

FOCUS

TECNOLÒGIC DE ESPAITEC

Inteligencia Artificial en el sector del Agua



UJI UNIVERSITAT
JAUME I
Fundació General · FUGEN

espaitec
Parc Científic i Tecnològic

Development /



0



Fondo Europeo de
Desarrollo Regional

Una manera de hacer Europa

Actuación cofinanciada por
la Unión Europea a través del
Programa Operativo del Fondo
Europeo de Desarrollo Regional
(FEDER) de la Comunitat Valen-
ciana 2014-2020

CONTENIDOS

Presentación	2
Panorama tecnológico	3
Últimos desarrollos tecnológicos (Patentes)	3
Tendencias	4
Principales actores tecnológicos	5
Principales centros de investigación con desarrollos patentados	6
Evolución de la actividad de los principales titulares	6
Principales países	7
Principales áreas tecnológicas	7
Evolución de las principales áreas tecnológicas	9
Principales contenidos patentados	10
Principales palabras en las patentes	11
Principales áreas temáticas tratadas	11
Principales ámbitos o clústeres temáticos	13
Principales áreas de especialización	14
Colaboraciones	15
Algunos proyectos recientes de I+D	16
Panorama general del Mercado	19
Principales proveedores de soluciones comerciales	20
Centros de referencia	23
Conclusiones	25
Algunas referencias	26
Publicaciones científicas recientes	27

Presentación

El presente estudio de *Vigilancia Tecnológica e Inteligencia Competitiva* tiene por objetivo mostrar un panorama de los últimos avances tecnológicos y la situación a nivel competitiva y de mercado en relación a la **Inteligencia Artificial aplicada a la Gestión del Agua**.

Se consideraron de especial interés los siguientes ámbitos:

1. Estimación de la calidad del agua tanto de consumo como de las EDAR en función del tratamiento.
2. Estimación de caudal entrante a las EDAR y de la carga contaminante de esas aguas.
3. Gemelos digitales de redes o instalaciones de EDAR que permitan avanzar en el control y gestión de las instalaciones.
4. Predicción de inundaciones, y en general riesgos naturales, utilizando IA.
5. Uso de la IA en la estimación de la disponibilidad de recursos hídricos: previsión de la evolución de reservas en función de estimaciones climáticas y previsibles demandas.

Panorama tecnológico

Se ha realizado un estudio de los principales desarrollos tecnológicos a partir de **información de Patentes**, obtenida mediante la consulta a bases globales de las principales oficinas de PI en el mundo¹.

La información de patentes revela aspectos estratégicos relacionados con la identificación de actores que están actualmente destinando recursos de I+D a proteger nuevas tecnologías e invenciones en este ámbito y, por tanto, pueden desarrollar potencialmente productos que incorporen esas tecnologías al mercado en unos años; asimismo el análisis de los contenidos tratados en las patentes permite detectar temas de interés y su evolución, si éstos son sostenidos en el tiempo o emergentes.

Para la realización de este estudio **IALE Tecnología** ha usado herramientas propias de búsqueda y monitoreo de la información y herramientas open source de análisis estadístico de los datos (principalmente R y Python), que incluyen librerías y algoritmos de Aprendizaje automático (ML), Procesamiento del Lenguaje Natural (NLP), así como herramientas para la visualización de los datos.

Últimos desarrollos tecnológicos (Patentes)

El ámbito de búsqueda se focalizó en los desarrollos e invenciones en Inteligencia Artificial aplicada a la Gestión del Agua publicadas en los últimos 5 años (entre el año 2019 y 2023). La búsqueda se realizó a partir de conceptos clave junto con clasificaciones de patentes:

Keywords utilizados: (*water, flood?, hydrolog?, "river basin", river, wastewater, waste-water, drainage, RDAP, ...*) + (*pressure, resources, cycle, management, infrastructure, consumption, utilit?, facilit?, demand, reserves, quality, monitor?, control, treatment, contamina?, flood?, model?, "digital twin", simulat?, "land use", impact, disaster, prevent?, predict?, scenario?, decision, anticip?, "climate change", adapt?, "flow gage", forecast?, optim?, "predictive maintenance", "data collection", "data processing", "information system", "data analysis", cloud, platform, "data categorization", automat?, modul?, visuali?ation, "extreme events"*,

¹Patentscope, de la OMPI, la Oficina Mundial de la Propiedad Industrial; Espacenet, de la EPO, la Oficina Europea de Patentes y la bases de datos a texto completo de la USPTO, la Oficina de Patentes de los Estados Unidos

dashboard, "control panel", "real-time", "real time", efficien?, drought, flood?, overflow, runoff, twin?, sewage, drain?, rain?, drink?, leak?, health, smart, intelligent, autonom? OR autom?, purif?, "artificial intelligence", AI...)

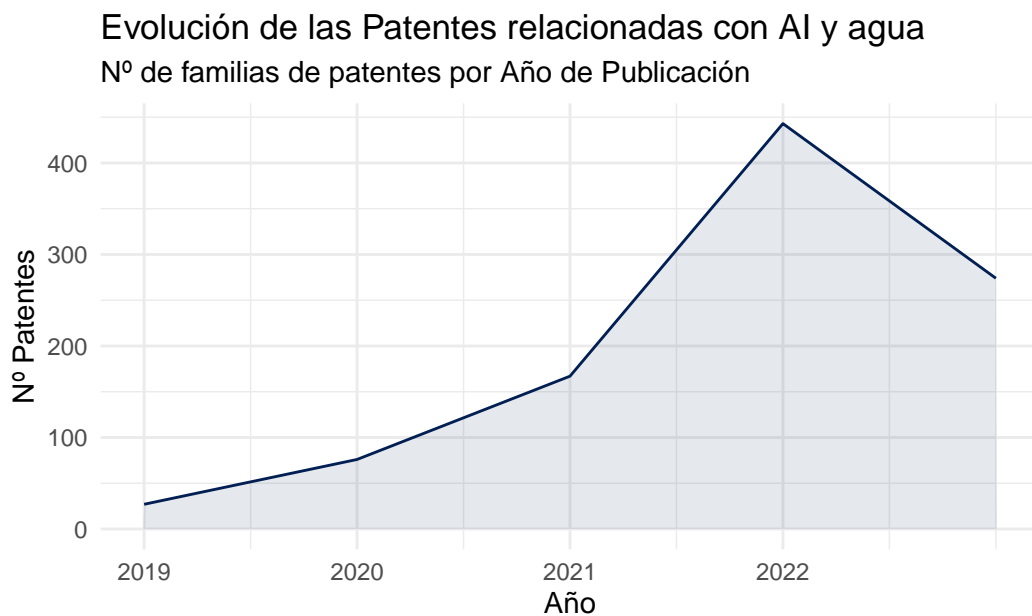
Clasificaciones relevantes: E02 (ingeniería hidráulica), G06Q (TIC), G06F0030 (CAD), C02F (tratamiento del agua), Y02A (adaptación al cambio climático), G06N (modelos computacionales), G06T (procesamiento de imágenes)...

