

# AGUA, ENERGÍA Y MEDIOAMBIENTE



Joaquín Melgarejo Moreno  
M<sup>a</sup> Inmaculada López Ortiz  
Patricia Fernández Aracil



# **AGUA, ENERGÍA Y MEDIO AMBIENTE**

© los autores, 2022  
© de esta edición: Universitat d'Alacant  
ISBN: 978-84-1302-184-3

Reservados todos los derechos. No se permite reproducir, almacenar en sistemas de recuperación de la información, ni transmitir alguna parte de esta publicación, cualquiera que sea el medio empleado -electrónico, mecánico, fotocopia, grabación, etcétera-, sin el permiso previo de los titulares de la propiedad intelectual.

# TABLA DE CONTENIDO

## BLOQUE I - EVALUACIÓN SOCIOECONÓMICA, JURÍDICA Y AMBIENTAL

Integración de la energía solar fotovoltaica en los esquemas de gestión del agua Miguel Ángel Pérez .....	23
Análisis tendencial del cambio climático registrado en las variables hidrológicas en España Luis Garrote, Álvaro Sordo-Ward, Javier Montalvo y Alberto González .....	35
Agua, agricultura y efectos económicos en el campo de Cartagena Alberto del Villar García y Marcos García López .....	55
Energía en el regadío y posibles actuaciones para reducirla Luis Juana y Raúl Sánchez .....	91
Herramientas y soluciones innovadoras para la gestión del nexo Agua-Energía-Alimentos- Ecosistemas: GoNEXUS Manuel Pulido-Velázquez, Héctor Macián-Sorribes y Sergio Segura .....	115
Sobreexplotación de acuíferos, subsidencia y su impacto en el riesgo de inundación. El caso paradigmático del Valle del Alto Guadalentín Javier Valdés, María I. Navarro-Hernández, Roberto Tomás, Serena Tessitore, Pablo Ezquerro y Gerardo Herrera .....	121
Eficiencia Energética y Sostenibilidad en Desalación Domingo Zarzo .....	139
Optimización energética en bombeo de aguas subterráneas Miguel Fernández-Mejuto y Héctor Fernández Rodríguez .....	153
Microgeneración y mejora de bombeos en redes de distribución de agua: un compromiso con la Sostenibilidad Camila Andrea García Rodríguez, Modesto Pérez-Sánchez, Francisco-Javier Sánchez-Romero y Petra Amparo López-Jiménez .....	171
Avances y limitaciones en el desarrollo de un gemelo digital del Mar Menor Javier Senent, Adrián López Ballesteros, Francisco José Segura Méndez, Anders Nielsen, Dennis Trolle, Salvador Peña-Haro y José María Cecilia .....	187
<i>Smart Metering</i> : las redes inteligentes al servicio del agua César Vázquez y Vicent Joan Martínez Soler .....	205
Proyecto NAIADES: un ecosistema para la digitalización del ciclo urbano del Agua Ignacio Casals, Manuel Ramiro, Juan Manuel Fernández Montenegro y Leonardo Alfonso .....	215
Solución al problema del agua y de la energía en España Francisco Javier Flores Montoya .....	237
Herramienta para la gestión de riesgos incorporando el impacto del cambio climático en infraestructuras críticas hidráulicas Ignacio Escuder y Adrián Morales Torres .....	271
Experiencias prácticas en la integración de la gestión del agua de lluvia en el paisaje urbano Sara Perales y Miguel Rico-Cortés .....	277
Cambio global y aguas subterráneas en un contexto de escasez y sequías David Pulido, Leticia Baena, Antonio Juan Collados, África de la Hera, Juan de Dios Gómez, José Luis García- Aróstegui, Francisco J. Alcalá y Juan Grima Olmedo .....	293

Posibilidades para la optimización y reducción del uso del agua y la energía en el riego de la zona mediterránea. Retos para su implementación Miguel Ángel Jiménez-Bello, Fernando Martínez-Alzamora, Juan Manuel Carricondo, Joan Carles Alonso Campos y Manuel Pulido-Velázquez .....	315
Instrumentos Innovadores para la Gestión Integrada de las Aguas Subterráneas en un contexto de escasez creciente de recursos hídricos (Proyecto Interreg Sudoeste AQUIFER) José Luis García Aróstegui et al. ....	335
Nueva dimensión en la gestión patrimonial de redes Raúl González.....	349
Nuevos retos de la reutilización Amador Rancaño Pérez, M <sup>a</sup> del Mar Micó Reche y Aina Soler-Jofra.....	359
Evaluación de la recarga del acuífero Solana. Análisis de escenarios de cambio climático María Alejandra Feinstein, Miguel Fernández Mejuto y José Miguel Andreu Rodes .....	381
Cálculo de la huella de carbono como herramienta de gestión ambiental. Caso de éxito de la EDARi Helados Alacant Mercedes A. Calzada Garzón, Juan Carlos Bugallo Tena, Elena Campos Pozuelo, Domingo Zarzo Martínez y Enrique Ortiz González .....	393
Reducción de boro en parcela mediante ósmosis inversa y resinas de intercambio iónico. Aspectos técnicos y económicos José Francisco Maestre Valero, Alberto Imbernón Mulero, Belén Gallego Elvira, Victoriano Martínez Álvarez y Bernardo Martín Górriz .....	403
Derechos de agua de riego diferenciados por su prioridad a nivel de cuenca José A. Gómez-Limón, Carlos Gutiérrez-Martín y Nazaret M. Montilla-López .....	413
Algoritmo de sincronización entre la energía consumida en una red de riego y producida por módulos solares fotovoltaicos Francisco José Navarro-González, Miguel Ángel Pardo, Housseem Eddine Chabour y Tarek Alksaif .....	425
Boro en la red de azarbes de la Vega Baja del Segura y el Baix Vinalopó (Alicante) Jose Navarro Pedreño, Teresa Rodríguez Espinosa, María Belén Almendro Candel, Ana Pérez Gimeno, Ignacio Gómez Lucas e Ignacio Meléndez Pastor .....	439
Tratamiento ecológico para la eutrofización y la anoxia en balsas de riego Ricardo Mateos Aparicio.....	451
Estimación de la movilización del suelo como efecto de la escorrentía en viñedos mediante ISUM (Improved Stock Unearthing Method) en el Sureste de España Antonio Jódar Abellán, Amparo Melián Navarro y Jesús Rodrigo-Comino.....	459
Estimación de la evapotranspiración real, escorrentía superficial y recarga de acuíferos mediante dos modelos hidrológicos en el Sureste de España Antonio Jódar Abellán, Ryan T. Bailey, Dámaris Núñez-Gómez, Pablo Melgarejo, Derdour Abdessamed y Pilar Legua.....	467
Cálculo de la evaporación de agua en la microcuenca agrícola del río Coñaque, Ecuador José Gerardo Becerra Carrión, Antonio Jódar Abellán y Miguel Ángel Pardo Picazo .....	479
Aplicación del método de precipitación rápida controlada para estudios del efecto del tratamiento electromagnético en agua de elevada dureza Sergio Martínez Moya, Nuria Boluda Botella, María Dolores Saquete Ferrándiz y Jaime García Quiles .....	491
Un modelo matemático para la gestión de riesgos Ramón Egea Pérez y Francisco J. Navarro González .....	499

Reducción del contenido en fósforo en aguas de riego mediante filtro verde construido con residuos Teresa Rodríguez Espinosa, Jose Navarro Pedreño, María Belén Almendro Candel, Ignacio Gómez Lucas, Ignacio Meléndez Pastor y Manuel Jordán Vidal .....	513
Casos de estudio de soluciones basadas en la naturaleza para la adaptación a las inundaciones en zonas agropecuarias María José Marcos Palacios y Esther Sánchez Almodóvar .....	525
Análisis hidrológico-edáfico para la gestión ambiental de un Sistema Léntico Artificial de alta montaña en Colombia Breiner Dan Bastidas Osejo, Antonio Jódar Abellán y Pablo Melgarejo .....	539
Evaluación del efecto del cambio climático en dos cultivos de secano en la provincia de Alicante Yailin Fernández González, Javier Valdes-Abellan, Marlon Mederos Corrales y Concepción Pla .....	551
Perspectiva de las partes interesadas en la gestión de las aguas subterráneas en cuatro cuencas mediterráneas bajo estrés hídrico: prioridades y desafíos Roberta Boni et al.....	563
Estudio de los parámetros más relevantes en el periodo de amortización de un bombeo solar en la provincia de Alicante Héctor Fernández Rodríguez y Miguel Ángel Pardo Picazo .....	585
El impacto de la continuidad de negocio y la gestión del riesgo en el ciclo integral del agua. Caso de Estudio: Aguas Municipalizadas de Alicante, E. M. Andrés Miguel Roca Lloret, Andrés Pina Martínez, Manuel Latorre Gijón y Joaquín Marco Terrés .....	597
Inundaciones compuestas: modelación computacional en zonas urbanas-costeras Daniela Córdova de Horta .....	611
Análisis del ciclo de vida de la red de riego de la Universidad de Alicante Daniel Elie Benalcázar Murillo y Miguel Ángel Pardo Picazo.....	623
Conducción Júcar - Vinalopó: binomio Agua y Energía Estefanía Blasco Casal y Vicente José Richart Díaz .....	635

## **BLOQUE II - EVALUACIÓN SOCIOECONÓMICA, JURÍDICA Y AMBIENTAL**

Construcción de una <i>Biblioteca de Mensajes</i> para la comunicación del riesgo de inundación Pablo Aznar-Crespo, Guadalupe Ortiz y Antonio Aledo .....	647
La relación agua, territorio y urbanismo en un nuevo escenario Rosa Arce.....	659
El binomio agua y energía: claves jurídicas para la transición a un sistema energético autosuficiente y sostenible Asensio Navarro Ortega y Estanislao Arana García .....	675
Economía circular y regulación de los lodos de EDAR Ángel Ruiz de Apodaca Espinosa.....	691
Efecto de los caudales ecológicos sobre la disponibilidad de agua en la España peninsular Álvaro Sordo, Paola Bianucci, Beatriz de Lama Pedrosa y Luis Garrote .....	715
Costes energéticos de la desalación Jaime Lora María, Fernanda López Pérez y Carlos Carbonell Alcaina .....	727
Uso eficiente del agua en el diseño y control del riego de jardines y zonas verdes: una experiencia formativa práctica Fernando Echarri.....	745

