

APLICACIONES LIMNOLOGICAS DE LOS SATELITES LANDSAT

JOSE LUIS ORTIZ CASAS

RAMON PEÑA MARTINEZ

Centro de Estudios Hidrográficos (CEDEX)

INTRODUCCION

Desde que los satélites artificiales LANDSAT, a partir del nº 4, incorporaron a su sistema radiométrico los sensores TM (thematic mapper), se ha mejorado extraordinariamente la utilidad de los mismos como medio de observación de las masas de aguas epicontinentales. El sensor TM comporta, en efecto, unas importantes ventajas frente al MSS (multispectral scanner): 1º) Mayor discriminación espectral, al suministrar información digital en siete bandas o canales diferentes, frente a cuatro del MSS. 2º) Mayor resolución espacial, ya que el tamaño de "pixel" es de 30×30 m, en lugar de 80×80 m para las imágenes MSS. 3º) Resolución radiométrica ligeramente superior a la del MSS.

Consecuentemente, si bien existen precedentes de aplicaciones limnológicas del sensor MSS, la tendencia actual es, lógicamente, el desarrollo de aplicaciones TM. Este es, básicamente, el objetivo de un programa de investigación emprendido por el CEDEX en cooperación con el Bureau of Reclamation, dentro del Proyecto Cooperativo Hispano Norteamericano "Recursos Hídricos" que llevan a cabo, conjuntamente, dicho organismo federal de Estados Unidos y su homólogo español, la Dirección General de Obras Hidráulicas. Los resultados que brevemente se comentan en los párrafos siguientes se han obtenido utilizando el equipo de proceso de imágenes que posee el INTA, constituido en Punto Nacional de Contacto (NPOC) de la red europea EARTHNET. Los datos procesados proceden de las imágenes digitales grabadas en cintas magnéticas (CCT) y recibidas por la estación de Fucino (Italia), perteneciente a la ESA (Agencia Espacial Europea).

OBJETO DEL ESTUDIO

Las aplicaciones de los satélites Landsat al estudio limnológico de los embalses han de limitarse, lógicamente, a la evaluación de parámetros limnoló-

gicos en la capa más superficial de las aguas; y entre ellos a aquellos que presentan unas implicaciones físicas detectables por los elementos sensores TM (dicho más exactamente, aquellos que van asociados estrechamente a las radiancias reflejadas por la superficie del agua). Entre estos parámetros, los más inmediatos son la temperatura del agua, la transparencia, y el contenido de pigmentos. Estos dos últimos parámetros están, por otra parte, ligados al estado de eutrofia de los embalses (con la salvedad de la transparencia que pudiera responder en buena parte a turbiedad inorgánica en ciertos embalses y fechas). El presente estudio se centró, concretamente, en la temperatura de la superficie del agua, la profundidad de visión del disco de Secchi, y la concentración de clorofila *a* en superficie.

El objeto más inmediato del estudio es elaborar unas ecuaciones empíricas que permitan deducir, en cada uno de los pixels, los valores de los parámetros mencionados en función de los datos digitales suministrados por el TM, mediante las oportunas combinaciones lineales de las distintas bandas espectrales. En una fase inicial del estudio, la validez de tales ecuaciones se limita al conjunto de embalses situados dentro de una misma imagen (cuarto de escena TM, cuyas dimensiones en el terreno son aproximadamente 90×90 km), pero ulteriormente está previsto desarrollar unas ecuaciones aplicables a áreas más extensas.

Por otra parte, considerando la dimensión tiempo, las ecuaciones hasta ahora obtenidas se refieren a fechas específicas exclusivamente, pero, introduciendo las debidas correcciones atmosféricas y solares, parece asimismo posible obtener unas relaciones válidas para cualquier fecha comprendida en una determinada época del año.

Sea cual sea el alcance espacial y temporal de tales ecuaciones, éstas permiten elaborar unos mapas limnológicos temáticos, para cada uno de los parámetros estudiados, que muestren la dis-

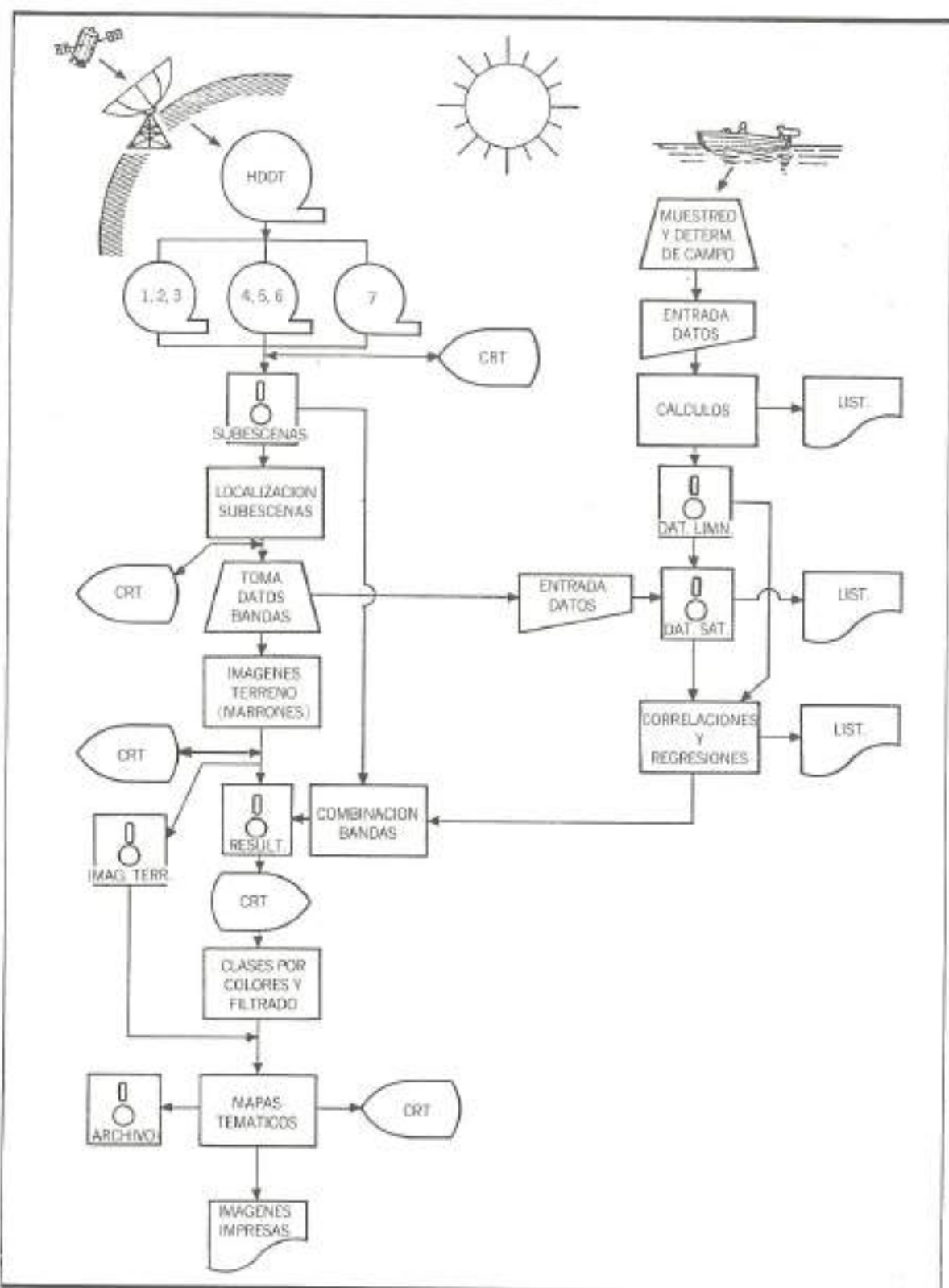


FIGURA 1. Diagrama esquemático de los trabajos realizados.

tribución en superficie de los valores de dichos parámetros en las fechas en que se disponga de imagen TM, con el apoyo o no de determinaciones efectuadas directamente en el embalse.

En última instancia, cabe la posibilidad de establecer una clasificación periódica de embalses, a nivel nacional, en cuanto a su estado trófico, en función del contenido de clorofila *a* y la transparencia de Secchi, utilizando una serie de imágenes que cubran todo el territorio abarcado.

TRABAJOS REALIZADOS

Los trabajos realizados en la primera fase de estudio se han concretado en los embalses y fechas indicados en la tabla nº 1, donde también se incluyen las coordenadas de las respectivas imágenes TM. Las fechas coinciden con tomas de imagen por el satélite Landsat 5 en las respectivas zonas. En cada embalse se establecieron diez puntos de muestreo, en los que se midieron directamente, en las fechas indicadas y a una hora lo más próxima posible a la del paso del satélite, la temperatura, la profundidad del disco de Secchi y la concentración de clorofila. Con esta masa de datos directos y con los valores digitales (conteos) suministrados por el TM en las distintas bandas espectrales, referentes a los respectivos píxeles, se han calculado, para cada uno de los tres parámetros limnológicos mencionados, tantas regresiones estadísticas como imágenes se han estudiado, con un total de ocho.