Periodo: 2019-2023

Los resultados de la búsqueda permitieron identificar principales actores y áreas de aplicación. De entre los 987 documentos de patente recuperados, 930 son solicitudes de patentes y 57 han sido concedidas.

Tendencias

El recuento del número de patentes -agrupadas por familias (todos los documentos asociados a una misma invención)- publicadas en los últimos 5 años muestra una clara evolución creciente, que deja constancia del interés suscitado y de los esfuerzos crecientes en I+D y protección de nuevas tecnologías al respecto.



Fuentes: WIPO Patentscope, Espacenet y USPTO

Figura 1: Evolución de las patentes sobre AI en gestión del agua

Principales actores tecnológicos

Las grandes empresas e instituciones gubernamentales chinas dominan los desarrollos actuales y las invenciones protegidas por patentes en Inteligencia Artificial aplicada a la Gestión del Agua a nivel global, siendo el centro más activo en cuanto a nuevos desarrollos protegidos en el último periodo, el [China Institute of Water Resources & Hydropower \(IWHR\)](#), que tiene registradas varias invenciones sobre modelización de datos y métodos para evaluación de la presión en cuencas hídricas y embalses, previsión de niveles de agua subterránea y previsión de desastres e inundaciones, entre otros.

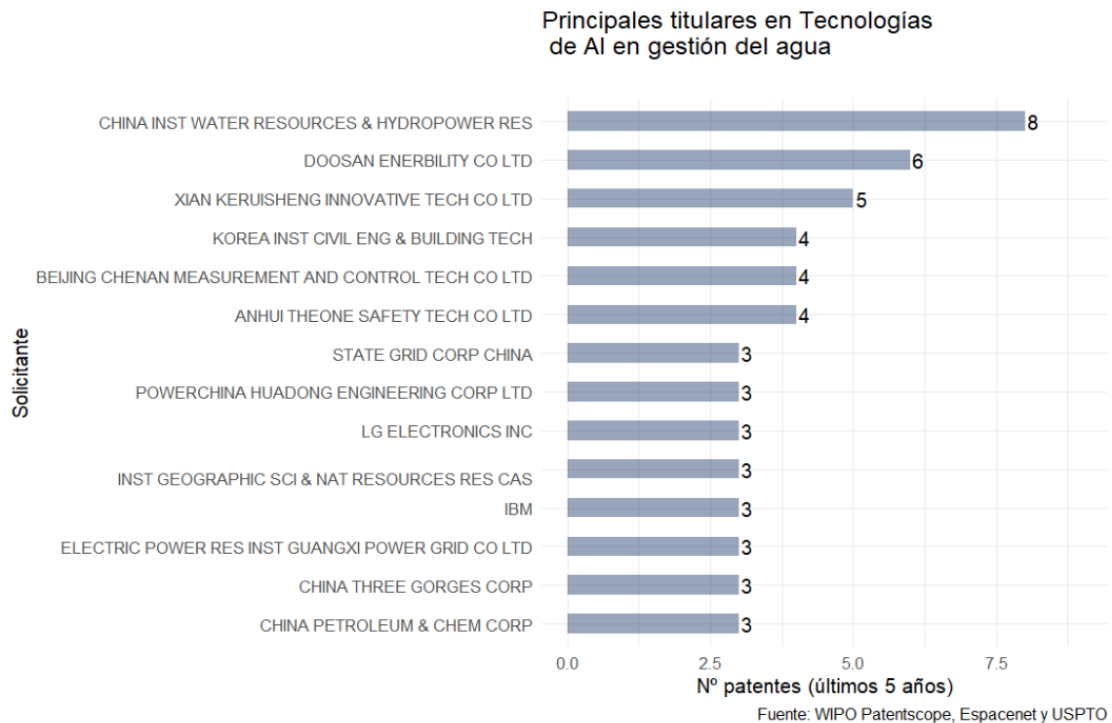


Figura 2: Principales solicitantes

Otras instituciones chinas importantes son las empresas [Xian Keruisheng Innovative Tech](#), focalizada en uso de Machine Learning para previsión de caudales de agua, [Beijing Chenan measurement and Control](#), que trabaja en sistemas de alerta sobre niveles de contaminación del agua, [The One Safety](#), la empresa China de petróleo [Sinopec](#), el instituto [IGSNRR \(CAS\)](#), así como la corporación estatal de redes [SGCC](#).

En Corea del sur, el grupo [Doosan Enerbility](#) (antes llamado *Doosan Heavy Industries*), es otro actor líder en nuevos desarrollos patentados sobre aplicación de tecnologías de IA a la gestión del agua, junto con la compañía electrónica [LG](#) que tiene desarrollos sobre asistentes para operarios en sistemas y dispositivos de purificación del agua ([US11535536B2](#)); el primer

titular que aparece del continente americano es la tecnológica **IBM**, que patenta, entre otros, sistemas de alerta basados en lógica difusa ([US20200167682A1](#)).

En cuanto a desarrollos tecnológicos recientes protegidos en el área de estudio por parte de instituciones españolas, aparece la empresa **Neurite**, incubada en el campus La Salle Technova de Barcelona, que trabaja en tecnologías de gemelos digitales (*digital twin watershed*) y ha protegido su tecnología de predicción de caudales en España. ([ES2933392A1](#)).

Por su parte, el centro tecnológico vasco **Vicomotech** ha conseguido la concesión en Europa de sus tecnologías de optimización de plantas de tratamiento de aguas residuales que usan la IA y métodos de control multivariable para cuantificar y ayudar a reducir las emisiones de CO2 ([EP3333802B1](#)).

