EL TRASVASE SUBTERRANEO DEL NACIMIENTO DEL RIO ARLANZA (BURGOS)

Eugenio Sanz Pérez *
Dr. en Ciencias Geológicas

En el presente trabajo se describe el funcionamiento hidrogeológico del karst de la cara Norte de la Sierra de Urbión. El aspecto más significativo de este acuífero es la existencia de un trasvase subterráneo de unos 14 Hm³/año de la cuenca del Ebro a la del Duero, dando lugar a la práctica totalidad del caudal de la Fuente Sanza, que es el nacimiento del río Arlanza. Se simula el hidrograma del manantial y se hacen diversas consideraciones sobre su régimen hidrológico.

Introducción

La Sierra de Urbión constituye un importante macizo montañoso de dirección Este-Oeste, cuyas cumbres alcanzan los 2.228 m de altitud. Las provincias de Soria, Burgos y La Rioja se juntan en estas montañas que hacen de divisoria de primer orden entre la vertiente mediterránea y la atlántica. Hacia Oriente y Occidente, respectivamente, esta misma alineación orográfica se prolonga en los otros Montes Distercios de Neila y Cebollera, una vez pasado El Collado de Neila (1.405 m) y el Puerto de Santa Inés (1.753 m).

En la vertiente meridional nace el Duero en Duruelo de la Sierra (Soria), como fruto de los deshielos de neveros y de las pequeñas fuentes de montaña. Nace también en Quintanar de la Sierra (Burgos) el Arlanza, al pie del Puerto de Neila y dentro del frondoso pinar que cubre la comarca. Allí surge el manadero de Sanza con un caudal medio de unos 500 l/s (Figura 1).

(*) *Profesor Titular de Hidrogeología*
Departamento de Ingeniería y Morfología del Terreno.
Esc. Téc. Sup. de Ing. Caminos, Canales y Puertos.
Madrid

Funcionamiento Hidrogeológico

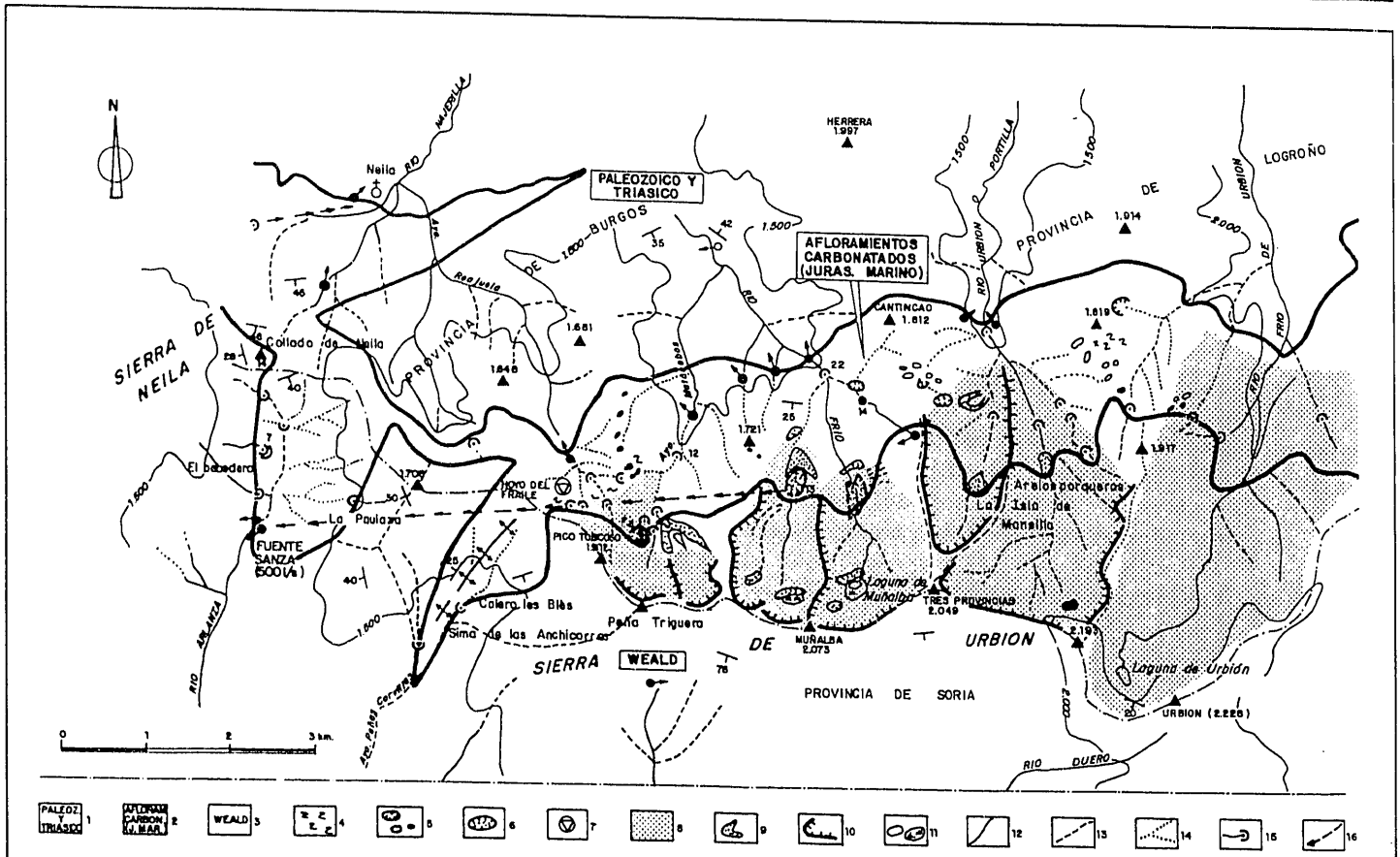
■ Naturaleza y Geometría del Acuífero de Sanza

Son las calizas jurásicas de ambiente marino las que constituyen el acuífero de la fuente de Sanza. Estos terrenos están formados por la siguiente sucesión de materiales (IGME, 1978 y 1982: en la base hay ochenta metros de carniolas y calizas dolimíticas del Rhetiense-Hettangiense. Por encima siguen unos 60 m de calizas sublitográficas sinemurienses. A continuación aparece una alternancia de calizas, margas y calizas margosas pliensbachienses-toarcienses de 65 m de espesor. Inmediatamente después se apoyan 45 m de calizas oolíticas grises y masivas del Aaleniense-Bajociense, para terminar en una alternan-

Figura 1. La Fuente Sanza, nacimiento del río Arlanza (Burgos)



Figura 2. Esquema hidrogeológico del Karst de la Sierra de Urbión



1. Paleozoico y Triásico. 2. Jurásico Marino. 3. Weald. 4. Lapiaz. 5. Dolinas. 6. Depresiones nivokársticas o glaciokársticas. 7. Pozo de nieve. 8. Área probable afectada por los hielos glaciares cuaternarios. 9. Morrenas y depósitos fluvioglaciares. 10. Bordes de circos glaciares. 11. Lagunas, terrenos anegadizos. 12. Río o arroyo permanente. 13. Arroyo temporal. 14. Valles secos. 15. Sumideros. 16. Recorrido subterráneo comprobado con trazadores.