El método estadístico utilizado es el de regresión lineal múltiple con acumulación sucesiva de variables independientes, seleccionadas según los coeficientes de correlación y los errores típicos de la estima. Las variables independientes son los conteos de radiancia en los píxeles de muestreo y

en cada una de las siete bandas, mientras que la variable dependiente es el valor medio del parámetro en cuestión (en el caso de la profundidad del disco de Secchi, se ha adoptado como variable el valor inverso, a fin de manejar una magnitud correlacionada positivamente con las radiancias reflejadas).

Una vez obtenidas las ecuaciones de regresión, y si se consideran suficientemente significativas, se han elaborado los correspondientes mapas temáticos, utilizando los datos digitales de todos los píxeles que cubren las superficies de los embalses y estableciendo una codificación por colores que representa los distintos intervalos numéricos de los valores de cada parámetro.

Todos estos trabajos se resumen en el esquema de la figura 1. De esta figura conviene aclarar que HDUT (high density data tape) se refiere a las cintas que registran directamente la información emitida por el satélite, y cuyo formato es transformado en el Centro de Proceso de Imágenes de Frascati (Italia), dando lugar a las cintas (1, 2, 3), (4, 5, 6) y (7), con datos agrupados por bandas, que son las que se suministran a los usuarios. Por otra parte, CRT (cathode ray tube) hace referencia a la pantalla del monitor donde son visualizadas las imágenes digitales.

RESULTADOS

En general, las relaciones calculadas para la concentración de clorofila muestran unos valores muy aceptables (superiores a 0,8) para el coeficiente de determinación múltiple, R^2 , y valores en torno al 25% para el error típico de la estima. Para las fechas en que los resultados no fueron significativos se comprobó que ello era debido a la presencia de restos muy tenues de nubosidad sobre

EMBALSE	TRIBUTARIO PRINCIPAL	IMAGEN			FECHAS DE IMAGENES DE LANDSAT-5
		ORBITA	FILA	CUADRANTE	
EL ATAZAR	LOZOYA	201	032	II	4/7/85, 6/9/85
EL VADO	JARAMA	201	032	II	
ALCORNILLO	BORNOBA	201	032	II	
BELENA	SORBE	201	032	II	
SAN JUAN	ALBERCHE	202	032	II	15/10/85
EL BURGUILLO	ALBERCHE	202	032	II	
NAVALCAN	GUADYERBAS	202	032	IV	9/6/85, 25/6/85 12/8/85, 13/9/85
CAZALEGAS	ALBERCHE	202	032	IV	
AZUTAN	TAJO	202	032	IV	
EL TRANCO DE BEAS	GUACALQUIVIR	200	034	II	27/6/85
NEGRATIN	GUADIANA M.	200	034	I	

TABLA 1. Embalses incluidos en el estudio y fechas de muestreo/toma de imágenes.

los embalses, que no habían sido apreciados previamente en las fotos "quick look". En el otro extremo, los embalses de Navalcán (25/6/86) y Navaleja-Cazalegas (13/9/86) dieron lugar, respectivamente, a unos coeficientes R^2 de 0,86 y 0,96, con unos errores típicos de 13,34 y 11,4%. Sin embargo, en cada fecha resultó una combinación de bandas diferente, lo cual, de cara a un ulterior desarrollo de ecuaciones para "fechas múltiples", no es una circunstancia muy favorable. En la figura 2 se muestra, a título de ejemplo, el mapa de clorofila del embalse de El Burguillo, correspondiente al día 15 de octubre de 1985. Puede observarse que, en conjunto, la distribución de clorofila en superficie responde al esquema esperado, con un gradiente general de cola a presa en sentido decreciente.

Consideraciones similares pueden hacerse sobre los resultados relativos a la transparencia de Secchi, pero con respecto a la temperatura, teóricamente muy correlacionada con la radiancia en la banda 6 (infrarrojo térmico), surgieron algunas dificultades, sobre todo: a) amplitud muy reducida, para una misma fecha, entre valores extremos, b) influencia muy importante de la hora del día sobre la temperatura de la superficie del agua, lo que puede ser decisivo cuando la hora de determinación directa difiere considerablemente de la hora de paso del satélite.

CONCLUSIONES

Por lo que se lleva investigado en este proyecto,

se puede concluir que es perfectamente factible elaborar mapas temáticos de clorofila y transparencia en embalses, a partir de las imágenes digitales Landsat-TM y con el apoyo de unos muestreos o determinaciones directas. También es posible, en principio, extrapolar la deducción de datos limnológicos a embalses vecinos comprendidos en la misma imagen (cuarto de escena TM) en que se encuentran aquél o aquéllos que sirvieron de base para las regresiones múltiples. No obstante, puede ser necesario excluir aquellos datos o embalses que se encuentran en cualquiera de las siguientes circunstancias: a) Acusada turbiedad inorgánica en parte de la superficie estudiada b) Coloraciones debidas a sustancias húmicas o a algún tipo especial de contaminante c) Efecto de oleaje con formación de espumas en el momento de toma de la imagen d) Tramos de embalse muy estrechos debido a la influencia de píxeles tierra-agua e) Aguas poco profundas y transparentes con fondos arenosos f) En embalses con gran tasa de renovación hidráulica, muestreos con diferencia horaria considerable respecto del paso del satélite.

En la actualidad, el CEDEX continúa trabajando, en cooperación con el Bureau of Reclamation, para la elaboración de regresiones múltiples válidas para fechas variables y, en última instancia, para la puesta a punto de una técnica que permita elaborar clasificaciones periódicas de embalses a nivel nacional, en función de la clorofila y la transparencia, únicamente con empleo de imágenes de satélite.

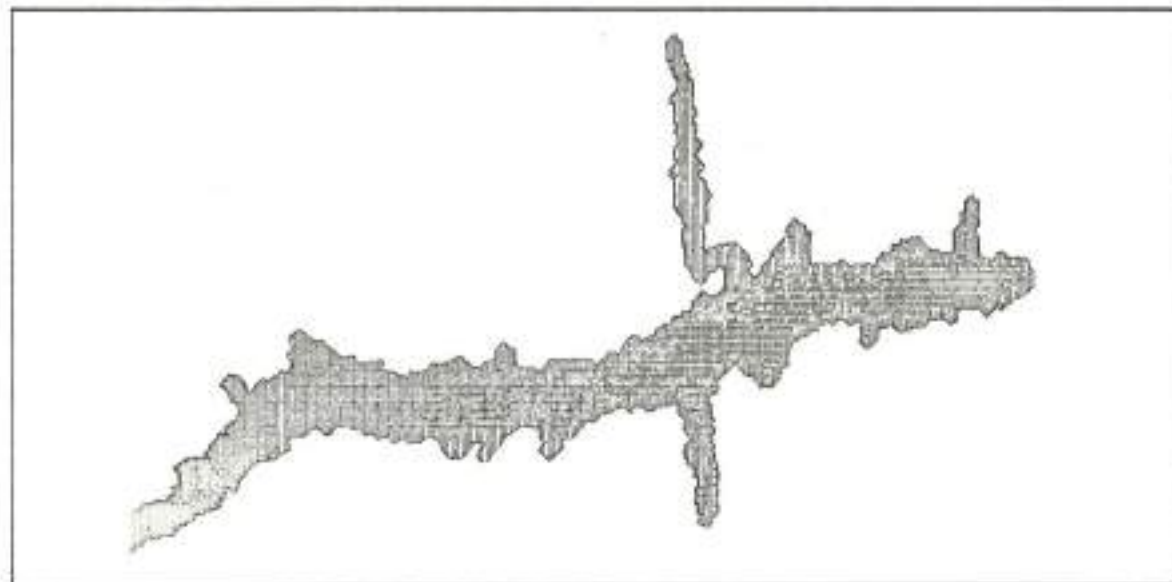


FIGURA 2. Mapa temático de concentración de clorofila del embalse El Burguillo correspondiente al día 15 de octubre de 1985.

ESTUDIO DE ESQUEMAS PARA EL APROVECHAMIENTO DE LOS RECURSOS HIDRICOS SUPERFICIALES DE LA SIERRA NORTE DE MALLORCA

JAVIER FERRER POLO

Centro de Estudios Hidrográficos (CEDEX)

1. INTRODUCCION

Ante las recientes dificultades en el abastecimiento de agua en la isla de Mallorca y especialmente en la Ciudad de Palma y los núcleos urbanos de su entorno, el Gobierno de la Comunidad Autónoma de las Islas Baleares planteó la conveniencia de acometer nuevas obras en la Sierra Norte de la isla, para así incrementar el grado de aprovechamiento de los recursos hídricos superficiales de esa zona húmeda, donde actualmente se encuentran construidos los embalses de Gorg Blau y Cúber.

