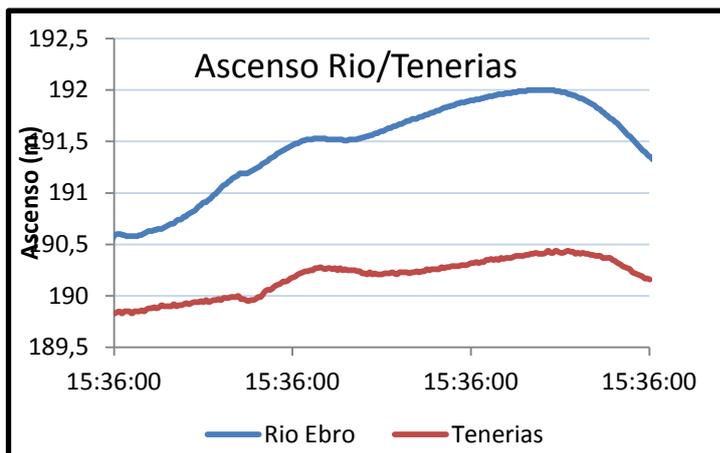


Figura 15. Comparación ascensos río piezómetro de Tenerías. Se observa la clara influencia del río en el nivel piezométrico. (Datos: SAIH-IGME, Fuente: Autor)



Figura 16. Piezómetro de Tenerías localizado en el parque de la ribera del Ebro. (Fuente Autor).

El nivel de agua del piezómetro Tenerías, situado en la ribera del Ebro a 50 metros (figura 16.) del cauce aproximadamente está ligado a la dinámica que sigue el río por el efecto del azud del Ebro y la lámina de agua que genera ver Figura 15.

Por otro lado existe también una elevada problemática con el piezómetro Geológicas, este como se ha dicho antes presenta una respuesta anómala a las precipitaciones (ascenso muy rápido a pesar de tener más de 30 metros de espesor de la zona no saturada). Este ascenso podría explicarse por las pérdidas en el alcantarillado que se encuentra en las cercanías del piezómetro.

El piezómetro del Actur, es el que tienen una más clara relación entre el evento de lluvia y el nivel del agua, estos es así porque se sitúa en una zona apenas

urbanizada con amplias zonas verdes. El nivel ascendió 5 cm en las 12 horas inmediatas al máximo del evento de precipitación lo que supone una recarga de 3 l/m^2 si aplicamos un valor de coeficiente de almacenamiento S de 0,06. Valor obtenido de la información de la CHE y de los estudios realizados a continuación.

El acuífero de José Sinués tiene un ascenso similar al del Actur (5 cm.) si bien se encuentra influenciado por la recarga del río que le alcanza con un retardo estimado de unas 12 horas aproximadamente (Figura 14).

Es difícil discernir que parte de la recarga se debe a precipitación y que parte a la crecida que sufrió el río Ebro en esas fechas (ver Figura 11) pero se puede realizar una aproximación observando la siguiente gráfica en la cual se representa la relación ascenso/distancia al río. En la Figura 17 se han representado las variaciones de nivel de los piezómetros en los intervalos de tiempo considerados, ordenados en función de la distancia al río Ebro.

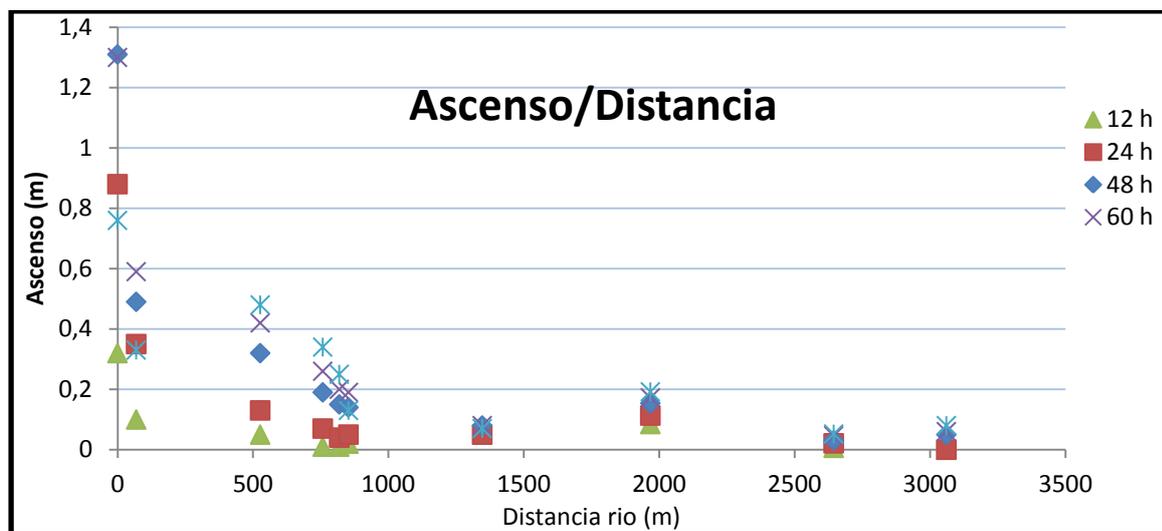


Figura 17. Representación de los ascensos/distancia al río para los periodos de horas estudiados. (Datos: SAIH-IGME, Fuente: Autor).

Se puede observar como a las 24 horas del evento de precipitación los ascensos más evidentes y más regulares corresponden a los piezómetros situados más cerca del río: Tenerías, José Sinués, Provincial, Albareda y Anselmo Clavé según orden de cercanía. Esta situación se repite para mayores intervalos de tiempo. Los restantes piezómetros presentan ligeros ascensos que son difíciles considerar si están o no relacionados ascenso del nivel del Ebro.