Los ingenieros en el suministro de agua potable en España (siglo XIX) Juan Manuel Matés-Barco .....	759
Economía circular en el ciclo del agua Fernando Morcillo Bernaldo de Quirós y Andrés Guerra-Librero Castilla .....	775
La recarga artificial como técnica resiliente ante el cambio climático. Aplicación a los parques naturales y masas de agua subterránea de la provincia de Alicante (España) José Manuel Murillo Díaz y Alberto Padilla .....	795
Análisis agronómico, económico y ambiental de distintos escenarios de sustitución de aguas del trasvase Tajo-Segura por agua marina desalinizada Victoriano Martínez, Bernardo Martín, José Francisco Maestre, Belén Gallego y Alberto Imbernón .....	819
El vencimiento de las concesiones hidroeléctricas y su nueva explotación José Antonio Blanco .....	841
La extinción y reversión de las concesiones hidroeléctricas (a propósito del Salto Lafortunada Cinqueta) Esteban Arimany .....	861
Governança da água e adaptação justa Carla Gomes y Luísa Schmidt .....	881
Proyecto <i>Life Baetulo</i> en Badalona: gestión operativa de crisis ante eventos climáticos Monste Martínez, Ángel Villanueva y Beniamino Russo .....	895
La degradación ambiental y sus implicaciones socioeconómicas en cultivos leñosos bajo un escenario climático difícil de predecir: el caso del viñedo mediterráneo de la provincia de Valencia..... Jesús Rodrigo-Comino, Andrés Caballero-Calvo, José María Senciales-González, Jesús Fernández-Gálvez y Artemi Cerdà .....	905
La utilización de paneles solares fotovoltaicos para reducir la factura energética del trasvase Tajo-Segura Marcos García, Borja Montaña Sanz y Joaquín Melgarejo Moreno .....	925
Perspectivas jurídicas del trinomio Agua-Energía-Cambio Climático Jesús Conde Antequera .....	941
Generación y eficiencia energética en el ciclo del agua urbana. Retos desde la óptica del Derecho..... Andrés Molina Giménez .....	959
El papel de la desalación frente a una demografía y demanda crecientes Borja Montaña Sanz, Marcos García-López y Joaquín Melgarejo Moreno .....	969
Sustentabilidad y gobernanza transnacional como fundamentos para la difusión de nuevas matrices energéticas Paulo Marcio Cruz y Maria Cláudia da Silva Antunes de Souza .....	989
La eficiencia energética del trasvase Tajo-Segura en comparación con sus posibles alternativas Marcos García-López, Borja Montaña Sanz y Joaquín Melgarejo Moreno .....	1001
Desarrollo de proyectos hidroeléctricos en Ecuador. Oportunidades frente a los conflictos socioambientales Andrés Martínez-Moscoso e Israel Castro-Enríquez .....	1011
Enseñar las inundaciones para incrementar la resiliencia socio-territorial. El <i>PATRICOVA</i> como recurso didáctico Álvaro-Francisco Morote .....	1023
Sostenibilidad y eficiencia hídrica en el «agroecosistema» de la Vega Baja del Segura: estudio histórico-jurídico y ambiental Francisco José Abellán Contreras .....	1033

Estimación de los sobrecostos producidos por las alternativas para paliar el déficit mediante el bombeo de agua desalinizada en la Demarcación del Segura José Alberto Redondo Orts, Joaquín Melgarejo Moreno y Patricia Fernández Aracil .....	1045
Nuevos métodos en marketing social para conseguir comportamientos proambientales Carla Rodríguez-Sánchez.....	1057
Aceitação social da reutilização de água para adaptação às alterações climáticas no sul europeu: uma análise de instrumentos políticos de Portugal e Espanha Marcella Conceição y Carla Gomes.....	1067
El derecho humano al agua. Alcances sobre la normativa internacional y peruana Flor Gianina Paucar Aedo.....	1079
Over-fertilising, water pollution and Climate Change: overview of the European and German regulatory framework Mariana Moreno Kuhnke y Josefina Lyda.....	1087
Eficiencia del riego por aspersión en la máquina de pivote central de la finca «El Marqués», Cuba ..... Yoangel Jesu Miranda Agüero .....	1101
Evaluación de la calidad del riego para el cultivo de la patata en la cooperativa «Amistad Cubano-Búlgara», Cuba Heriberto Vargas Rodríguez, Caridad Sánchez Veranes y Fabienne Torres Menéndez .....	1111
Buenas prácticas medioambientales a implementar en la Unidad Empresarial de Servicios Técnicos (UEBIST) «Talleres y Desmonte Artemisa», Cuba Fabienne Torres Menéndez, Heriberto Vargas Rodríguez y Zulema Lombillo Laferte.....	1119
Educação ambiental e legislação ambiental: uma reflexão necessária na inserção dentro do ambiente escolar no ensino público Aline Hoffmann y Liton Lanes Pilau Sobrinho .....	1129
A regulação como mecanismo de proteção dos valores da livre iniciativa e da livre concorrência André Emiliano Uba.....	1137
El uso del instrumento de licencia por admisión y compromiso como medio para la necesaria desburocratización de la generación eléctrica en Brasil Alexandre Waltrick Rates .....	1149
Evaluación de la gestión y eficiencia de la actividad de riego en la UBPC Granja Arroyo, La Habana (Cuba) Daniel Acosta Rivero, Caridad Sánchez Veranes y María del Carmen Falcón Acosta.....	1157
Valoración económica de la producción agraria española en zonas inundables Adela Bellver Baca, Jesús Garrido Manrique, Margarita Navarro Pabsdorf y Eduardo Cuenca García.....	1169
Smart cities e a dignidade da pessoa humana no transtorno do espectro autista: experiências que vêm do sul do Brasil Liton Lanes Pilau Sobrinho, Vanessa Ramos Casagrande, Franco Scortegagna y Elys Marina Hack .....	1183
Legal issues of Chinese water rights system Yang Yang .....	1193
Inconstitucionalidad de la ley y del reglamento de recursos hídricos en Ecuador Luis Alfonso Castillo Vaca .....	1201
Regulamentação jurídica das águas subterrâneas no Brasil Denise Schmitt Siqueira Garcia y Heloise Siqueira Garcia .....	1213
Economía circular en el uso del agua en la Región de Murcia y en la Demarcación Hidrográfica del Segura José María Gómez Espín, José María Gómez Gil, Encarnación Gil Meseguer.....	1223



La desalinización como seguro hídrico en el Sureste Ibérico	
Encarnación Gil Meseguer, José María Gómez Gil, Ramón Martínez Medina, José María Gómez Espín .....	1233
Energía fotovoltaica y conducción Júcar-Vinalopó	
Vicente José Richart Díaz .....	1241

# Optimización energética en bombeo de aguas subterráneas

**Miguel Fernández Mejuto**

Área de Ciclo Hídrico, Diputación de Alicante y Departamento de Ciencias de la Tierra y del Medio Ambiente, Universidad de Alicante, España

[mfmejuto@diputacionalicante.es](mailto:mfmejuto@diputacionalicante.es)

<https://orcid.org/0000-0002-1682-2979>

**Héctor Fernández Rodríguez**

Área de Ciclo Hídrico, Diputación de Alicante y Universidad de Alicante, España

[h.fernandez@diputacionalicante.es](mailto:h.fernandez@diputacionalicante.es)

## RESUMEN

La gestión de los acuíferos, especialmente en el abastecimiento urbano es una tarea muy compleja, dada la gran cantidad de elementos de control que pueden llegar a intervenir para su correcto funcionamiento y a la rapidez necesaria para resolver cualquier anomalía que pueda afectar la garantía del abastecimiento. Sin embargo, en la actualidad, gracias a los avances tecnológicos, se dispone de sistemas de control que permiten a los gestores y operadores controlar el régimen de operación de las infraestructuras de abastecimiento, así como monitorizar el estado en tiempo real de éstas a través de sistemas de control, adquisición y análisis de datos (SCADA). Además, también permiten una mejor planificación de futuras infraestructuras hidráulicas de cara a optimizar y a aumentar la garantía de abastecimiento, aspecto muy importante, especialmente en zonas como Alicante, con escasez hídrica estructural. Dentro de la optimización, cada vez cobra más importancia para lograr la sostenibilidad la optimización energética de las elevaciones de agua, en especial los pozos de bombeo de aguas subterráneas. En el presente trabajo se explican casos reales de optimización energética realizados por el Área de Ciclo Hídrico de la Diputación de Alicante en los pozos de los municipios cuyo abastecimiento asesora.

## 1. INTRODUCCIÓN

El uso de las aguas subterráneas, integrado con los recursos superficiales, se ha mostrado siempre eficaz en la gestión hídrica de un territorio. La gran capacidad de almacenamiento de los acuíferos y su distribución espacial, les confiere un alto valor práctico y estratégico. En ocasiones, especialmente en entornos semiáridos, resultan ser la única fuente de agua disponible y, en cualquier caso, su menor sensibilidad ante situaciones de sequía en relación con las aguas superficiales proporciona una mayor garantía de suministro. Por otro lado, desde el punto de vista de su calidad, su vulnerabilidad a la contaminación, siempre y cuando se realice una adecuada protección de los acuíferos y de las obras de captación, es mucho menor que en las aguas superficiales. Por el contrario, los tiempos de recuperación en los acuíferos sobrexplotados pueden ser de décadas y los casos de contaminación tienen soluciones muy complejas. De esta forma, resultan un recurso esencial, pero que también es necesario utilizar de forma óptima.

Uno de los elementos fundamentales para la gestión de las aguas subterráneas es el conocimiento de su estado, evolución y usos. La competencia específica para esta tarea corresponde a las Confederaciones

Hidrográficas. La provincia de Alicante es un caso algo particular, ya que, debido a la gran compartimentación de los acuíferos en Alicante, y a su relativa independencia respecto a los cauces superficiales principales de las Demarcaciones Hidrográficas hace necesario un control más exhaustivo de los recursos subterráneos que el que hacen las Confederaciones Hidrográficas, organismos tradicionalmente más orientados al control de las aguas superficiales (Rodríguez-Hernández et al., 2020).

La Diputación de Alicante, a través de su Área de Ciclo Hídrico, ha sido la heredera de las redes de control del IGME y lleva varias décadas mejorando y manteniendo las redes de control de las aguas subterráneas y compartiendo los datos obtenidos con las Confederaciones Hidrográficas.

En la actualidad, toda la información de las redes de control, junto a los datos de inventario y los datos relevantes de centenares de estudios y proyectos, tanto referidas a las aguas subterráneas como aguas superficiales, climatología o a las infraestructuras de abastecimiento en alta, se organizan en torno a un Sistema de Información Hidrológica (SIH). Se trata de un conjunto de datos, aplicaciones y procedimientos de trabajo que, entre otras cosas, permiten el acceso a la cartografía provincial topográfica, geológica, hidrogeológica, hidrológica, de infraestructuras hidráulicas y de demandas y usos del agua, organizada en capas vectoriales; así como a la ortofoto y las variables, series temporales y datos numéricos asociados. El sistema se ha desarrollado sobre una base de datos geográfica y tiene varios interfaces que permiten el trabajo con los datos, siendo el principal una extensión para el sistema de información geográfica QGIS.