La Administración Balear dispone de estudios donde se esbozan esquemas de posibles aprovechamientos que incluyen diversos embalses de regulación y conexiones entre ellos, y solicitó al CEDEX su colaboración en la elaboración de conclusiones sobre la viabilidad e idoneidad de dichos esquemas.

Conviene subrayar que si bien la generación de nuevos recursos hídricos en la isla no tiene porqué plantearse exclusivamente hacia el abastecimiento de la capital, este concepto destacaba singularmente en la relación de necesidades y condicionaba por sí mismo los grandes rasgos de la planificación hidráulica en Mallorca, lo cual justificó su papel protagonista en el trabajo acometido.

Los esquemas de aprovechamiento propuestos se centraron en los recursos superficiales y dada la finalidad del Estudio no se analizó la viabilidad de esquemas de aprovechamiento subterráneo con carácter complementario o alternativo a los planteados.

El presente artículo pretende resumir los puntos principales del Estudio realizado, haciendo hincapié en la metodología empleada antes que en los resultados y conclusiones particulares alcanzadas.

2. SITUACION ACTUAL

2.1. DISPONIBILIDADES SUPERFICIALES

Actualmente la gran mayoría de los recursos hídricos utilizados en Mallorca proceden de las reservas subterráneas limitándose la explotación de los recursos superficiales al aprovechamiento del sistema de embalses Gorg Blau - Cúber.

El primero de ellos (capacidad = 6,9 hm³) situado en la ladera Norte de la Sierra capta las aportaciones de su cuenca propia que, mediante un bombeo de 200 m. y canal en régimen libre son llevados al vecino embalse de Cúber (capacidad = 4,6 hm³) situado en la vertiente Sur y prácticamente sin aportación propia. Desde Cúber las aguas se conducen por gravedad hasta la planta de tratamiento de Lloseta y desde allí hasta los depósitos de Palma de Mallorca mediante una tubería de 0,75 m³/sg de capacidad. A esta conducción se van conectando durante este último recorrido diversas instalaciones de extracciones de acuíferos.

Estos embalses derivan un volumen medio de unos 8 hm³/año y su distribución mensual en un año medio se puede observar en los gráficos de la figura nº 1. En dicha figura se muestra la distribución mensual media para las principales fuentes de suministro a la ciudad de Palma así como los valores anuales de la demanda total en el período 76/77 - 84/85.

2.2. DISPONIBILIDADES SUBTERRANEAS

Además de las aguas procedentes del sistema Gorg Blau - Cúber se utilizan con destino a Palma otras captaciones de fuentes y diversos pozos entre los que destacan por su importancia las dos siguientes explotaciones:

— Pozos de Estremera. Situada en las proximidades de Buñola, están ubicados en un acuífero calcáreo con descargas hacia el acuífero del

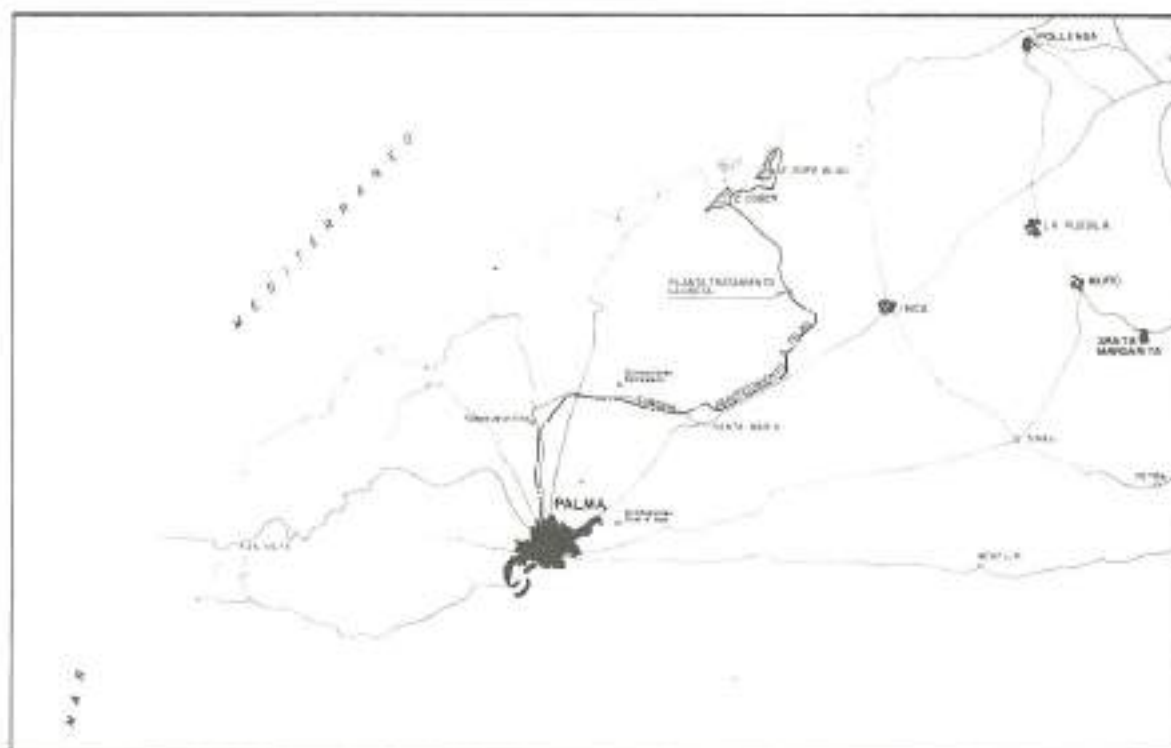


GRAFICO 1. Elementos principales del sistema actual de abastecimiento a Palma de Mallorca.

Llano de Palma sólo en el caso de niveles piezométricos por encima de un umbral estimado en la cota 40 m.s.n.m. Por debajo de este nivel no existe conexión con el acuífero del Llano y no han aparecido problemas de intrusión marina a pesar de la intensa explotación que ha sufrido y que ha llevado a variaciones de niveles entre los 40 y los 70 m.s.n.m.

La capacidad del acuífero se estima en torno a los 25 hm³, y sus extracciones son de unos 10 hm³/año. Este acuífero constituye la principal reserva de agua de buena calidad pudiendo actuar como un hiperembalse para la regulación interanual.

- Pozos de Pont D'Inca. Estos pozos extraen agua de un acuífero con grandes problemas en la calidad de su agua debido a intrusión marina con valores de hasta 2,2 gr/l de Cl⁻ en los caudales bombeados. La media anual de extracciones es de unos 13 hm³ y constituye la principal fuente de suministro en los años más secos.

El suministro a la ciudad de Palma se completa con la captación de la Font de la Villa (unos 4 hm³/año) y las extracciones de diversos pozos: Virgen de Monserrat, Son Serra, Son Roqueta y La Vileta con unos valores medios en conjunto de

unos 10 hm³/año. Estos pozos presentan problemas de calidad debido a la salinización de sus acuíferos, habiéndose alcanzado valores máximos de salinidad comprendidos entre los 3,3 gr/l de Cl⁻ en Son Serra y los 0,8 gr/l de Cl⁻ en Son Roqueta.

3. PLANTEAMIENTO GENERAL

Dada la importancia del abastecimiento a Palma de Mallorca en la búsqueda de nuevos recursos hídricos y la concurrencia en esta ciudad de suministros de distintas procedencias se decidió plantear la idoneidad y rendimiento de los futuros esquemas de aprovechamiento dentro del marco de una explotación conjunta con los principales elementos que componen el actual sistema de abastecimiento.

