

Análisis de las disponibilidades hídricas de los torrentes de Son Real y Binicaubell (Mallorca-España) para su utilización en la recarga artificial del acuífero de la Marineta

J. M. Murillo⁽¹⁾, J. A. de la Orden⁽¹⁾ y C. J. Gavilán⁽²⁾

(1) Instituto Geológico y Minero de España c/ Ríos Rosas 23. 28003. Madrid. España.

jm.murillo@igme.es; ja.delaorden@igme.es

(2) Iberdrola S.A. Cofrentes. Valencia. España.

cgavilan@iberdrola.es

RESUMEN

Se presenta un bosquejo histórico de las principales propuestas y actuaciones de recarga artificial que se han realizado en la isla de Mallorca. Se describe someramente la única experiencia que en estos momentos se encuentra en funcionamiento y se hace mención a la propuesta del Plan Hidrológico de la Demarcación de Baleares para regular aguas de escorrentía mediante recarga artificial de acuíferos. Ésta podría incluir los torrentes de Son Real y Binicaubell, por lo que se presenta el análisis de disponibilidades que se ha realizado en los mismos. La metodología utilizada se ha fundamentado en la realización de un análisis climático de las cuencas en estudio, así como de las aportaciones que circulan por los torrentes de Son Real y Binicaubell. También se ha cuantificado el caudal que se infiltra de forma natural en estos torrentes y el excedente que se vierte en el mar. El estudio ha hecho uso de métodos estadísticos como la autocorrelación.

Palabras clave: disponibilidad hídrica, función de autocorrelación, Mallorca, recarga artificial

Analysis of water availability from Son Real and Binicaubell torrents (Mallorca-Spain) for use in the artificial recharge of the La Marineta aquifer

ABSTRACT

The history of artificial recharge of groundwater in Majorca island is explained in this paper. Too, a brief description of the only experience now working is shown, and an overview of the proposal of the Hydrogeological Plan of the Demarcation of Baleares for the regulation of runoff by means of the artificial recharge of aquifers is presented. This should include Son Real and Binicaubell torrents; so, an assessment of their water surpluses to determine water availability for artificial recharge is analyzed. The methodology used is based on a climatic analysis in the studied basins, as well as on the Son Real y Binicaubell torrents water inflow. Water naturally infiltrated through these torrents' beds and surpluses flowing to the sea are also quantified. The statistical analysis involves methods such as autocorrelation.

Key words: artificial recharge, autocorrelation function, Mallorca, water availability

Antecedentes

El rápido desarrollo turístico experimentado por el archipiélago Balear, durante la década de 1960, provocó que se generara un incremento espectacular de la demanda de agua para abastecimiento urbano, especialmente en la isla de Mallorca.

Este aumento de las necesidades hídricas para consumo humano, unido a un mayor gasto de agua por expansión del regadío, motivó que la isla de Mallorca fuera una de las primeras zonas de España donde se tuvo conciencia de la necesidad de empre-

der estudios de carácter hidrogeológico para cuantificar y proteger la disponibilidad de los recursos hídricos.

Este sentimiento de preocupación se tradujo en la publicación del Decreto-Ley nº 11 de 16 de Agosto de 1968 y, posteriormente, de la Ley 58, de 30 de Junio de 1969, que afectaban al régimen jurídico de los alumbramientos de aguas subterráneas de la isla, así como a la creación de un Comité de Coordinación integrado por representantes de los Ministerios de Obras Públicas, Industria y Agricultura, que debería realizar un estudio Regional de los Recursos

Hidráulicos Totales de la isla. Años más tarde, mediante Decreto de 27 de Marzo de 1972, se aprobó la ampliación de dicha investigación hidrogeológica a las islas de Ibiza y Formentera.

El Comité de Coordinación estableció y consensuó, previamente al inicio del proyecto, un índice de trabajo y un Plan de Operaciones. El estudio fue realizado y financiado por el Servicio Geológico de Obras Públicas (Ministerio de Obras Públicas), Instituto Geológico y Minero de España (Ministerio de Industria) e Instituto de Reforma y Desarrollo Agrario (Ministerio de Agricultura). Los conocimientos adquiridos durante esta etapa se resumieron, para una mejor difusión y utilización, en un único Informe General de Síntesis (SGOP-IGME-IRYDA, 1973). En este informe se concretaban una serie de actuaciones de diversa índole, que contemplaban, en ciertos casos, un posible aprovechamiento de los recursos pluviales mediante operaciones de recarga artificial de acuíferos, aunque se advertía que, dado el régimen torrencial de los recursos superficiales, no podrían utilizarse, normalmente, dichos recursos para recargar a los acuíferos con pozos, balsas o pequeñas represas.

La propuesta formulada en el documento anteriormente referenciado incluía únicamente a los embalses subterráneos de Estremera y La Marineta, como acuíferos potencialmente aptos para ubicar dispositivos de infiltración artificial. El citado en primer lugar se podía recargar, según dicho documento, bien con pozos o bien con balsas, que utilizarían, como fuente de agua, los aportes del torrente de Sóller. En La Marineta, acuífero favorecido por una topografía suave y llana, se proponía el empleo de pequeños azudes y canales de lecho filtrante, que permitirían la percolación del agua, que esporádicamente circula por los torrentes de Son Bauló, Binicaubell y Na Borges.

El informe de síntesis también planteaba la posibilidad de utilizar embalses de vaso permeable, como dispositivos de infiltración, aunque ofrecía unas escasas expectativas de éxito, por lo que no recomendaba, en principio, la construcción de ninguna obra de este tipo. Las opciones que barajó hacían referencia, tanto a represas concebidas y diseñadas específicamente sobre cerradas con una elevada percolación, como a embalses diseñados inicialmente como elementos de almacenamiento de escorrentía superficial, pero que posteriormente se habían desestimado por su alto coste de impermeabilización o por consideraciones de índole geotécnico.

Las propuestas de obras potencialmente aprovechables incluían el embalse de Orient, que podría recargar la unidad de Estremera, así como el embal-

se de Ternellas, que había sido desechado durante el estudio previo de viabilidad por la existencia de ofitas permeables en su vaso y por la presencia de yesos en la cerrada, pero que, tras un estudio de rentabilidad, quizás podía recargar al acuífero dolomítico que se localizaba en su borde occidental.

Otros embalses, como el de Puigpuñet, que recargaría el burdigaliense de la primera escama de la sierra Norte, o el de Estamblimens, que recargaría el acuífero del Llano de Palma, no parecían económicamente viables, ya que, en el primer caso, resultaba difícil determinar el lugar idóneo donde captar los recursos infiltrados en el embalse, y, en el segundo, casi no existían volúmenes de agua a embalsar, dada la gran infiltración natural que se produce en el lecho del torrente y los escasos recursos que se pierden en el mar.

Las actuaciones anteriormente formuladas sólo constituyeron una iniciativa que no traspasó las fronteras de un sencillo estudio teórico, aunque no tuvo que transcurrir mucho tiempo, desde la publicación en marzo de 1973 del Informe de Síntesis General sobre el Estudio de los Recursos Hidráulicos Totales de las Islas de Mallorca e Ibiza, para que en el año 1976 se iniciara una primera experiencia de recarga artificial de acuíferos en el territorio Balear.

La operación de infiltración que se programó perseguía el doble objetivo de incidir positivamente sobre el balance hídrico de un acuífero y frenar, en lo posible, la intrusión de agua de mar. La experiencia se localizó en el acuífero del Llano de Palma, fue gestionada por el IRYDA y la empresa EMAYA, y el seguimiento de la misma, hasta casi finales de la década de los ochenta de la pasada centuria, fue realizado por el Instituto Geológico y Minero de España.

El agua introducida en el acuífero procedía de la planta de tratamiento de aguas residuales de San Jordi. El efluente producido por esta instalación se utilizaba directamente en regadío, aunque el excedente, variable a lo largo del año, se introducía en una formación calcarenítica permeable a través de 7 pozos de inyección (Iglesias, 1986). La calidad del agua de recarga se consideraba aceptable, sobre todo comparada con la del acuífero en esa zona, que se encontraba salinizado. A partir del año 1987 toda el agua tratada se comenzó a utilizar íntegramente en los regadíos establecidos en la zona, ya que éstos se ampliaron, aunque se conservaron dos pozos operativos para inyectar posible sobrantes (IGME, 1987).

A lo largo de las décadas de 1980 y 1990 se realizaron algunas pequeñas actuaciones de recarga artificial en la zona norte de la isla de Mallorca (Artá y torrente de San Miguel), así como en el acuífero de Estremera con agua potable procedente de los exce-

dentes de los embalses del Gorg Blau y Cúber (BOIB, 1997). Algunas de estas experiencias se describen a continuación.

El proyecto de ordenación agrohidrológica de Artá (Genovart, 1996) fue elaborado y aprobado en 1990 por la entonces denominada Consellería de Obras Públicas y Ordenación del Territorio del Govern Balear. Su objetivo estribaba en actuar sobre las torrenteras del macizo de Artá, para evitar la erosión de las cuencas, cuando se producen episodios de lluvia torrencial. Como efectos colaterales se citaban la laminación de avenidas y el incremento del agua pluvial infiltrada en los acuíferos.

De acuerdo con las especificaciones contenidas en el proyecto se construyeron seis pequeñas presas distribuidas en puntos estratégicos de los torrentes des Parral (vertiente de la Colonia de Sant Pere), des Revoles, des Cocons, des Coloms, sa Palmera y Can Puceta.

El resultado obtenido en estas experiencias se catalogó por la Administración hidráulica Balear de satisfactorio, ya que una vez levantados los diques de contención no se produjeron destrozos por causa de la impetuosidad de las aguas. Este mismo argumento esgrimieron los vecinos y el Ayuntamiento de Artá, para solicitar la construcción de dos nuevas obras en los torrentes de Betlem (o de S'Ermita) y de sa Devesa (o de Castellet). El coste aproximado de ambos proyectos hidráulicos, que se iniciaron a finales del año 1996, fue de 335.000 Euros.

No se tiene constancia de la existencia de estudios relacionados con la evaluación y cuantificación del efecto que, sobre el acuífero, causa la infiltración de los volúmenes de agua, que esporádicamente retienen estos pequeños embalses de vaso permeable.