Las redes de medida, en origen manuales, han ido siendo progresivamente automatizadas. Para ello, un componente fundamental del SIH es el Sistema de Telemida y Telecontrol (SISCON), un SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition) de desarrollo propio del Área de Ciclo Hídrico. En esta herramienta se han ido integrando los datos de las estaciones de medida que se han ido sensorizando progresivamente a lo largo de los últimos 25 años. En la actualidad, el SISCON integra más de 500 estaciones que capturan los datos continuos de más de 5.000 sensores y cuya base de datos supera los 350 millones de medidas históricas (Figura 1) (Rodríguez-Hernández et al., 2020). Las tipologías de estaciones, y los parámetros principales que se pueden controlar son los siguientes:

- Pozos de bombeo, estaciones reelevadoras: niveles, presiones, caudales, tensión, intensidad, conductividad y sensores digitales de marcha/paro, temperatura límite o profundidad máxima.
- Piezómetros: niveles, conductividad y temperatura.
- Galerías, manantiales, ríos y presas: niveles de lámina de agua y de desborde, y caudales.
- Depósitos, distribuciones y redes (sectoriales): caudales, presiones y niveles en depósito.
- Potabilizadoras y depuradoras: caudales, presiones, conductividades, etc.
- Meteorológicas: pluviometría, temperatura, horas de sol, humedades relativas y direcciones/velocidad del viento.

Una de las áreas en las que el SIH y la información, tanto de las redes de medida manual como de las redes de telemida, resultan de gran ayuda es la de optimización de las captaciones de aguas subterráneas para abastecimiento. Esta optimización, además de la mejora en la gestión de los recursos, puede tener impactos muy importantes en el descenso de los consumos energéticos. Se estima que el total energético para abastecimiento de agua a los municipios de la provincia de Alicante supera los 120 GWh/año, siendo el de los municipios con gestión directa del servicio de unos 18 GWh/año. La mejora del rendimiento medio de las instalaciones de bombeo hasta alcanzar eficiencias totales en torno al 60%, un valor razonable para este tipo de instalaciones, junto a la reducción de consumos no controlados, podría resultar en ahorros el total de los pequeños municipios con gestión directa del servicio del orden de 10 GWh/año, que equivalen a más de 3.000 t/año de emisiones CO<sub>2</sub>.

En el presente trabajo se hace una revisión de las estrategias utilizadas desde el Área de Ciclo Hídrico de la Diputación de Alicante para optimizar los bombeos de aguas subterráneas, apoyadas por el SIH y el SISCON.

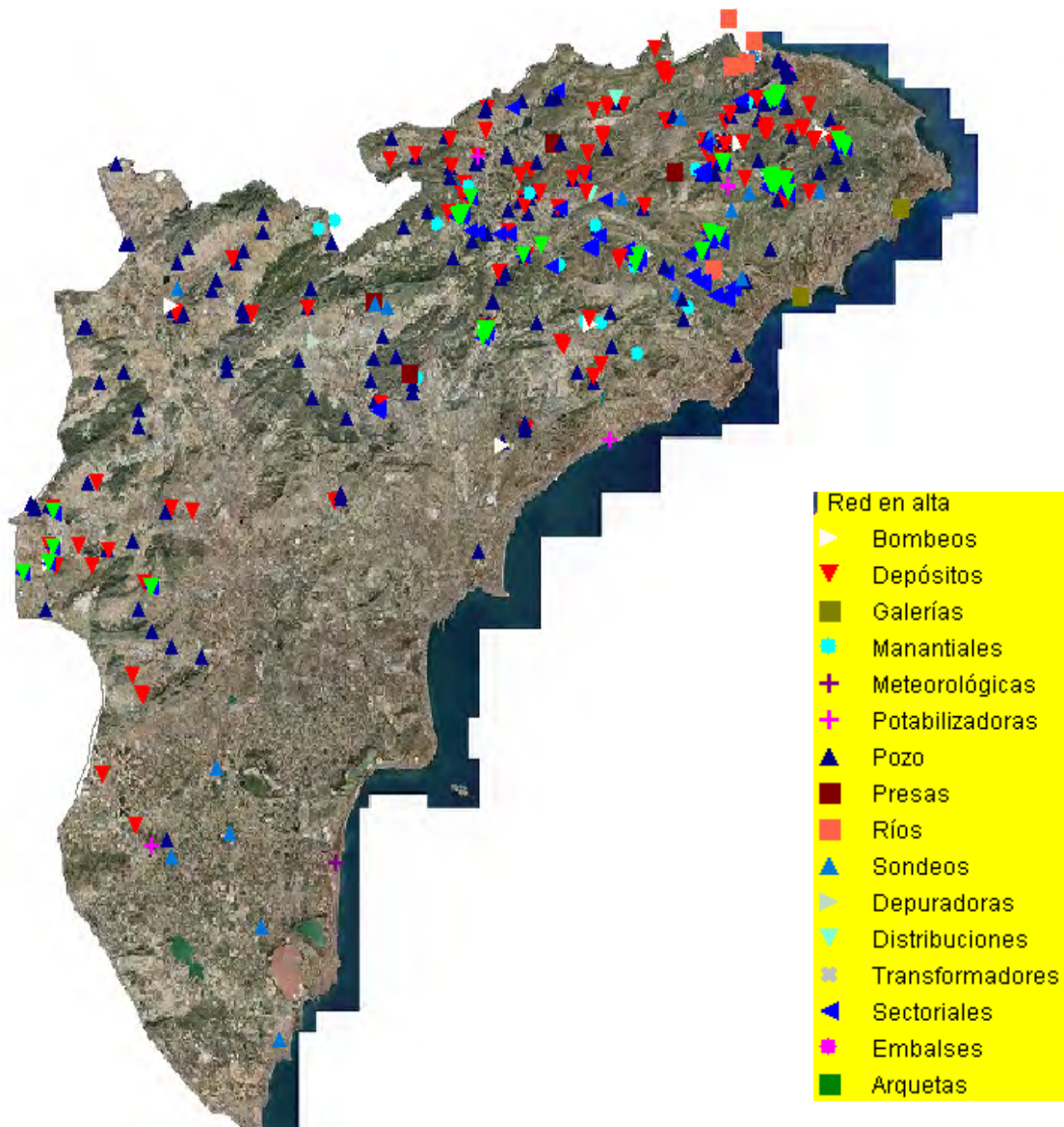


Figura 1. Mapa provincial de las estaciones de teledeteción del Área de Ciclo Hídrico. Fuente: elaboración propia.

## 2. SEGUIMIENTO DEL ESTADO DE LOS ACUÍFEROS

Para el seguimiento del estado de los acuíferos se analizan de los datos de piezometría. Para ello, se realiza una revisión continua del estado de los acuíferos mediante un seguimiento de las profundidades de los pozos, tanto de la red de teledeteción como de la red manual, que sirve para apoyar y calibrar la red teledetecida. Estos niveles se comparan con los de las mismas épocas de años anteriores, con la profundidad de los aportes de agua en el pozo (si se conocen), con la profundidad de la bomba y la del fondo del pozo para:

- Determinar si el acuífero se está sobreexplotando, está en recuperación o en equilibrio hídrico.
- Simular la profundidad máxima que alcanzará el pozo en época estival.
- Calcular las reservas disponibles del acuífero, para el nivel piezométrico límite de la profundidad actual de la bomba y para el de la profundidad máxima alcanzable de la bomba en el pozo.

Además, en los acuíferos con intrusión marina o entrada de aguas salinas por circulación por materiales salinos del Trias, se analiza la evolución de las conductividades.

En el siguiente apartado se muestran casos reales detectados en la teledetecada y se explican las medidas tomadas para tratar de gestionar de manera adecuada los recursos hídricos, siempre que sea posible.

## 2.1. Sobreexplotación de acuífero

Cuando las salidas de agua en un acuífero (bombeos, drenaje por ríos, drenaje lateral subterráneo, salida por manantiales y salidas subterráneas al mar) superan las entradas (infiltración por lluvia, infiltración desde cauces, entradas laterales subterráneas y retorno de riego y de abastecimiento) se habla de sobreexplotación del acuífero (Rodríguez-Hernández et al., 2020). Si bien el término sobreexplotación es generalmente entendido, algunos autores prefieren utilizar los términos explotación intensiva explotación intensiva de las aguas subterráneas (Llamas y Martínez-Santos, 2005; Custodio et al., 2016), cuando se produce un cambio importante del funcionamiento de los sistemas acuíferos y de sus relaciones con las otras componentes del ciclo hidrológico, principalmente las aguas superficiales y los humedales, y minería del agua extracción es mayor que la recarga en las condiciones de esa extracción, se consumen reservas de agua continuamente, hasta su agotamiento práctico o hasta que la extracción ya no puede continuar por razones físicas, de calidad o económicas (Custodio et al., 2016). En el caso de la provincia de Alicante encontramos una situación predominante de explotación intensiva, con casos de minería del agua, especialmente en el caso de los acuíferos del Alto Vinalopó (ver Figura 2) (DPA, 2007; DPA-IGME, 2015; Fernández-Mejuto et al., 2019; Fernández-Mejuto et al., 2021).

Aunque estos términos se definen en función de los balances de los acuíferos, no siempre es sencillo la actualización continua de los mismos. Por ello, el método más eficaz para determinar el estado cuantitativo de un acuífero es observar la tendencia del nivel estático, es decir, el nivel que se estabiliza tras algunas horas sin explotación, en los pozos que captan de este, así como de los piezómetros no afectados por captaciones cercanas.

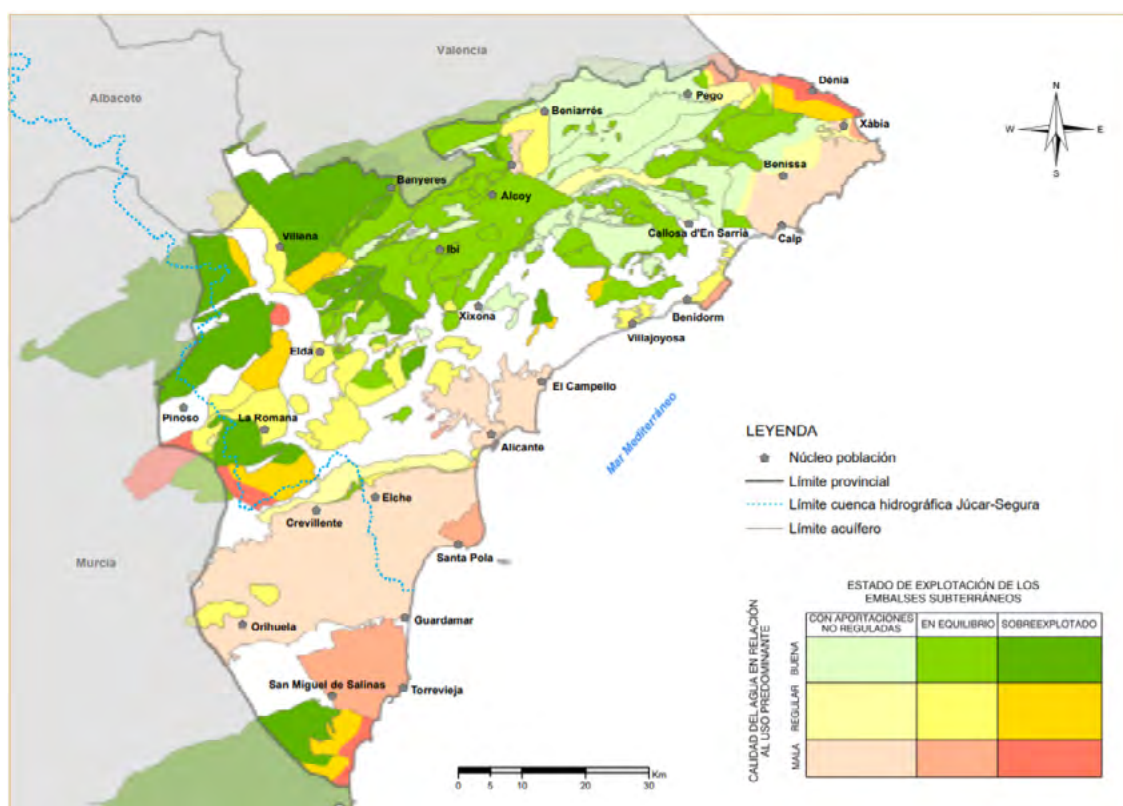


Figura 2. Mapa de clasificación de los acuíferos de la provincia de Alicante en función de las características cuantitativas y cualitativas de sus aguas. El mapa se interpreta a partir de la leyenda de doble entrada, que representa en abscisas el estado cuantitativo y en ordenadas el cualitativo. Los colores más oscuros representan los peores estados cuantitativos, mientras que los tonos rojos representan el mal estado cualitativo para los usos actuales. Fuente: Rodríguez-Hernández et al., 2020.