A la vista de los datos mensuales de suministros a la ciudad de Palma (facilitados por la Empresa Municipal de Aguas y Alcantarillado - EMAYA) se comprueba que incluso durante la temporada húmeda se extraen caudales importantes de los embalses de Gorg Blau - Cúber y de los acuíferos de Estremera y de Pont D'Inca. Esto demuestra la capacidad del sistema para absorber recursos superficiales fluyentes que se deriven directamente de otras fuentes y que se emplea-

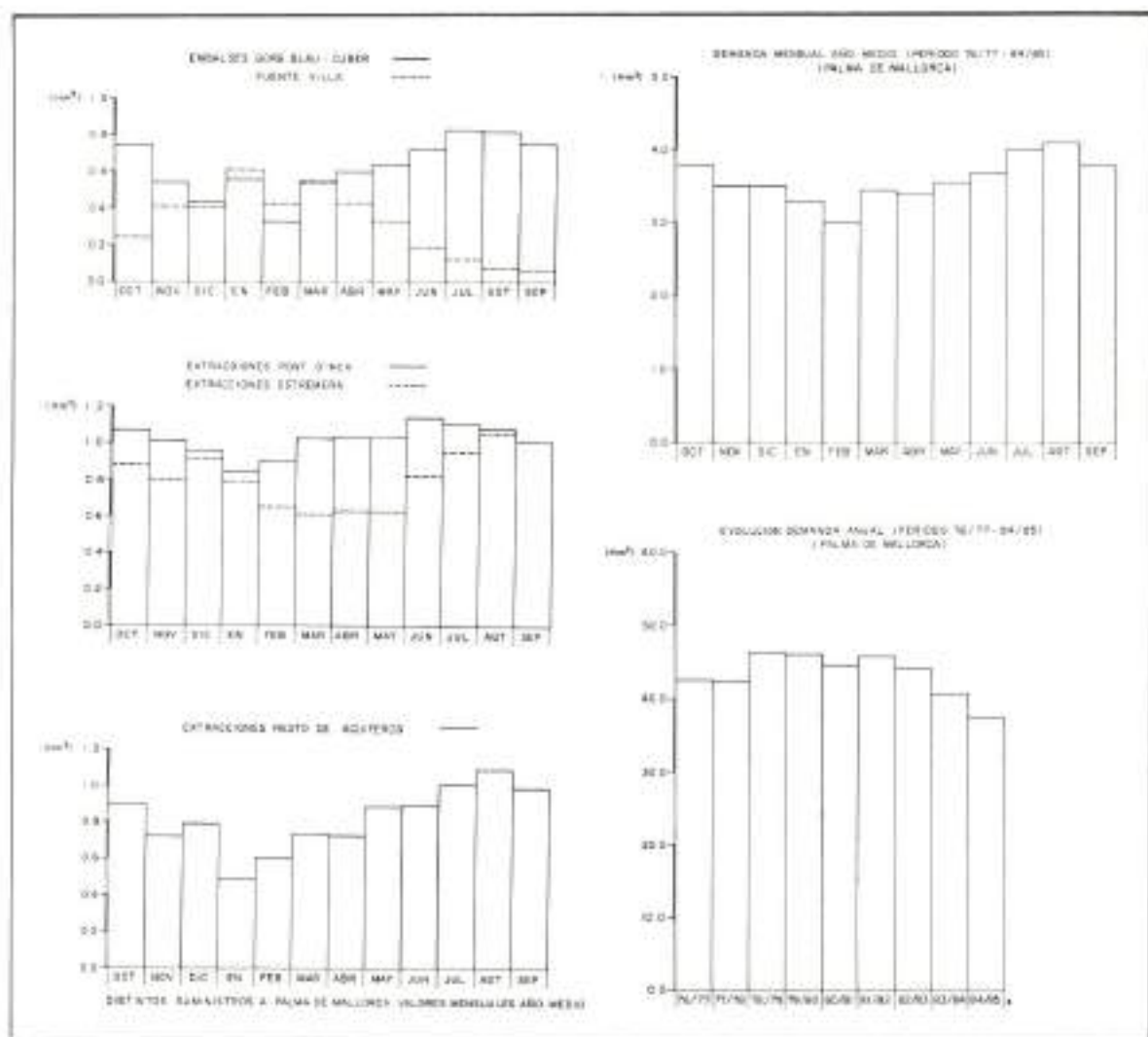


FIGURA 1.

rían en sustitución de las antes mencionadas, mejorando así la calidad y dedicando las reservas de los embalses superficiales y de los acuíferos para los estiajes y los años secos.

La consideración anterior justifica la viabilidad técnica de algunas obras de captación, sin necesidad de nuevos embalses, a la vez que aconsejó hacer girar los esquemas de aprovechamiento en torno a los principales puntos de agua y atenuar el carácter severamente determinante que en algunos planteamientos anteriores se concedía a la localización de posibles vasos.

La metodología general del estudio se centró en los dos siguientes puntos:

- Estimación de los recursos captables en los puntos considerados de interés en función

principalmente de la magnitud de esos recursos y/o de su carácter actual de recursos desaprovechados.

- Estimación de la magnitud y rendimiento de los esquemas aprovechamiento propuestos así como su repercusión en el actual sistema de abastecimiento mediante la simulación de dicho sistema.

4. ESTIMACION DE RECURSOS CAPTABLES

La simple observación de los registros foronómicos muestra dos destacadas fuentes de suministro en razón de la importancia de sus recursos: Torrente Mayor de Sóller y Torrente San Miguel.

Alrededor de estos puntos se definen los sistemas denominados:

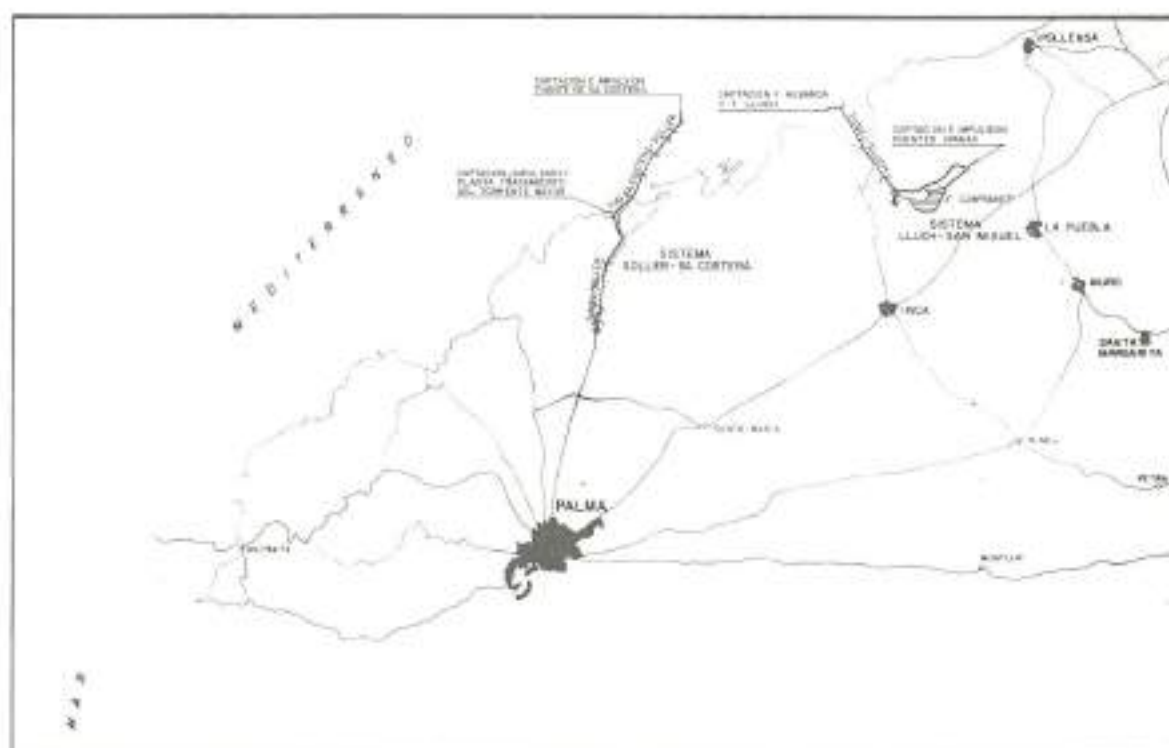


GRAFICO 2. Sistemas "Sóller - Sa Costera" y "Lluch - San Miguel". Planta general de los aprovechamientos conjuntos.

• Sóller - Sa Costera

• San Miguel - Lluch

Una visión general de dichos sistemas puede apreciarse en el gráfico nº 2.

4.1. SISTEMA SOLLER - SA COSTERA

El Torrente mayor de Sóller presenta una gran irregularidad y discontinuidad en sus aportaciones aunque se estima que pierde al mar, en la vertiente Norte de la Sierra, unos 20 hm/año en valor medio. En esa misma vertiente se encuentra el manantial de Sa Costera que vierte directamente al mar a cota prácticamente nula unos caudales apreciables.

4.1.1. Torrente Mayor de Sóller. En aras de una mayor sencillez, y a falta de un estudio de detalle sobre el punto idóneo de captación, se supuso que ésta se realiza sobre los sobrantes prácticamente a nivel del mar, que una vez depurados serían bombeados al punto de consumo.

Se utilizaron los datos diarios de la estación foronómica nº 16: Torrente Mayor en Sóller durante el período 1976/77 a 1982/83 cuyo valor medio es de 20,0 hm³/año.

Dada la inexistencia de posibles cerradas el aprovechamiento de estos recursos debe realizarse por captación directa. Con los datos diarios referidos anteriormente se calcularon para diversas capacidades de bombeo los valores anuales medios captables obteniéndose los siguientes resultados:

Q bombeo m ³ /sg	A aportación anual captable hm ³
0,5	5,1
1,0	7,3
2,0	10,0

4.1.2. Fuente Sa Costera. La evaluación de los recursos de este manantial, totalmente desaprovechados en la actualidad, se ve dificultada por la inexistencia de datos fiables y continuos de aforos disponiéndose únicamente de datos de aportaciones mensuales estimadas por el Servicio Hidráulico de Baleares entre octubre de 1975 y marzo de 1976.