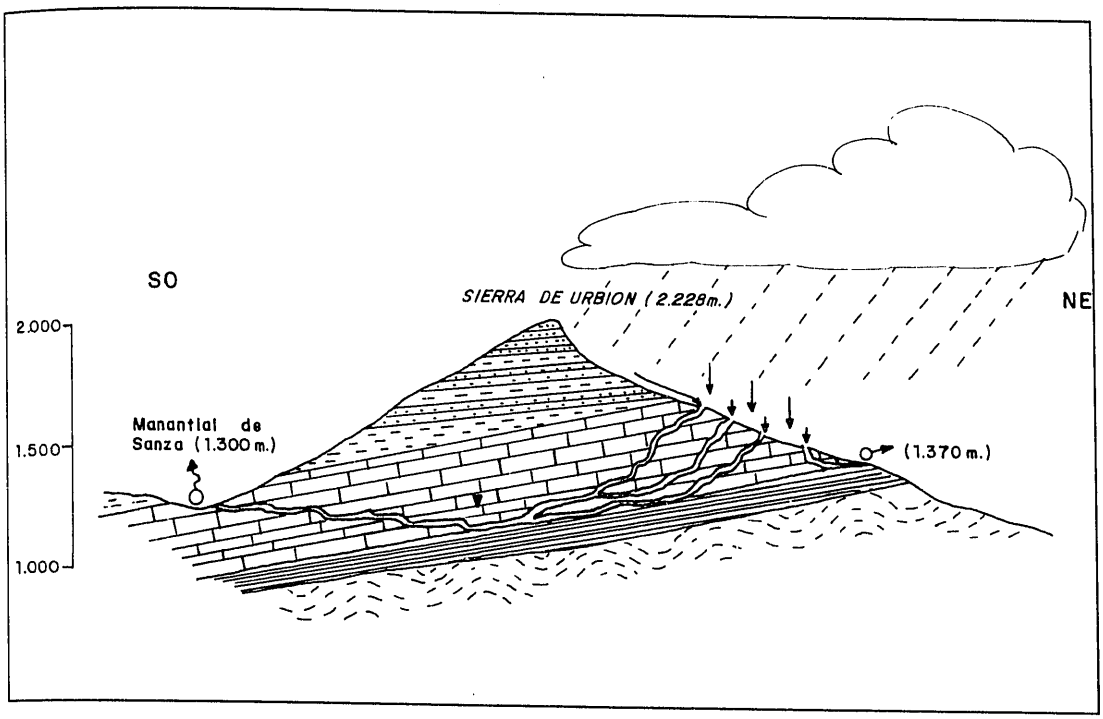


Figura 3. Corte hidrogeológico esquemático mostrando el trasvase de agua en el Karst de la Sierra de Urbión

cia de calizas, margas y calizas margosas de 100 m de potencia, de edad Bathoniense-Calloviense. Así pues, se totalizan unos 350 m de terrenos calizos jurásicos que se apoyan sobre el Triásico en facies germánica. En este piso se distinguen por tanto un Buntsandstein de areniscas y conglomerados de 60 a 90 m de espesor, un Muschelkalk calcodolimítico discontinuo de no más de 20 m de potencia, y un Keuper arcilloso que se encuentra normalmente laminado. Esta última formación es la que hace de base impermeable al acuífero. Por debajo se encuentran metareniscas y pizarras cámbricas.

Encima del Bathoniense-Calloviense y en suave discordancia se situa el grupo Tera, perteneciente a la facies "Purbeck-Weald". La unidad basal de esta facies forma parte del acuífero y está constituida por calizas lenticulares de 1 a 20 metros de espesor. Pero el grueso de esta formación lo integran una serie de areniscas, conglomerados y margas de 400 m de espesor total. La base de esta formación estratigráfica hace de límite superior del acuífero de Sanza.

Las calizas se extienden desde Sanza hasta El Collado, por donde trasmontan la divisoria. Por esta cuerda trepan al morro de San Cristobal (1.680 m), Pico del Fraile (1.781 m) y laderas del Pico de Ojoscoso (1.912 m). Desde aquí se desparraman por la vertiente del Najerilla y por la del Arlanza. En la vertiente septentrional ocupan las cabeceras de los arroyos que bajan de las cumbres de Muñalba y Urbión, hasta Montenegro y Viniegra de Arriba (Figura 2).

La estructura del acuífero es sencilla: se trata de una serie monoclinal prácticamente invariable desde Sanza hasta el Pico de Tres Cruces (1.904 m). Al principio, la serie estratigráfica queda rota y desplazada por una familia de fracturas N.NE-S.SO. Un cabalgamiento de dirección NE-SO asociado a los materiales plásticos del Keuper y que viene de Viniegra de Arriba, ha truncado la continuidad geológica del Jurásico de este sector con el de Neila, impidiendo una conexión hidráulica amplia entre los acuíferos de Neila y de Sanza. En Montenegro de Cameros la estructura cambia de dirección y estilo, pero aquí ya nos encontramos fuera de los límites del embalse subterráneo que alimenta el Arlanza.

El Triásico y el Jurásico se inclinan de 15 a 20 grados hacia el Sur. El Weald buza 9-12° también al Sur, formando una suave discordancia con el resto de la serie, como se ha dicho anteriormente.

La secuencia calcárea es la que da lugar en la zona a los manantiales más caudalosos, como es el caso de los resolladeros de Neila (200 l/s en 1990) o los manaderos de Brieba de Cameros (600 l/s en 1991) y Vinegra de Arriba. En la Cuen-

TABLA 1. SUMIDEROS DEL KARST DE LA SIERRA DE URBION

	Nº de orden	Toponimia del sumidero y/o nombre del arroyo	Cota (m.)	Capacidad máxima de filtración (l/s)	Observaciones
C. DEL. DUERO	1	El Bebedero, en un afluente del río Arlanza	1..360	>15 l/s	(1)
	2	Afluente del río Arlanza	1.365	> 5 l/s	
	3	Cabecera del río Arlanza	1.345	>10 l/s	(2)
	4	Cabecera del río Arlanza	1.340	>10 l/s	(2)
	5	Sumidero de la Paulaza, en un arroyo afluente del río Arlanza	1.450	>15 l/s	(1)
	6	Sumidero del Calero Los Bles, en arroyo de Peñas Corvillas	1.600	>10 l/s	(1)
	7	Sumidero de la Sima de las Anchicorras, en arroyo de Peñas Corvillas	1.450	>5 l/s	
CUENCA DEL EBRO	8	Tragaderos del Hoyo del Fraile, en arroyo de la Fuente de la Cueva del Hoyo	1.800	>40 l/s	(3)
	9	En arroyo de la Fuente de la Cueva del Hoyo	1.650-1.700	>30 l/s	(4)
	10	En la cuenca del arroyo de la Fuente de la Cueva del Hoyo	1.700	>10 l/s	(5)
	11	Matacebos, en arroyo Cuestarvejares	1.720	>20 l/s	(6)
	12	En arroyo Matacebos, en el desagüe de la Laguna Oruga	1.700	>10 l/s	
	13	Tragadero de Nilsa Chica	1.660	>200 l/s	(7)
	14	Tragadero del Collado Árabe		>30 l/s	(8)
	15	Sumideros del arroyo de la Fuente de los Estilos	1.700	<20 l/s	(12)
	16	Sumideros del río Frío			(9)
	17	Sumidero del río Portilla o río Urbión.	950	>500 l/s	(10)
	18	Arroyos de margen izquierda del río Frío de Urbión	1.800	>20 l/s	
	19	Arroyos de Campolengo en la margen izquierda del río Frío de Urbión	1.640	>20 l/s	
	20	Sumidero del río Frio de Urbión	1.340	30 l/s	
	21	Sumidero del Portilla	1.700	>200 l/s	(11)
	22	Sumidero del Portilla	1.700	5-10 l/s	