Que manifiesten relación con la precipitación de forma más o menos inmediata, tan solo pueden considerarse los piezómetros de Geológicas y Actur. En lo referente a los piezómetros de Aragonia y Seminario se observa un ascenso del orden de 1-2 centímetros, pero resulta difícil discernir a que se deben esos ascensos.

Por tanto, aún en situación de evento de precipitación extraordinaria, los ascensos más importantes del agua en el acuífero se deben a la crecida del río. Hay que tener en cuenta

que en ocasiones de fuertes precipitaciones en el entorno urbano (tormentas de verano) no se producen crecidas en el río Ebro, y por tanto apenas se producirá recarga en el acuífero. Evidentemente, con precipitaciones más extensas habría que considerar el flujo general del acuífero aluvial del Ebro, dentro del cual se encuentra el acuífero urbano estudiado.

Por último y a modo de aproximación se puede estimar el volumen mínimo de agua que recarga el acuífero por efecto de las precipitaciones, tomando como ascenso debido a las precipitaciones el que tiene lugar durante las primeras 12 horas del evento de precipitación y aplicando un valor de $S=0,06$; Así el volumen de agua que recarga el acuífero es $V = h * S * A$ donde h es el ascenso expresado en l/m^2 , S es el coeficiente de almacenamiento y A es la superficie permeable ajardinada de Zaragoza (Según tabla del anexo 3) se ha escogido este valor $4950409 m^2$ así el volumen obtenido es $V = 0,03677778 * 0,06 * 4335062 = 9545,82 m^3$ de recarga por efecto de la precipitación para el valor de superficie con capacidad de infiltración escogido.

A continuación se procederá al estudio de una crecida del río Ebro más marcada con el objetivo de estudiar el efecto de las crecidas del río sobre la recarga del acuífero

[6.2 Análisis de la recarga del acuífero por las Crecidas del río Ebro.](#)

La conexión hidráulica río- acuífero viene condicionada principalmente por dos factores la situación de las formaciones permeables en relación con el cauce del río y la diferencia existente entre los niveles de agua del río y del acuífero. Atendiendo a estos dos factores (Custodio et al, 1983.) proponen 6 modelos (ver Figura 18.) básicos para las distintas relaciones que se pueden dar.

En el acuífero aluvial urbano de Zaragoza, la situación viene perfectamente identificada con la Figura 18d. Es decir en los periodos de aguas bajas en el río, el acuífero alimenta al río, mientras que en aguas altas, especialmente durante las crecidas, es el río el que alimenta al acuífero. Esta situación si bien era conocida en el acuífero, nunca se había considerado la magnitud ni extensión del proceso. Los nuevos datos disponibles, gracias a la red de control instalada por el IGME en la ciudad de Zaragoza, permiten cuantificar el tema y establecer las modificaciones que en la dirección y sentido del flujo se producen (mapa de isopiezas en periodo de crecida del río Ebro)

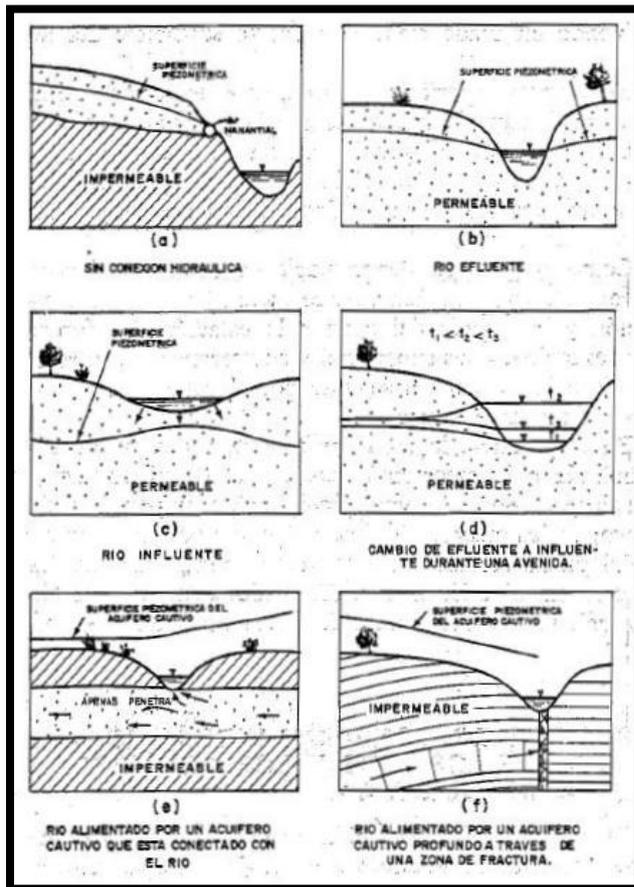


Figura 18. Tipos de relaciones que pueden existir entre el río y el acuífero. (Fuente: Custodio et al, 1983.)

En la Figura 19. se muestra la evolución temporal de los niveles de agua libre en el río Ebro, se observa como su nivel más frecuente se sitúa sobre los 190 m.s.n.m., pero en cortos periodos de tiempo el nivel asciende hasta valores que superan los 191 m e incluso llegan en crecidas importantes a mas de 192. 5 m. Estos niveles corresponde a caudales circulantes por el río de 53, 87 m³ /s para 190 m, 359,93 m³ /s para 191 m y 739,69 m³ /s para ascensos de 2 metros. Pudiendo ser mucho mayor.