Se planteó una correlación con los datos mensuales de la estación foronómica nº 56: Fuente S'Olia obteniéndose un aceptable coeficiente de correlación $r = 0,953$. A partir de esta ley de regresión se generaron valores diarios con los

datos de la ya mencionada estación nº 56 en el período 1976-77 a 1982-83, obteniéndose una aportación media de 3,9 hm³ y los siguientes valores anuales medios captables para distintas capacidades de bombeo:

Q bombeo m ³ /sg	A aportación anual captable hm ³
0,5	3,5
1,0	3,8

4.2. SISTEMA SAN MIGUEL - LLUCH.

El Torrente San Miguel presenta importantes aunque irregulares aportaciones, unos 20 hm³/año, la mayor parte de las cuales provienen de un grupo de fuentes intermitentes de carácter kárstico: Las Ufanas. Su afluente Coma Freda, pese a sus reducidas aportaciones juega un importante papel por ofrecer una de las pocas posibilidades de vaso para un embalse, de hasta 12 hm³ de capacidad denominado Campanet.

Se han realizado numerosos estudios para intentar una posible regulación subterránea de Las Ufanas pero los resultados hasta el presente no permiten asegurar la viabilidad de captar en profundidad niveles productivos y con reservas adecuadas. Sin pretender zanjar el tema de la regulación subterránea, el estudio se centró en las posibilidades de captación superficial.

La imposibilidad de un embalse situado aguas abajo de la surgencia de los manantiales, debido a la inexistencia de cerradas y al valor de los terrenos, conduce a esquemas basados en un bombeo que permita conducir los recursos directamente al punto de consumo o bien al futuro embalse de Campanet donde se podrían regular.

No es previsible que se puedan ocasionar perjuicios a los habitantes de la Puebla situados aguas abajo de las derivaciones propuestas puesto que se prevén unos caudales mínimos y los "reventones" de Las Ufanas proporcionan agua sobrada para todos los usos, que en la actualidad se pierde en el mar.

A este esquema se puede incorporar el Barranco de Lluch con unos caudales totalmente desaprovechados pero con la dificultad que supone cruzar la Sierra Norte para conducirlos a los puntos de consumo. Estos recursos podrían regularse en el futuro embalse de Campanet, al que se llevarían mediante un túnel de 3,5 - 4 km de longitud y que podría utilizarse también para conducir las sueltas del embalse de Gorg Blau por gravedad hasta Mallorca, ahorrando los gastos actuales de bombeo hasta el embalse de Cúber.

4.2.1. Torrente de San Miguel. Para la estimación de sus recursos se utilizaron los datos diarios de la estación de aforos nº 4: Torrente San Miguel en Campanet en el período 1968-69 a 1982-83 cuyo valor medio es de 19,8 hm³/año.

Para evitar posibles interferencias con los usos de aguas abajo, se puso un techo a los caudales susceptibles de captación de acuerdo con la expresión:

$$Q^* = 0,8 \times (Q - 0,2)$$

en donde:

Q^* = máximos caudales susceptibles de captación en m³/sg.

Q = caudales diarios estación nº 4 en m³/sg.

Con estos valores se calcularon para diversas capacidades de bombeo instalados los valores anuales medios captables:

Q bombeo m ³ /sg	A aportación anual captable hm ³
1,0	5,2
2,0	7,9
3,0	9,3

4.2.2. Torrente Coma Freda. Este torrente tiene muy escasas aportaciones pero serían aprovechadas en el caso de construirse el embalse de Campanet. Se utilizaron los datos mensuales de la estación de aforos nº 12: Torrente Coma Freda en Campanet durante los años 1969-70 a 1982-83, cuyo valor medio anual es de 1,86 hm³.

4.2.3. Barranco de Lluch. El Barranco de Lluch en las proximidades del Santuario de Lluch es otro de los puntos considerados de interés, recogiendo las aportaciones del torrente Lluch y de la Fuente Aubarca que drenan conjuntamente una superficie aproximada de 7 km² con una elevada pluviometría.

En fechas recientes se han instalado en los dos anteriores cursos intermitentes de agua las siguientes estaciones de aforo:

Nº Estación	Nombre	Comienzo de funcionamiento
75	Torrente Lluch	1-10-85
76	Fuente Aubarca	1-10-85

con medidas diarias de niveles en sus respectivas escalas.

Dada la disparidad en las estimaciones de recursos realizadas en trabajos anteriores, previos a la instalación de dichas estaciones, se optó por realizar un estudio basado en estos nuevos datos.

Debido a la escasa correlación encontrada entre estos valores aforados y los correspondientes a estaciones vecinas se optó por plantear un modelo matemático conceptual precipitación - aportación de cuatro parámetros a escala mensual. Este modelo fue calibrado con los datos disponibles de precipitación, aportación y evapotranspiración potencial y utilizado para generar, a partir de datos de precipitación, una serie de aportaciones de mayor longitud que permitiera determinar el valor medio de las aportaciones.

El modelo utilizado —elaborado por J.R. Téniz (C.E.H.)— se basa en una descripción del ciclo hidrológico apoyada en cuatro parámetros: C , $H_{\max}$, $I_{\max}$, α indicando brevemente a continuación los cálculos a realizar en cada periodo de tiempo i .

1. CALCULO DE EXCEDENTES T A PARTIR DE LA PRECIPITACION P

$$T = \frac{(P - P_0)^2}{P + d - 2 P_0} \quad \text{si } P > P_0$$

$$T = 0 \quad \text{si } P \leq P_0$$

$$\text{en donde: } P_0 = C (H_{\max} - H_{i-1}) \\ d = H_{\max} - H_{i-1} + ETP$$

siendo:

T = excedentes en mm

P = precipitación en mm en el periodo i

H_i = contenido de humedad en mm en el suelo al final del periodo i

ETP = evapotranspiración potencial en mm en el periodo i

C = parámetro del modelo: adimensional

$H_{\max}$ = parámetro del modelo: mm

2. CALCULO DE LA HUMEDAD DEL SUELO H_i AL FINAL DEL PERIODO

$$H_i = \text{Max} (0, H_{i-1} + P - T - ETP)$$

3. CALCULO DE LA INFILTRACION I AL ACUIFERO EN MM

$$I = \frac{T}{T + I_{\max}}$$

siendo:

$I_{\max}$ = parámetro del modelo: mm

4. CALCULO DE LA APORTACION SUBTERRANEA DEL ACUIFERO EN MM

$$ASUB = Q_{i-1} \frac{(1 - e^{-\alpha \Delta t})}{\alpha \Delta t} + I (1 - \frac{1 - e^{-\alpha \Delta t}}{\alpha \Delta t})$$

en donde:

α = parámetro del modelo: rama de descarga del acuífero en días⁻¹

Δt = número de días del mes

Q_{i-1} = caudal subterráneo al principio del mes en mm/mes

$ASUB$ = aportación subterránea durante el mes en mm

5. CALCULO DEL CAUDAL SUBTERRANEO Q_i AL FINAL DEL PERIODO

$$Q_i = Q_{i-1} e^{-\alpha \Delta t} + I (1 - e^{-\alpha \Delta t})$$

6. CALCULO DE LAS APORTACIONES TOTALES: $ATOP$ EN MM

$$ATOP = ASUB + T - I$$

La calibración de los parámetros se realizó con los datos mensuales correspondientes a los 17 meses comprendidos entre Octubre de 1985 y Febrero de 1986:

Aportaciones. Se utilizaron los niveles diarios medios en las estaciones E-75 y E-76, traducidos a caudales mediante sus respectivas curvas de gasto determinadas por el Servicio Hidráulico de Baleares a partir de aforos directos.

Precipitaciones. Se consideraron los valores mensuales de la estación pluviométrica B-13 del Monasterio de Lluch, admitidos como representativos de la precipitación media sobre la cuenca dado el pequeño tamaño de la misma.

Evapotranspiración potencial. Se usaron los valores del año medio para la estación meteorológica del Monasterio de Lluch que se indicaban en el Estudio de los Recursos Hidráulicos Totales de Baleares, Marzo 1973, realizado por el Comité de Coordinación de los Ministerios de Obras Públicas, Industria y Agricultura.

Con estos datos se procedió a la calibración de los parámetros del modelo mediante sucesivos tanteos buscando un adecuado ajuste gráfico de las aportaciones calculadas e históricas y un valor mínimo de la suma de sus diferencias cuadráticas. Los valores adoptados definitivamente para los parámetros —que conducen a un aceptable grado de ajuste (Gráfico Nº 3)— son los siguientes:

Metro Pacífico-Oporto. Madrid.