Principales centros de investigación con desarrollos patentados

Entre los principales centros de investigación destaca el centro surocreano **KICT** (Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology), así como varios centros e institutos de investigación públicos chinos bajo el paraguas de la Academia de Ciencias China (CAS) <https://english.cas.cn> y universidades como la tecnológica de Pequín, la de Hohai, Tianjin, Zhejiang, Dalian, Hangzhou, Tongji, Tsinghua o Wuhan, entre las más activas.

Evolución de la actividad de los principales titulares

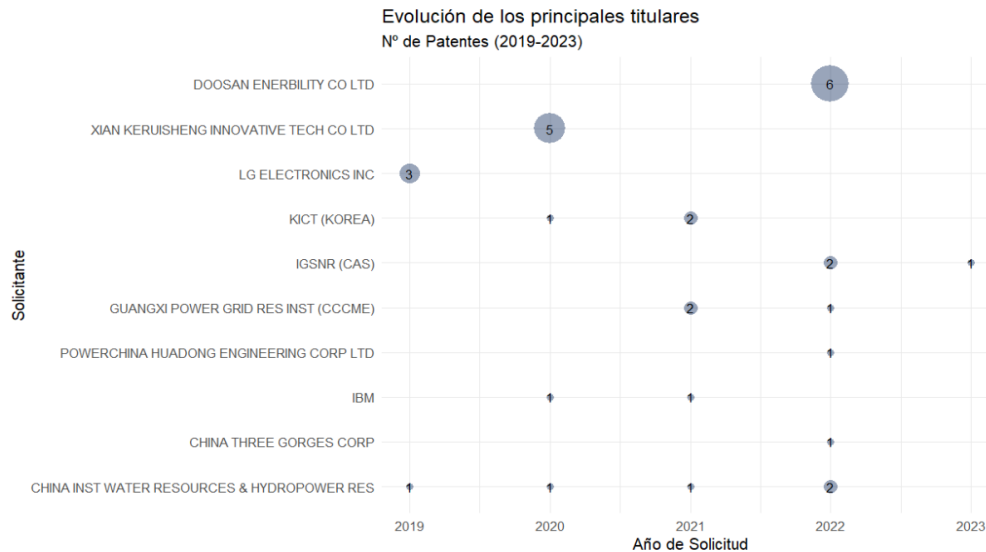


Figura 3: Evolucion de los principales titulares

La evolución en el patentamiento de los principales titulares muestra como centros actualmente más activos a la coreana **Doosan Enerbility**; con menor número de nuevas invenciones, le siguen el instituto de la academia china de ciencias **IGSNRR**, el China Institute of Water Resources and Hydropower Research (**IWHR**), el **CCCME** de Guangxi y **HDEC** de Huadong.

Principales países

El dominio de las instituciones chinas en nuevas invenciones protegidas por patentes sobre aplicación de la AI a la gestión de las infraestructura de agua es total.

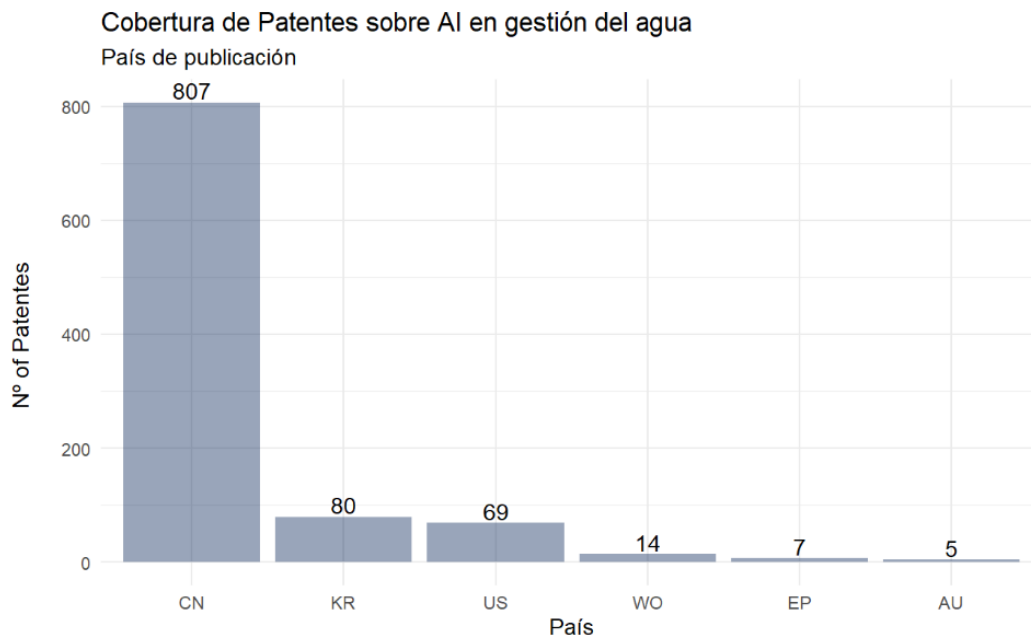


Figura 4: Principales países

Principales áreas tecnológicas

Los códigos de clasificación de patentes² permiten la identificación de principales subáreas tecnológicas en desarrollo dentro de la Inteligencia Artificial aplicada a la Gestión del Agua.

²Concretamente, se usó la Clasificación Cooperativa de Patentes (CPC) que integra y armoniza las clasificaciones europea y estadounidense: <https://www.epo.org/en/searching-for-patents/helpful-resources/first-time-here/classification/cpc>

Las principales áreas tecnológicas se asocian con el uso de **redes neuronales** y **combinaciones de redes neuronales** (G06N 3/045) y **métodos de aprendizaje** (G06N 3/08) y algoritmos de **aprendizaje automático** (G06N 20).

Son también temas ampliamente cubiertos los relacionados con adaptación al cambio climático en zonas costeras y cuencas hídricas y en concreto el **control y monitoreo, p.ej. de inundaciones o huracanes; los métodos de predicción, p.ej. el análisis o mapeo de riesgos** (Y02A 10/40) y los métodos de uso eficiente del agua y control de la **filtración de agua** (Y02A 20/152).