OBSERVACIONES: (1) Suelen ser permanentes (2) Filtraciones a través de los acarreos del cauce del río Arlanza. (3) Son más de diez sumideros puntuales de carácter temporal que filtran las aguas de fusión de las nieves. Algunos se encuentran en el fondo de pequeñas dolinas. (4) Perdederos a lo largo del cauce del arroyo que funcionan sobre todo en el deshielo. (5) Son dolinas-sumidero emplazadas en el fondo de pequeñas vaguadas de la margen derecha del arroyo de la Fuente de la Cueva del Hoyo. Funcionan en deshielos o tras lluvias intensas. (6) Hay dos sumideros al pie del pico Ojoscoso. (7) Es el sumidero más importante. Es permanente y en él muere un arroyo, bajo una peña de caliza. (8) Es de carácter puntual y permanente. En él se pierde un pequeño regato que nace de una fuente próxima. Es una dolina rellena de los sedimentos de un cono de deyección. (9) De carácter temporal y en acarreos del cauce. Vuelve a salir 300 m. más abajo. Sólo funciona en estiaje. La comunicación ha sido comprobada con trazadores. (10) Antes de la construcción del Embalse de Mansilla, el río Portilla se filtraba en estiaje 2 km. a suso de la confluencia con el Najerilla, en término de Mansilla. Volvía a salir 400 m. más abajo, en el mismo cauce. (11) El río se pierde en estío y con caudales bajos. En avenidas logra sobrepasar el afloramiento calizo. En cabecera hay un sumidero permanente. (12) Más abajo se halla la Fuente de la Cuesta.

ca del Duero encontramos la Fuente Sanza y La Fuentona de Palacios de la Sierra de 50 a 70 l/s. Todos los acuíferos a ellos asociados tienen un comportamiento hidrogeológico similar debido a que sus características litológicas y estructurales son parecidas, con recargas no sólo provenientes de la infiltración del agua de lluvia, sino también de sumideros.

Como los materiales del Weald son por lo general poco filtrantes, el acuífero de Sanza se encuentra entonces confinado o semiconfinado en profundidad. Pero la relativa alta pluviometría y nivosidad de la zona, acompañada de la existencia de importantes depósitos morrénicos, coluviales, periglaciares y de alteración, dan lugar a un manto de derrubios húmedos que de alguna manera regulan la infiltración de la lluvia y de los deshielos. Son pues muy numerosas las fuentes o burdiales en todo Pinares, por lo general de escaso caudal, aunque las hay de cerca de 10 l/s en los conglomerados wealdicos duros que sobresalen de las laderas con sus formas acastilladas. A modo de ejemplo, citaremos que en los términos municipales de Covaleda y Quintanar hay un total de 155 fuentes, lo que representa una densidad de 1 fuente por Km^2. Ello nos indica la poca permeabilidad del Weald y su relativa alta densidad de fuentes si se compara con la del karst (0,25 / Km^2).

Las Recargas del Acuífero

Hay dos formas de entrada de agua en el aparato kárstico. Por un lado la infiltración del agua de lluvia y nieve que caen sobre los 20 Km^2 de afloramientos calcáreos. Y por otro, a través de las pérdidas que hay en los arrroyos que bajan de las cumbres de Urbión, constituidas por terrenos wealdicos y que totalizan 18 Km^2. (Figura 3).

Después de un recorrido por todos y cada uno de los cauces y vaguadas de la zona realizado en distintas épocas del año durante varios años, hemos podido tener una idea de los diferentes regímenes hídricos que se presentan, y que se resumen en tres tipos generales.

Hay que destacar la presencia de valles secos en calizas por donde casi nunca corre el agua. Sin embargo, en las vaguadas de análoga superficie que están en el Weald es raro que les falte un pequeño arroyo de curso más o menos permanente.

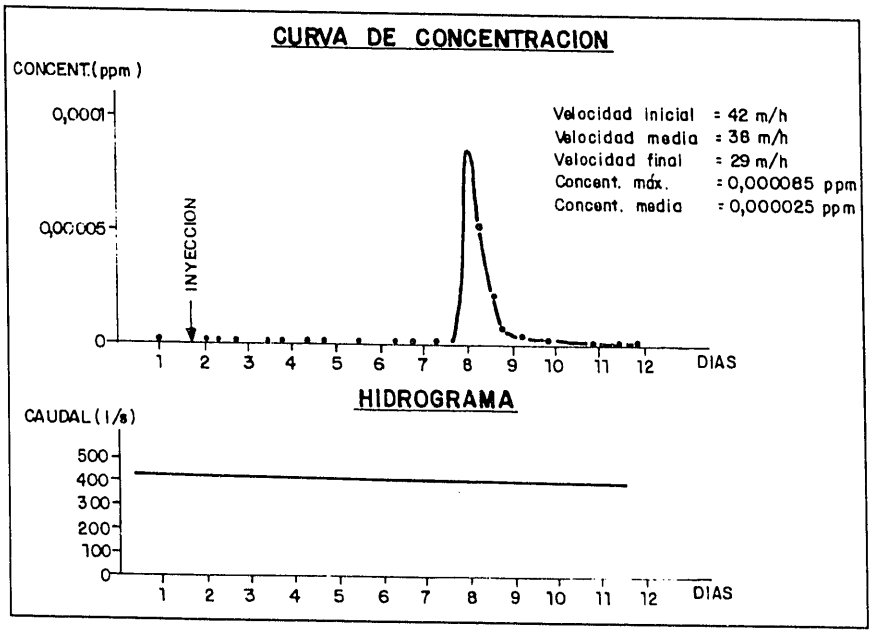


Fig. 4. Curva de concentración -tiempo de la prueba de trazador entre el sumidero de Nilsa Chica y el nacimiento del Arlanza

La existencia de un aluvial arcilloso que recubre los afloramientos calizos o el escaso grado de karstificación de éstos, hace que la infiltración sea despreciable en algunos arroyos importantes, como el del río Frío que baja de Nilsa Grande o el río Frío de Urbión. Sin embargo, en las vaguadas laterales de estos mismos valles hay sumideros.