■ *En ello nos volcamos,
en abrir nuevos caminos que
transformen el futuro.*

■ *Un futuro firme y
seguro basado en la experiencia
acumulada a lo largo de
un siglo.*

*Con la técnica precisa
para ser una empresa dinámica
en constante evolución.*

■ *Levantamos nuevos
horizontes y abrimos nuevos
caminos.*

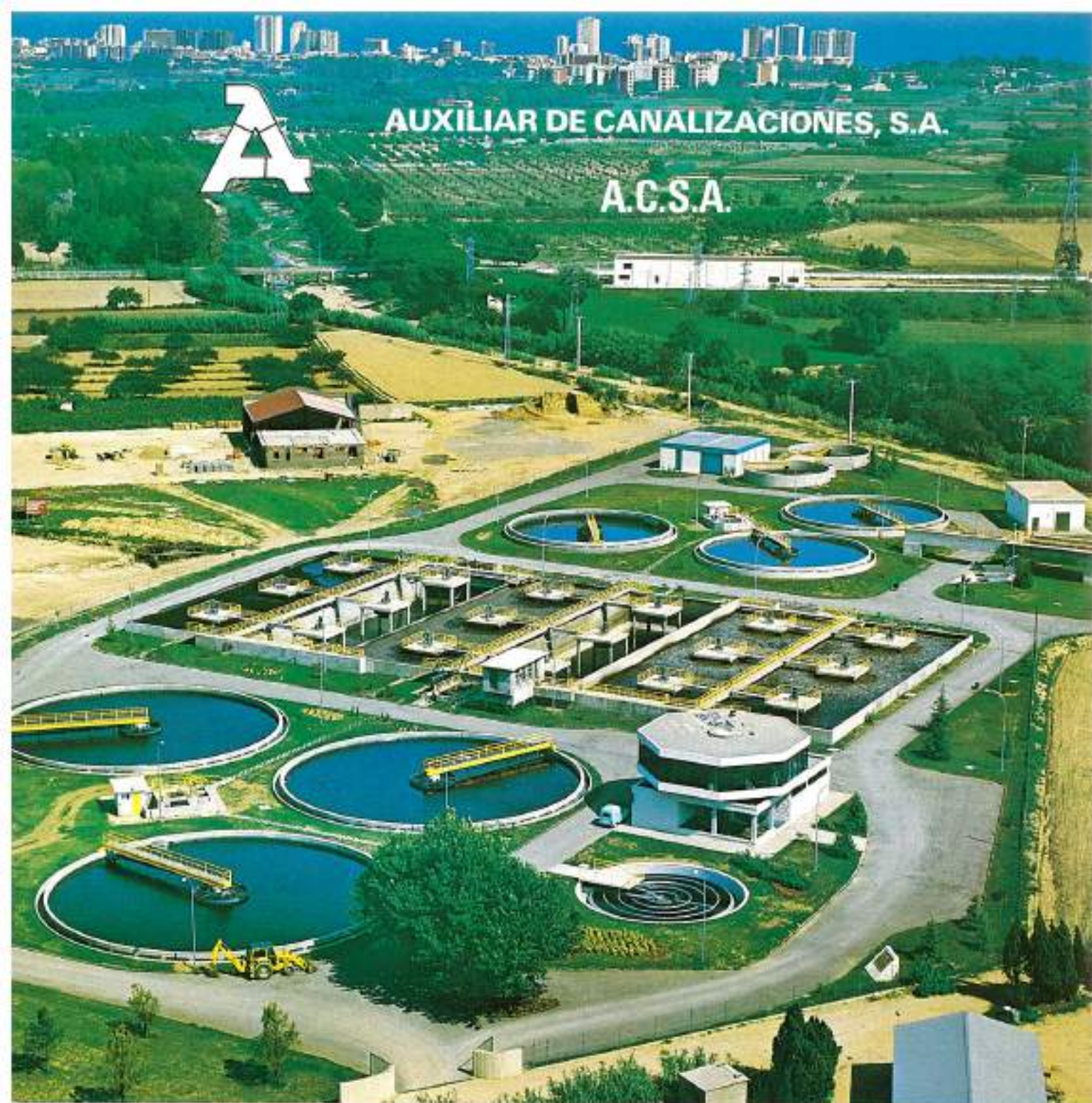
Abrimos nuevos caminos

 **FOMENTO**
DE OBRAS Y CONSTRUCCIONES S.A.



AUXILIAR DE CANALIZACIONES, S.A.

A.C.S.A.



Abastecimientos de agua, Depósitos
Estaciones depuradoras, Redes de saneamiento

Emisarios submarinos

Gasoductos

Conservación de redes

Galerías, defensas de cauces, muros de contención

Instalaciones de bombeo y pavimentaciones

Central:

Manro Casanovas, s/n.
Tel.: 236 87 00 - 08026 BARCELONA

Oficina:

Marqués de la Ensenada, 14
Tel.: 410 15 50 - 28004 MADRID

Delegaciones:

Brasil, 19 - Tel.: 70 52 16
46003 VALENCIA
Escultor Galmes, 2 - Tel.: 29 25 24
07004 PALMA DE MALLORCA
Camino de Purchill, s/n.
(Fte. Molino La Torrecilla)
Tel.: 257 56 62 - GRANADA

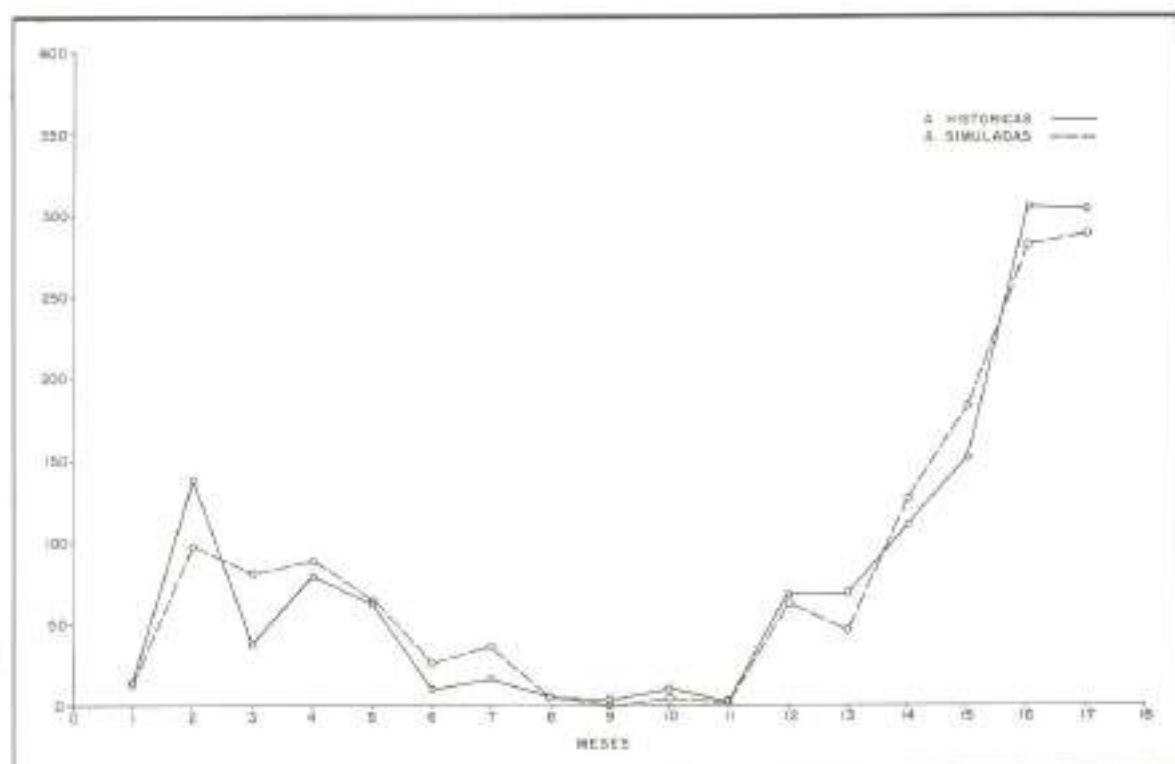


GRAFICO 3. Aportaciones (MM) históricas y simuladas. Barranco de Luch.

$C = 0,3$
 $H_{m\acute{a}x} = 200 \text{ mm}$
 $\alpha = 0,2 \text{ días}^{-1}$
 $I_{m\acute{a}x} = 100 \text{ mm}$

Una vez admitido este modelo hidrológico y los valores propuestos para sus parámetros se simuló el período 1945/46 a 1982/83 con las precipitaciones mensuales de la estación pluviométrica del Monasterio de LLuch (B-13) obteniendo la correspondiente serie de aportaciones históricas generadas cuyo valor medio anual fue de $3,4 \text{ hm}^3$.

De estas aportaciones se estimó que pueden derivarse del orden del 90% ($3 \text{ hm}^3/\text{año}$), mediante un túnel de $2-4 \text{ m}^3/\text{sg}$ que las conduzca al futuro embalse de Campanet donde podrán regularse.