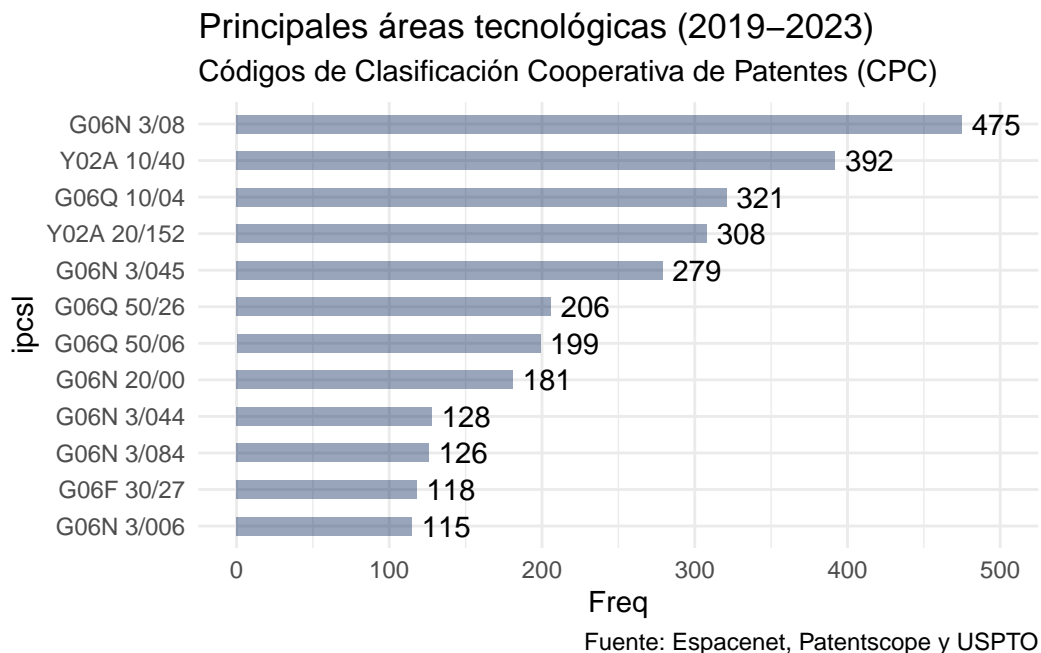


Figura 5: Principales áreas tecnológicas

Son también abundantes las invenciones que involucran sistemas de **predicción** (*forecasting*) y **optimización** (G06Q 10/04). Muchas de las invenciones recuperadas se asocian también genéricamente a tecnologías y plataformas TIC asociadas a servicios públicos (G06Q 50/26) y específicamente a redes de suministro de agua (G06Q 50/06).

Otras áreas relevantes, se encuentran dentro del área del tratamiento del agua o de aguas residuales y específicamente los **Sistemas de Control o encauzamiento** (C02F 1/008) y los **Métodos biológicos de tratamiento** de aguas (C02F3/006).

Otros ámbitos que aparecen son:

- **Redes recurrentes (por ejemplo Hopfield networks)** (G06N 3/044)

- **Retropropagación en Machine Learning (por ejemplo usando gradient descent)** (G06F 30/27)
- **Sistemas de simulación virtual basados en partículas de enjambre o particle swarm optimisation [PSO]** (G06N 3/006).

Todas las áreas cubiertas por las invenciones publicadas en los últimos años, se relacionan genéricamente con los campos técnicos mostrados en la figura 6, obtenida representando todas las clasificaciones de las patentes y los grupos principales a los que pertenecen.

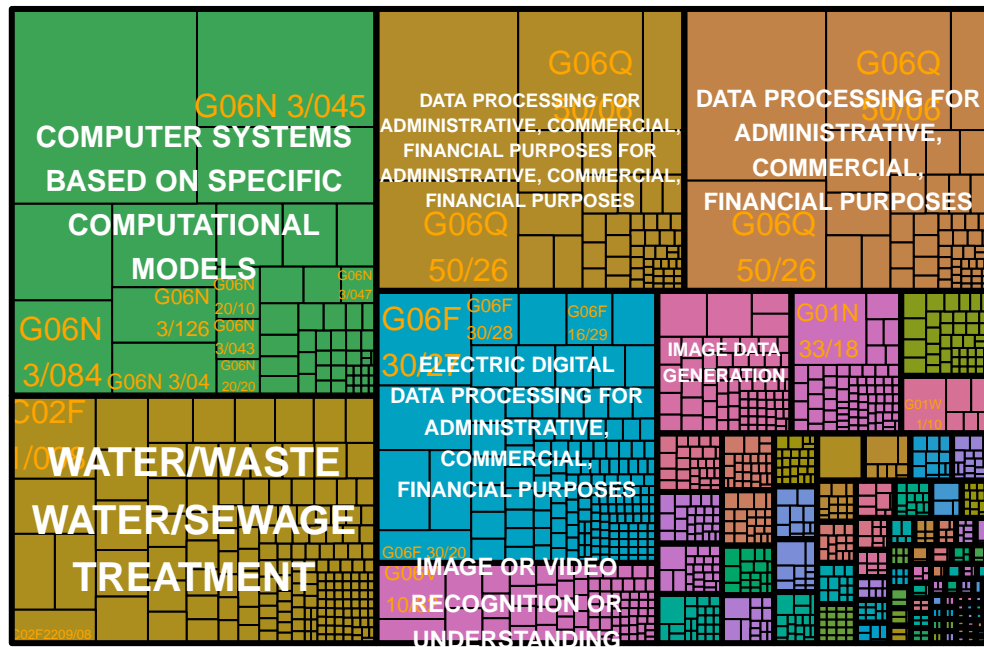


Figura 6: Principales áreas tecnológicas (Según la Clasificación Cooperativa de Patentes)

Evolución de las principales áreas tecnológicas

De la evolución de las áreas tecnológicas observamos aquéllas que muestran un interés sostenido en el tiempo y aquellas que emergen en los últimos años (sin apenas actividad previa):

Son áreas de interés sostenido y creciente en los últimos años:

- **Computer-aided design [CAD] and Design optimisation, verification or simulation (optimisation, verification or simulation of circuit designs) using machine learning, e.g. artificial intelligence, neural networks, support vector machines [SVM] or training a model** (G06f 30/27)