En otros cursos de agua se localizan sumideros temporales o permanentes, dependiendo del caudal de los arroyos y la capacidad de filtración del cauce. Los perdederos ("tragaderos", como se denominan en la región) más importantes se relacionan en la Tabla I, y en la Figura 2 se indican su situación.

La superficie de alimentación de la Fuente Sanza viene condicionada por el flujo subterráneo, que al tratarse de un acuífero virgen, en régimen natural, sin sondeos de los que puedan deducirse las isopiezas, y sin apenas pruebas de trazadores, no es posible prefijar, sino por la geología. El límite inferior impuesto por la situación estratigráfica y cota de la Fuente Sanza, delimita de alguna manera sus contornos, junto con la consideración de un gradiente hidráulico en el nivel piezométrico. Así se ve como tanto la base y el techo impermeable del acuífero no bajan de 1.350 m. Más al norte el flujo regional se dirige hacia las surgencias de Viniegra de Arriba. Sin embargo, la divisoria subterránea entre el Duero y el Ebro es difícil de situar y nos inclinamos a pensar que se halla próxima al río Frío de Urbión, ya que éste no se infiltra y escapa del karst. No es ésto un criterio

definitivo, pues es posible que aunque no se verifiquen pérdidas en los cauces, tampoco hay ganancias (ríos colgados) aunque sí haya infiltración por lluvia o nieve en los afloramientos de alrededor. Hemos fijado pues con cierta reserva una superficie de 20 Km^2 en el karst y de 9 Km^2 en el Weald, ésta última no como la suma del territorio situado por encima del Jurásico calcáreo, que es más, sino teniendo únicamente en cuenta las cuencas de los arroyos que se infiltran de forma permanente o temporal.

■ El Trasvase Subterráneo del Nacimiento del Arlanza

El caudal de la Fuente Sanza no puede ser explicado por su pequeña cuenca hidrográfica (1,5 Km^2), ni por el área ocupada por las calizas que se hallan en la Cuenca del Duero (3,5 Km^2). Demostrado mediante trazadores que el acuífero de Neila está incomunicado con el de Sanza (Sanz Pérez, 1992), del que le separa un accidente tectónico importante, como hemos dicho, el área de alimentación hay que buscarla en la serie jurásica calcárea que, sin trastornos tectónicos, salta la divisoria y se prolonga con uniformidad por toda la vertiente norte de la Sierra, entre los 1.400 y 1.800 metros de altitud. El karst actua entonces como una trampa geológica que a modo de canal va recogiendo el agua de los deshielos de las cumbres y de la infiltración de agua y nieve, para terminar desaguando en el pequeñísimo apéndice que precisamente cruza la divisoria y muere en Sanza (Figuras 2 y 3). Este trasvase fue sugerido por Blasco y Rolandi (1992), quienes lo valoraron en 2 Hm^3/año.

Aunque la geología ofrecía poca discusión, quisimos confirmar, el trasvase de manera fehaciente vertiendo fluoresceina en el sumidero de Nilsa Chica, situado en la Cuenca del Ebro, a 6 km de distancia en línea recta del nacedero de Sanza, y a 1.650 m de altitud. El trazador surgió por la fuente cinco días después, demostrando la captura subterránea y la constatación del área de alimentación.

En la Figura 4 se representa la curva de respuesta (curva de concentración-tiempo) medida con un fluoroscopio de precisión. La recuperación del trazador fue elevada. Debajo se representa el hidrograma del manantial de Sanza durante la realización del ensayo, y que no varió prácticamente nada pues no llovió ni hubo deshielo. En la misma figura se indican algunos parámetros característicos en donde se destaca que la velocidad media fue de 38 m/h. La forma de la curva y estos parámetros parecen indicar la existencia de un acuífero con predominio del régimen laminar en estiaje y poca capacidad de dispersión o de mezcla de aguas.

Este trasvase, aunque modesto de caudal (14 Hm^3/año), es muy ilustrativo por varias razones. En primer lugar porque es un claro ejemplo de cómo prácticamente la totalidad del agua de descarga de un acuífero proviene de otra cuenca. En segundo lugar porque en este caso, los ríos de la cuenca perdedora (Ebro), tienen un nivel de base más bajo que la ganadora (Duero), lo que no suele ser frecuente. En efecto, contrastan las fuertes pendientes de los ríos cameranos que descienden rápidamente al Najerilla, con los del Alto Duero (Arlanza, Duero, Zumel, Revinuesa), lo que hace destacar el papel desempeñado por los condicionantes geológicos sobre los topográficos. No ocurre lo mismo en el otro gigante ibérico: El Moncayo, donde el río Araviana, afluente del Duero, se pierde para salir en el nacimiento del río Queiles, que pertenece al Ebro (Saenz García,1958).

El hecho de que la zona sea montañosa y desplobada, y que la mayor parte de la recarga se realice a través de la infiltración de lluvia o de nieve y no por la pérdida de ríos importantes que siempre llaman más la atención, ha hecho que este trasvase haya pasado desapercibido.. En Neila, sin embargo, se conserva el recuerdo de que la comunicación entre los dos puntos fue comprobada antiguamente por los pastores trashumantes, con el tintado por anilinas.

La creencia antigua y errónea de que el Duero nacía en la laguna de Urbión podría disculparse si se considera, como se ha venido demostrando, que los ríos que bajan de la cara norte de esta Sierra quedan atrapados por el karst, y que tras un corto recorrido subterráneo dan lugar al Arlanza, afluente y hermano de nacimiento del Duero.

La Fuente Sanza

La descarga del acuífero se realiza principalmente a través de la fuente Sanza, que presenta dos brotes cercanos, uno mucho mayor que otro y comunicados entre sí. Sin embargo, hay también un flujo local poco importante, sin relación