En la Figura 3 se observa una gráfica que representa los datos de medida continua de la profundidad del agua (en metros) de un pozo que capta de un acuífero claramente sobreexplotado durante los últimos 20 años. En la gráfica se observan los ciclos de bombeo, que alternan entre las profundidades máximas (o niveles dinámicos) a las que se llega en los momentos de puesta en marcha del equipo de bombeo y las profundidades mínimas, aproximadamente correspondientes a niveles estáticos, representativas del nivel regional. Se observa un descenso continuado acumulativo, así como el lógico aumento en el rango de diferencia estático/dinámico causado por la menor transmisividad al ser menor el espesor saturado.

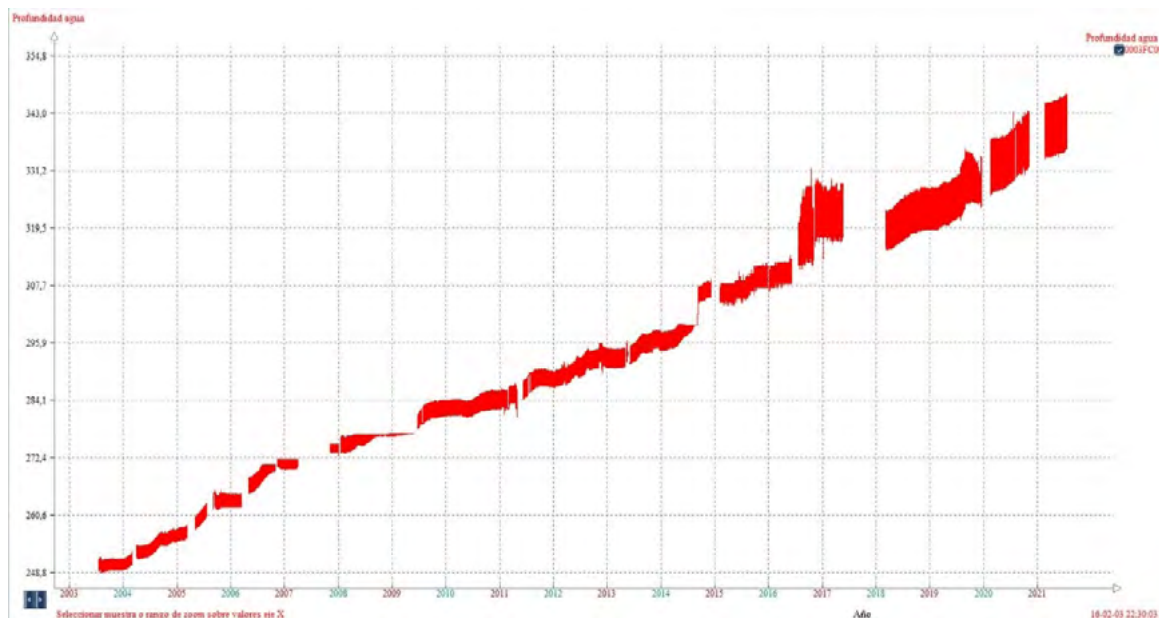


Figura 3. Profundidad del agua en un pozo. Fuente: Sistema de telemedida y telecontrol del Área de Ciclo Hídrico.

En estos casos se deben moderar las extracciones o buscar recursos hídricos alternativos que reduzcan las extracciones de agua sobre el acuífero de modo que se evite una explotación minera del recurso, y, por tanto, no sostenible. Estas alternativas podrían ser los trasvases, la conexión con otra fuente de suministro o aducción cercana que tenga excedentes hidráulicos, la reutilización de aguas depuradas, la desalación de aguas marinas o salobres... Sin embargo, estas alternativas no son siempre posibles o sencillas, y en muchos casos pueden provocar un aumento del coste del agua en muchas ocasiones inasumible por los usuarios.

Para moderar la demanda, pero evitar los impactos socioeconómicos asociados, otra estrategia a adoptar, que cada vez está cobrando más importancia, es la optimización de los regadíos y de las redes de abastecimiento urbano, de tal manera que se reduzcan las demandas pese a que el agua consumida por el interesado siga siendo la misma.

## 2.2. Nivel piezométrico límite

Por nivel piezométrico límite (NPL) para una instalación se entiende aquel al que no debería llegarse durante la explotación para evitar daños en la instalación electromecánica del pozo.

Durante los periodos de sequía prolongados se producen descensos en el nivel del acuífero que pueden dar lugar a problemas de nivel piezométrico límite en el pozo.

Si la bomba se puede bajar más, en la mayoría de los casos con esta acción se podrá aumentar la profundidad del nivel piezométrico límite, aumentando la garantía de suministro, solucionando el problema.

Pero si la bomba no se puede bajar más, el bombeo a profundidades superiores al nivel piezométrico límite provocará el fenómeno de la cavitación en el fluido dentro del cuerpo hidráulico de la bomba. El cual es causante de los siguientes efectos:

- Efectos hidráulicos: disminución del rendimiento de la bomba, del caudal impulsado, de la altura de elevación alcanzada y descebamiento de la bomba (este último no sucede en pozos).
- Efectos mecánicos: ruidos, vibraciones y sobrepresiones que pueden dañar la bomba. También produce desgastes muy graves en los interiores de los cuerpos intermedios, debido al roce de los impulsores.
- Efectos químicos: con las implosiones de las burbujas se liberan iones de oxígeno que atacan las superficies metálicas.

Para evitar este fenómeno, partiendo de que no se puede aumentar la profundidad a la que se encuentra la bomba, ya sea debido a la cercanía al fondo del pozo, a que se produzca un estrechamiento de este a mayor profundidad o a la inutilidad de realizar esta acción, en el caso de que la profundidad del agua supere la de la última zona de aporte de caudal, se debe disminuir el caudal de bombeo, esta disminución se puede conseguir de dos maneras, la segunda mucho más aconsejable que la primera, debido a la mayor optimización energética y al menor desgaste de la bomba:

- Cierre parcial de válvula: El cierre parcial de la válvula (preferiblemente de compuerta) a la salida del pozo provocará un aumento de pérdidas de carga en la impulsión, y por tanto de la altura manométrica, lo cual desplazará el punto de funcionamiento hidráulico de la bomba a uno con menor caudal. El descenso de caudal bombeado provocará que el aumento de profundidad debido al nivel dinámico sea más lento, aumentando el tiempo de bombeo necesario para llegar al nivel piezométrico límite. El inconveniente de realizar esta maniobra será la reducción de la eficiencia del bombeo, además de poder provocar daños en los rodetes, cojinetes o incrementar la temperatura de la bomba.
- Reducción de las revoluciones de la bomba mediante el uso de un variador de frecuencia: al reducir la frecuencia de bombeo, el caudal (proporcional a la reducción de revoluciones) y la altura manométrica (exponencialmente, proporcional al cuadrado de la reducción de revoluciones) de la curva de bombeo también se reducirán (Figura 4), desplazando la curva de bombeo y, por lo tanto, también el punto de funcionamiento hidráulico de la bomba. Esto reducirá el caudal de bombeo igual que con la maniobra anterior, pero en este caso se reducirá el coste de la energía empleada, ya que la potencia varía exponencialmente proporcional al cubo de la reducción de las revoluciones (Figura 5), y se evitan los posibles daños al cuerpo hidráulico de la bomba.

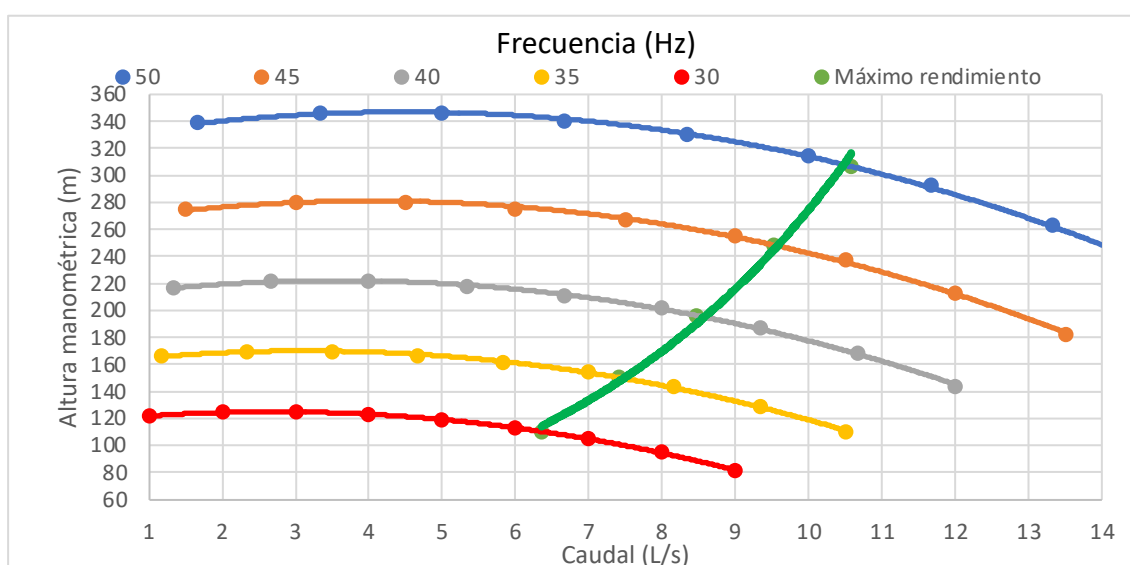


Figura 4. Curvas hidráulicas de una misma bomba funcionando a distintas frecuencias. Fuente: elaboración propia.