- **TICs especialmente adaptadas para gestión/supervisión en el sector Servicios (G06Q 50/10)**

Son áreas particularmente emergentes:

- *reconocimiento de imágenes y video usando redes neuronales (G06V 10/82)*
- *Modelos computacionales que usan algoritmos o programación genética (G06N 3/126)*
- *Modelos computacionales que usan redes neuronales temporales tales como elementos delay, oscillating neurons o pulsed inputs (G06N 3/049).*

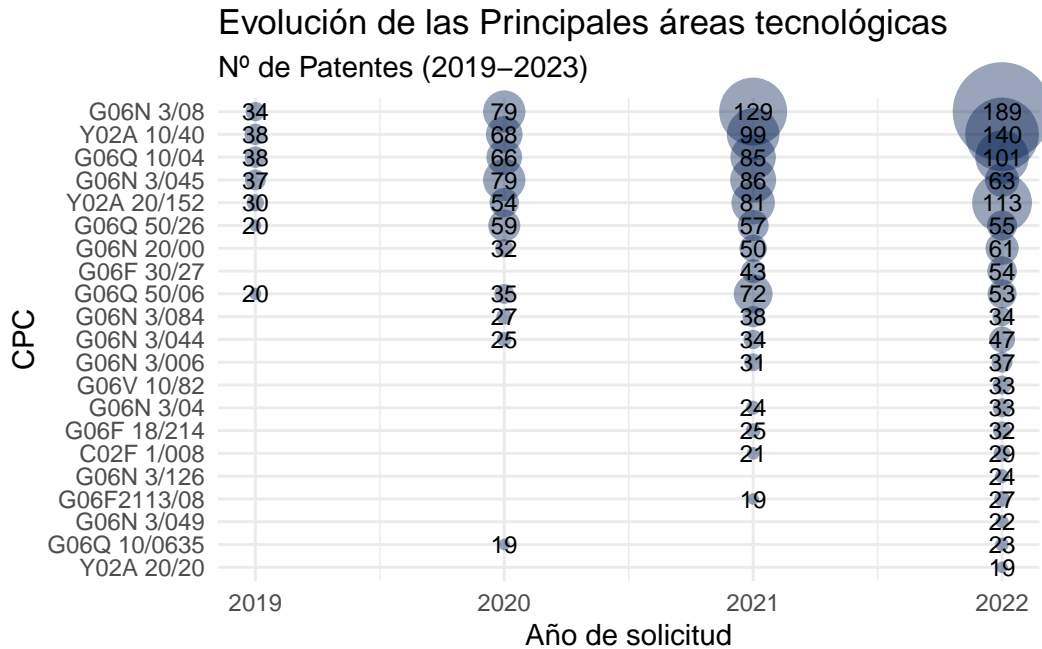


Figura 7: Evolución de las principales áreas tecnológicas

Principales contenidos patentados

Procesamos el texto del resumen de todas las patentes y ordenamos los términos por frecuencia para obtener una visión de los principales conceptos patentados. (eliminamos la palabra genérica “water”, al no ser de aporte)

en Inteligencia Artificial aplicada a la Gestión del Agua nos aportan algunas señales de otros temas relevantes tratados en las nuevas invenciones del ámbito estudiado (figura 11).

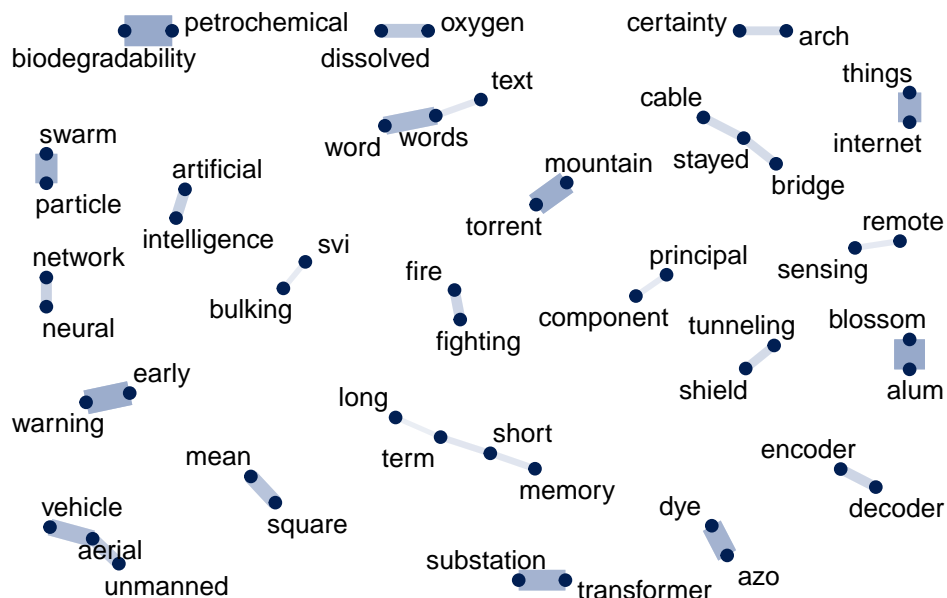


Figura 11: Palabras más correlacionadas

Aparecen algunos conceptos tales como la *IoT*, el *sensoreo remoto*, *técnicas de reducción de la dimensionalidad en análisis multivariable*, el uso de *drones*, análisis de la *degradación de petroquímicos*, del *oxígeno disuelto en agua*, *estaciones de transformación*, *sistemas de alerta temprana*, *técnica de memoria a largo/corto plazo (LSTM) para redes neuronales recurrentes*, *índice de volumen del lodo o SVI (Sludge Volume Index)*, entre otros.

Principales ámbitos o clústeres temáticos

Con el objetivo de detectar y visualizar grupos de contenido significativos en el conjunto de datos recuperados, aplicamos técnicas de *topic modeling*, esto es, técnicas estadísticas que nos permiten descubrir grupos semánticamente similares (clústeres) en el texto que describe las invenciones patentadas. Con ello obtenemos una visualización de los grupos temáticos más representativos de todo el conjunto de datos.

Visualizamos los principales (10) términos, que describen cada clúster mediante un gráfico de barras de frecuencias de cada grupo distintivo.