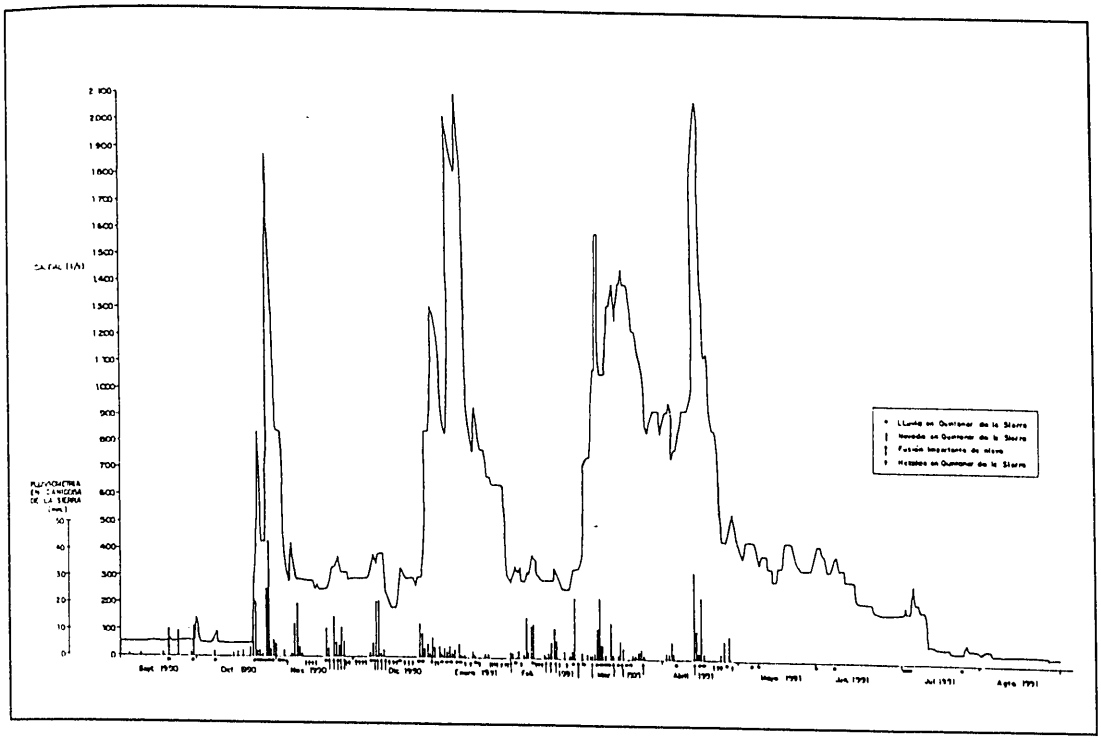


Figura 5. Hidrograma de la Fuente Sanza (IX de 1990 a VIII de 1991)

con el flujo profundo regional que da lugar a diversas fuentes de pequeño porte (de 5 a 15 l/s), próximas al contacto entre las calizas jurásicas y el Triásico (Figura 3). Son los manantiales de La Toba, Calaguera, Cuestarvergares, La Cuesta y otros más pequeños. En la junta de los ríos de cabecera que forman el Portilla, aparecen descolgados de la ladera dos manantiales de más de 30 l/s que drenan las dos partes de un sinclinal que forma el paquete calizo en un suave repliegue.

Características del régimen hidrológico de la Fuente Sanza

El manadero de Sanza ha estado controlado diariamente durante un año (de IX de 1990 a VIII de 1991), y aunque el período de medida ha sido corto, se puede comprobar que las oscilaciones del hidrograma guardan estrecha relación con las variaciones meteorológicas, lo que hace caracterizar muy bien la recarga en el acuífero kárstico.

Se trata de un manantial de régimen pluvionival, de caudal variable y sensible a la climatología de la Sierra de Urbión, tal como hemos dicho. Su respuesta es rápida a las recargas de lluvia o a las infiltraciones de los arroyos. Así, por ejemplo, las torrentas de Septiembre de 1990 o de Julio y Agosto de 1991 provocaron un aumento en el caudal que se hace notar el mismo día o un día después (Figura 5). A finales de octubre hubo una crecida notable motivada por una semana de lluvias relativamente intensas. Las crecidas más fuertes, sin embargo, son debidas al deshielo de la nieve. La nieve es una recarga muy efectiva pues se almacena y no se evapora apenas, a diferencia de la lluvia. Este deshielo depende de la cantidad de nieve acumulada en la montaña y de la temperatura. Así, se ve cómo tras las precipitaciones de nieve de noviembre y diciembre hubo heladas que la conservó en los campos. La helada del 13 de diciembre provocó una inmediata caída en el hidrograma ya que frenó el deshielo. Las heladas originaron también los mínimos que se intercalan dentro de la crecida general de enero. A finales de diciembre y enero hubo varios días con lluvias y suaves temperaturas que originó algunos picos del hidrograma. En febrero bajaron las temperaturas y se almacenó la nieve recién caída hasta llegar a marzo y abril, que es cuando se produjo el mayor deshielo. Todavía en mayo se nota cómo sube ligeramente el caudal del manantial debido a que se estaba derritiendo la escasa nieve que quedaba en las eminencias de las montañas. Los descensos bruscos del 9 y 10 de julio son producidos por un exceso de calor que evaporó el agua contenida en el suelo.

La variación de caudales de las fuentes de Sanza y de Neila guardan una estrecha relación, correlacionándose con una función potencial de segundo grado. Esta función se ajusta muy bien con

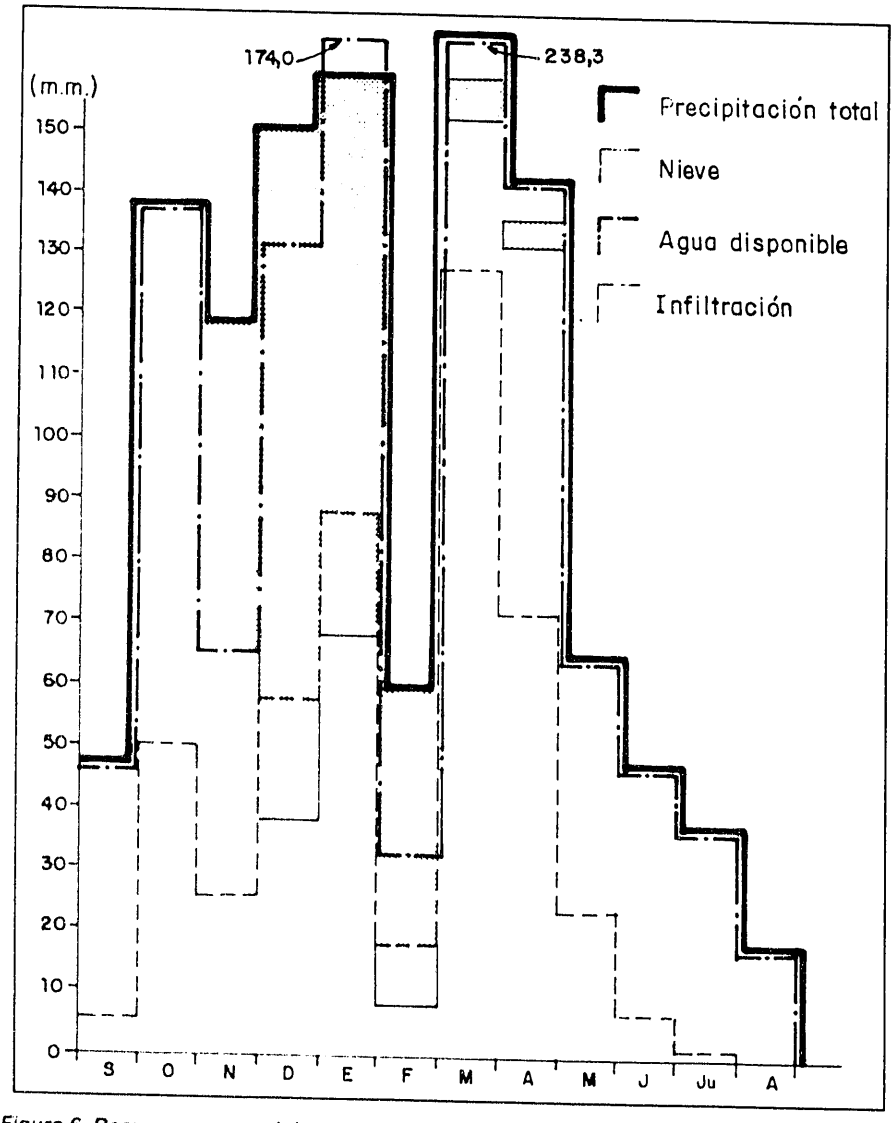


Figura 6. Resumen mensual de la fase de producción en la simulación de la Fuente Sanza.

caudales pequeños y medianos ya que para caudales altos hay mayor dispersión. Este buen ajuste no es de extrañar, ya que el modo de recarga y la estructura geológica son en ambos acuíferos muy parecidos.