La recarga artificial del acuífero de Estremera, a partir de agua potable procedente de los excedentes de los embalses del Gorg Blau y Cúber (12 hm³ de capacidad), tenía el objetivo de paliar la fuerte sobreexplotación a que se encuentra sometido el acuífero, que alcanza descensos de más de 100 metros (MMA-IGME, 1997). No obstante, el volumen de agua que vierten estos embalses, que gestiona la empresa pública Emaya desde el año 1973, es escaso en cifras absolutas y sobre todo muy esporádico, aunque cuando el hecho tiene lugar resulta extremadamente espectacular. En los últimos 10 años se ha vertido agua por los aliviaderos de estos embalses únicamente en 6 ocasiones. Concretamente una vez en los años 2007, 2004, 2003 y 1997, y dos veces en el año 2002. El volumen de agua recargado en el acuífero de Estremera durante el año 2003 fue de 1,9 hm³ (CAP, 2007).

Dado que el acuífero de Estremera lo constituyen

carniolas y dolomías infraliásicas, así como carniolas, dolomías y calizas liásicas, que presentan una permeabilidad muy elevada, no se han detectado hasta la fecha problemas de colmatación en las instalaciones de recarga artificial, que son de tipo sondeo, aún cuando no se controlan los sólidos en suspensión que lleva el agua de recarga. La transmisividad del acuífero es como mínimo de 1500 m²/d, pero hay zonas, como la escama de Namarich, donde se alcanzan valores de 50000 m²/d (MMA-IGME, 1997).

La recarga a los acuíferos también se produce de forma natural, durante los eventos en que los embalses vierten agua, ya que el agua que rebosa desde el embalse de Gorg Blau baja por el Torrente de Pareis hasta el mar y la que desborda desde el embalse Cúber transita por el Torrente de l'Almadrà hasta el centro de la isla, infiltrándose parte o todo el agua que circula por dichos torrentes en los acuíferos que atraviesan. No se han realizado estudios que cuantifiquen el valor de dicha recarga.

La operación de recarga artificial anteriormente descrita no parece que pueda resolver los problemas de desabastecimiento que sufre la Bahía de Palma, ni los de sobreexplotación que aquejan al acuífero de Estremera. Por esta razón, a principios de este siglo se retoma (BOE, 2000 y BOIB, 2002) la idea, ya propuesta en 1973, de realizar la operación de recargar artificialmente el acuífero de Estremera con recursos del Torrente de Sóller (SGOP-IGME-IRYDA, 1973), pero en esta ocasión complementada con aguas provenientes del manantial de Sa Costera (BOE, 2000 y BOIB, 2002).

Dicho proyecto (BOE, 2000) consiste en la captación de una parte de la aportación hídrica que se producen en la Sierra de Tramontana; la ejecución de las conducciones e infraestructuras necesarias para transportar y conectar el agua captada con las redes de abastecimiento de los núcleos urbanos de Sóller, Bunyola, Palmanyola y Palma de Mallorca; y, por último, en la construcción de las instalaciones necesarias para destinar una parte del agua captada a recargar el acuífero de Estremera. Con este conjunto de actuaciones se pretende evitar el eventual déficit de agua que ocasionalmente tiene lugar en el valle de Sóller; aumentar la garantía de suministro e incrementar los recursos hídricos disponibles para el abastecimiento a la bahía de Palma; y paliar la sobreexplotación en el acuífero de Estremera.

La aportación anual media de agua que se pretende regular asciende a 10 hm³/a, aunque puede llegar a un máximo de 13 hm³/a. Ésta procederá (máximo de 9 hm³/a) de la fuente de Ses Font de Verger, más conocida como Sa Costera, que es un manantial que aflora en un acantilado de la costa norte de Mallorca;

y en una cuantía máxima de 4 hm³/a de los manantiales de S'Olla, Na Lladonera y resto de torrentes con circulación esporádica de agua que en épocas de lluvia alimentan al Torrente Mayor del Valle de Sóller (BOE, 2003-a y BOE, 2003-b).

El esquema de funcionamiento que se ha previsto es el siguiente: Captación del agua que mana en la fuente de Sa Costera y conducción hasta el Puerto de Sóller mediante una tubería submarina de 9.060 m de longitud, 1.000 mm de diámetro y 1,4 m³ de capacidad máxima. Almacenamiento en el Puerto de Sóller de esta agua junto a los excedentes que provienen del Torrente Mayor del Valle de Sóller en un depósito de regulación de 44.000 m³ de capacidad. Impulsión (8 km) y conducción por gravedad (13 km) de un caudal máximo de agua de 1,8 m³/s, que se almacenará en un depósito y se tratará en una estación de potabilización (Son Pacs), desde donde se distribuirá a las poblaciones de Sóller, Fornalutx y Bunyola, a la urbanización Palmanyola, a la bahía de Palma y a la instalación de Almacenamiento Subterráneo con Recuperación (ASR) de Estremera, que estará constituida por ocho pozos de 550 mm diámetro y 200 m profundidad, que permitirán tanto la recarga como la extracción de agua mediante bombas sumergidas (BOE, 2003-a y BOE, 2003-b).

La financiación y la ejecución de las obras dependen del Ministerio de Medio Ambiente y cuentan con subvención de la Unión Europea. El presupuesto inicial era de 56 millones de euros (Ambienta, 2002), aunque posteriores modificaciones presupuestarias lo dejaron en un coste definitivo de 78.310.000 euros (Europapress, 2009). El sistema ha entrado en funcionamiento a principio del mes de enero de 2009.

A parte de la anterior actuación, la Propuesta del Plan Hidrológico de la Demarcación de Baleares también contempla en su programa número 6. "Recarga Artificial de Acuíferos y Almacenamiento-Recuperación" otras propuestas de recarga artificial, para regular las aguas de escorrentía, que circulan en determinadas épocas del año por algunos de los torrentes de la isla (DGRHGIB; 2008). Entre estos se podrían encontrar los torrentes de Son Real y Binicaubell, que eran una de las actuaciones que se citaban en el estudio Regional de los Recursos Hidráulicos Totales de la isla de Mallorca del año 1973.

Objetivo y metodología

Un condicionante totalmente necesario para acometer cualquier tipo de recarga artificial de acuífero es la disponibilidad de agua en una cantidad y una calidad

tal que permitan la viabilidad técnica y económica de la operación de recarga artificial.

El objetivo del trabajo que se muestra en el presente artículo es la evaluación y cuantificación de los volúmenes excedentarios de agua, que circulan por los torrentes de Son Real y Binicaubell, para su utilización en la recarga artificial del acuífero de la Marineta.

El diagrama secuencial de los estudios que se han realizado, dentro del procedimiento metodológico que se ha utilizado, se indica a continuación:

- Caracterización geológica e hidrogeológica
- Análisis de las disponibilidades hídricas que consta de:
 - Análisis climático.
 - Análisis de la distribución espacial de las aportaciones.
 - Análisis de la distribución temporal de las aportaciones.
 - Cuantificación del caudal infiltrado de forma natural a través del lecho de los torrentes.

Desarrollo metodológico y presentación de resultados

Caracterización geológica e hidrogeológica

La cuenca del torrente de Son Real y de su afluente el torrente de Benicaubell (Figura 1) discurre en su tramo alto por la zona norte de la antigua unidad hidrogeológica 18.15 "Sierras Centrales" y en su tramo bajo por el tercio central de la antigua unidad hidrogeológica 18.16 "La Marineta" (DGOH-ITGE, 1988). En la actualidad estas unidades hidrogeológicas se corresponden en prácticamente toda su extensión con las masas de agua subterránea de Ariany (18.15-M1) y Son Real (18.16-M2) (DGRHGIB, 2009).

Los principales acuíferos que se identifican en la zona los constituyen calcarenitas eólicas del cuaternario, calizas arrecifales del Mioceno superior y dolomías karstificadas del Lías. La transmisividad en estas últimas puede alcanzar los 30000 m²/d, mientras que en los materiales calcáreos del Mioceno puede variar entre 40 m²/d y 2000 m²/d (ITGE, 1997).

La principal presión que afecta a estas masas de agua subterránea es la elevada extracción de recursos hídricos en la masa de Ariany (ITGE, 1997) y la intrusión marina en la masa de Son Real (López-García y Mateos, 2003). De acuerdo a las directrices de la Directiva Marco se ha catalogado de "prorrogable" a la masa de agua subterránea de Ariany (DGRHGIB, 2009), por no poderse alcanzar los objetivos de buen estado ecológico en el plazo previsto, pero donde es posible implantar las medidas y mejo-

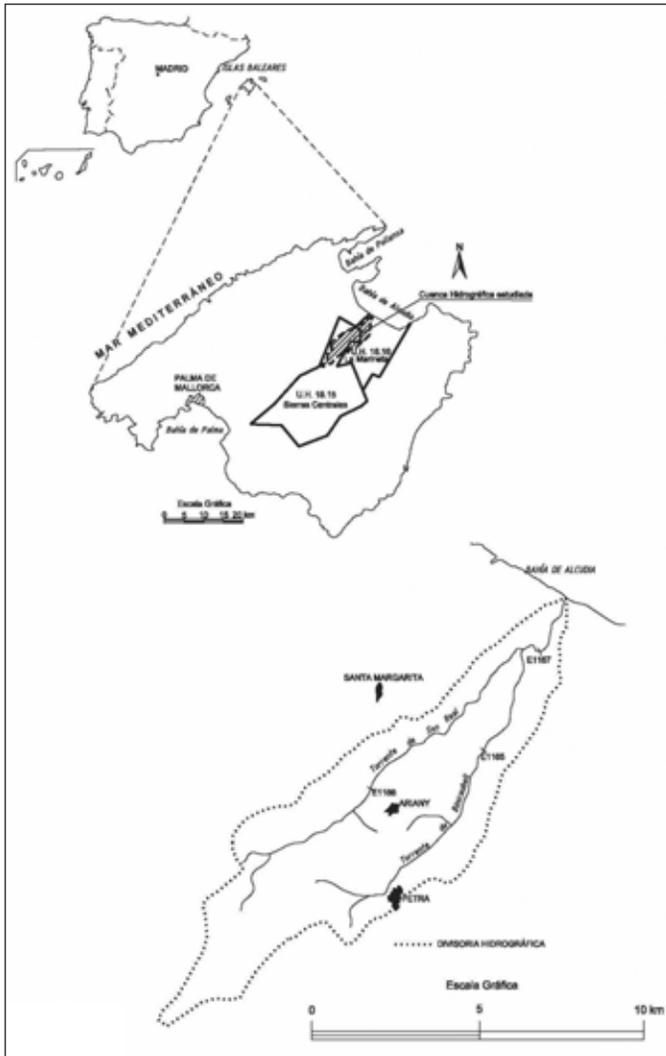


Figura 1. Localización geográfica de la cuenca en estudio y situación de las estaciones de aforo
 Figure 1. Geographic location of the basin of study and situation of the phoronomic control stations

que cubre una gran extensión. Los suelos presentan una gran capacidad de infiltración y bajo potencial de escurrimiento debido a su alta permeabilidad.