Se hace referencia a aspectos tales como la optimización de los métodos tratamiento de aguas residuales, el uso de imágenes para unidades de control de tratamiento de aguas

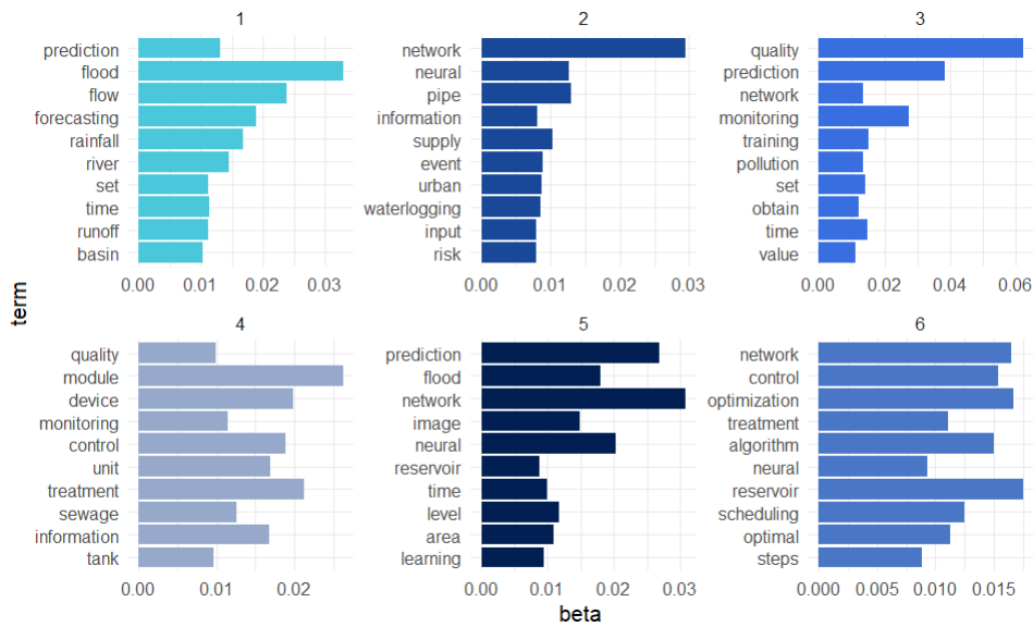


Figura 12: Principales clústeres temáticos

residuales, algoritmos de control de la calidad de caudales de agua, predicción y prevención de desastres e inundaciones, métodos de monitoreo de la contaminación y de alerta temprana.

Principales áreas de especialización

A continuación se muestran las principales organizaciones titulares de patentes y las temáticas relacionadas con sus invenciones patentadas.

Doosan Enerbility, por ejemplo, se focaliza en control y monitoreo de parámetros en plantas de tratamiento de agua (C02F 2209), por ejemplo, usando simuladores de los procesos de filtración por osmosis inversa (GO5B 13/04, C02F 1/444, B01D 35/28), etc. La **Universidad de Pequín** investiga y protege tecnologías en varios frentes que van desde métodos predictivos de procesos de tratamiento de aguas residuales para optimizar procesos de biodegradación, detección de contaminación y optimización de procesos de desnitrificación, así como para predecir eventos potencialmente desastrosos en cuencas hidrológicas usando técnicas de lógica difusa y redes neuronales. La **Universidad de Hohai** usa la AI junto a tecnologías relacionadas con adaptación al cambio climático, por ejemplo, para el diseño adaptativo de zonas de escorrentía en cuencas según las condiciones climáticas. En este ámbito coopera con la empresa de proyectos de plantas de generación de energía GUIZHOU WUJIANG HYDROPOWER DEV CO LTD, filial del grupo estatal **Huadian**. La **Universidad de**

Dalian, por su parte, desarrolla métodos predictivos (G06Q 10/04) de situaciones de lluvia e inundaciones, usando algoritmos tales como CNN-LSTM (*convolution cyclic neural network* y *Long Short-Term Memory Networks*) **IBM**, por su parte, se centra en invenciones sobre nuevos algoritmos de aprendizaje automático para sistemas de alerta de inundaciones (US20220156636A1, US20200167682A1), entre otros.

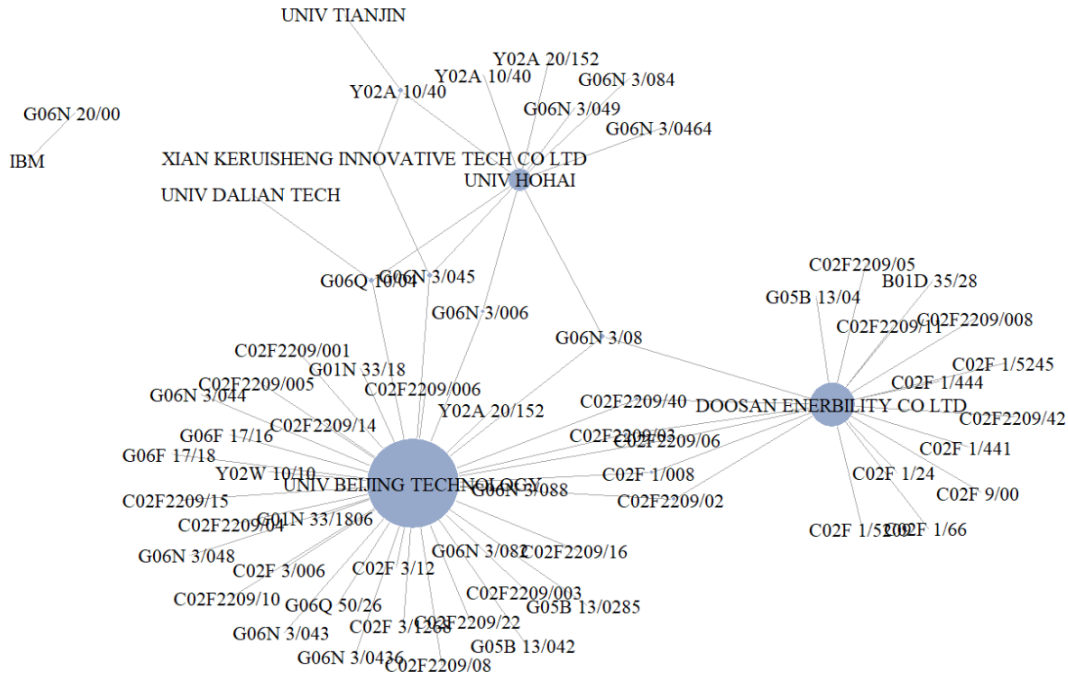


Figura 13: Diagrama en red de las áreas de especialización de los principales titulares

Colaboraciones

El análisis del co-patentamiento -empresas que comparten titularidad en el registro de invenciones patentadas- nos permite detectar relaciones de cooperación en materia de desarrollo tecnológico.