■ Simulación del Manadero

A pesar de que el régimen de la fuente estaba bien definido, quisimos simular su hidrograma a fin de cuantificar detalladamente todas las variables que intervenían en él y ofrecer así una herramienta válida que pudiese servir para simulaciones más largas sin registro foronómico.

Para ello se consideró que la cuenca que alimenta la fuente de Sanza era de 29,2 Km^2 y su altitud media de 1.680 m. De estos 29,2 Km^2, algo más de los dos tercios (20,2 Km^2) presentan aflo-

ramientos calcáreos, y los 9 Km^2 restantes son terrenos wealdicos impermeables. Se puede considerar a nuestros efectos que no hay escorrentía superficial apreciable.

Se trata pues de simular el funcionamiento de dicho acuífero relacionando las entradas con las salidas, más o menos la variación de existencias en los almacenes. Puesto que se disponían de datos diarios, tanto para las variables de entrada como para las salidas, se ha tomado el día como unidad de tiempo. Aparte de los aforos diarios de Sanza, se ha dispuesto de la pluviometría diaria de Canicosa de la Sierra y las temperaturas medias diarias de la estación de Soria. Hubo que estimar la serie pluviométrica de la cuenca de Sanza en base a la de Canicosa de la Sierra (altitud 1.125 m), admitiendo un gradiente pluviométrico de 45 mm por cada 100 m de altitud, gradiente que ha sido calculado en otras zonas próximas a la Cordillera Ibérica (Fernández García, 1989). Con las temperaturas medias de Soria (altitud 1.080 m) y un gradiente de 0,5°C por cada 100 m de altitud, se han estimado las de la Cuenca de Sanza. Estas estimaciones han podido producir algunas desviaciones de la realidad, pero se cree que mantienen la evolución general de lo que ha podido ocurrir en la cuenca de alimentación y, en este sentido, habrán de tomarse los resultados, aunque en ellos se observen algunas desviaciones esporádicas.

En cuanto a la fase de producción del modelo, hay que tener en cuenta que la cuenca de alimentación del manantial de Sanza es bastante alta, pues las calizas están entre los 1.400 y 1.750 m de altitud y por encima de ellas, las otras litologías llegan hasta los 2.000 m. Ello ha obligado a considerar la precipitación en forma de nieve, lo cual constituye una reserva de agua hasta su fusión.

Para este proceso se han tenido en cuenta las experiencias y métodos de la Organización Mundial de Meteorología (I.N.M.,1975). Así, llamando P_j a la precipitación total; P^J_a, precipitación líquida; P^J_n, precipitación en forma de nieve, f_j, a la fusión de nieve; N_j, nieve acumulada en el suelo (todo en mm equivalentes de agua) y T_j a la temperatura en grados centígrados, el proceso se ha concretado de la siguiente manera:

● Forma de precipitación (nieve o agua):

Si $T_j<0$ se toma $Pi_n=P_j$

Si $0<T_j<1$ se toma $Pi_a=P_j\ T_j$ y $Pi_n=P(1-T_j)$

Si $T_j> 1$ se toma $Pi_a=Pi$

● Fusión de la nieve:

Si hay nieve en el suelo y llamamos N_{j-1} al almacén de nieve al final del día anterior Si $T_j\leq 1$, no hay fusión

Si $T_j> 1$ se toma: Fusión = $0,1\ (T_j -1)\ N_{j-1}= f_j$

● Almacén de nieve

$N_j=N_{j-1}+Pi_n-f_j$

● Agua disponible $=Pi_a+f_j$

● Infiltración = agua disponible por el coeficiente de infiltración

Teniendo en cuenta la proximidad de esta cuenca con la del Neila y que ambas son de climatología análoga, se han aplicado aquí los mismos coeficientes de infiltración obtenidos en dicha última cuenca para el mismo año.

Los resultados se han obtenido día a día y un resumen de los mismos, por meses, figuran en la Tabla II y en el Gráfico 6. A ellos se les puede hacer, entre otros, los siguientes comentarios:

- La capa de nieve apareció el 21 de Noviembre y se prolongó hasta el 15 de Mayo siguiente, o sea que permaneció durante casi medio año. Alcanzó su máximo espesor el 5 de Enero que llegó a los 146 mm. El 72% de la precipitación total fue en forma de agua y el 28% restante en forma de nieve. Este porcentaje en forma de nieve alcanzó el 68,5% durante el invierno.

- Esta capa de nieve constituyó un almacen que produjo un retraso medio en la disponibilidad del agua líquida que contenía sobre el suelo de un mes. Efectivamente:

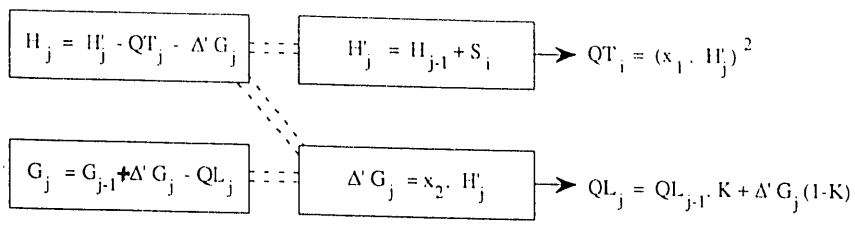
Centro de gravedad de la precipitación de la nieve: 18 de Enero
Centro de gravedad de la fusión: 28 de Febrero
Retraso Medio: 31 días

Las incidencias principales de la fusión de la nieve sobre los caudales de la fuente se produjeron en tres momentos de este año en que coincidieron la existencia de un buen almacen de nieve y la elevación de las temperaturas que pasaron de negativos a valores próximos a los 3°: Estos momentos fueron la última semana de Diciembre, la segunda de Enero y la primera de Marzo; en ellos, la fusión de la nieve superó con creces a la pluviometría, los caudales de la fuente se triplicaron y alcanzaron valores de 1.300 l/s, 2.000 l/s y 1.500 l/s, respectivamente. La simulación del régimen del manantial que se hace más adelante permite estimar esta incidencia para unas condiciones determinadas del almacen de nieve y de las temperaturas. Así, por ejemplo, para un almacen Nj =100 mm, en un día de Marzo en que el caudal del manantial fuese de 675 l/s, el almacen H=4 mm y cesasen las heladas alcanzando la temperatura los 5°, el caudal del manantial ascendería a los 1.800 l/s en ausencia de lluvias, o sea, por el sólo efecto de la fusión.