Análisis de las disponibilidades hídricas

Análisis climático

La realización del estudio climático se ha abordado a partir de los datos suministrados por la Agencia Estatal de Meteorología (antiguo Instituto Nacional de Meteorología) para la estación pluviométrica B682. La elección de dicha estación se ha debido a dos causas. La primera es su cercanía a las estaciones foronómicas que controlan el caudal que circula por los torrentes de Son Real y Binicaubell. La segunda a su situación geográfica, pues se encuentra en la población de Muro, que se localiza en las inmediaciones del acuífero de la Marineta, que es el embalse subterráneo que se pretende recargar.

En la tabla 1 se suministra los valores anuales y mensuales de la precipitación en la estación B682 para el periodo analizado, y en la tabla 2 sus valores medios, máximos y mínimos, las desviaciones promedio y estándar, y el coeficiente de variación. A partir de los datos contenidos en dichas tablas se ha procedido a determinar la función de distribución de Goodrich (Tabla 3 y Figura 2), que permite establecer de acuerdo a los intervalos de probabilidad que se muestran en la tabla 4 los años hidrológicos con tipología húmeda, media y seca (Tabla 5).

El comportamiento hiperanual de las precipitaciones se puede analizar a partir de la Figura 3 y de la tabla 1. Dicho comportamiento se caracteriza tanto por una ciclicidad de la serie estudiada, se detectan dos ciclos con un periodo de retorno aproximado de

ras necesarias para lograrlos en el año 2027. La masa de agua subterránea de Son Real se ha catalogado de "excepcional" (DGRHGIB, 2009), ya que se estima que por una u otra causa no alcanzará nunca el buen estado. Con el término excepcional se significa en la Directiva Marco aquellas masas de agua que se les pueden aplicar objetivos menos rigurosos.

El acuífero (La Marineta) donde se contempla realizar la operación de recarga artificial tiene una topografía llana y suave de pendiente inferior al dos por ciento. La pendiente media del torrente de Benicaubell es muy baja del orden de 0,004% (IGME, 1987). Sobre el acuífero se extiende una agricultura de regadío con labores dispuestas en curvas de nivel

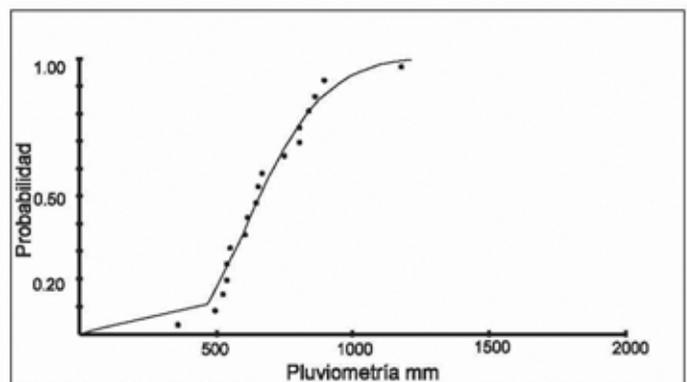


Figura 2. Función de distribución de Goodrich
 Figure 2. Goodrich distribution function

MES/AÑO HIDROLÓGICO	76/77	77/78	78/79	79/80	80/81	81/82	82/83	83/84	84/85
Octubre	171,30	22,10	162,80	114,70	23,60	144,90	64,00	16,70	33,20
Noviembre	25,40	87,50	61,50	62,30	23,60	15,00	81,70	66,40	90,20
Diciembre	70,60	70,70	31,60	104,90	102,80	23,60	80,00	72,10	25,70
Enero	112,30	108,50	33,80	211,00	61,00	46,40	3,00	52,90	87,10
Febrero	1,30	30,90	107,60	44,10	46,20	78,20	21,60	85,30	21,20
Marzo	20,00	42,90	72,80	34,10	31,80	154,90	58,70	89,90	98,00
Abril	69,10	362,60	26,10	83,70	67,90	34,50	0,00	29,50	12,40
Mayo	131,90	107,90	1,10	50,20	9,50	27,90	10,20	98,50	111,30
Junio	46,80	4,30	1,10	24,40	8,90	7,20	11,40	14,70	2,90
Julio	4,00	4,20	52,70	5,80	12,00	1,00	0,30	0,00	0,00
Agosto	64,10	6,00	16,60	2,90	21,00	67,50	132,00	3,80	0,00
Septiembre	125,20	20,10	100,00	13,30	25,70	51,80	60,30	85,00	15,70
TOTAL	842,00	867,70	667,70	751,40	534,00	652,90	523,20	614,80	497,70
MES/AÑO HIDROLÓGICO	85/86	86/87	87/88	88/89	89/90	90/91	91/92	92/93	93/94
Octubre	102,30	134,10	57,80	16,80	96,30	381,90	129,10	58,10	121,00
Noviembre	165,00	93,50	122,70	69,80	50,80	121,80	45,30	1,50	82,20
Diciembre	73,90	79,10	83,50	34,90	136,40	72,70	22,80	161,30	14,60
Enero	48,40	183,60	49,60	23,80	91,90	241,70	42,90	10,90	41,20
Febrero	77,10	147,00	17,10	15,50	4,00	99,20	20,80	73,60	23,50
Marzo	34,70	33,90	32,20	41,40	0,00	37,20	92,90	8,50	15,00
Abril	101,90	3,00	86,70	38,00	102,40	75,70	113,80	75,90	31,30
Mayo	4,50	30,00	78,60	67,90	45,70	91,00	11,80	79,80	11,20
Junio	5,80	13,00	134,40	31,00	2,40	0,80	84,20	0,10	6,10
Julio	76,90	52,50	0,00	2,10	1,00	0,00	7,90	0,00	3,10
Agosto	0,70	4,00	2,20	113,10	67,40	19,70	17,00	4,40	9,40
Septiembre	210,70	32,00	137,20	96,30	50,50	43,90	17,00	64,50	0,00
TOTAL	901,90	805,70	802,00	550,60	648,80	1185,60	605,50	538,60	358,60

Tabla 1. Valores anuales y mensuales de la precipitación en la estación B682. Datos en mm
 Table 1. Annual and monthly values of precipitation at station B682. Data in mm

MES	Precipitación			Desviación Promedio	Desviación Estándar Poblacional	Coeficiente de variación
	Media	Máxima	Mínima			
Octubre	102,82	381,90	16,70	59,70	84,37	82,05
Noviembre	70,34	165,00	1,50	31,32	40,15	57,08
Diciembre	70,07	161,30	14,60	29,69	39,12	55,84
Enero	80,56	241,70	3,00	52,47	66,29	82,30
Febrero	50,79	147,00	1,30	34,72	40,02	78,80
Marzo	49,94	154,90	0,00	29,73	37,54	75,17
Abril	78,58	362,60	0,00	46,50	78,18	107,06
Mayo	53,83	131,90	1,10	37,36	41,61	77,30
Junio	22,19	134,40	0,10	23,31	33,98	153,10
Julio	12,42	76,90	0,00	16,09	22,31	179,70
Agosto	30,66	132,00	0,00	32,31	39,50	128,86
Septiembre	63,84	210,70	0,00	41,33	52,59	82,37
TOTAL	686,04	1185,60	358,60			

Tabla 2. Valor medio máximo y mínimo de precipitación para el periodo analizado (1976-1994). Desviación promedio y estándar y coeficiente de variación. Datos en mm. Excepto el coeficiente de variación que es adimensional
 Table 2. Maximum and minimum mean values of precipitation for the period analyzed (1976-1994). Mean and standard deviation, and variation coefficient. Data in mm, except for variation coefficient, which is non-dimensional

Probabilidad	Pluviometría mm	Probabilidad	Pluviometría mm
0,10	464,9	0,55	683,7
0,15	493,6	0,60	709,4
0,20	519,3	0,65	736,8
0,25	543,5	0,70	766,6
0,30	566,8	0,75	799,7
0,35	589,7	0,80	837,7
0,40	612,5	0,85	883,4
0,45	635,6	0,90	942,8
0,50	659,2	0,95	1216,4

Tabla 3. Valores de probabilidad de la función de Goodrich
 Table 3. Values of probability of the Goodrich function

nueve años, como por una cierta tendencia decreciente en el valor que presenta la precipitación a lo largo de cada uno de los ciclos. Así, el primer ciclo se inicia con una precipitación de 842,00 mm y finaliza con una de 497,70 mm, mientras que el segundo se inicia con una precipitación de 901,90 mm y finaliza con una de 358,6 mm.

La precipitación total acontecida dentro de cada uno de los ciclos es prácticamente la misma. Así, para el ciclo 1976/1985 es de 5921,40 mm, lo que representa 48,20% del total acaecido, mientras que la correspondiente al ciclo 1985/1994 es de 6397,30 mm, lo que representa el 51,80% restante. Dentro de cada ciclo se dan aproximadamente el mismo número de años húmedos, medios y secos. Así, para el ciclo 1976/1985 se presentan tres años húmedos, tres medios y tres secos, mientras que para el ciclo 1985/1994 la secuencia es de cuatro años húmedos, dos medios y tres secos. En este segundo ciclo es donde se presentan el año más húmedo y más seco de toda la serie histórica analizada (Tabla 1 y Tabla 2). La probabilidad de que se presente un año seco, medio o húmedo es, para toda la serie histórica analizada, prácticamente la misma. Ésta es de 38,90% para los años húmedos, 27,77% para los medios y 33,33 para los secos.