5. SIMULACION DE LOS ESQUEMAS PROPUESTOS

Una vez calculados los recursos captables en los diversos puntos considerados de interés se estimó de forma aproximada los rendimientos esperados y las capacidades de embalse razonables, mediante un modelo de simulación del sistema de abastecimiento a la ciudad de Palma durante el período 1976-77 a 1982-83.

Este período tiene unas aportaciones ligeramente inferiores a las medias del período completo de registro y presenta una gran irregularidad en su reparto temporal, por lo que los resultados pueden considerarse conservadores.

Como hipótesis de cálculo se incluyeron en el modelo exclusivamente los elementos principales del sistema de abastecimiento:

Embalses de Gorg Blau - Cúber
 Acuífero de Estremera
 Acuífero de Pont D'Inca

El resto de elementos: Fuente de la Villa, extracciones en Virgen de Montserrat, etc. no se consideraron directamente en la simulación, admitiendo inalterado en todos los casos su régimen de explotación, e igual al que tuvo lugar históricamente.

En este modelo simplificado se integraron cada uno de los esquemas propuestos con diversas hipótesis de desarrollo de las obras, definiendo unas elementales reglas de operación que permitieron estudiar su comportamiento global.

Esta simulación, dada la importancia que las captaciones fluyentes tienen en los esquemas propuestos y la torrencialidad de los cursos de agua, se planteó a escala diaria.

5.1. APORTACIONES

La simulación planteada requiere las aportaciones exteriores al sistema en los puntos de captación y cabecera de embalses, para el período de estudio. Se repasa brevemente estos puntos y el origen de los valores utilizados (Ver apartado 4):

- **Torrente Mayor.** Se utilizaron los datos diarios de caudales en la estación de aforos nº 16; Torrente Mayor en Saller.
- **Fuente Sa Costera.** Se utilizaron los caudales diarios generados en el apartado 4.
- **Torrente San Miguel.** Se utilizaron los caudales diarios en el apartado 4 mediante la minoración allí expuesta de los datos diarios de la estación de aforos nº 4; Torrente San Miguel en Campanet.
- **Torrente Coma Freda.** Se utilizaron los valores mensuales de aportaciones a la estación de aforo nº 12; Torrente Coma Freda en Campanet. Puesto que estas aportaciones sólo serán captables en el caso de construirse el embalse de Campanet, es suficiente trabajar con valores mensuales, aunque dado que la simulación del conjunto es a escala diaria se repartieron estas aportaciones homogéneamente entre los días de cada mes.
- **Torrente Lluch y Fuente Aubarca.** Se manejaron las aportaciones mensuales generadas con el modelo precipitación-aportación expuesto en el apartado 4, admitiendo que serán captadas un 90% de las mismas. Dado que en los esquemas propuestos estas aportaciones serán reguladas en el embalse de Campanet se consideró adecuado repartirlas homogéneamente dentro de cada mes como en el caso anterior.
- **Aportaciones a los embalses de Gorg Blau - Cúber.** Estos elementos ya construidos y en explotación no presentan estadísticas directas de sus aportaciones y se optó por calcularlas indirectamente a partir de los datos disponibles de volúmenes embalsados a final de mes y de las sueltas realizadas durante el mismo.

El cálculo se redujo a resolver la ecuación:

$$A_i = V_{i+1} - V_i + S_i$$

en la que:

V_i = volumen embalsado al comienzo del mes i

V_{i+1} = volumen embalsado al final del mes i

S_i = sueltas efectuadas en el mes i

A_i = aportaciones calculadas a los embalses en el mes i

Con este esquema se despreciaron las pérdidas por evaporación y filtración pero se consideró suficiente para el grado de detalle requerido.

Como en los casos anteriores estos valores mensuales se repartieron uniformemente para la simulación diaria.

5.2. DEMANDA

Se consideró una demanda igual a los suministros históricos mensuales servidos por el conjunto de los tres elementos mencionados anteriormente, suponiendo un reparto homogéneo dentro del mes. Los valores medios anuales ($\text{hm}^3/\text{año}$) en el período de simulación fueron:

Embalses de Gorg Blau - Cúber	7,9
Acuífero de Estremera	10,5
Acuífero de Pont D'Inca	12,7
Suma	31,1
Resto suministros no simulados	13,3
TOTAL	44,4

El sistema de abastecimiento —constituido por los tres elementos anteriores y los nuevos esquemas de aprovechamiento propuestos— se simuló con la demanda parcial indicada ($31,1 \text{ hm}^3/\text{año}$) de modo que los nuevos recursos añadidos sustituyeran en lo posible por una parte las extracciones al acuífero salinizado de Pont D'Inca, mejorando la calidad, y por otra las extracciones de Estremera y los desembalses de Gorg Blau - Cúber aumentando la garantía de suministro al mantener mayores reservas.

5.3. MODELO DE SIMULACION

Las simulaciones fueron realizadas con una simplificada regla de gestión basada en el siguiente orden a la hora de suministrar recursos:

1. Caudales fluyentes captados sin posibilidad de almacenamiento.
2. Suelas de los nuevos embalses propuestos.
3. Suelas de los actuales embalses.
4. Extracciones de acuíferos.

Todo ello consecutivamente hasta completar la demanda total y con las únicas restricciones que suponen las limitaciones físicas de capacidad de embalse o de capacidad en las conducciones.

Los acuíferos de Pont D'Inca y Estremera se trataron conjuntamente como un depósito con un gran volumen inicial y sin limitaciones en las extracciones.

Los embalses superficiales de Gorg Blau y Cúber se consideraron como un sólo embalse de capacidad suma.

El modelo de simulación esquematiza el sistema real mediante una red de flujo compuesta

por nudos y arcos que los unen, realizando para cada período de tiempo la gestión del sistema mediante la regla anteriormente indicada y la resolución de la ecuación de continuidad de flujos en los nudos del sistema (en un orden predefinido, función de la topología de la red) calculando, si los hubiera, los vertidos incontrolados y despreciando las pérdidas de filtración y evaporación.

Se realizaron varias simulaciones con diversos grados de desarrollo de los esquemas de aprovechamiento obteniendo resultados sobre los siguientes temas:

Capacidad de bombeo a instalar en las captaciones fluyentes propuestas en función de:

- Estructura de la demanda.
- Características de las aportaciones naturales.

Capacidades de los nuevos embalses propuestos.

Rendimiento hídrico de los nuevos esquemas

de aprovechamiento al adaptarse a la demanda real y a la capacidad de los embalses.

Influencia de estos esquemas en los actuales elementos y en particular en la capacidad de los embalses de Gorg Blau y Cúber que verían endurecida su gestión.

Las simulaciones realizadas no pretendieron ser exhaustivas y dada la cantidad de variables que intervienen: capacidad de captación, capacidades de embalse, distinta regla de gestión, etc. los resultados obtenidos deben ser entendidos como una primera aproximación a la magnitud de las obras y a sus rendimientos hídricos, suficiente para los objetivos globales del estudio.

5.4. ESQUEMAS PROPUESTOS Y RESULTADOS OBTENIDOS

Los dos sistemas principales propuestos, Sóller Sa Costera y San Miguel - Lluç, se indican esquemáticamente en el gráfico nº 4 en conexión con los