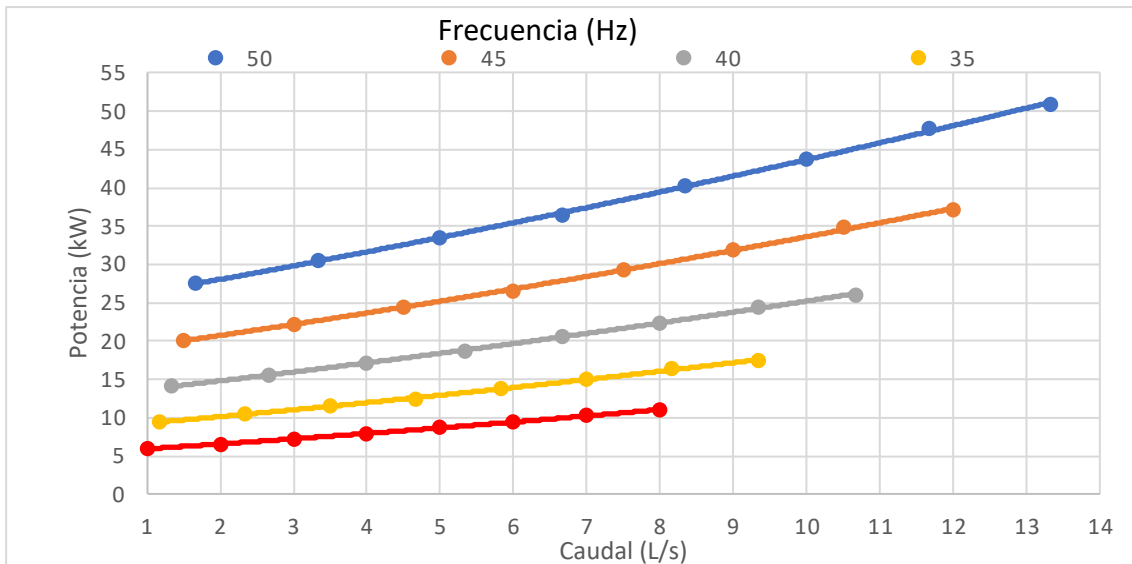


Figura 5. Curvas de potencia de una misma bomba funcionando a distintas frecuencias. Fuente: elaboración propia.

En la Figura se muestra un ejemplo de los datos capturados en una actuación para evitar el bombeo por debajo del NPL. Se representan los sensores del caudal de impulsión de la bomba de un pozo (arriba) y la profundidad de este (abajo). En este caso, el nivel piezométrico límite se situaba en unos 65 metros, profundidad que llega a alcanzar pese a no verse representada en la gráfica al llegar la sonda de profundidad a su límite de rango (64,75m).

Una vez alcanzada esta profundidad, se adoptó la decisión de utilizar un variador de frecuencia (a partir del día 24) para reducir el caudal de bombeo y con esto, disminuir la velocidad a la que aumenta el nivel dinámico del pozo y de esta forma se evitó que la profundidad del agua alcanzara el nivel piezométrico límite sin necesidad de reducir el volumen diario de bombeo.

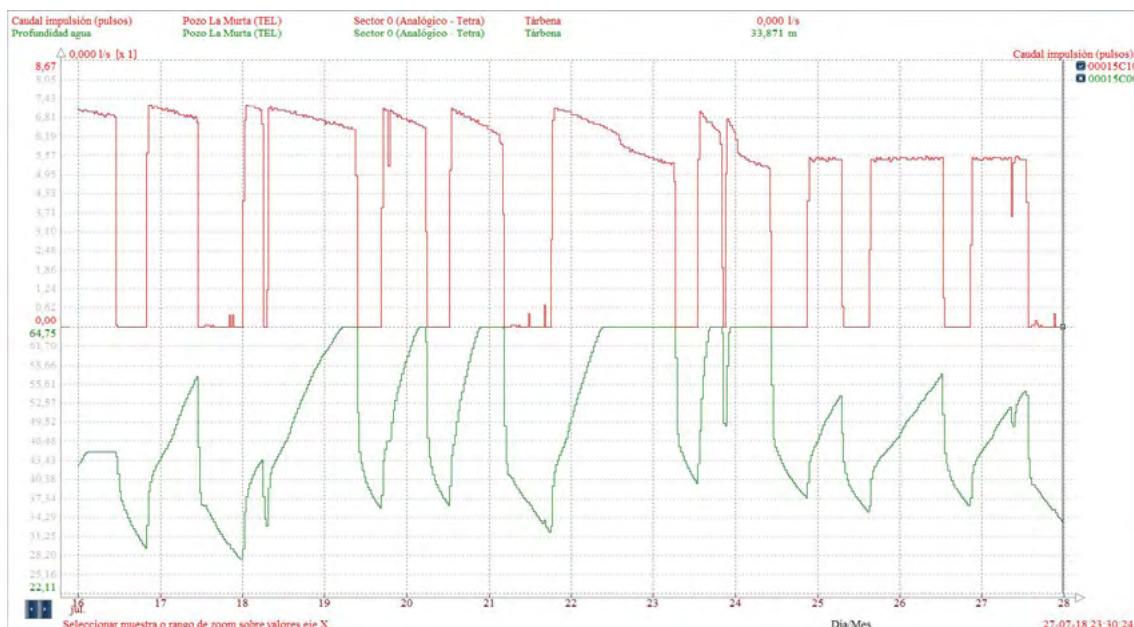


Figura 6. Representación gráfica de nivel piezométrico límite del pozo. Fuente: Sistema de telemedida y telecontrol del Área de Ciclo Hídrico.

Es necesario tener en cuenta que un cierre o una reducción de revoluciones excesivos pueden provocar que la bomba no alcance la altura manométrica necesaria para elevar el agua hasta el objetivo, provocan-



do un aumento de las pérdidas volumétricas de la bomba unido a un sobrecalentamiento de ésta, además de fenómenos como la cavitación (en los extremos de los álabes de los rodetes) que inducirá graves daños en la bomba. Por lo que nunca deberá llegarse a esos niveles de disminución.

Otro límite que no se debe sobrepasar, aunque en ocasiones resulta imposible si se quiere garantizar no llegar al nivel piezométrico límite es el valor del caudal en el que, ni bombeando las 24 horas del día, podría abastecer a la población (el volumen bombeado en 24 horas deberá ser superior al volumen diario de consumo del municipio).

En el caso de sobrepasar este último límite, sería necesario otro aporte de agua (pozo de emergencia, pozo de regantes, conexión, que podría ser de emergencia, con la red de otro municipio, cubas de agua...) si se quiere evitar el vaciado del depósito y los cortes de agua.

Para no llegar a estos dos límites suele ser necesario bombear mediante ciclos de bombeo (X horas de funcionamiento, Y horas de parada), sin embargo, esto provoca una gran complejidad para obtener la estrategia que más caudal garantice, ya que cuanto mayor sea el caudal de bombeo, menor será la relación horas de bombeo/horas de parada, siendo necesario establecer un equilibrio entre ambas para poder bombear el mayor volumen posible sin que la profundidad se acerque al nivel piezométrico límite.

Para ello será necesario conocer el consumo de los municipios (incluidos sus patrones, tendencias...) y las características hidráulicas del acuífero en la captación (Caudal específico, transmisividad, permeabilidad, productividad de la captación...). En la mayoría de los casos no se conoce con tanto detalle el comportamiento del acuífero a estas profundidades, ya que suele darse en situaciones excepcionales de sequía extrema, por lo que muy probablemente se deberán modificar las estrategias de bombeo (horas de arranque, horas de parada, caudal de bombeo) en función de la evolución del acuífero.

### **2.3. Comparativa anual de la evolución piezométrica**

Es conveniente anticiparse a las situaciones de cavitación, especialmente si se va a plantear de la forma más correcta, con el uso de variador. Para ello es importante realizar un análisis interanual de los datos que permitan predecir el riesgo de alcanzar profundidades excesivas.

A lo largo del año se realiza un seguimiento de las profundidades de los pozos, especialmente de aquellos en los que su profundidad es mayor, o está cerca de serlo, a la de ese mismo periodo en años en los que haya estado cerca de alcanzar el nivel piezométrico límite, o al año en que se haya alcanzado la mayor profundidad de la historia (de ese pozo), ya que puede que alcancen niveles en los que nunca antes se había bombeado y es posible que no se tenga conocimiento del comportamiento del acuífero (tanto en términos de aporte de agua, como de la calidad de esta).

Además, el análisis interanual sirve a efectos de gestión del recurso para caracterizar situaciones de explotación intensiva/minería del agua, y para plantear alternativas para el abastecimiento, incluso dentro del mismo acuífero. Es importante resaltar en este punto que los niveles piezométricos de los acuíferos no son horizontales, sino que presentan gradientes. Cuando se analice la piezometría en un pozo en relación a las reservas del acuífero y a la situación en otros pozos del acuífero será imprescindible tener en cuenta estos gradientes, en forma de mapas de isopiezas que caracterizan la geometría de la superficie piezométrica.

En la Figura 7 se representan, para otro ejemplo real en la provincia de Alicante, las profundidades a lo largo del año para 4 años distintos. El que se alcanzó la mayor profundidad desde que se tienen registros (representado en rojo), el que se alcanzó la menor profundidad desde que se tienen registros (azul), el año pasado (verde) y el año actual (negro).

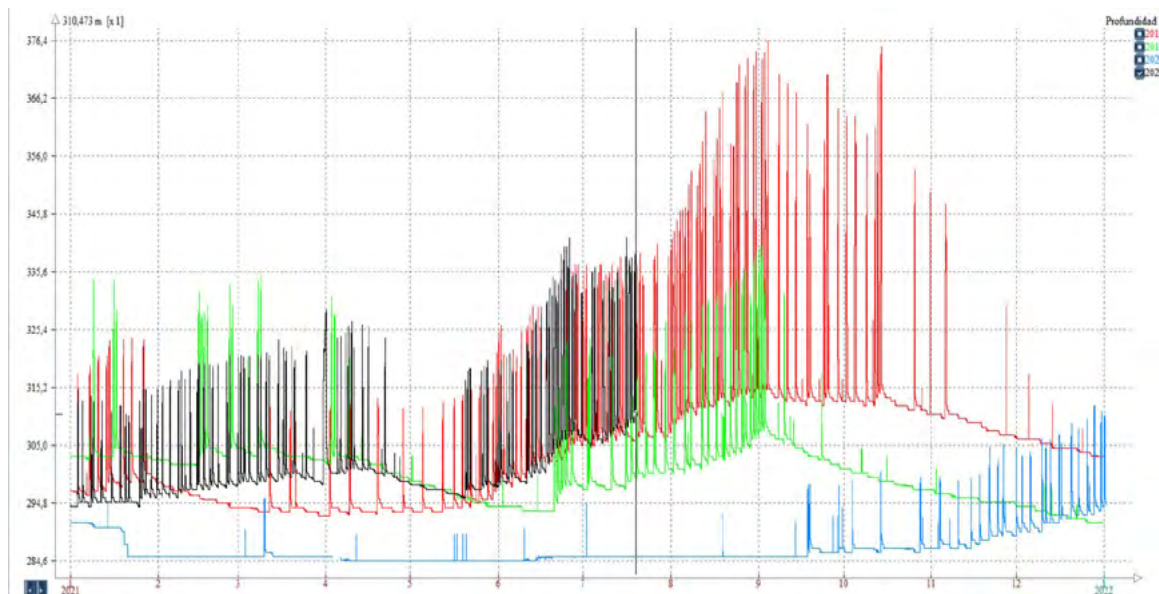


Figura 7. Profundidades de agua. Fuente: Sistema de teledeteción y telecontrol del Área de Ciclo Hídrico.