Un hecho interesante a resaltar es que los años secos no se caracterizan por una pluviometría excesivamente baja, con excepción del año 1993/1994, sino simplemente por una pluviometría que se encuentra ligeramente por debajo del límite inferior (566,8 mm), que caracteriza a los años con una tipología climática de tipo medio. En concreto, dicha diferencia, sobre el valor límite que separa el año medio del año seco, es como media de tan sólo 38 mm.

En cuanto a la distribución mensual de la precipitación se contabilizan 32 meses (14,81 %) con precipitación superior a los 105 mm; 42 meses (19,44 %) con precipitación comprendida entre 70 mm y 105 mm; 40

meses (18, 52%) con precipitación comprendida entre 35 mm y 70 mm; y 102 meses (47,22 %) con precipitación comprendida entre 0 mm y 35 mm. Este último valor determina el umbral de escorrentía por debajo

Año tipo	Intervalo de probabilidad	Intervalo pluviométrico (mm)
Seco	0-0,3	0-566,8
Medio	0,3-0,65	566,8-736,8
Húmedo	0,65-0,99	736,8-1216,4

Tabla 4. Definición de años pluviométricos tipo en función del intervalo de probabilidad de Goodrich
 Table 4. Definition of pluviometric years in terms of the Goodrich probability interval

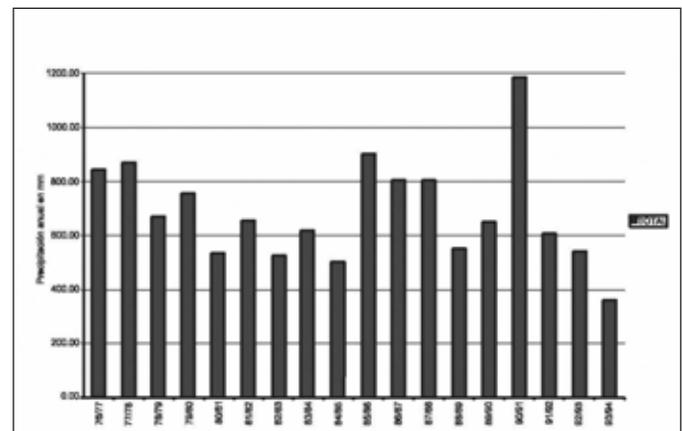


Figura 3 Valores anuales de la precipitación en la estación B682 para el periodo analizado. Datos en mm
 Figure 3. Annual values of precipitation at station B682 for the period analyzed. Data in mm

Año hidrológico	Precipitación mm	Año pluviométrico tipo	Año hidrológico	Precipitación mm	Año pluviométrico tipo
1976/1977	842,00	Húmedo	1985/1986	901,90	Húmedo
1977/1978	867,70	Húmedo	1986/1987	805,70	Húmedo
1978/1979	667,70	Medio	1987/1988	802,00	Húmedo
1979/1980	751,40	Húmedo	1988/1989	550,60	Seco
1980/1981	534,00	Seco	1989/1990	648,80	Medio
1981/1982	652,90	Medio	1990/1991	1185,60	Húmedo
1982/1983	523,20	Seco	1991/1992	605,50	Medio
1983/1984	614,80	Medio	1992/1993	538,60	Seco
1984/1985	497,70	Seco	1993/1994	358,00	Seco

Tabla 5. Clasificación de años hidrológicos según tipología húmeda, media y seca
Table 5. Classification of the hydrological years by type: wet, medium and dry

del cual no se produce aportación superficial. Dicho valor se ha obtenido mediante la aplicación de los programas MODIPÉ y NUMCUR. MODIPÉ (Martínez Azagra *et al.*, 2003) es un módulo hidrológico para zonas áridas y semiáridas, cuya principal aplicación es la estimación de la infiltración en una ladera degradada antes y después de una intervención de reforestación. NUMCUR (Hospital *et al.*, 2006) es un programa de apoyo a MODIPÉ que permite determinar el número de curva.

Por lo que respecta a las precipitación máxima se detectan (Tabla 1) cinco episodios mensuales con lluvias superiores a los 200 mm, que son los siguientes: octubre de 1991 (381,90 mm), que es la máxima precipitación mensual que se produce en el periodo analizado (Tabla 2); abril de 1978 (362,60 mm); enero de 1992 (241,70 mm); enero de 1980 (211,00 mm) y septiembre de 1986 (210,70 mm). Además de estos cinco grandes eventos mensuales se detectan otros veintisiete donde la lluvia caída es superior a 105 mm. En cuanto a los episodios mensuales con precipitación nula tan sólo hay nueve (Tabla 1) a lo largo de toda la serie histórica analizada.

La serie de precipitación que se muestra en la tabla 1 presenta una importante dispersión, pues la desviación estándar toma valores relativamente altos (Tabla 2), a veces superiores a la media, como ocurre en los meses de verano (junio, julio y agosto). En estos meses se aprecia que junto a un importante número de eventos con precipitación nula se presentan otros con una alta pluviometría, lo que provoca que la representatividad del valor medio de cara a una posible operación de recarga artificial sea poco significativa, ya que éste se encuentra muy afectado por los valores extremos. La serie es a nivel mensual bastante irregular, ya que el coeficiente de variación adquiere valores muy altos, no sólo en los meses de

estío, sino también en la mayor parte del resto del año, salvo los meses de noviembre y diciembre, donde es algo más bajo. En general se trata de una serie de precipitación que generará una aportación superficial todavía más irregular, como se verá en el siguiente apartado, que se caracterizará por presentar un régimen intermitente poco apto para alimentar una instalación de recarga artificial que se pretende funcione en modo continuo.

El estudio climático que se ha realizado muestra que las precipitaciones pueden no dar lugar a escorrentía superficial en aproximadamente el cincuenta por ciento de los meses analizados y en un quince por ciento a posibles avenidas de mayor o menor envergadura, no aprovechables en recarga artificial, por lo que en aproximadamente un tercio (35%) de los meses analizados se podría generar un caudal de agua susceptible de ser recargado artificialmente.

Análisis de la distribución espacial y temporal de las aportaciones

Sobre los torrentes de Son Real y Binicaubell el Ministerio de Medio Ambiente opera y controla tres estaciones de aforo (E1165, E1166 y E1167) (Figura 1). Los registros foronómicos para el periodo 1976-1994 se listan en la tabla 6.

Las estaciones E1165 y E1166 se localizan sobre los afloramientos calcareníticos de la cabecera de los torrentes de Benicaubell y Son Real, y la estación E1167 sobre el segundo torrente, aguas abajo de las dos estaciones anteriormente mencionadas, también sobre afloramientos calcareníticos, y a unos dos kilómetros de la desembocadura en el mar del torrente de Son Real.

Mediante comparación de las tablas 1 y 6 se com-

MES/AÑO HIDROLÓGICO	Estación de control	76/77	77/78	78/79	79/80	80/81	81/82	82/83	83/84	84/85
Octubre	E1166	0,10	0,00	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	E1165	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	E1167	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Noviembre	E1166	0,11	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	E1165	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	E1167	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Diciembre	E1166	0,09	0,18	0,00	0,06	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	E1165	0,01	0,11	0,00	0,17	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	E1167	0,02	0,04	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Enero	E1166	0,47	0,45	0,00	0,39	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	E1165	0,06	0,17	0,00	0,49	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	E1167	0,35	0,42	0,00	0,29	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Febrero	E1166	0,24	0,25	0,04	0,19	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	E1165	0,00	0,07	0,02	0,11	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	E1167	0,00	0,10	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Marzo	E1166	0,10	0,12	0,23	0,10	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00
	E1165	0,00	0,02	0,15	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	E1167	0,00	0,00	0,09	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00
Abril	E1166	0,00	1,00	0,03	0,00	0,15	0,00	0,00	0,00	0,00
	E1165	0,00	0,37	0,00	0,00	0,26	0,00	0,00	0,00	0,00
	E1167	0,00	0,56	0,00	0,00	0,07	0,00	0,00	0,00	0,00
Mayo	E1166	0,09	0,06	0,00	0,00	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00
	E1165	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
	E1167	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Junio	E1166	0,13	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	E1165	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	E1167	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Julio	E1166	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	E1165	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	E1167	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Agosto	E1166	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	E1165	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	E1167	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00
Septiembre	E1166	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00
	E1165	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	E1167	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,12	0,00	0,00	0,00
MES/AÑO HIDROLÓGICO	Estación de control	85/86	86/87	87/88	88/89	89/90	90/91	91/92	92/93	93/94
Octubre	E1166	0,00	0,07	0,00	0,00	0,05	0,36	0,00	0,00	0,00
	E1165	0,00	0,06	0,00	0,00	0,10	0,40	0,00	0,00	0,00
	E1167	0,00	0,22	0,00	0,00	0,09	0,10	0,00	0,00	0,00
Noviembre	E1166	0,00	0,03	0,03	0,00	0,00	0,30	0,00	0,00	0,00
	E1165	0,00	0,04	0,00	0,00	0,00	0,28	0,00	0,00	0,00
	E1167	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,18	0,00	0,00	0,00
Diciembre	E1166	0,00	0,23	0,03	0,00	0,02	0,16	0,00	0,00	0,00
	E1165	0,00	0,42	0,01	0,01	0,02	0,08	0,00	0,00	0,00
	E1167	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Enero	E1166	0,00	0,65	0,00	0,00	0,19	0,35	0,00	0,00	0,00
	E1165	0,00	1,78	0,00	0,00	0,40	0,75	0,00	0,00	0,00
	E1167	0,00	0,45	0,00	0,00	0,00	0,25	0,00	0,00	0,00
Febrero	E1166	0,09	0,00	0,00	0,00	0,00	1,04	0,00	0,00	0,00
	E1165	0,02	0,00	0,00	0,00	0,11	0,85	0,00	0,01	0,00
	E1167	0,00	0,26	0,00	0,00	0,00	0,46	0,00	0,00	0,00
Marzo	E1166	0,00	0,37	0,00	0,00	0,00	0,60	0,00	0,00	0,00
	E1165	0,00	0,05	0,00	0,00	0,00	0,21	0,00	0,00	0,00
	E1167	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,19	0,00	0,00	0,00
Abril	E1166	0,00	0,13	0,00	0,00	0,00	0,14	0,00	0,00	0,00
	E1165	0,00	0,04	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00
	E1167	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	0,00	0,00	0,00
Mayo	E1166	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,43	0,00	0,00	0,00
	E1165	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,52	0,00	0,00	0,00
	E1167	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,26	0,00	0,00	0,00
Junio	E1166	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,08	0,00	0,00	0,00
	E1165	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00
	E1167	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Julio	E1166	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	E1165	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	E1167	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Agosto	E1166	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	E1165	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	E1167	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Septiembre	E1166	0,01	0,00	0,00	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	E1165	0,01	0,00	0,00	0,10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	E1167	0,05	0,00	0,00	0,09	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Tabla 6. Valor mensual de la aportación en las estaciones foronómicas E1165, E1166 y E1167 para el periodo analizado (1976-1994). Datos en hm³
 Table 6. Monthly value of the inflow from phoronomic stations E1165, E1166 and E1167 for the period analyzed (1976-1994). Data in hm³