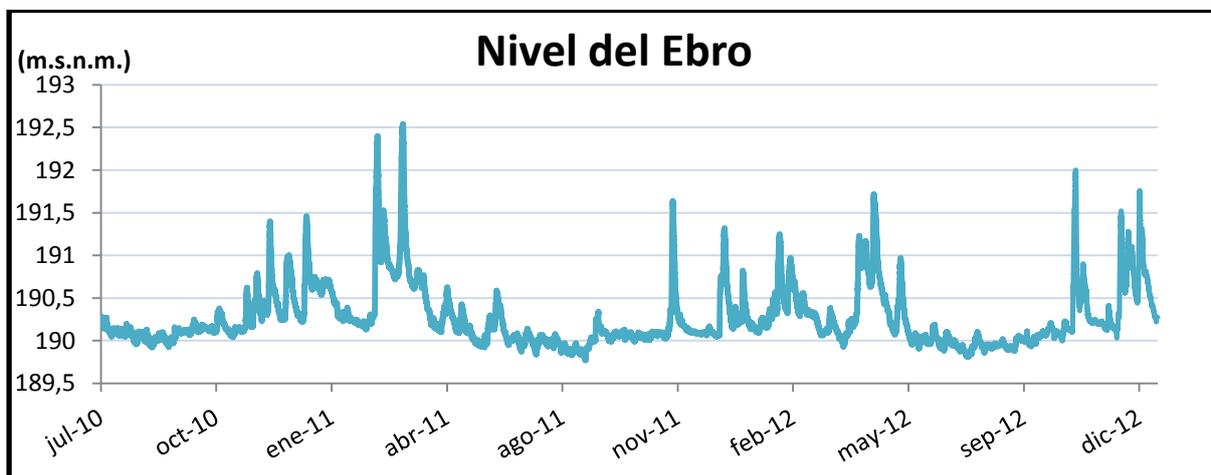


Figura 19. Hidrograma del río Ebro a lo largo de 2 años. (Datos: SAIH, Fuente: Autor).

Como la inversión de flujo y por tanto la recarga del acuífero por el río se produce en los momentos de crecidas, a continuación se analizan en detalle los niveles de agua tanto en el río como en el acuífero coincidiendo con un determinado evento de crecida en el río.

6.2.1 Descripción del evento de crecida:

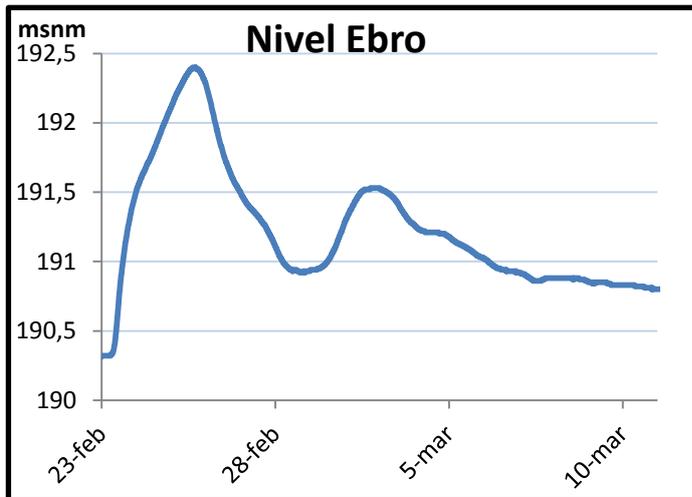


Figura 20. Hidrograma del mes de Febrero y Marzo de 2011 en el que se observa la crecida. (Datos: SAIH, Fuente: Autor)

Para esta parte del trabajo se ha propuesto el estudio de una de las grandes crecidas que ha sufrido el río Ebro a su paso por Zaragoza en los últimos años. Se ha seleccionado la crecida que tuvo lugar en Zaragoza a finales de Febrero y durante el mes de Marzo de 2011 considerando además en el hecho relevante de que el nivel del río previo era notablemente bajo, y que el ascenso se produce bruscamente,

los niveles y caudales observados tiene una recurrencia aproximada de 2 años, se trata por tanto de una crecida ordinaria.

En la Figura 20. Aparece la evolución de los niveles de agua en el río, que pasó de 190,3 m a 192,2 m.s.n.m lo que corresponde a caudales que varían desde 122,82 m³/s a 861,79 m³/s en la punta de la crecida. Como puede verse en la crecida el ascenso máximo experimentado fue de 205 centímetros y se alcanzó el día 25 de Febrero a las 14 horas.

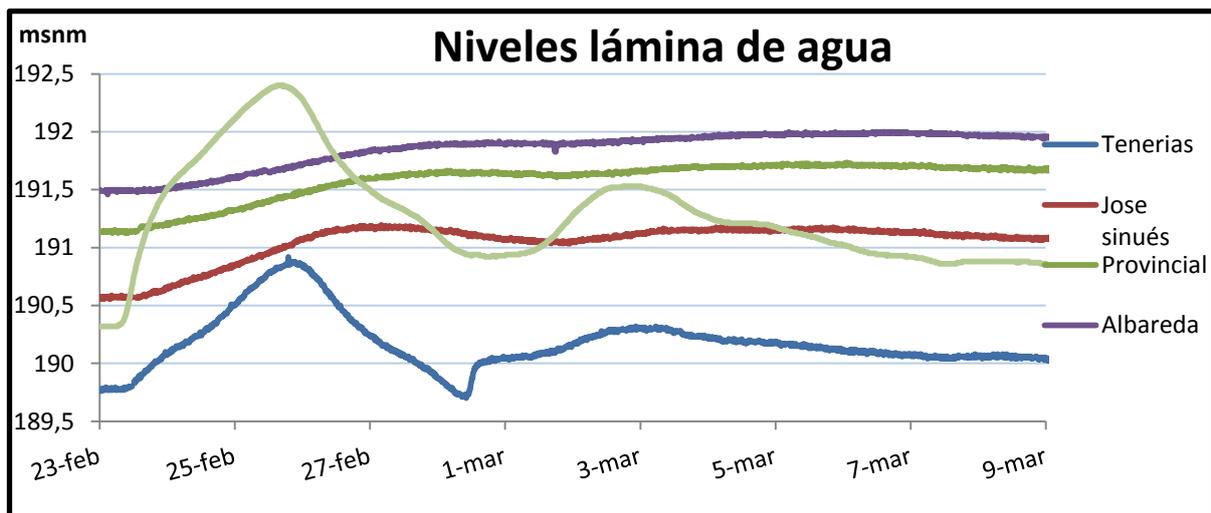


Figura 21. En la que se muestra el nivel del agua durante la avenida. (Datos: IGME-SAIH, Fuente: Autor).