La infiltración registra un coeficiente medio anual del 43% y varía entre el 0 y el 56%, dependiendo principalmente de la temperatura.

■ Las Transferencias Subterráneas

Para las transferencias y circulación del agua en el acuífero se ha considerado que éste se ha formado por dos capas (no saturada y manto acuífero). Se ha aplicado el modelo CREC (Guillot, 1975), en su parte de transferencias, cuyo esquema operativo es como sigue:



donde:

H- Nivel de la capa no saturada
G- Nivel hidrodinámico del manto acuífero
S- Infiltración gravífica
QT - Caudal turbulento
QL - Caudal laminar
x_1- Parámetro de vaciado de H por el caudal turbulento
x_2- Parámetro de filtrado de H en el acuífero
K - Parámetro del caudal laminar

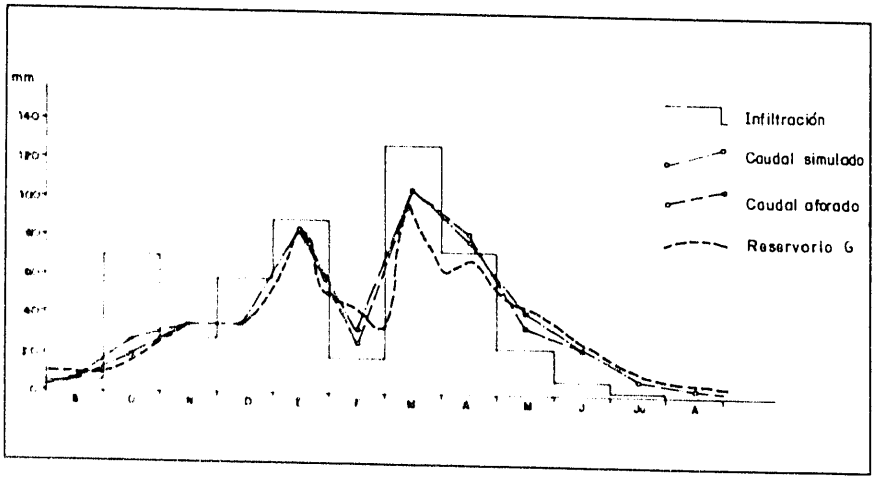


Figura 7 Resumen mensual del flujo subterráneo de la Fuente Sanza. Año 1990-91

Después de varios tanteos para el ajuste del modelo con los datos aforados, se han adoptado los siguientes valores para los datos iniciales y parámetros:

Valores iniciales: QL_0 = 0,2 mm; H_0 = 1 mm; G_0 = 10 mm

Parámetro: x_1=0,08; x_2=0,4; K=0,96

El parámetro $K = e^{-\alpha}$ responde a un coeficiente de agotamiento α=0,04 (día)$^{-1}$. Dada la forma alargada del acuífero en que la fuente se situa en un extremo de la mayor dimensión, se ha estimado que el caudal turbulento tarda 2 días en llegar, por lo que se ha calculado el caudal total

$$Q_j = QL_j + QT_{j-2}$$

También se ha observado que el caudal turbulento tiene un tope superior de drenaje de 3 mm=1.013 l/s.

En la Tabla III se ofrecen los resultados tanto de QL como de QT y caudal total; para su contraste se reflejan también, en la misma unidad de medida, los caudales aforados. Se han calculado también, para cada periodo de tiempo, los niveles de H y G. En el Gráfico 8, se reflejan los hidrogramas, aforado y simulado, así como la evolución de la inflitración gravítica y de los niveles de los almacenes G y H+G. Como resumen de estos resultados, en la Tabla III y Gráfico 7 se reflejan los resultados mensuales.

Todos los datos vienen expresados en mm. como espesor de una capa de agua extendida sobre los 29,2 km^2 de superficie del acuífero. Si los caudales se quisiesen expresar en l/s bastaría con multiplicar por 338,07.

■ Análisis de resultados

La observación de la Gráfica 8 pone de manifiesto que el caudal simulado refleja con bastante aproximación todas las variaciones diarias del caudal aforado; igual puede observarse respecto a los valores mensuales en la Gráfica 7. Quizás pueda apreciarse que el método de simulación es algo más lento para reaccionar, tanto a las crecidas como a los descensos del manantial, pero creemos que estas diferencias pueden tener su origen en las estimaciones de los datos de entrada (pluviometría y temperatura) en base a las estaciones que están fuera de la cuenca.

El balance del año según lo simulado es como sigue:

	En mm	En Dm^3
Existencias en depósitos en 1-IX-90	11,0	321,2
Infiltración	481,5	14.058,8
	492,5	14.381,0
Salidas:	486,6	14.208,7
Caudal Turbulento	75,0	2.190,0
Caudal Laminar	411,6	12.018,7
Existencias en depósitos en 31-IX-91	5,7	166,4

Los depósitos de agua subterránea han quedado reducidos a la mitad y ello está de acuerdo con la misma proporción entre los caudales de septiembre-90 y agosto-91.

El caudal turbulento ha supuesto durante este año el 15,4% del caudal total, pero esta proporción es muy variable; así, en algún mes ha ascendido al 37,5% y durante más de 15 días, a continuación de fuertes aguaceros, ha superado al caudal laminar.

Por lo que se refiere a los almacenes se destaca el diferente comportamiento de ambos: el H de la capa no saturada manifiesta grandes oscilaciones, con un llenado y vaciado bastante rápido. Sus niveles más altos se han registrado a mediados de enero, marzo y abril con valores de 11,7,

TABLA II

Meses	Temperatura Media(°)	Precipitación	Forma de precipitación		Fusión Nieve	Existencias de agua por mes	Agua Disponible	Infiltración	Coeficientes de Infiltración
			Agua	Nieve					
Septiembre 1990	14,1	45,7	45,7	-	-	-	45,7	6,3	0,14
Octubre 1990	8,3	135,3	135,3	-	-	-	135,3	50,1	0,37
Noviembre 1990	3,0	119,0	64,9	54,1	0,3	53,8	65,2	26,7	0,41
Diciembre 1990	-0,6	151,3	38,4	112,9	24,3	72,4	132,7	58,5	0,44
Enero 1991	-0,7	158,0	68,3	89,7	105,7	56,4	174,0	88,8	0,51
Febrero 1991	-1,0	57,1	8,7	48,4	24,4	80,4	33,1	18,5	0,56
Marzo 1991	3,9	158,3	152,9	5,4	85,4	0,4	238,3	127,7	0,53
Abril 1991	3,9	136,3	132,6	3,7	4,1	-	136,7	72,5	0,53
Mayo 1991	6,9	63,8	63,4	0,4	0,4	-	63,8	24,3	0,38
Junio 1991	13,4	45,9	45,9	-	-	-	45,9	7,3	0,16
Julio 1991	17,6	35,7	35,7	-	-	-	35,7	0,8	0,02
Agosto 1991	19,8	17,6	17,6	-	-	-	17,6	-	-
Año	**7,2**	**1.124,0**	**809,4**	**314,6**	**314,6**	-	**1.124,8**	**481,5**	**0,43**