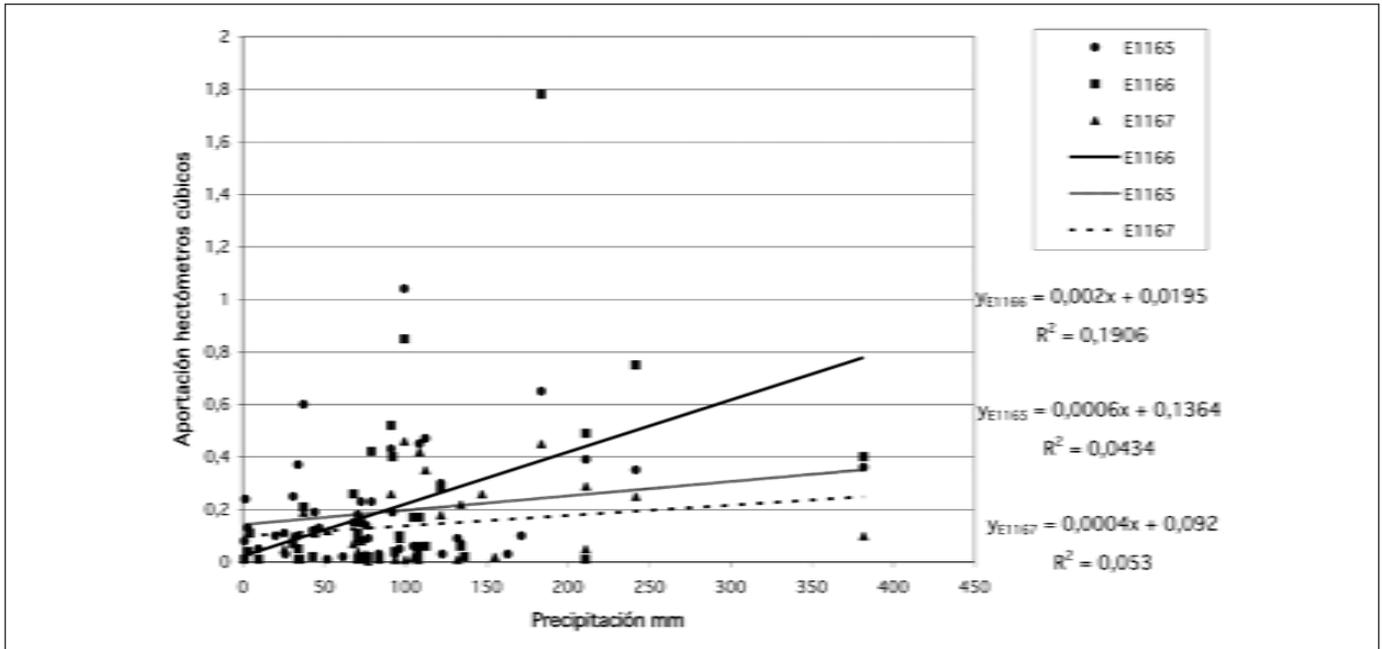


Figura 4. Diagrama de correlación precipitación-aportación generada en las estaciones E1165, E1166 y E1167 durante el periodo analizado (1976-1994)

Figure 4. Diagram of the correlation precipitation-inflow generated at stations E1165, E1166 and E1167 during the period analyzed (1976-1994)

Análisis para la Estación E1166				Análisis para la Estación E1165				Análisis para la Estación E1167			
AH	P (mm)	APT	Aportación hm ³ /a	AH	P (mm)	APT	Aportación hm ³ /a	AH	P (mm)	APT	Aportación hm ³ /a
90/91	1185,60	H	3,46	90/91	1185,60	H	3,12	90/91	1185,60	H	1,47
77/78	867,70	H	2,07	86/87	805,70	H	2,40	77/78	867,70	H	1,12
86/87	805,70	H	1,48	79/80	751,40	H	0,78	86/87	805,70	H	0,95
76/77	842,00	H	1,34	77/78	867,70	H	0,75	76/77	842,00	H	0,42
79/80	751,40	H	0,74	89/90	648,80	M	0,63	79/80	751,40	H	0,31
78/79	667,70	M	0,35	80/81	534,00	S	0,27	81/82	652,90	M	0,14
89/90	648,80	M	0,26	78/79	667,70	M	0,17	78/79	667,70	M	0,10
80/81	534,00	S	0,20	88/89	550,60	S	0,12	89/90	648,80	M	0,09
85/86	901,90	H	0,10	76/77	842,00	H	0,07	88/89	550,60	S	0,09
87/88	802,00	H	0,06	85/86	901,90	H	0,03	80/81	534,00	S	0,07
88/89	550,60	S	0,05	87/88	802,00	H	0,01	85/86	901,90	H	0,05
81/82	652,90	M	0,01	92/93	538,60	S	0,01	82/83	523,20	S	0,01
83/84	614,80	M	0,00	81/82	652,90	M	0,00	87/88	802,00	H	0,00
91/92	605,50	M	0,00	83/84	614,80	M	0,00	83/84	614,80	M	0,00
92/93	538,60	S	0,00	91/92	605,50	M	0,00	91/92	605,50	M	0,00
82/83	523,20	S	0,00	82/83	523,20	S	0,00	92/93	538,60	S	0,00
84/85	497,70	S	0,00	84/85	497,70	S	0,00	84/85	497,70	S	0,00
93/94	358,00	S	0,00	93/94	358,00	S	0,00	93/94	358,00	S	0,00

Tabla 7. Comparación para un determinado año hidrológico entre su tipología climática y la aportación anual que se registra en distintas estaciones de control foronómico. AH: año hidrológico; P: precipitación; APT año pluviométrico tipo (H: húmedo; M: medio; S: seco)

Table 7. Comparison, for a given hydrological year, between the climatic type and the annual inflow registered in the different stations of phoronomic control. AH: hydrological year; P: precipitation; APT: type of pluviometric year (H: wet; M: medium; S: dry)

Mes	Estación de control foronómico		
	E1166	E1165	E1167
Octubre	0,034	0,031	0,023
Noviembre	0,027	0,018	0,013
Diciembre	0,043	0,046	0,004
Enero	0,139	0,203	0,098
Febrero	0,103	0,066	0,046
Marzo	0,084	0,024	0,017
Abril	0,081	0,038	0,037
Mayo	0,035	0,029	0,014
Junio	0,012	0,001	0,000
Julio	0,000	0,000	0,000
Agosto	0,000	0,000	0,001
Septiembre	0,004	0,006	0,015
APORTACION MENSUAL MEDIA (periodo 1976-1994)	0,047	0,039	0,022
APORTACION ANUAL MEDIA (periodo 1976-1994)	0,561	0,463	0,268

Tabla 8. Aportación mensual media en las estaciones foronómicas E1165, E1166 y E1167 para el periodo analizado. Datos en hm³/mes excepto la aportación anual media que viene expresada en hm³/a
Table 8. Mean monthly water inflow in phoronomic stations E1165, E1166 and E1167 for the period analyzed. Data in hm³/month except for the mean annual inflow, expressed in hm³/yr

prueba que, para el periodo analizado (1976-1994), se registra precipitación en la estación pluviométrica B682 en 207 meses, mientras que, para el mismo periodo de tiempo, sólo acontece aportación en la estación E1166 en 45 meses (21,74%). Este mismo

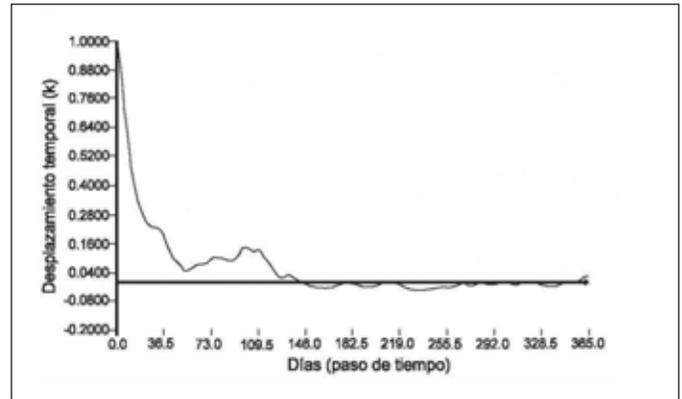


Figura 5. Función de autocorrelación en la estación E 1165. Torrente de Son Real
Figure 5. Autocorrelation function at the station E 1165. Torrent of Son Real

dato, para las estaciones E1165 y E1167, es respectivamente de 38 meses (18,36%) y 27 meses (13,04%). Dado que los registros de aportación en las cuencas de los torrentes de Benicaubell y Son Real no siempre se producen de forma simultánea en las tres estaciones de control foronómico, el número de eventos mensuales con escorrentía superficial es de 55 (26,60%). Este porcentaje es aproximadamente nueve puntos inferior al obtenido en el apartado de análisis climático (35%). Los datos registrados en las estaciones foronómicas E1165, E1166 y E1167 indican que