En la Figura 21 se muestra la evolución de los niveles de agua del río (línea gruesa) y los de los piezómetros más próximos al mismo, como puede verse el nivel del río supera ampliamente los niveles de agua de los piezómetros considerados, al menos durante el

periodo principal de la crecida (entre las 12 de la noche del día 24 hasta las 10 de la mañana del día 26), lo que confirmaría el paso temporal del agua del río al acuífero.

La crecida del río se traduce en unos ascensos de los niveles piezométricos del acuífero, que como puede observarse en la Figura 22 decrecen conforme nos alejamos del río.

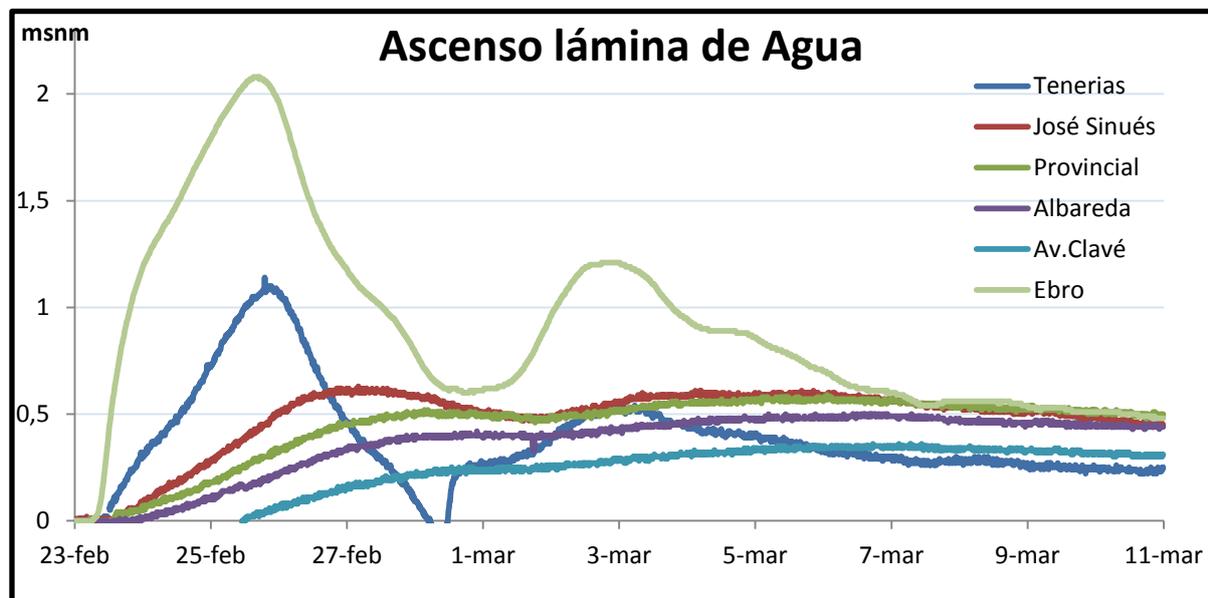


Figura 22. que muestra los ascensos que sufre la lámina de agua como efecto de la crecida. (Datos: IGME-SAIH Fuente: Autor).

Los valores de ascenso máximos para los piezómetros son: Tenerías (42 cm a 50 metros de distancia del río Ebro), José Sinués (60 cm a 526 metros del río), Provincial (56 cm. a 758 metros.), Albareda (47 cm. a 819 metros) y Av.Clavé (0,32 cm a 853 metros.). El efecto que presentan el resto de piezómetros más alejados del río es insignificante con respecto a los citados anteriormente por ello no se representan en las gráficas.

En la misma gráfica puede observarse como el nivel en el piezómetro de Tenerías es totalmente solidario con el nivel del río, de manera que puede ser representativo de como se produce la conexión hidráulica río-acuífero a una distancia de 50 metros.

Es interesante observar como los ascensos piezométricos presentan una relación directa con la cercanía al río, atenuándose las dos ondas de crecida del río conforme nos alejamos de este y solo se manifiestan en los piezómetros de José Sinués y Provincial prácticamente desapareciendo en Albareda y Av.Clavé.

Los piezómetros considerados siguen aproximadamente la línea de corriente WSW-ENE que establece el mapas de isopiezas del anexo I y la figura 7. siguiendo esa línea de corriente, el ascenso del nivel del agua del río no produce una inversión de flujo –es decir un cambio de sentido del flujo-, pero debemos considerar que en situación de crecida el mapa de

isopiezas cambia sustancialmente y por ello, cambia también la dirección y sentido de las líneas de flujo.

6.2.2 Cuantificación del proceso y nuevo mapa de isopiezas.

La relación existente entre los sistemas rio-acuífero que modifican su gradiente durante la ocurrencia de avenidas está muy estudiada en la literatura (Custodio et al, 1983; Escuder et al 2009). Existen expresiones matemáticas que permiten calcular parámetros hidrogeológicos del acuífero, variaciones de los niveles a diferentes distancias del río, incluso evolución temporal de estos niveles. También se evalúa el volumen de agua que aporta el río al acuífero. A continuación se hace una aplicación de estas expresiones matemáticas.