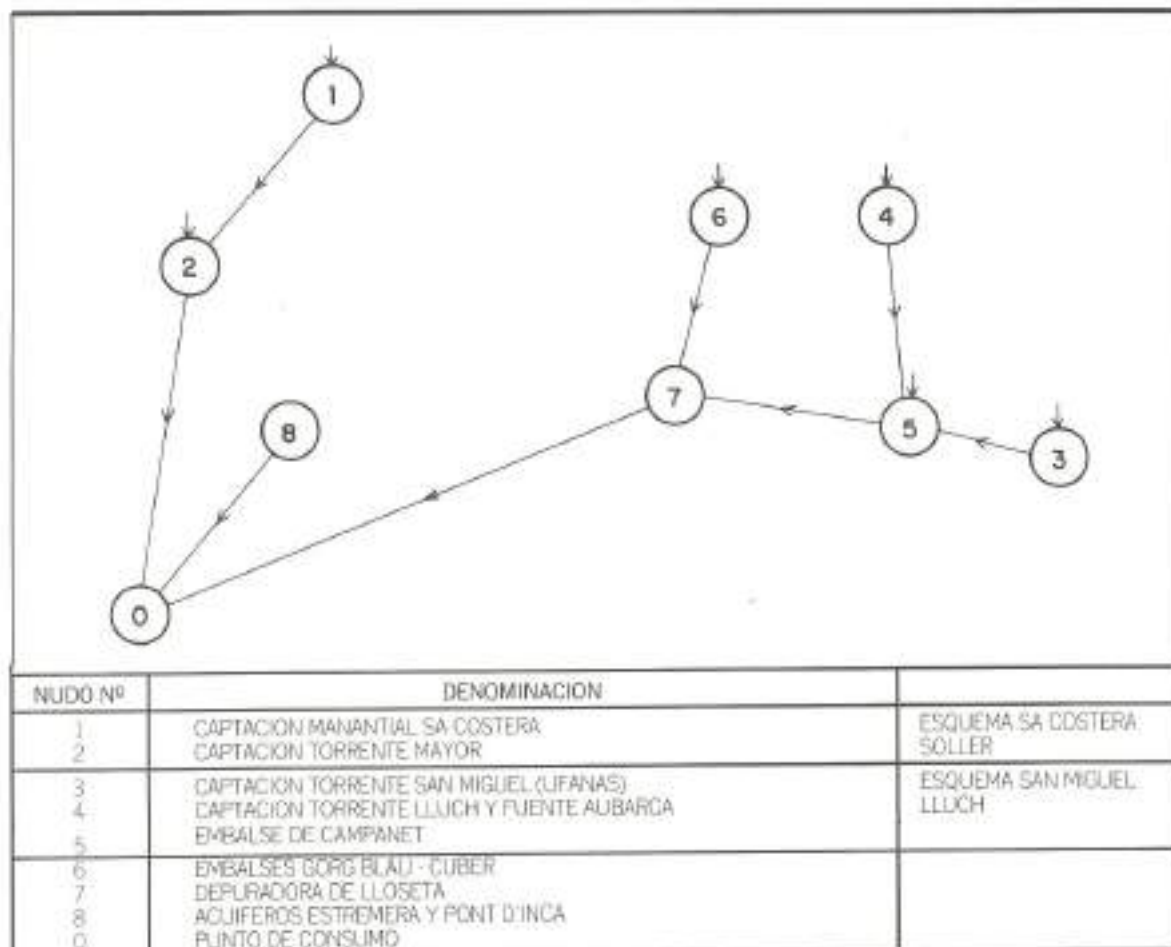


GRAFICO 4. Esquemas propuestos.

elementos principales del actual sistema de abastecimiento a Palma, correspondiendo dicho gráfico al grado último de desarrollo de ambos sistemas.

Se simularon diversas hipótesis de desarrollo de las obras, que cubren un amplio abanico de posibilidades resumiéndose a continuación los resultados más significativos:

5.4.1. Sistema Sóller - Sa Costera. Tras unas simulaciones iniciales se fijaron las capacidades de captación idóneas en $0,5 \text{ m}^3/\text{sg}$ para el manantial de Sa Costera y $1,0 \text{ m}^3/\text{sg}$ para el Torrente Mayor en Sóller a la vista de los datos de aportaciones y de la demanda que la ciudad de Palma puede absorber directamente.

Se realizaron tres simulaciones planteando la captación del manantial de Sa Costera, del Torrente Mayor o de ambos elementos conjuntamente, limitando los desembalses de los embalses de Gorg Blau - Cúber a $0,5 \text{ m}^3/\text{sg}$ observándose una gestión más dura de éstos pero sin apreciar una necesidad de mayor capacidad.

Los recursos aportados se resumen en la siguiente tabla:

	H1	H2	H3
CAPTACION SA COSTERA	si	no	si
CAPTACION TORRENTE MAYOR	no	si	si
CAPACIDAD DE BOMBEO (m^3/sg)	0,5	1,0	1,0
RECURSOS CAPTADOS (hm^3)	3,5	6,8	9,0

5.4.2. Sistema San Miguel - Lluch. La captación de Las Ufanas mediante bombeo, directamente al punto de consumo o bien al embalse de Campanet donde sería regulado, fue estudiada previamente con la ayuda del modelo de simulación. Las capacidades de bombeo a instalar quedaron fijadas en $1 \text{ m}^3/\text{sg}$ en el primer caso (limitada por la demanda de Palma) y en $1-3 \text{ m}^3/\text{sg}$ en el segundo caso, reduciéndose el rendimiento hídrico para mayores capacidades.

Se estudió la capacidad del futuro embalse de Campanet simulando unas sueltas máximas de $0,7 \text{ m}^3/\text{sg}$ cuando la demanda lo permite. El resto de elementos del sistema completan la demanda, endureciéndose la gestión de los embalses ya construidos al realizar sus salidas supeditadas a las del embalse de Campanet y con un caudal máximo de $0,5 \text{ m}^3/\text{sg}$.

Para distintas hipótesis de desarrollo de las obras se simuló la situación del embalse de Campanet, resumiéndose en la siguiente tabla su máximo volumen almacenado y los recursos generados.

	H1	H2	H3	H4	H5	H6
CAPTACION BARRANCO LLUCH	NO	NO	NO	SI	SI	SI
CAPACIDAD BOMBEO DESDE UFANAS	1	1	3	—	1	3
CONSTRUCCION						
EMBALSE CAMPANET	NO	SI	SI	SI	SI	SI
RECURSOS GENERADOS ($\text{hm}^3/\text{año}$)	4,7	6,8	10,0	4,7	9,4	12,6
MAXIMO VOLUMEN ALMACENADO EN CAMPANET (hm^3)	—	5,5	10,4	4,3	6,9	11,0

Los valores obtenidos de máximo volumen almacenado son una primera aproximación a la capacidad requerida y tienen un carácter conservador por la singular irregularidad del período de cálculo utilizado y por la hipótesis implícita de regular el 100% de las aportaciones consideradas.

En los casos simulados no se produjeron vertidos en los embalses de Gorg Blau - Cúber a pesar del endurecimiento de su gestión.

5.4.3. Sistema conjunto Sóller - Sa Costera y San Miguel - Lluch. Por último se estudió el funcionamiento conjunto de ambos sistemas, en el supuesto del máximo desarrollo posible en cada uno de ellos.

En las simulaciones citadas hasta ahora se trabajó con la demanda histórica satisfecha por los tres principales elementos del sistema de abastecimiento actual: embalses Gorg Blau - Cúber y acuíferos de Estremera y Pont D'Inca, por ser una hipótesis desfavorable en cuanto a rendimiento de los nuevos esquemas, ya que un aumento de aquella facilita la colocación más directa del agua captada. Sin embargo no ha parecido realista compatibilizar la explotación simultánea de los dos sistemas con esa hipótesis de estancamiento de la demanda y por ello en este caso ésta se ha supuesto aumentada en un 30% (unos $9 \text{ hm}^3/\text{año}$).

La sencilla norma de gestión utilizada ha sido el uso prioritario de las captaciones de Sa Costera y Torrente Mayor, en segundo lugar las aguas del embalse de Campanet con un caudal máximo de $0,9 \text{ m}^3/\text{sg}$, en tercer lugar los recursos del sistema Gorg Blau - Cúber con un caudal máximo de $0,6 \text{ m}^3/\text{sg}$ y por último las extracciones de los acuíferos de Estremera y Pont D'Inca hasta completar la demanda.

En este caso se han utilizado las máximas capacidades posibles: 13 hm^3 en Campanet y $13,2 \text{ hm}^3$ en el sistema Gorg Blau - Cúber resultante al colocar las compuertas previstas en el proyecto inicial, observándose ciertos vertidos en el embalse de Campanet mientras que no los hubo en el resto de embalses.

Los recursos aprovechados resultaron ser, en valores medios anuales:

SISTEMA SOLLER - SA COSTERA	9,5 hm ³
SISTEMA SAN MIGUEL - LLUCH	11,6 hm ³
TOTAL	21,1 hm ³

6. CONCLUSION

El estudio de esquemas de aprovechamiento con

cuantificación de la magnitud de las obras y de los rendimientos hídricos esperados puede utilizar como valiosa ayuda sencillos modelos hidrológicos y de gestión de recursos como los sucintamente expuestos en este artículo, que dado el rápido avance de la tecnología informática pueden ser desarrollados en pequeños microordenadores cada vez más extendidos en los ambientes técnicos.

vibradores urbar para edificación y obras públicas



agujas vibrantes
con motor incorporado

convertidor
de
frecuencia



vibradores VH-15 sobre tractor



bombas sumergibles para agotamientos



vibración talves
vibradores eléctricos externos.



agujas vibrantes
neumáticas

agujas P-140

alisadoras y reglas vibrantes



urbat
ingenieros s.a.

avda. de la Zurriola, 6
telf. (943) 27 77 00
telex 38171
20002 SAN SEBASTIAN



Un aliado
muy rentable.

Motobasculantes



14 Modelos de 1000 a 3000 Kgs.
Diferentes sistemas de descarga.
Tracción a 2 y 4 ruedas.



Carretillas Elevadoras

De 1000 a 2500 Kgs.



Pala Cargadora

Modelo standard: 400 litros.
Versiones con pinzas para troncos,
retro excavadora, etc.



Auto - hormigonera

Capacidad de amasado: 750 litros.



APART, P.O.B. 194
TEL. (93) 874 73 11
TELEX 53102 AUDU E
MANRESA (Barcelona) ESPAÑA