Como se aprecia en las gráficas, este año la profundidad del agua en el último día teledetecido supera a la del año más seco, situación que se ha dado durante la mayor parte del año. Por ello se decidió instalar un variador de frecuencia en el pozo, por si se tuviera que realizar el procedimiento explicado en el punto 2.2 de este artículo.

Este seguimiento permite anticiparse a las situaciones hidrológicas extremas, de tal manera que se esté preparado para realizar actuaciones que aumenten la garantía de suministro (la mencionada instalación de variador, una conexión de emergencia a una conducción cercana que reciba agua de otra fuente de abastecimiento, una reprofundización del pozo...), antes de que el pozo alcance una situación de emergencia.

## 2.4. Determinación de periodos secos y húmedos

Gracias a la disponibilidad de los datos piezométricos de los pozos se pueden determinar los periodos secos y húmedos, la infiltración al acuífero del agua en los episodios de precipitaciones e incluso la afectación de nuevas captaciones que capten del mismo acuífero. Este conocimiento será de gran utilidad para una correcta planificación hidrológica, especialmente de cara a la construcción de futuras infraestructuras hidráulicas. En estos sentidos, desde el área de Ciclo Hídrico esta información se está usando para:

- Calibración y validación de series simuladas con los modelos de recarga de acuíferos con el software ReNaTa (IGME y DPA, ) y de flujo SIMTRA (IGME y DPA, ).
- Estimación de la recarga en periodos sin explotaciones y estimación de extracciones en periodos sin recarga (sin precipitación cuando no hay otros aportes externos).
- Evaluación en tiempo real de las reservas de los acuíferos. A partir de modelos de flujo de los acuíferos se han establecido para los acuíferos provinciales con explotación para abastecimiento correlaciones entre el nivel de cada pozo teledetecido y las reservas útiles y totales del acuífero. Se entiende en este contexto por reservas útiles aquellas explotables con la infraestructura actual, y por reservas totales aquellas explotables con la infraestructura actual o con nuevos pozos que pudieran ponerse en explotación en el futuro.

En la Figura 8 se muestra la evolución piezométrica de un pozo que capta del acuífero Mediodía, de gran importancia en el abastecimiento de la Marina Alta y en el que se aprecian los periodos secos (1995-1997, 1999-2002 y 2014-2016) y los episodios de precipitaciones intensas (descensos bruscos de profundidad).

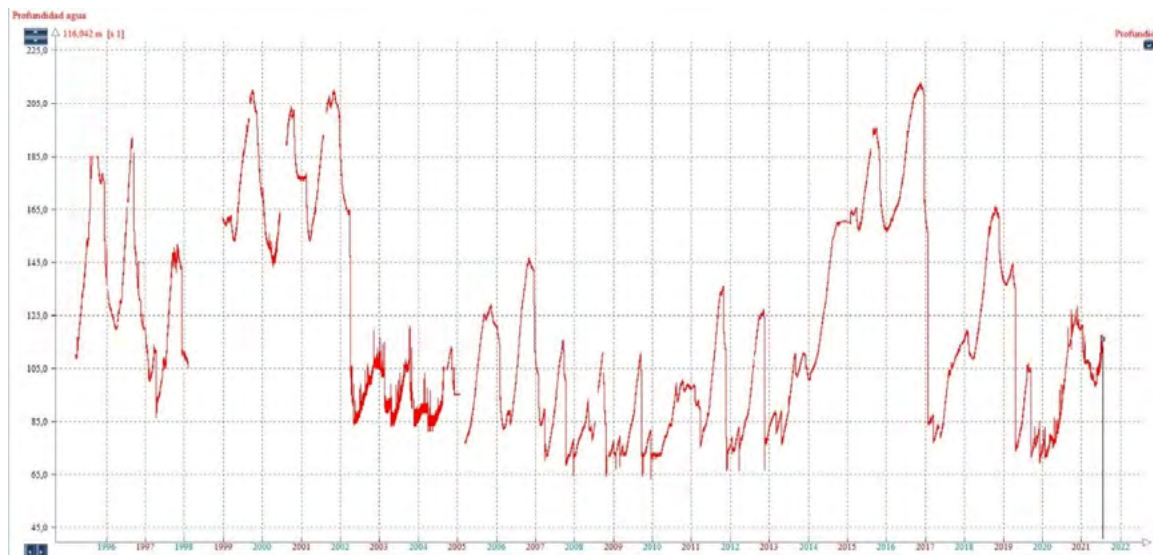


Figura 8. Evolución histórica de la profundidad de un pozo en el acuífero Mediodía. Fuente: Sistema de teledata y telecontrol del Área de Ciclo Hídrico.

La importancia que tiene estos recursos es muy alta para sostener la agricultura de regadío y, muy especialmente, para el abastecimiento urbano. En la provincia de Alicante hay 95 municipios, ubicados mayoritariamente en la mitad septentrional, abastecidos con aguas subterráneas (1 con apoyo de agua subterránea marina desalada), lo que significa que el 66 % de los municipios de la provincia dependen exclusivamente del agua subterránea para satisfacer su demanda urbana (Figura 9). Además, el suministro mixto, con aguas superficiales, tanto provinciales como extraprovinciales, y aguas subterráneas, se realiza en 8 términos municipales, lo cual representa un 6 % del total.

Esto supone que el 72 % de los municipios dependen, en mayor o menor grado de las aguas subterráneas para su abastecimiento. El consumo de agua subterránea en los abastecimientos provinciales en estos años asciende a 122, 2 hm<sup>3</sup>/año, con una punta en los meses de julio y agosto, los de máxima demanda del verano, en torno a 13,5 hm<sup>3</sup>/mes.

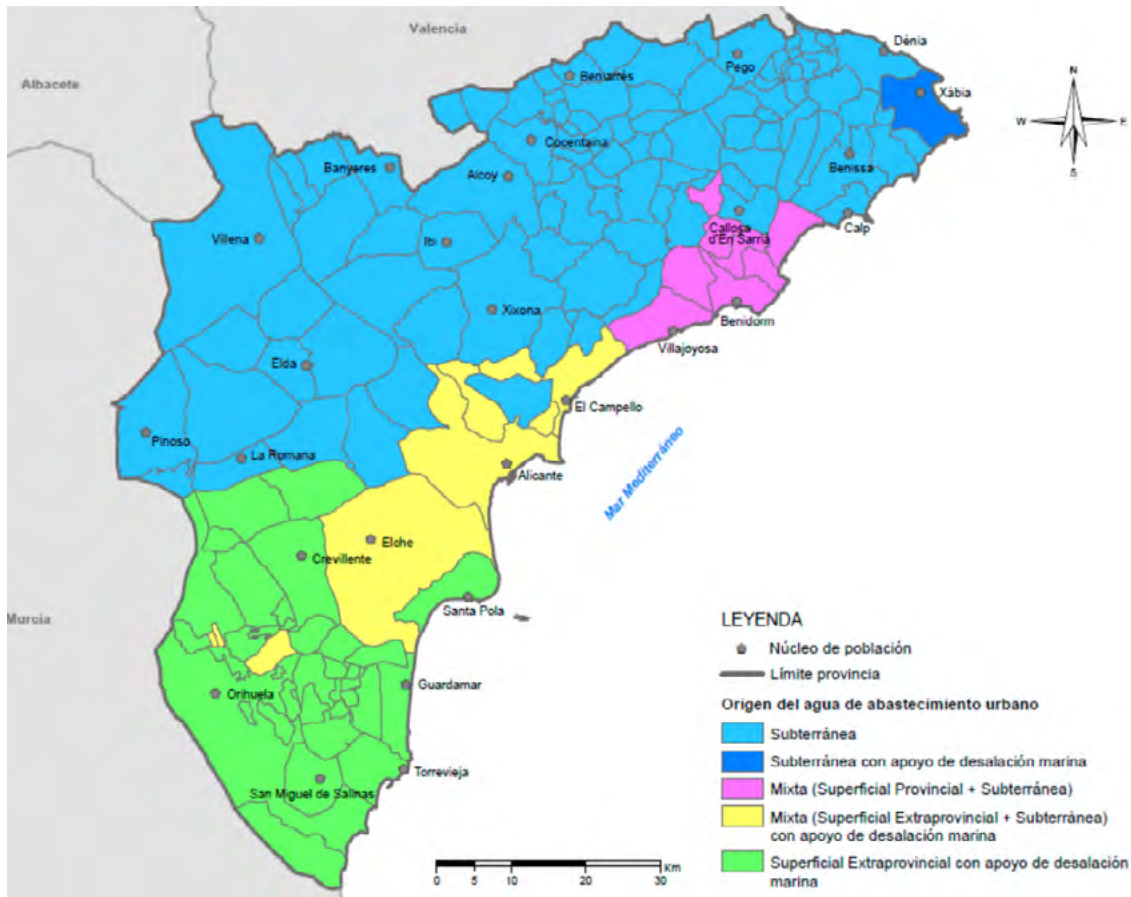


Figura 9. Origen del agua de abastecimiento urbano. Fuente: Rodríguez-Hernández et al., 2020.

Uno de los aspectos clave, además de la disponibilidad cuantitativa y cualitativa es la profundidad del nivel piezométrico por los efectos que tiene sobre los costes de explotación y el consumo energético. En la provincia de Alicante las mayores profundidades se observan en la mitad septentrional (Figura 10), particularmente en la comarca del Alto y Medio Vinalopó (en el eje Bañeres, Villena, Elda), se encuentran las áreas de mayor profundidad, frecuentemente mayores de 100 m en las áreas de captación, con zonas comprendidas entre 200 y 400 m de profundidad, excepto en las planas costeras. El Medio Vinalopó es un ejemplo paradigmático de como la explotación excesiva ha terminado por hacer inviables muchas captaciones (Andreu et al., 2008) dado el aumento de la profundidad del nivel piezométrico, que además de los elevados costes energéticos lleva aparejada el descenso de la calidad. El Alto Vinalopó necesita medidas urgentes para revertir las tendencias actuales y no llegar a esta situación.