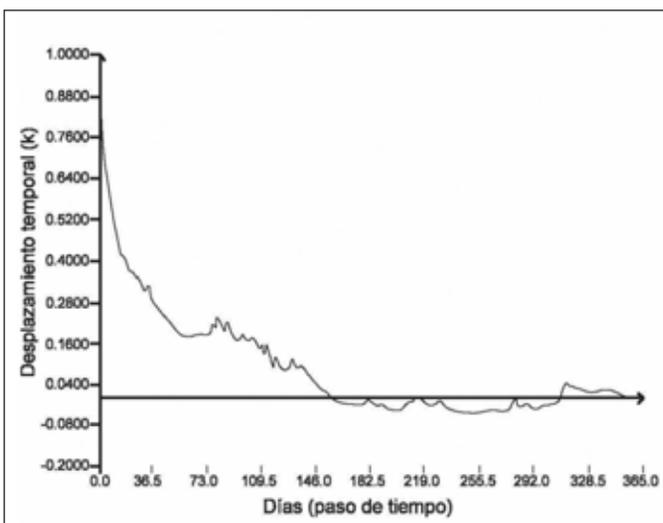


Figura 6. Función de autocorrelación en la estación E 1166. Torrente de Benicaubell
Figure 6. Autocorrelation function at the station E 1166. Torrent of Benicaubell

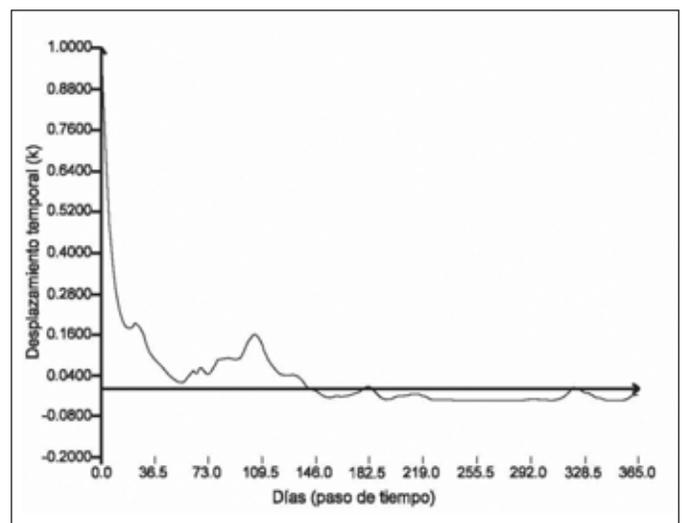


Figura 7. Función de autocorrelación en la estación E 1167. Torrente de Son Real
Figure 7. Autocorrelation function at the station E 1167. Torrent of Son Real

Año hidrológico	Estación de control foronómico			Año hidrológico	Estación de control foronómico		
	E1166	E1165	E1167		E1166	E1165	E1167
1976/1977	1,33	0,07	0,42	1985/1986	0,1	0,03	0,05
1977/1978	2,06	0,74	1,12	1986/1987	1,48	2,39	0,94
1978/1979	0,35	0,17	0,11	1987/1988	0,06	0,01	0
1979/1980	0,74	0,78	0,31	1988/1989	0,05	0,11	0,09
1980/1981	0,2	0,27	0,07	1989/1990	0,26	0,63	0,09
1981/1982	0,01	0	0,14	1990/1991	3,46	3,12	1,47
1982/1983	0	0	0,01	1991/1992	0	0	0
1983/1984	0	0	0	1992/1993	0	0,01	0
1984/1985	0	0	0	1993/1994	0	0	0
APORTACIÓN EN EL PERIODO 1976-1994					10,1	8,33	4,82
APORTACIÓN ANUAL MEDIA (periodo 1976-1994)					0,56	0,46	0,27

Tabla 9. Aportación en el periodo 1976-1994 discretizada por años hidrológicos. Datos en hm³/a, excepto la aportación en el periodo 1976-1994 que viene expresada en hm³ para todo el periodo analizado

Table 9. Water inflow in the period 1976-1994 discretized by hydrological years. Data in hm³/yr, except for inflow in the period 1976-1994, expressed in hm³ for the entire period analyzed

MES	E1166			E1165			E1167		
	Promedio	Desviación estándar	Coefficiente de variación	Promedio	Desviación estándar	Coefficiente de variación	Promedio	Desviación estándar	Coefficiente de variación
octubre	0,034	0,084	248,083	0,031	0,093	299,404	0,023	0,056	247,402
noviembre	0,027	0,071	261,137	0,018	0,064	361,421	0,013	0,042	315,238
diciembre	0,043	0,071	166,178	0,046	0,102	220,587	0,004	0,011	239,792
enero	0,139	0,212	152,676	0,203	0,436	215,065	0,098	0,163	166,298
febrero	0,103	0,242	235,818	0,066	0,193	292,660	0,046	0,118	256,106
marzo	0,084	0,159	188,452	0,024	0,057	233,903	0,017	0,047	281,425
abril	0,081	0,229	284,149	0,038	0,100	260,906	0,037	0,128	349,261
mayo	0,035	0,099	283,363	0,029	0,119	404,148	0,014	0,060	412,311
junio	0,012	0,034	291,723	0,001	0,002	412,311	0,000	0,000	
julio	0,000	0,000		0,000	0,000		0,000	0,000	
agosto	0,000	0,000		0,000	0,000		0,001	0,002	412,311
septiembre	0,004	0,012	298,636	0,006	0,023	374,497	0,015	0,034	227,981
total	0,561	0,922	164,315	0,463	0,858	185,496	0,268	0,431	160,772

Tabla 10. Valor medio máximo y mínimo de precipitación Valor medio, desviación estándar y coeficiente de variación de la serie de aportaciones en las estaciones E1166, E1165 y E1167 para el periodo analizado (1976-1994). Datos en hm³/mes. Excepto el coeficiente de variación que es adimensional y el total que se expresa en hm³/a

Table 10. Maximum and minimum mean values of precipitation. Mean value, standard deviation and coefficient of variation of the series of water inflows at stations E1166, E1165 and E1167 for the period analyzed (1976-1994). Data in hm³/month, except of the variation coefficient, which is non-dimensional, and the total, expressed in hm³/yr

sólo una cuarta parte de los meses con precipitación dan lugar a escorrentía superficial.

A partir del análisis de los pares de valores precipitación-aportación no nula, se deduce que, para la

serie histórica analizada, se presentan con cierta frecuencia meses con un valor de precipitación igual o muy similar entre sí y una aportación muy dispar. A título de ejemplo se cita el mes de enero de 1977, con

una precipitación de 112,3 mm y una aportación registrada en la estación E1166 de 0,47 hm³, mientras que en el mes de mayo de ese mismo año la aportación es de 0,09 hm³ y la precipitación de 131,9 mm. En la figura 4 se representan todas las precipitaciones que han generado aportación en las estaciones E1165, E1166 y E1167 durante el periodo analizado. Del análisis de dicha figura se desprende que entre las variables precipitación y aportación existe un escaso grado de correlación.

De la apreciación realizada anteriormente se desprende que factores como el grado de humedad de un suelo antes de comenzar una lluvia, o la intensidad y variabilidad con la que ésta se produce a lo largo de un día o un determinado periodo de tiempo, tienen en esta cuenca hidrográfica una incidencia notable sobre la generación de la aportación, por lo que se puede cometer un error muy grave si se pretende calcular la aportación superficial o subterránea mediante la aplicación de un cierto porcentaje de la variable precipitación.

Incluso, como se observa en la tabla 7, puede ocurrir que un año con una tipología climática húmeda presente una aportación inferior a uno medio o seco. Este es el caso del año 1985/1986 (húmedo), y los años 1989/1990 (medio) y 1980/1981 (seco). También puede suceder que un año de tipología climática húmeda, como el 1987/1988, presente una aportación nula o prácticamente nula, dependiendo de la estación de control que se considere, mientras que uno seco o medio presentan una aportación de una cuantía notable, como es el caso del año 1989/1990 (seco) y 1978/1979 (medio). Este último presenta en la estación de control E1166 la segunda mayor aportación anual de toda la serie histórica estudiada, que solamente es superada por la correspondiente al año húmedo de 1990/1991.

En la tabla 8 se presenta la aportación mensual media para los diferentes meses del año en las estaciones foronómicas E1165, E1166 y E1167, así como la aportación mensual media para el periodo 1976-1994 y la aportación anual media para el mismo periodo de tiempo. En general se observa que las disponibilidades de agua son reducidas, tanto a nivel mensual como anual, aunque existe un cierto remanente de agua que, aunque pequeño, podría ser recargado en el acuífero, dado que su régimen temporal presenta una cierta persistencia, como se deduce del análisis realizado a través de la función de autocorrelación (Figuras 5, 6 y 7) que se expone a continuación.

La función de autocorrelación da idea de la relación que tiene un determinado caudal con los caudales de los días anteriores y posteriores. Si esta rela-

ción es superior a 0,2, que es el criterio de comparación propuesto por Mangin (Mangin, 1981), durante un intervalo de tiempo muy grande, el sistema posee mucha inercia, y el caudal que circula por un determinado punto es tanto más regular cuanto mayor sea dicho intervalo.

En la figura 5 se muestra la función de autocorrelación en la estación E1165 (Torrente de Son Real). Del análisis de dicha figura se desprende que los caudales que circulan por la estación E1165 lo hacen durante un periodo de tiempo de aproximadamente un mes. Este tiempo es lo que se denomina efecto memoria y se calcula como el punto donde la curva función de autocorrelación toma el valor de 0,2. En el caso de la estación E1165 dicho tiempo es de aproximadamente 32 días. Las figuras 6 y 7 representan las funciones de autocorrelación en las estaciones E1166 y E1167. Para la primera el efecto memoria es de 55 días, por lo que los caudales que circulan por este tramo del torrente de Benicubell presentan una gran persistencia, mientras que el efecto memoria en la estación E1167 es de 15 días. El rendimiento de unas hipotéticas instalaciones de recarga artificial que funcionen en continuo, se puede catalogar, dada la persistencia y la duración de los eventos de caudal en las distintas estaciones de aforo de la cuenca, de mínimamente aceptable, aunque la aportación media de la cuenca sea reducida (Tabla 8).