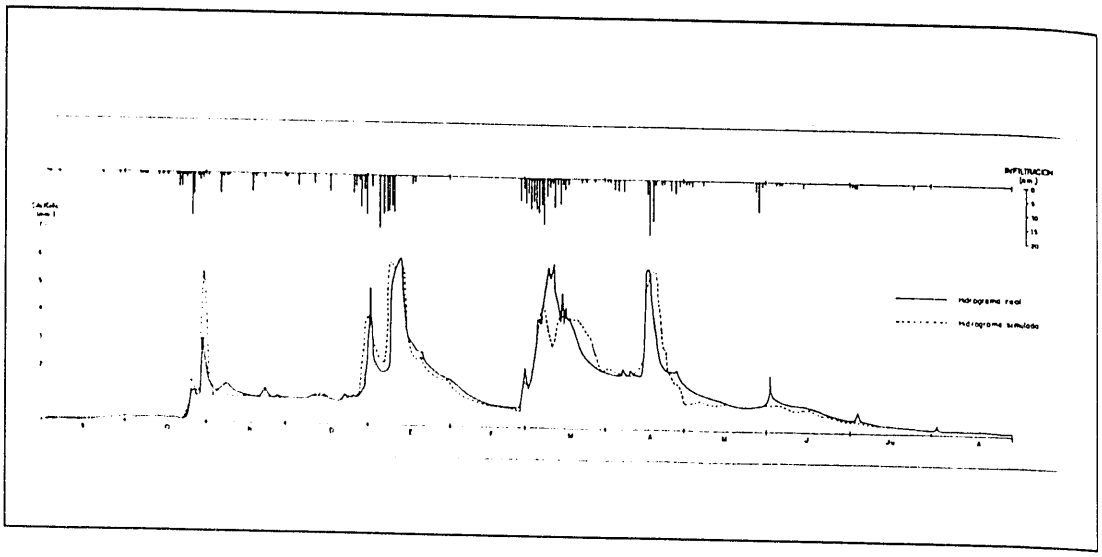
12,3 y 14,9 mm., respectivamente. Por el contrario, el G del manto acuífero presenta oscilaciones más suaves, principalmente en los descensos; partiendo de un valor inicial de 10 mm., llegó al 12 de enero con un máximo que ascendió a 88 mm., seguido de unos descensos que cambian a finales de febrero, el 16 de marzo vuelve a alcanzar otro máximo de 87,8 mm. Después de este máxi-

TABLA III

Meses	S	QT	A'G	H	QL	G(1)	Q	Caudal Aforado
Septiembre	6,3	-	6,5	0,8	5,0	11,5	5,0	6,1
Octubre	50,1	6,4	40,8	3,7	12,7	39,6	19,1	27,2
Noviembre	26,7	2,0	28,0	0,2	23,9	33,7	35,9	33,5
Diciembre	58,5	7,1	41,3	10,3	27,2	47,8	34,3	35,5
Enero	88,8	20,0	78,9	0,2	76,3	50,4	96,3	96,4
Febrero	18,5	2,4	13,0	3,3	29,6	33,8	32,0	25,2
Marzo	127,7	24,2	106,4	0,4	80,8	59,4	105,0	104,3
Abril	72,5	10,3	62,0	0,6	69,0	52,4	79,3	81,5
Mayo	24,3	2,1	17,7	5,1	39,9	30,2	42,0	33,8
Junio	7,3	0,5	11,7	0,2	25,6	16,3	26,1	23,4
Julio	0,8	-	0,8	0,2	8,5	8,6	8,5	8,6
Agosto	-	-	-	0,2	3,1	5,5	3,1	3,2
Total	**481,5**	**75,0**	**407,1**	-	**411,6**	-	**486,6**	**478,7**

(1) A final de cada mes

Fig. 8. Hidrograma real y simulado del manantial de Sanza.



mo aún vuelve a tener otro el 16 de abril, fecha a partir de la cual los descensos son continuos para acabar con 5,5 mm. a finales de agosto. Las reservas de Abril suponian por lo tanto un volumen de agua de 2.067 Dm^3

Para los resultados del modelo CREC se han aplicado los siguientes parámetros:

- Coeficiente reductor del caudal turbulento $x_1=0,08$
- Coeficiente reductor de circulación en el acuífero $x_2=0,4$
- Coeficiente del caudal laminar $K=0,96$

El primero de ellos tiene un valor próximo al que suele presentarse en acuíferos karsticos, donde el caudal turbulento tiene cierta importancia.

El segundo suele expresarse por $1/x_2=2,5$ como valor del tiempo medio que tarda el agua en atravesar la capa no saturada.

El tercero está en función del coeficiente de agotamiento ya que $K= e^{-\alpha}$; de ello resulta que el coeficiente de agotamiento del manantial es $\alpha=0,04$ $(días)^{-1}$.

Agradecimientos

Este trabajo fue financiado mediante el Proyecto de Investigación Nº PS90-0012 de la DGICYT del Ministerio de Educación y Ciencia sobre recarga natural de acuíferos. Deseamos agradecer a D. Víctor Arqued, de la Confederación Hidrográfica del Ebro, por habernos facilitado los datos de aforo del manantial de Sanza.

Bibliografía

- Blasco Merguedas, O. y Rolandi Sánchez-Solís, M. (1992). Contribución al conocimiento de la hidrografía de la Unidad Mansilla-Neila (La Rioja-Burgos-Soria). III Congreso Geológico de España. Salamanca. Actas. Tomo 2, pp 251-255.
- Fernández García, F. (1989). Gradientes térmicos y pluviométricos de dos sectores de la Ibérica: Demanda. Urbión y Albarracín. I Encuentro Nacional de Estudios sobre El Moncayo. Ciencias de la Naturaleza. Turiaso IX. Tomo I. Tarazona, pp 245-260.
- Guilbot, A. (1975). Modélisation des ecoulements d'un aquifere karstique (liasons pluie-débit). Aplication aux bassins de Saugras et du Lez. These d'Université, USTL. Montpellier, 110 págs.
- Instituto Geológico y Minero de España (1978). Mapa geológico de España E=1/50.000. Canales de la Sierra.
- Instituto Geológico y Minero de España (1982). Mapa geológico de España E=1/50.000. Villoslada de Cameros.
- Instituto Nacional de Meteorología (1975). Comparación entre modelos de escorrentía de nieve fundida. Organización Mundial de Meteorología. Informe núm. 23. Ginebra, 240 págs.
- Sáenz García, C. (1958). Miscelánea de la historia fluvial española. Notas y Comunicaciones del IGME, núm. 50, pp. 149-180.
- Sanz Pérez, E. (1992). El karst de la Sierra de Neila (Burgos). V Simposio de Hidrogeología. Alicante, pp. 83-96.