Identificamos varias colaboraciones publico-privadas entre empresas y centros de investigación, principalmente en Asia. Así, por ejemplo, en China, la corporación de grandes proyectos hidrológicos [China Three Gorges \(CTG\)](#) coopera con el Shanghai Investigation Design & Res Inst Co Ltd, [SIDRI](#) y la [Universidad de Tongji](#) (CN114858207A, CN114861550A); Por su parte, el [The One Safety](#) lo hace con el fabricante de equipos hidráulicos, de sensores e IoT [TCX \(Beijing Chenan Measurement and Control\)](#) y la Universidad de Tsinghua (CN112101796A, CN112101790A, CN112101789A). En corea, [DNC](#) y la Universidad de

EULJI han inventado un aparato para controlar el tratamiento de aguas residuales que incluye sensores con ultrasonidos y algoritmos de IA ([KR20210067138A](#)). Otras colaboraciones se dan entre las japonesas **TOSHIBA** y **KURITA Water** en sistemas de monitoreo con autoaprendizaje ([US11509550B2](#)), entre **SEMBCORP** y la Universidad de Singapur sobre predicción de parámetros en efluentes de aguas residuales ([US20210355007A1](#)) o entre la Universidad de Florida, la de Clarkson y el instituto oceanográfico **WOODS HOLE** en EE.UU. sobre métodos de monitoreo de condiciones del agua en situaciones de eventos climatológicos extremos ([US20230161070A18](#)), entre otras.

Algunos proyectos recientes de I+D

En los últimos años también se han realizado varios proyectos de I+D en el ámbito de la gestión del agua, involucrando el uso de la IA.

Entre los participantes más activos se encuentran centros de investigación y tecnológicos como **EURECAT**, el **CSIC**, el **CIEMAT**, **AQUALIA**, la **UPC**, la **UPV**, el Barcelona Supercomputing Center (**BSC**), **CETAQUA**, **FUTUREWATER SL** o el **ICRA** (Instituto Catalán de Investigación del Agua), entre los más activos actualmente. Algunos de los proyectos más destacados son:



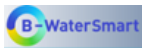
WATERVERSE - Water Data Management Ecosystem for Water Data Spaces Participan 17 socios de 10 países. Por parte de España, Eurecat e Hidralia (se realiza proyecto piloto en la planta de Sevilla).



REWaise - REsilient WAter Innovation for Smart Economy creará un nuevo “ecosistema de agua inteligente”, integrando un marco digital inteligente para los servicios de agua descentralizados y la toma de decisiones, involucrando a todas las partes interesadas relevantes para adoptar el verdadero valor del agua, reduciendo el uso de agua dulce y energía, y recuperando nutrientes y materiales. Los resultados serán un ciclo hidrológico sostenible y libre de carbono, en línea con el concepto de una economía circular resiliente. Participan instituciones de España (Aqualia y FCC) y más de 25 socios de 15 Países Europeos.



DWC - Digital-Water.city Leading urban water management to its digital future Desarrolla y demuestra 15 soluciones digitales avanzadas. Estas soluciones cubren toda la gama de tecnologías digitales innovadoras: Realidad aumentada, tecnología móvil, cloud computing, sensores, monitorización en tiempo real, inteligencia artificial, analítica predictiva, modelización y software libre. Participan las instituciones españolas: ADC SL, ICRA, I-CATALIST SL y Gimeno Digital Technologies SL.



[B-WaterSmart Accelerating Water Smartness in Coastal Europe](#) pretende implementar soluciones inteligentes de gestión de agua en zonas costeras de Europa. Cuenta con participación española (Cetaqua, Eurecat, Uned)



[WATER-MINING Next generation water-smart management systems: large scale demonstrations for a circular economy and society](#) coordinado por la TU Delft, tiene como objetivo ayudar a garantizar el acceso al agua potable y al saneamiento mediante la exploración de fuentes de agua alternativas y el desarrollo de soluciones innovadoras para la gestión sostenible del agua, incluido el aprovechamiento de las aguas residuales urbanas e industriales y la desalinización de agua de mar.

Específicamente en el ámbito de los **Gemelos Digitales**, cabe destacar el proyecto [Naiades](#), *A holistic water ecosystem for digitisation of urban water sector* en el que participan **Aguas de Alicante** y **Eurecat**, entre otros socios y el proyecto [SmartWaterTwin TWINNING FOR SMART WATER- THINKING AND RETHINKING WASTEWATER MANAGEMENT IN CIRCULAR ECONOMY FRAME](#), coordinado por la universidad Serbia de Novi Sad y con participación el **ICRA** (Institut Català de Recerca de l'Aigua).

Otros proyectos recientes que han propuesto soluciones de gestión del agua involucrando tecnologías inteligentes son:

- [Callisto - CopernicusArtificial Intelligence Services and data sources and processing at the edge to support DIAS and HPC infrastructures](#)
- [AccelWater - Accelerating Water Circularity in Food and Beverage Industrial Areas around Europe](#)
- [WaMoS - Wastewater Treatment Monitoring and Advisory System](#)
- [SOCRATIC: A real-time effluent management software based on artificial intelligence and industrial automation, specific for the prevention of combined sewage overflow](#) proyecto de la empresa francesa Ixane.
- [TEUTA Technology Enabler for Internet of Underwater Things applications](#) Proyecto de la empresa croata H2O ROBOTICS DOO ZA USLUGE.
- [TUBERS Scalable and Modular robotic tools for pipeline inspection and repair](#)
- [Water-Futures Smart Water Futures: designing the next generation](#)
- [Co-UDlabs Building Collaborative Urban Drainage research labs.](#) con participación española (Universidad de La Coruña).
- [WISEFLOW Whole-plant Assessment of Innovative, Sustainable and Energy-efficient Future Layouts of Wastewater Treatment Plants](#)
- [EMPOWER Entrepreneurial Multidisciplinary scientists forging Pathways Onto clean Water, sustainable Energy and Resources](#)
- [PURE-WATER Improved Estimation Algorithms for Water Purification](#)
- [M-NBS Smart, flexible, decentralized water treatment](#)
- [WATERSIGN: Smart Water Monitoring & Leakage](#)