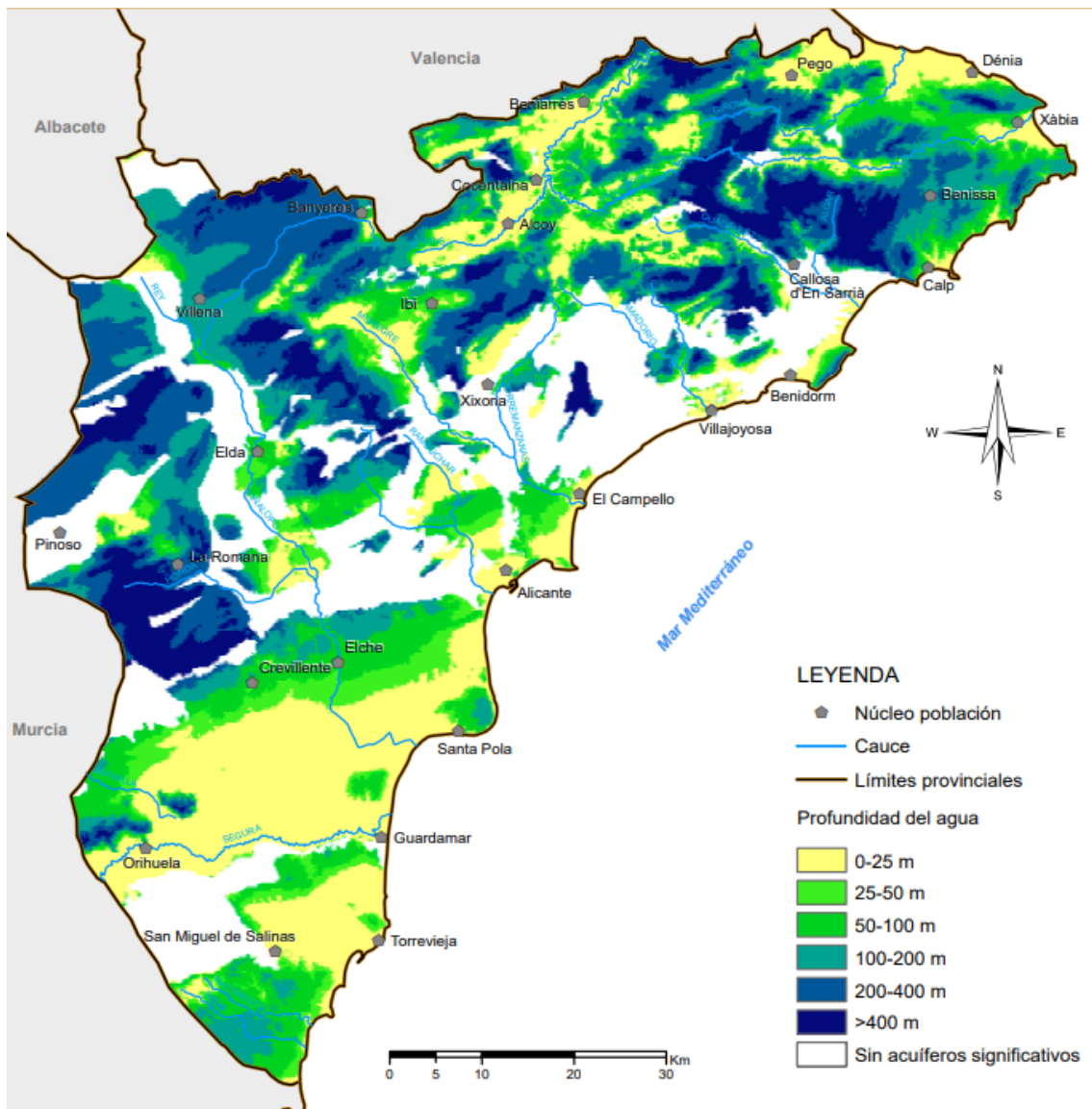


Figura 10. Mapa provincial de isoprofundidad media del agua subterránea. Fuente: Rodríguez-Hernández et al., 2020.

### 3. OPTIMIZACIÓN DE BOMBEO

El bombeo de agua para abastecimiento y regadío es uno de los grandes consumidores de energía en la EU. Los costes energéticos del bombeo son los responsables de un 60-70% del precio del agua (Sorin y Liviu-Valer, 2013).

De forma indicativa, el coste medio actual del agua subterránea en el depósito de regulación resultante de dividir el volumen total de salida de depósito entre la suma de los costes para todos los abastecimientos provinciales en Alicante en municipios con gestión directa del servicio, es de 0,2 €/m<sup>3</sup>. De esta cantidad unos 0,11 €/m<sup>3</sup> corresponden a los costes energéticos de elevación. El gasto energético medio de elevación del agua subterránea hasta el depósito en estos municipios provinciales está en torno a 0,9 kWh/m<sup>3</sup>.

Estas cifras revelan la trascendencia económica y ambiental de una óptima gestión de las elevaciones de agua, pues la mejora en los regímenes de explotación, elección de tarifas idóneas, adecuado dimensionamiento y rendimiento de las instalaciones, se traduce en importantes ahorros económicos y energéticos.

La Diputación de Alicante dispone de herramientas de optimización de los abastecimientos municipales, tanto en la fase de diseño como de explotación, con las que asesora a los municipios para lograr un uso más sostenible de la energía (DPA, 2013; DPA, 2016).

### 3.1. Pérdidas de rendimiento en una bomba

Las pérdidas de energía que se consideran para calcular el rendimiento de una bomba se pueden dividir en los tres tipos que se describen en los siguientes epígrafes.

#### 3.1.1. Pérdidas hidráulicas

Son las pérdidas de energía que se producen al circular la corriente líquida entre los elementos fijos y móviles de la bomba. Son debidas al rozamiento entre los canales de los álabes, en las paredes de la bomba, etc., originándose también en los cambios de dirección y sección entre la entrada de la bomba y la entrada del rodete, así como entre la salida del rodete y la salida de la bomba.

Las pérdidas hidráulicas son aproximadamente proporcionales al cuadrado del caudal por ser turbulento el régimen de la corriente de la bomba.

El rendimiento hidráulico o rendimiento manométrico de una bomba se define como la relación entre la potencia útil real desarrollada por la bomba y la teórica que genera el rodete.

#### 3.1.2. Pérdidas volumétricas

Son debidas a las fugas o escapes de caudal tanto hacia el exterior como hacia el interior de la bomba.

Las pérdidas volumétricas exteriores son debidas a fugas del líquido que se producen por la holgura existente entre la cámara de presión y el eje de la bomba, a través de los denominados prensaestopas. Pueden llegar a ser prácticamente nulas si se utilizan buenos prensaestopas, si bien se aumentan las pérdidas mecánicas por fricción con el eje.

Las pérdidas volumétricas interiores tienen mayor importancia que las exteriores y son debidas a la existencia dentro de la bomba de una corriente líquida de retroceso a través de las holguras que hay entre el rodete y la carcasa. Esta corriente se debe al gradiente de presión creado por el rodete, que permite que un pequeño caudal retorne de nuevo a la entrada del rodete, a través de la holgura señalada para volver a ser impulsado por éste, con el consiguiente consumo de energía.

La cuantía del caudal fugado depende de la diferencia de presiones y de los grados de holgura, las pérdidas volumétricas de energía se evalúan mediante el rendimiento volumétrico de la bomba, el cual se define como la relación entre el caudal útil  $Q$  suministrado por la bomba y el caudal impulsado por el rodete  $Q + Q_r$ .

#### 3.1.3. Pérdidas mecánicas

Son las pérdidas de energía provocadas por la fricción mecánica de los prensaestopas y los cojinetes con el eje de la bomba, así como la debida al rozamiento de la superficie externa del rodete con la masa líquida que le rodea.

El rendimiento mecánico de la bomba se define como la relación entre la potencia que realmente recibe el rodete y la potencia en el eje de la bomba.

El rendimiento total de la bomba es el producto de sus rendimientos hidráulico, volumétrico y mecánico.

Y suele oscilar, en sistemas correctamente diseñados, entre el 65 % y el 85 %.

### 3.2. Objetivo de la optimización energética

La suma de todas estas pérdidas forma el trazado de la curva de rendimiento teórica de la bomba, esta curva tendrá una forma de parábola convexa. El objetivo para alcanzar una optimización energética será elegir el modelo de bomba cuyos puntos de funcionamiento se encuentren la mayor parte del tiempo de funcionamiento posible dentro de la zona de mayor rendimiento de la curva, es decir, lo más cercano al vértice de ésta. De esta manera, además de reducir el coste eléctrico y, por lo tanto, el precio de la factura eléctrica final, se disminuirá la velocidad de desgaste de los componentes de la bomba.

Para conseguir dicho objetivo será necesario conocer el rango de profundidades del agua en la zona donde se pretende realizar el pozo y estimar su tendencia futura. Para ello se necesita un conocimiento de la evolución piezométrica del acuífero, así como de su balance hídrico.

Otro dato necesario para la elección del modelo de bomba de impulsión será el volumen de agua que deba abastecer la captación, tanto medio anual, para establecer su rango de bombeo habitual, como el caudal diario punta a lo largo del año, para asegurarse de que la bomba elegida garantice el 100% del volumen de abastecimiento necesario en las condiciones de máximo consumo y máxima profundidad anual, ya que es habitual que las variaciones de volumen de abastecimiento y profundidad del agua coincidan estacionalmente.

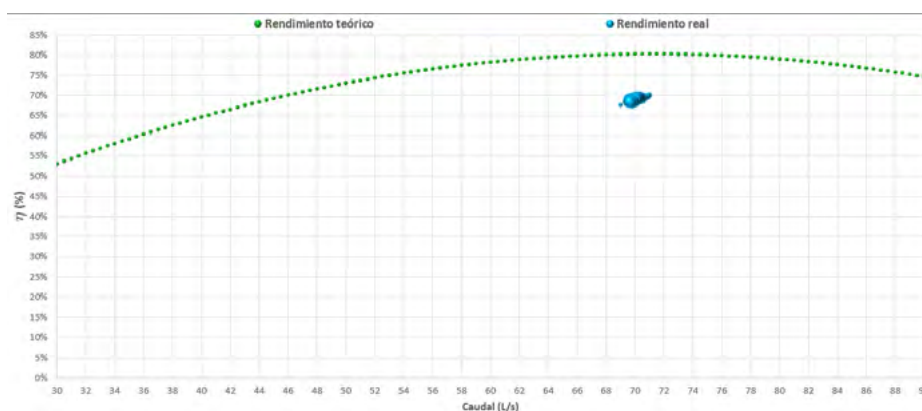


Figura 11. Rendimiento teórico y real de un bombeo. Fuente: elaboración propia.

### 3.3. Anomalías que reducen el rendimiento de una impulsión

Una vez instalada la bomba óptima se deberá realizar un seguimiento continuo para conseguir su máxima eficiencia posible y actuar en caso de que no se alcanzara. También será necesario este seguimiento con el objetivo de detectar lo antes posible cualquier posible anomalía que pueda disminuir el rendimiento de la captación o incluso poner en riesgo la garantía del abastecimiento. Entre estas anomalías, se pueden deber a fallos en la parte hidráulica de la bomba, en el cuerpo eléctrico de ésta, en la red eléctrica de la que se alimenta o incluso en la tubería de impulsión.