Ascenso de la lámina de agua:

Custodio et al, 1983; Escuder et al, 2009 y Sahuquillo et al 1983. Proponen utilización de la ecuación de flujo para medios porosos aplicada en la relación rio-acuífero para obtener el ascenso (s) a una distancia (x) del río.

$$s = s_0 * \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{\sqrt{\frac{4 * T * t}{S}}} \right) \right]$$

$$\operatorname{erf}(X) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} * \int_0^x e^{-y^2} dy.$$

Donde s es el ascenso de la lámina de agua. s_0 la variación de altura inicial entre la crecida

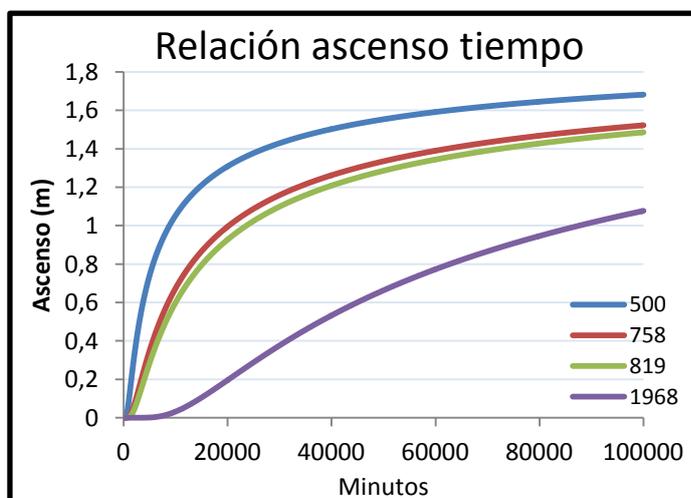


Figura 23. Relación ascenso tiempo para una ascenso instantáneo de 2,05 metros, a distintas distancias expresadas en m.

del río y el nivel en el punto x que se quiera estudiar. x la distancia entre el río y el punto donde se quiere estudiar el ascenso. T es la transmisividad (m^2/min), S el coeficiente de almacenamiento y t el tiempo desde que se produce el ascenso de la lámina de agua. erf es la función error cuya expresión queda arriba descrita.

Una condición previa necesaria para poder aplicar esta ecuación es

suponer que el ascenso del nivel de agua en el río se produce de forma inmediata y que esta cota permanece constante en el tiempo. Considerando esa condición y para un ascenso del nivel del agua en el río de 2.05 m, en la Figura 23 se muestran las curvas de ascenso obtenida y el retardo que se produce para diferentes distancias al río.

	Valor calculado (m)	Valor medido (m)
José Sinués (527 m)	0,41	0,64
Provincial (758 m)	0,11	0,6
Albareda (819 m)	0,074	0,42
Geológicas (1918 m)	$1,51 \cdot 10^{-6}$	-0,03

Figura 24. Tabla comparativa con ascensos reales y simulados. Fuente: Autor

La comparación con los datos medidos (ver Figura 24.) muestra errores como puede verse estas diferencias son todas por defecto, al igual que sucede con el retardo y están motivadas por las consideración previa que hay que asumir de ascenso instantáneo. En ese sentido, al considerar el máximo ascenso de nivel del río, en la ecuación no se consideran los efectos que los ascensos previos han podido generar en la recarga del acuífero.

Para una mejor aproximación a la realidad se ha aplicado la ecuación anterior a intervalos de ascenso del nivel de agua del río. Para ello se han tomado ascensos medios para intervalos de tiempo, como resultado se obtiene una gráfica en tramos, que como puede verse en la Figura 25. Se ajusta adecuadamente a la curva de ascensos observada en el piezómetro de José Sinués. Un ajuste mediante función polinómica da un ajuste continuo más preciso.

En ambos casos (ajuste por tramos, o polinómico), la curva debe desplazarse en un valor igual al retardo o lag que existe entre el río y el piezómetro que es de 18 horas. El ajuste se ha obtenido como los siguientes parámetros hidrogeológicos del acuífero: $T=3800 \text{ m}^2/\text{día}$ y $S= 0,06$ que son similares a los medidos en puerta Cinegia por la confederación hidrográfica del Ebro en su publicación, Aluvial del Ebro: Zaragoza (58) ($T= 3500 \text{ m}^2/\text{día}$ y $S0 0,06$, datos obtenido mediante ensayo de bombeo).

Como se dijo en apartados anteriores el acuífero aluvial del Ebro presenta parámetros hidrodinámicos muy variables en función de la zona del acuífero en la cual se realice el estudio.

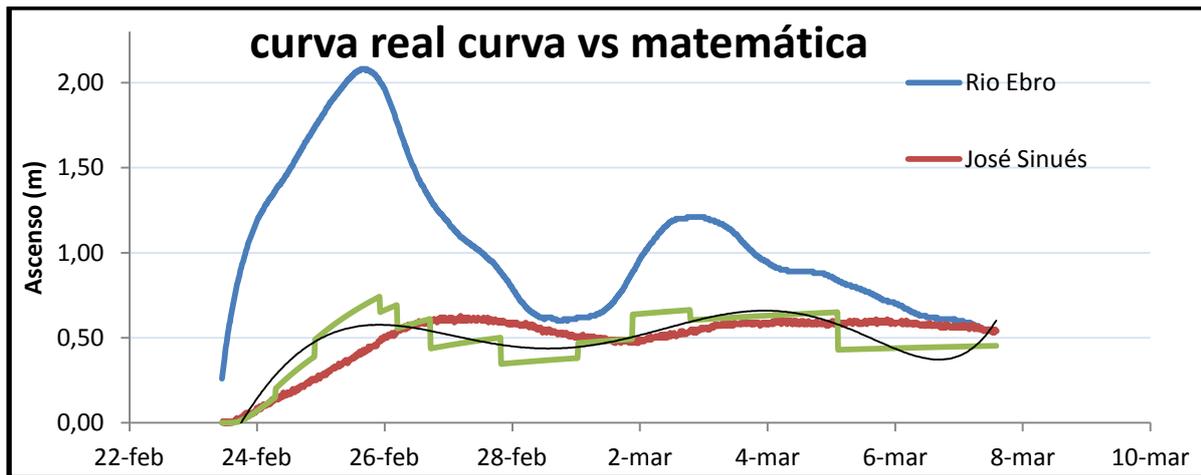


Figura 25. Comparación entre la curva real con la curva obtenida de la ecuación. (Datos: SAIH-Autor, Fuente: autor).