En la tabla 9 se muestra la distribución temporal de la aportación anual que es muy irregular, pues el número de años con una aportación superior o próxima a 1 hm³/a es de cinco, lo que representa el 86,33% de la aportación total, aunque hay dos años (1986/1987 y 1990/1991) que, por sí solos, aportan algo más del cincuenta y cinco por ciento de la escorrentía superficial que se genera. En el lado contrario se sitúan los diez años con una escorrentía superficial nula o próxima a 0,1 hm³/a, que sólo contribuyen con el 2,1% a la aportación superficial que se registra en el periodo histórico analizado.

La distribución temporal de la aportación mensual presenta una gran dispersión, pues como se observa en la tabla 10 la desviación estándar es en todas las estaciones y en todos los meses superior a la media. En la tabla 6 se aprecia que junto a un importante número de eventos con aportación nula se presentan otros con una elevada escorrentía, lo que provoca que la representatividad del valor medio de la aportación de cara a una posible operación de recarga artificial sea poco significativa, ya que éste se encuentra muy afectado por los valores extremos. La serie es a nivel mensual bastante irregular, ya que el coeficiente de variación adquiere valores muy altos. Éstos son muy superiores a los calculados (Tabla 2) a partir de

Meses	Aportación en la estación E1166 (1)	Aportación en la estación E1165 (2)	Aportación en la estación E1167 (3)	Aportación suma de E1165 y E1166 (1) + (2) = (4)	(a) Infiltración (4) - (3)	(b) Infiltración real
Octubre	0,61	0,56	0,41	1,17	0,76*	0,85*
Noviembre	0,49	0,32	0,24	0,81	0,57	0,57
Diciembre	0,77	0,83	0,08	1,60	1,52	1,52
Enero	2,50	3,65	1,76	6,15	4,39	4,39
Febrero	1,85	1,19	0,83	3,04	2,21*	2,47*
Marzo	1,52	0,44	0,30	1,96	1,66*	1,68*
Abril	1,45	0,69	0,66	2,14	1,48	1,48
Mayo	0,63	0,53	0,26	1,16	0,9	0,9
Junio	0,21	0,01	0,00	0,22	0,22	0,22
Julio	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0
Agosto	0,00	0,00	0,01	0,00	-0,01*	0*
Septiembre	0,07	0,11	0,27	0,18	-0,09*	0,06*
TOTAL	10,12	8,36	4,82	18,48	13,61	14,14

*La diferencia entre los valores caracterizados mediante un asterisco en las columnas (a) y (b) se debe al hecho que se explica a continuación:
 Considérese un conjunto de m ríos, que se controlan mediante m estaciones foronómicas (E1, E2...Em). Estos ríos acaban confluyendo en un río principal aguas arriba de una sección S, donde existe una estación foronómica Ep. La aportación para

una serie histórica de n años vendrá dada por las series A1, A2...An. Cada elemento $x_{i,j}^k$ de la serie de aportaciones viene caracterizado por un superíndice k (1, 2...m, p) que indica la estación de control, un subíndice i (1,2...n) que identifica el año hidrológico que se controla y otro subíndice j (1, 2...12) que define el mes que se está midiendo. Por lo que cada año hidrológico quedará definido por la siguiente serie de aportaciones:

$$A_1 \begin{pmatrix} x_{1,1}^1 & x_{1,2}^1 & \dots & x_{1,12}^1 \\ x_{1,1}^2 & x_{1,2}^2 & \dots & x_{1,12}^2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{1,1}^p & x_{1,2}^p & \dots & x_{1,12}^p \end{pmatrix} \quad A_2 \begin{pmatrix} x_{2,1}^1 & x_{2,2}^1 & \dots & x_{2,12}^1 \\ x_{2,1}^2 & x_{2,2}^2 & \dots & x_{2,12}^2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{2,1}^p & x_{2,2}^p & \dots & x_{2,12}^p \end{pmatrix} \quad A_n \begin{pmatrix} x_{n,1}^1 & x_{n,2}^1 & \dots & x_{n,12}^1 \\ x_{n,1}^2 & x_{n,2}^2 & \dots & x_{n,12}^2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{n,1}^p & x_{n,2}^p & \dots & x_{n,12}^p \end{pmatrix}$$

En la serie anterior todos los valores $x_{i,j}^k$ son positivos, puesto que no puede haber aportaciones negativas.

En el supuesto que los m ríos sean perdedores, la infiltración (I_p) que tiene lugar entre las estaciones (E¹, E²...E^m) y la estación E^p para el mes 1 se podrá calcular como diferencia entre la suma de las aportaciones registradas en las estaciones 1,2 ...m, para la serie histórica analizada, y la aportación registrada para la misma serie histórica en la estación p. Es decir mediante la expresión:

$$I_p = \sum_{i=1}^{i=n} x_{i,1}^1 + \sum_{i=1}^{i=n} x_{i,1}^2 + \dots + \sum_{i=1}^{i=n} x_{i,1}^m - \sum_{i=1}^{i=n} x_{i,1}^p \quad (1)$$

Si en dicha expresión se sustituyen los valores (Tabla 6) correspondientes al mes de octubre:

$$I_p = (0,1 + 0 + 0,03 + 0 + 0 + 0 + 0 + 0 + 0 + 0 + 0 + 0 + 0,07 + 0 + 0 + 0,05 + 0,36 + 0 + 0 + 0) + (0 + 0 + 0 + 0 + 0 + 0 + 0 + 0 + 0 + 0 + 0 + 0 + 0,06 + 0 + 0 + 0,1 + 0 + 0 + 0) - (0 + 0 + 0 + 0 + 0 + 0 + 0 + 0 + 0 + 0 + 0 + 0 + 0,22 + 0 + 0 + 0,09 + 0,1 + 0 + 0 + 0) = 0,61 + 0,56 - 0,41 = 0,76$$

La infiltración (I_p) también se puede calcular como:

$$I_p = (x_{1,1}^1 + x_{1,1}^2 + \dots + x_{1,1}^m - x_{1,1}^p) + (x_{2,1}^1 + x_{2,1}^2 + \dots + x_{2,1}^m - x_{2,1}^p) + \dots + (x_{n,1}^1 + x_{n,1}^2 + \dots + x_{n,1}^m - x_{n,1}^p) = (0,1+0-0) + (0+0-0) + (0,03+0-0) + (0+0-0) + (0+0-0) + (0+0-0) + (0+0-0) + (0+0-0) + (0+0-0) + (0+0-0) + (0,07+0,06-0,22) + (0+0-0) + (0+0-0) + (0,05+0,1-0,09) + (0,36+0,4-0,1) + (0+0-0) + (0+0-0) + (0+0-0) = 0,85$$

En la expresión anterior el resultado es 0,85 en vez de 0,76, porque la infiltración del mes de octubre del año 1986/1987, que viene determinada por el paréntesis (0,07+ 0,06- 0,22), no puede ser negativa y el valor mínimo que puede tener es cero. Cuando los cálculos se realizan mediante la aplicación de la expresión 1 este efecto no se denota. Análogamente se procedería para el resto de los meses que se han caracterizado mediante un asterisco en las columnas (a) y (b) de la Tabla 11.

Tabla 11. Infiltración en los cauces de Son Real y Binicaubell, y aportación mensual y total en las estaciones de control foronómico E1166, E1165 y E1167 para el periodo 1976-1994. Datos en hm³ referidos al intervalo temporal de 18 años
 Table 11. Infiltration in the riverbeds of Son Real and Binicaubell, and monthly and total water inflows in phoronomic control stations E1166, E1165 and E1167 for the period 1976-1994. Data in hm³ referring to the time interval of 18 years

la series de precipitación que se muestran en la tabla 1, por lo que la serie de aportaciones es mucho más irregular que la serie de precipitaciones. Este hecho corrobora lo ya apuntado anteriormente, acerca del poder distorsionador que tiene el grado de humedad de un suelo antes de comenzar una lluvia, o la intensidad y variabilidad con la que ésta se produce a lo largo de un día o un determinado periodo de tiempo.

Como síntesis cabe destacar que la serie de aportaciones que se ha analizado se caracteriza por presentar caudales reducidos, aunque relativamente persistentes en el tiempo, cuando éstos acontecen, y muy irregulares en su distribución hiperanual. Esto conlleva que cualquier operación de recarga artificial que se programe se vea afectada por dichos factores.

Cuantificación del caudal infiltrado a través del lecho de los torrentes

En la tabla 11 se muestra la distribución mensual de la infiltración que tiene lugar entre las estaciones E1166 y E1165, y la estación E1167, para el periodo 1976-1994, así como la aportación residual en esta última, que en principio determina el volumen de agua disponible para operaciones de recarga artificial. Éste es de 4,82 hm³ para el periodo de 18 años que se ha analizado, lo que representa un volumen anual medio de 0,27 hm³.

En principio parece que carece de sentido plantear operaciones de recarga artificial en el tramo que definen las estaciones E1166 y E1165, y la estación E1167, ya que en dicho tramo se infiltra de forma natural 14,14 hm³, para el periodo de 18 años que se ha analizado, lo que representa un volumen anual medio de 0,79 hm³.

La infiltración anual media (0,79 hm³/a), que se muestra en la tabla 12, es notablemente inferior al valor que se ha venido barajando para la unidad hidrogeológica de La Marineta en los distintos balances que se han realizado, que ha sido de 5 hm³/a (IGME, 1997). La distribución temporal de esta infiltración es muy irregular en el tiempo, como se observa en la tabla 12, donde se puede ver que el número de años con una infiltración superior o próxima a 1 hm³/a es de cinco, aunque hay dos (1986/1987 y 1990/1991) que, por sí solos, aportan casi el sesenta por ciento de la infiltración que tiene lugar a lo largo de todo el periodo histórico analizado. En el lado contrario se sitúan los once años con una infiltración nula o próxima a 0,1 hm³/a, que únicamente representa el 0,22% del total.