#### 3.3.1. Avería en el cuerpo eléctrico de la bomba

Tanto los defectos de fábrica, como la inadecuada gestión de los equipos de bombeo (insuficiente refrigeración del motor, hacer que la bomba trabaje a caudales excesivamente elevados...) como el envejecimiento de éstos, ya sea debido al paso del tiempo o a un exceso de activaciones, favorecen la aparición de este tipo de averías, caracterizadas por un aumento de la intensidad y un descenso de caudal, lo cual se traduce en un descenso de rendimiento, al necesitar la impulsión una mayor cantidad de energía para elevar un menor volumen de agua.

La gran diferencia de este tipo de averías con las producidas en el cuerpo hidráulico de la bomba, es que las eléctricas producen un descenso más rápido e irregular de rendimiento ya que provocan un incremen-

to de la intensidad mucho más acelerado (en ocasiones, acompañado con un ligero descenso del factor de potencia) y bajadas mucho más bruscas de caudal. Otro efecto producido son las paradas de la bomba debidas a la activación de las protecciones por incremento de temperatura del motor.

En la siguiente imagen, obtenida del SISCON, se muestra la representación gráfica de los sensores de intensidad, caudal y funcionamiento de la bomba en un caso real de una avería en el motor de una bomba, donde se puede apreciar los comportamientos explicados.

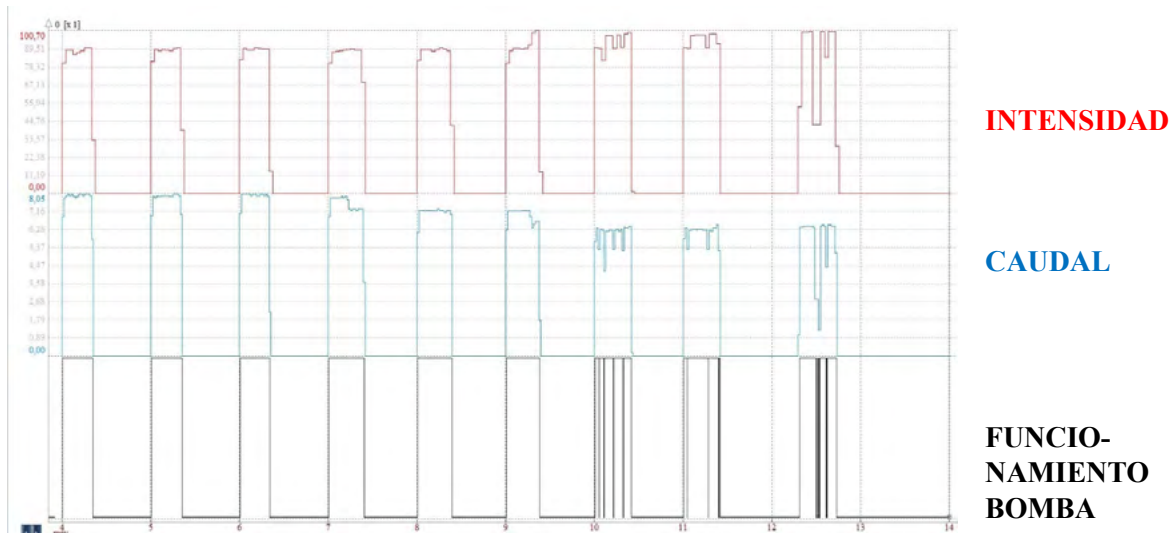


Figura 12. Representación gráfica de una avería eléctrica en una bomba hidráulica. Fuente: elaboración propia

### 3.3.2. Fuga en la tubería de impulsión

Puede ser antes del caudalímetro, en cuyo caso se apreciará un descenso del caudal de bombeo medido, o después, en el que, a diferencia del anterior, provocará un pequeño incremento al producirse un desplazamiento a la zona de bombeo de más caudal en el punto de funcionamiento de la curva de la bomba. En ambos casos suele venir acompañado por un pequeño incremento de intensidad al desplazarse el punto de funcionamiento eléctrico a una zona de la curva de mayor caudal y potencia. Como la potencia es igual al coseno de  $\phi$  por la tensión por la intensidad (por raíz cuadrada de 3), al no variar la tensión media ni el factor de potencia, éste incremento de potencia será producido por un incremento de intensidad.

Otro efecto fácilmente visible será el descenso de la presión de bombeo, al elevar parte del caudal impulsado a un punto cuya altura manométrica sea menor a la del destino habitual de la conducción.

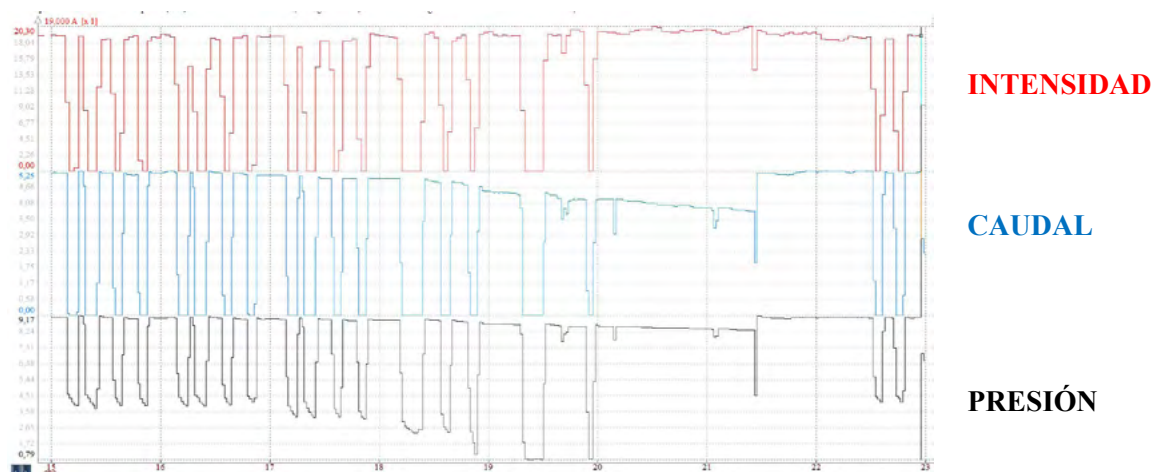


Figura 13. Representación gráfica de una fuga en una tubería de impulsión. Fuente: elaboración propia



## 4. CONCLUSIONES

Los acuíferos son uno de los grandes orígenes de recursos hídricos, que tienen un papel estratégico dada la alta garantía que suponen para el suministro y a que, especialmente en zonas semiáridas, a menudo, es el único recurso disponible. Por ello, es necesario asegurar una gestión óptima de los mismos para lo cual es fundamental el mantenimiento de redes de medida adecuadas, con incorporación de teledeteción y captura de datos en tiempo real con sistemas SCADA, así como la implementación de sistemas de información con gran capacidad de análisis de los datos.

Resulta fundamental disponer de una herramienta de supervisión y gestión de la red de abastecimiento en tiempo real y a distancia, especialmente en zonas y épocas de escasez hídrica, que permita actuar de manera inmediata ante cualquier funcionamiento anómalo de las infraestructuras de abastecimiento.

Este sistema, pese a suponer una gran inversión inicial y requerir de mantenimiento, es rentable debido a las reducciones de costes de operación de la red, al aumento de la garantía de suministro y a la mejora de la toma de decisiones para la planificación de nuevas infraestructuras hidráulicas para la red de abastecimiento.

Una de las áreas en la que es fundamental la optimización es la referente a los consumos energéticos, para lo cual se requiere un diseño apropiado de los sistemas de explotación y sistemas de monitorización adecuados, que permitan el mantenimiento preventivo y el diagnóstico ágil de las averías.

A dicha herramienta de supervisión conviene añadir un sistema de avisos que notifique cuando algún valor de un sensor dé una medida anómala, para apoyar al personal encargado de realizar el seguimiento de los miles de sensores que habitualmente disponen los SCADA.

El Área de Ciclo Hídrico de la Diputación de Alicante continúa implantando estaciones de teledeteción y desarrollando tanto sus herramientas SCADA como las herramientas de análisis del Sistema de Información Hidrológico Provincial para seguir avanzando en la optimización del uso de las aguas subterráneas, con los menores costes energéticos.

## REFERENCIAS

- Andreu, J. M., Pulido-Bosch, A., Llamas, M. R., Bru, C., Martínez-Santos, P., García-Sánchez, E., & Villacampa, L. (2008). Overexploitation and water quality in the Crevillente aquifer (Alicante, SE Spain). *WIT Trans. Ecol. Environ.* 111, 75-84.
- Custodio, E., Andreu-Rodes, J. M., Aragón, R., Estrela, T., Ferrer, J., García-Aróstegui, J.L., Manzano, M., Rodríguez-Hernández, L., Sahuquillo, A., & del Villar, A. (2016). Groundwater intensive use and mining in south-eastern peninsular Spain: Hydrogeological, economic and social aspects. *Sci. Total Environ.* 559, 302-316.
- Diputación Provincial de Alicante, DPA (ed.) (2007). *Mapa del Agua de la Provincia de Alicante*. Diputación Provincial de Alicante.
- Diputación Provincial de Alicante, DPA (ed.) (2013) *Optimización de Instalaciones de Captación y Elevación*. Diputación Provincial de Alicante.
- Diputación Provincial de Alicante, DPA (ed.) (2016) *Programa para el diagnóstico y la optimización de los sistemas urbanos de abastecimiento*. Diputación Provincial de Alicante.
- Diputación Provincial de Alicante-Instituto Geológico y Minero de España, DPA-IGME (ed.) (2015). *Atlas Hidrogeológico de la Provincia de Alicante*. Diputación Provincial de Alicante.

- Fernández-Mejuto, M., Andreu, J. M., García-Sánchez, E., & Palencia, R. (2019). Balance de recursos hídricos superficiales y subterráneos en la provincia de Alicante. *Canelobre: Revista Instituto Alicantino Cultura Juan Gil-Albert*, 70, 70-83.
- Fernández-Mejuto, M., Andreu, J. M., García-Sánchez, E., & Palencia, R. (2021). An Assessment of Groundwater Recharge at a Regional Scale for Sustainable Resource Management: Province of Alicante (SE Spain). *Water*, 13, 862. <https://doi.org/10.3390/w13060862>
- Llamas, M. R., & Martínez-Santos, P. (2005) Intensive groundwater use: Silent revolution and potential source of social conflicts. *J. Water Resour. Plann. Manag.*, 131, 337-341.
- Rodríguez, L., Fernández-Mejuto, M., Hernández, J. A., Pérez, F., Palencia, R., & Fernández-Rodríguez, H. (2020). Masas de agua subterránea: Acuíferos. En: J. Melgarejo-Moreno, & M. Fernández-Mejuto (eds.), *El Agua en la Provincia de Alicante* (pp. 77-104). Diputación Provincial de Alicante and University of Alicante.
- Sorin, P., & Liviu-Valer, H. (2013). Reducing energy consumption by upgrading pumping stations in water distribution systems. *Environmental engineering and management journal*, 12. <https://doi.org/10.30638/eemj.2013.090>