Con los parámetros hidrogeológicos considerados ($T=3800 \text{ m}^2/\text{día}$ y $S= 0,06$), puede aplicarse la misma ecuación para estimar el **volumen de agua** que recarga el acuífero.

Siguiendo esta expresión
$$V = s_0 * S \sqrt{\frac{4Tt}{\pi S}}$$

Asumiendo un valor de s_0 medio entre 1-2 m y un tiempo de duración de crecida de 12 días se obtiene un rango de valores de entre $60,43 \text{ m}^3$ y $120, 86 \text{ m}^3$ por unidad de longitud de río, considerando para el tramo de Zaragoza, una longitud del tramo de río que atraviesa la ciudad de Zaragoza de 7000 m el volumen recargado por el río sería de $423010 - 846020 \text{ m}^3$.

Con estos valores también podemos obtener el valor de caudal de entrada por unidad de longitud de río con la siguiente expresión
$$Q = \frac{s_0}{\sqrt{\frac{\pi T t}{S}}}$$
 obteniendo un caudal de: $0,0006 \text{ m}^3/\text{s}$

y $0,0013 \text{ m}^3/\text{s}$ por unidad de longitud por un valor de longitud de 7000 metros obtenemos unos resultados de $4,2 \text{ m}^3/\text{s}$ y $9,1 \text{ m}^3/\text{s}$.

Finalmente, es especialmente relevante para la caracterización del flujo en situaciones de crecida, realizar un mapa de isopiezas de ese momento. Como puede verse, comparando la Figura 27 con la Figura 26, en la cual se muestran los mapas de isopiezas para dos instantes cercanos en el tiempo pero muy distinto (el primero antes de que se produzca la avenida y el segundo posterior a ella). A la vista de los dos mapas se observa un cambio notable en las isopiezas, el flujo se ve modificado claramente en todo el acuífero urbano de Zaragoza situado al norte de los piezómetros P1 a P5, con una dirección del flujo subterránea NNW-SSE y un sentido evidente desde el río Ebro hacia el acuífero.

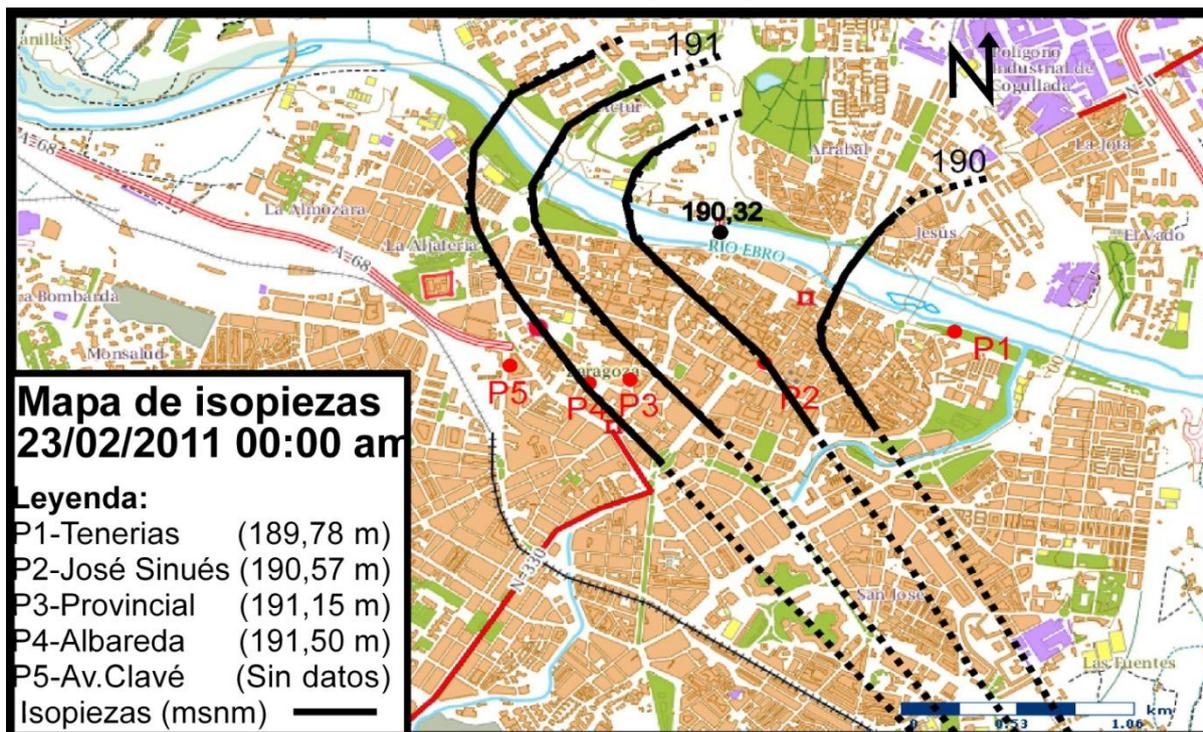


Figura 26. Mapa de isopiezas para un tramo del acuífero aluvial urbano de Zaragoza durante una época sin crecida. Trazo continuo: isopieza real, Trazo discontinuo: Isopieza: inferida. Fuente: Autor.