La distribución temporal de la aportación que se registra en la estación E1167, después de que tenga lugar el proceso de infiltración natural que se produce en el lecho de los torrentes de Son Real y Binicaubell, tiene una distribución análoga a la aportación que discurre por las estaciones E1165 y E1166, pues al igual que en aquellas hay dos años

Año hidrológico	Año pluviométrico tipo	INFILTRACIÓN ANUAL hm ³ /a	Año hidrológico	Año pluviométrico tipo	INFILTRACIÓN ANUAL hm ³ /a
1976/1977	Húmedo	0,98	1985/1986	Húmedo	0,11
1977/1978	Húmedo	1,68	1986/1987	Húmedo	3,28
1978/1979	Medio	0,42	1987/1988	Húmedo	0,07
1979/1980	Húmedo	1,21	1988/1989	Seco	0,07
1980/1981	Seco	0,4	1989/1990	Medio	0,8
1981/1982	Medio	0	1990/1991	Húmedo	5,11
1982/1983	Seco	0	1991/1992	Medio	0
1983/1984	Medio	0	1992/1993	Seco	0,01
1984/1985	Seco	0	1993/1994	Seco	0
INFILTRACIÓN NATURAL EN EL PERIODO 1976-1994 (hm ³)					14,14
INFILTRACIÓN ANUAL MEDIA (hm ³ /a)					0,79**

** Este valor es en realidad de 0,85, como se ha justificado en la explicación que se acompaña a la tabla 11.

Tabla 12. Infiltración en el periodo 1976-1994 discretizada por años hidrológicos. Datos en hm³/a, excepto la aportación en el periodo 1976-1994 que viene expresada en hm³ para todo el periodo analizado
 Table 12. Infiltration in the period 1976-1994 discretized by hydrological years. Data in hm³/yr, except for water inflow in the period 1976-1994, expressed in hm³ for the entire period analysed

(1986/1987 y 1990/1991) en los que se genera la mitad de la aportación y otros once donde el caudal es nulo o inferior a 0,1 hm³/a.

Conclusiones

La metodología utilizada ha permitido evaluar y cuantificar los volúmenes de agua que circulan por los Torrentes de Son Real y Benicaubell, así como analizar la posibilidad de emplear parte de los mismos en operaciones de recarga artificial de acuíferos. Dicha metodología ha contemplado la realización de los siguientes estudios:

- Análisis climático.
- Análisis de la distribución espacial de las aportaciones.
- Análisis de la distribución temporal de las aportaciones.
- Cuantificación del caudal infiltrado de forma natural a través del lecho de cada uno de los torrentes.

La serie de precipitación que se ha estudiado presenta una importante dispersión y son a nivel mensual bastante irregulares, por lo que generarán una aportación superficial que se caracterizará por presentar un régimen intermitente poco apto para alimentar una instalación de recarga artificial. El estudio climático ha puesto de manifiesto que las precipitaciones sólo generan escorrentía superficial susceptible de ser recargada artificialmente en aproximadamente un tercio (35%) de los meses analizados.

El análisis de la distribución espacio temporal de las aportaciones indica que el número de eventos mensuales con escorrentía superficial es nueve puntos inferior al obtenido en el apartado de análisis climático, por lo que sólo una cuarta parte de los meses con precipitación dan lugar a escorrentía superficial. Además es frecuente que meses con igual o parecida precipitación generen escorrentías superficiales muy dispares.

Las series de aportaciones que se ha analizado se caracterizan por presentar caudales muy irregulares en su distribución hiperanual, así como reducidos en su cuantía, aunque relativamente persistentes en el tiempo cuando acontecen, como ha puesto de manifiesto el análisis de la función de autocorrelación. Esto conlleva que cualquier operación de recarga artificial que se programe se vea afectada por dichos factores.

El volumen de agua disponible para operaciones de recarga artificial es de 4,82 hm³ para el periodo de 18 años que se ha analizado, lo que representa un volumen anual medio de 0,27 hm³. En el tramo comprendido entre las estaciones E1166 y E1165, y la

estación E1167, se infiltra de forma natural 14,14 hm³, para el periodo de 18 años que se ha analizado, lo que representa un volumen anual medio de 0,79 hm³, por lo que carece de sentido programar operaciones de recarga artificial en el mismo. Ésta se habría de plantear aguas abajo de la estación E1167.

Agradecimientos

Los autores quieren dar las gracias a Alfredo Barón, Cap de Servei d'Estudis i Planificació de la Direcció General de Recursos Hídricos de la Conselleria de Medi Ambient del Govern de les Illes Balears, por el asesoramiento que les ha prestado a lo largo de la realización del trabajo, que ha dado origen al presente artículo. Asimismo quieren agradecer el apoyo logístico que les ha prestado Rosa María Mateos y José María García López de la oficina del Instituto Geológico y Minero en Palma de Mallorca.

Referencias

- Ambienta. 2002. Noticias Breves. La Revista del Ministerio de Medio Ambiente.12.1-7.
- BOE. 2000. Resolución de 27 de noviembre de 2000, de la Secretaría General de Medio Ambiente, por la que se formula declaración de impacto ambiental del proyecto de aprovechamiento de los recursos hidráulicos de la sierra de Tramontana, Mallorca (Balears), de la Dirección General de Obras Hidráulicas. BOE 311/2000 de 28 diciembre 2000.
- BOE. 2003-a. Resolución de 28 de enero de 2003, de la Secretaría General de Medio Ambiente, sobre la evaluación de impacto ambiental del proyecto de conducción y recarga del acuífero de S'Estremera, en Mallorca (Balears), de la Dirección General de Obras Hidráulicas y Calidad de las Aguas. BOE 45/2003 de 21 de febrero de 2003.
- BOE. 2003-b. Anuncio de la Delegación del Gobierno en Baleares sobre Información pública del proyecto de construcción del aprovechamiento de los recursos hidráulicos de la Sierra de Tramontana. Mallorca (Illes Balears). Ministerio de Administraciones Públicas. BOE 143/2003 de 16 junio de 2003.
- BOIB. 1997. Información pública sobre la autorización para la recarga del acuífero de S'Estremera con agua potable procedente de los excedentes de los embalses del Gorg Blau y Cúber, y del depósito regulador de Son Tugores. Conselleria de medio ambiente, ordenación del territorio y litoral. Boletín Oficial de las Islas Baleares BOIB Núm. 028 - 6 / Marzo / 1997.
- BOIB. 2002. Notificación de la Resolución de 9 de noviembre de 1996 del Director General de Obras Hidráulicas y Calidad de las Aguas, por la que se aprueba el anteproyecto de aprovechamiento de los recursos hidráulicos

- de la Serra de Tramontana y se da respuesta a las alegaciones presentadas. BOIB Núm. 47 18-04-2002.
- CAP. 2007. Programa de Desarrollo Rural de las Islas Baleares 2007-2013. Conselleria D'Agricultura i Pesca. 498 págs.
- DGOH-ITGE. 1988. Delimitación de las unidades hidrogeológicas del territorio peninsular e islas Baleares y Síntesis de sus características. Dirección General de Obras Hidráulicas. 18 pp.
- DGRHGIB. 2008. Propuesta del Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica de las Islas Baleares (Versión 1.0). Programas de Actuación e Infraestructuras. Govern de les Illes Balears. Conselleria de Medi Ambient. Direcció General de Recursos Hídricos. Servei d'Estudis i Planificació. 104 pp
- DGRHGIB. 2009. Guía del Plan Hidrológico de las islas Baleares. Documento d Divulgació. Govern de les Illes Balears. Conselleria de Medi Ambient. Direcció General de Recursos Hídricos. 38 pp.
- Europapress. 2009. El agua de Sa Costera llegará esta semana a la red de la Bahía de Palma. <http://www.europapress.es/illes-balears>
- Genovart, A. 1996. Artá levanta dos nuevas presas para retener el agua pluvial. Diario de Mallorca. Miércoles, 20 de noviembre de 1996, pp 18.
- Iglesias López, A. 1986. Aspectos Generales de la lucha contra la intrusión marina. Aplicación al acuífero costero del Llano de Palma. XIX Curso de Hidrogeología Aplicada. Area IX. Contaminación del Agua. Ministerio de Industria y Energía. Ministerio de Educación y Ciencia.
- IGME. 1987. Localización de zonas preferenciales para la recarga artificial de acuíferos con aguas pluviales en las islas Baleares. Instituto Geológico y Minero de España. Informe no publicado. 157 pp.
- ITGE. 1997. Estudio de viabilidad de recarga artificial de acuíferos a partir de cursos de agua superficial en la isla de Mallorca. Acuífero receptor y selección de emplazamientos favorables para realizar operaciones de recarga artificial de acuíferos. Instituto Tecnológico y Geminero de España y Direcció General de Régim Hidráulic del Govern Balear. Informe inédito. 78 pp.
- Hospital Villacorta, J. M.; Martínez de Azagra Paredes, A. y Rivas González, J. C. 2006. NUMCUR. Determinación del número de curva. Programa de apoyo a MODIPÉ. Unidad Docente de Hidráulica e Hidrología. ETSIIAA de Palencia. Universidad de Valladolid. www.oasificación.com.
- López-García, J.M. y Mateos Ruiz, R.M. 2003. La intrusión marina en los acuíferos de la isla de Mallorca. Tecnología de la Intrusión de Agua de Mar en Acuíferos costeros: Países Mediterráneos. Instituto Geológico y Minero de España. Tomo I. 383-392.
- Martínez Azagra, A.; Mongil, J. y del Río, J. 2003. Pequeña guía de uso del modelo MODIPÉ. 28 pp. www.Oasificación.com.
- Mangin, A. 1981. Utilisation des analyses corrélatoire et spectrale dans l'approche des systèmes hydrologiques. Computers Rendues Acad. Sci. París. 293: 401-404.
- MMA-IGME. 1997. Catálogo de acuíferos con problemas de sobreexplotación o salinización. Predefinición del programa de actuación: Baleares. Ministerio de Medioambiente e Instituto Geológico y Minero de España. 43 pp. <http://aguas.igme.es>.
- SGOP-IGME-IRYDA. 1973. Estudio de los recursos hidráulicos totales de las islas de Mallorca e Ibiza. Informe de Síntesis General. Tomo I. Memoria. Servicio Geológico de Obras Públicas, Instituto Geológico y Minero de España e Instituto de Reforma y Desarrollo Agrario, 268 págs.

Recibido: septiembre 2009
Revisado: septiembre 2009
Aceptado: septiembre 2009
Publicado: octubre 2009