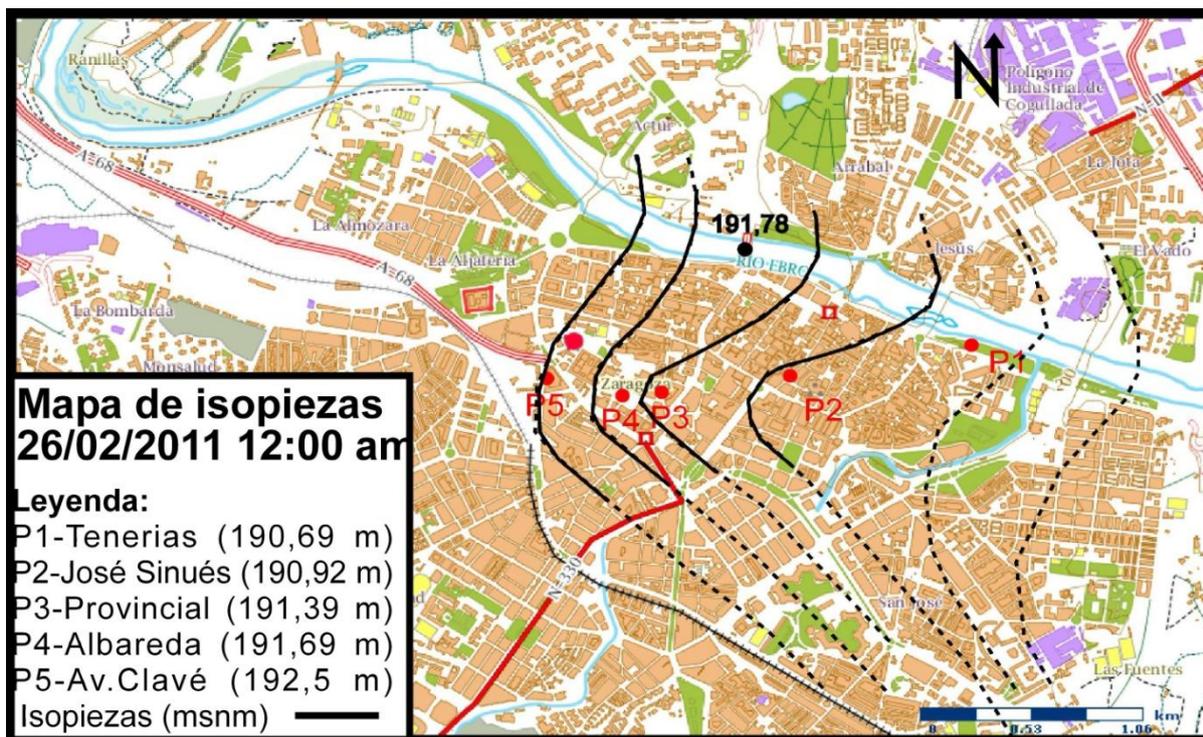


Figura 27. Mapa de isopiezas para un tramo del acuífero aluvial urbano de Zaragoza durante un evento de crecida del río Ebro. Trazo continuo: isopieza real, Trazo discontinuo: Isopieza: inferida Fuente: Autor.

Esta modificación de la dirección y sentido del flujo es evidente se debe producir a lo largo de todo el cauce del río, y sus evidencias son la pérdida de caudal que el río tiene en

crecidas, entre los aforos –medición de caudal del río- en Castejón (Navarra) y en Zaragoza.

En detalle, por tanto se plantearía que el flujo del agua hacia el piezómetro de José Sinués procedería después de un evento de crecida de la infiltración del agua del río Ebro entre los puentes de Europa y puente de Santiago (ver Figura 26 y 27) (flujo del agua durante y posteriormente a la crecida del río).

7. Conclusions

The piezometer control net installed and controlled by the IGME is an adequate tool to evaluate the origin of recharge of the alluvial urban aquifer of Zaragoza. His principal value is in the millimeter precision and in its highest frequency of measures (fifteen minutes frequency).

We have analyzed the recharge that occurs in the alluvial aquifer of Zaragoza by an extraordinary event of rainfall. This rainfall event occurs on 19 20 21 October of 2013. The effects, uplift of the phreatic level, only can be observed clearly in Actur's piezometer in relation with gardens zones and a low thickness of unsaturated zone. We can also observe his effect in Geologic's piezometer related with leaks in the drainage system. The rest of piezometers haven't a relevant recharge related with precipitation. They present elevation that we related with the uplift of Ebro river.

The elevation of Actur's piezometer (5 cm in the first 24 hours of the event) supposes a recharge of 3 mm in the aquifer. The event of rainfall discharge was 66 mm by that it has to consider that the most of rainfall is trapped in non saturated zone (the ground capacity is about 50-100 mm). In October the reserve of water is null, and ground trend is to trap every pluvial water.

We can observe clearly the aquifer recharge produced by Ebro river if we observe the water level in the river and water level in piezometer during floods. For example, during an ordinary flood the top of the flood is highest than Tenerias, José Sinués, Provincial, Albareda and Av. Clave piezometers. We can argue that water flow from Ebro recharge at least the aquifer situated down the old city (inner of second belt).

In flood situation we can observe a high change in isopiestic map of the urban aquifer. We change from a situation where Ebro is an effluent river (or winner), at other situation where Ebro is influent (or loser).

Using the equation that Custodio et Al. (1988) propose for the water flow in the relation between aquifer-river, we can obtain a good approximation with the uplift data measured in José Sinués's piezometer in relation with Ebro river levels. Setting parameters obtained are:

Transmissivity = 3800 m²/day, Storage coefficient= 6%, lag between the 2 points (527 m) is: 16-18 hours.

The recharge volume (water from Ebro river that is stored in the aquifer) estimated for the flood that we study (March 2011) has been of 0, 42-0, 85 hm³. The interval results from consider a flood duration of 12 hours, an uplift of water level between 1 and 2 meter. The length of the river consider has been of 7 km.

8. Bibliografía

- Barnolas, A. y Robador, A.(1991): Mapa Geológico de España 1:50.000, hoja nº383 (Zaragoza). IGME, Madrid.
- Custodio.E y Llamas.M.R. (1983): *Hidrogeología Subterránea tomo I*. ed.Omega.1157 págs. 1124-1130.
- Escuder, R., Fraile, J., Jordana, J., Ribera, F., Sánchez-Vila, X. y Vazquez-Suñé, E. (2009): *Conceptos básicos de hidrología subterránea*. Comisión Docente Curso Internacional de Hidrología Subterránea.768 págs. 281-289.
- Garrido Schneider, E.A., Garcia de la Noceda, C.(2008): Implicaciones hidrogeológicas de la utilización de los acuíferos por los pozos de climatización. El caso de la ciudad de Zaragoza .*I congreso de energía geotérmica en la edificación y la industria*. Madrid
- Garrido, E., Moreno, L. y Azcón, A. (2008). Caracterización del medio hídrico subterráneo en la ciudad de Zaragoza y su entorno. *IX Simposio de Hidrogeología. Elche (Alicante). Hidrogeología y Recursos Hidráulicos*. En prensa.
- Moreno Merino, L., Garrido Schneider, E.A, Azcón Gonzalez de Aguilar, A., Duran Alsero, J.J. (2008): *Hidrogeología Urbana de Zaragoza*. IGME. 200p.
- Garrido Schneider, E.; Coloma López, P.; Sánchez Navarro, J.A. (2010): Aprovechamiento geotérmico somero del acuífero aluvial urbano de Zaragoza: primeros resultados. *Congreso Gandesa*.
- Garrido Schneider, E.; Oroz Pardos, M.; Coloma López, P.; Sánchez Navarro, J.A. (2011). Transformación de usos y demandas del acuífero aluvial urbano de Zaragoza derivado del aprovechamiento geotérmico de sus aguas subterráneas. *Congreso Ibérico sobre las Aguas Subterráneas: desafíos de la gestión para el siglo XXI*.
- IGME-DGA (2009): *Apoyo a la caracterización adicional de las masas de agua subterránea en riesgo de no cumplir los objetivos medioambientales en 2015*.

- Ministerio de medioambiente y medio rural. Confederación hidrográfica del Ebro (2008). *Aluvial del Ebro: Zaragoza (58)*.
- Pueyo, O., Gil, H., Ramajo, J., Ipas, J.F., Simón, J.L., Ansón, D., Gracia, J.(2013). Distribución de los espesores del aluvial de la zona de Zaragoza, análisis de la influencia Kárstica. *Geogaceta*, 53, 2013. 113-116.
- Ruiz, O., de la Puente, P. (2007). El azud-pasarela sobre el río Ebro en Zaragoza. *Revista colegio de ingenieros de caminos, canales y puertos.Nº77 2007*.
- Sahuquillo, A. (1986): Quantitative characterization of the interaction between groundwater and surface water. *Conjunctive Water Use (Proceedings of the Budapest Symposium, July 1986)*. IAHS Publ.no. 156,1986.
- Simón, J.L., Soriano,M.A., Pocoví, A., Arlegui, L.E., Antonio M. Casas, A.M., Liesa, C.L., Luzón ,A., Pérez, A., Pueyo, O. Pueyo, E., Mochales, T. ,Gracia Abadías, F.J. y Ansón, D. (2009): Riesgo de subsidencia kárstica en áreas urbanas: El caso de Zaragoza. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 2009. (17.3) 303-315.

Anexos

- Localización piezómetros y dirección de flujo en época de estiaje. Anexo I
- Tablas con información complementaria. Anexo II

Piezómetros	Profundidad	Espesor acuífero	Tramo ranurado	X UTM	Y UTM	Z (m)	Distancia río Ebro(m)
Tenerías	31,2	23,6	1 - 23	677582	4613734	196,94	50
José Sinués	34,2	27,4	2,50 - 25,50	676708,36	4613569,09	205,897	527
Provincial	47,4	41,5	15,40 - 41,40	676090,11	4613476,24	208,465	758
Albareda	42,6	>42,6	9 - 36,6	675893,41	4613461,83	210,059	819
Av. Anselmo Clavé	51,9	25,30-30,9 y 36,6-46,5	23,0-31,6 y 36,6-50,0	675528	4613554	210,29	853
ACTUR	20,8	13,30	1 - 13	676239	4616710	198,21	1347
GEOLÓGICAS	38,4	36,7 ??	26 - 37	675084,78	4612552,53	220,466	1968
ARAGONIA	40,2	32,10	22,10 - 32,10	674253,33	4612241,89	229,944	2645
SEMINARIO	51,6	>51,6	29 - 50,6	674280,12	4611708,26	235,837	3061

Zonas verdes Zaragoza	Superficie (m2)	Zonas verdes Zaragoza	Superficie (m2)
Parque del Agua	1220000	Castillo Palomar	55425
Riberas del Ebro	829900	Oriente	48858
Lineal de Plaza	678000	Torre Ramona (las fuentes)	47938
Parque Grande	270466	Tapices de Goya (parque Goya)	46160
Valdespartera	192742	La Sedetania (bombarda)	45000
Tío Jorge	151538	P-de los Cineastas (Actur)	45000
Del Oeste (Oliver)	132000	Riberas urbanas del Huerva	39100
Cabezo Buena vista (trasera parque grande)	122240	La Granja (San José)	35934
Montecanal (4 parques)	121218	P. de los poetas (Actur)	35500
Delicias	93294	La Paz (La Paz)	34852
La aljafería	90000	Bruil (Madalena)	33420
Vistabella (Miralbueno, varias zonas)	80749	Fuente de la Junquera	33000
Parque de los depósitos del Canal	80000	Sotocanal (Canal Imperial Casablanca)	29605
Miraflores	78146	P. del Respeto (Actur)	29000
Rosales del Canal (4 zonas)	70000	P de la Tolerancia (Actur)	29000
Corredor verde Oliver-Valdefierro (1ª fase)	64769	Pinares de la Calle Oviedo (Torrero)	27555
Esclusas de Valdegurriana	60000	Superficie total	4335062