- [aqua3S Enhancing Standardisation strategies to integrate innovative technologies for Safety and Security in existing water networks](#) con participación española (NTT Data Spain).
- [ULTIMATE: indUstry water-utiLiTy symbiosis](#)
- [WIDER UPTAKE Achieving wider uptake of water-smart solutions](#)
- [Fiware4Water FIWARE for the Next Generation Internet Services](#) Participa Eurecat.
- [SCOREwater Smart City Observatories implement RESilient Water](#) participa Eurecat, el ICRA y SCAN IBERIA SISTEMAS DE MEDICION SL Tecnoagua.
- [RETOUCH Nexus RESilient water gOvernance Under climate CHange](#) Participa la UPV.
- [PYDRO - Water to Data Sensing as a Service](#) <https://www.pydro.com/> Empresa alemana que ha desarrollado un smart flow meter.
- [artEmis Awareness and resilience through European multi sensor system](#) participa el IESE.
- [Atlanteco - Atlantic Ecosystems Assessment, Forecasting & Sustainability](#)
- [Intelligent Water Treatment for water preservation combined with simultaneous energy production and material recovery in energy intensive industries](#)
- [EU network of mesocosm facilities and joint research initiatives](#)

En Cataluña, el Catalan Water Partnership ([CWP](#)), está llevando a cabo algunos proyectos, cofinanciados por el *Ministerio de Industria, Comercio y Turismo (MINCOTUR)* en la segunda convocatoria de Agrupaciones Empresariales Innovadoras (AEIs) del 2022 en el marco de las ayudas Next Generation y el Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia, tales como:

- [SmartLand](#) sobre implementación de una gestión eficiente y buena gobernanza en cuencas hídricas con retos vinculados al uso del agua. El proyecto plantea desarrollar, implementar y validar sobre el terreno un modelo integral de gestión territorial de agua de la zona del Baix Ter.
- [SatWater](#) con objetivo de desarrollar una herramienta innovadora que permita incrementar el conocimiento sobre la calidad de las masas de agua superficiales para prever su comportamiento y evolución de parámetros vinculados a la calidad, como son la turbidez, la concentración de clorofila o la presencia de algas.
- [AquaTWINS](#) que pretende dar respuesta a los principales retos de la gestión del ciclo urbano del agua en pequeños y medianos municipios mediante la investigación, diseño e implementación de gemelos digitales e inteligencia artificial aplicables a diferentes partes del ciclo urbano del agua. Participan en el proyecto [ABM](#) y [Amphos 21](#) con el rol de desarrolladores de la solución, y Aguas de Vic, Depuradoras de Osona y PRODAISA como usuarios finales de la tecnología.

Panorama general del Mercado

Los operadores de agua y aguas residuales están invirtiendo en inteligencia artificial. Algunos estudios de mercado¹ pronostican inversiones que alcanzarán los 6.300 millones de dólares en soluciones de inteligencia artificial para el año 2030.

Se constata la necesidad de disponer de soluciones digitales que permitan visualizar y gestionar de una forma ágil e inteligente las infraestructuras de agua, ayuden a predecir caudales, a adaptarse a condiciones cambiantes y complejas, de la demanda, de la disponibilidad de recursos y de las condiciones climáticas, controlar la calidad, detectar fugas, etc. y en definitiva poder mejorar la toma de decisiones, tener mayor control para predecir y anticiparse y evitar situaciones críticas y desastres potenciales. Por otro lado, la IA puede ser también de utilidad a la hora de diseñar las propias infraestructuras de la forma más optimizada. Finalmente, ya en un ámbito más cercano a la *AI generativa*, ciertas aplicaciones pueden contribuir a los procesos de interacción con operarios como herramientas que faciliten la visualización de soluciones creativas a problemas técnicos y también a nivel de comunicación e interacción con clientes y consumidores.

En España existen más de 2000 Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales (EDAR), siendo las mayores la EDAR Sur de Madrid, la EDAR Besos y la EDAR el Prat en Barcelona, la EDAR Galindo de Bilbao y la EDAR Pinedo 2 de Valencia.

La implementación de este tipo de tecnologías supone para ellas una oportunidad para mejorar la eficiencia, reducir el gasto operacional (OPEX), ahorrar costes y optimizar el consumo de energía, entre otros aspectos clave.

Algunos estudios estiman el coste en operaciones de tratamiento del agua en unos 300 USD por cliente al año² y que la AI permitiría ahorrar el 20-30% del OPEX reduciendo costes de energía, optimizando el uso de productos químicos para el tratamiento y facilitando el mantenimiento predictivo de la infraestructura.

¹<https://waterfm.com/report-data-demand-will-drive-92-billion-in-investment-by-2030/>

²<https://www.autodesk.com/blogs/water/2022/05/01/ai-in-water-10-ways-ai-is-changing-the-water-industry/?redirected=1>

Principales proveedores de soluciones comerciales

- **Pani Water Optimization** (Canadá) <https://www.pani.global> soluciones avanzadas de digitalización para plantas de tratamiento de agua.
- **Bentley Systems** (USA) <https://www.bentley.com/software/water-utilities> Entre sus proyectos, cuenta el desarrollo de un servicio de gemelos digitales para el sistema de suministro y tratamiento de agua para la gran compañía de saneamiento **Sabesp**, en Sao Paulo, Brasil³
- **SEW** (USA) <https://www.sew.ai> Plataforma SmartiX
- **Aquatic informatics** (Canadá) <https://aquaticinformatics.com>
- **Invicara** (Irlanda) <https://invicara.com>
- **Tomorrow** (USA) <https://www.tomorrow.io>
- **Floodbase** (USA) <https://www.floodbase.com>
- **Watertrax** (Canadá) <https://watertrax.com>
- **WoltersKluwer** (Países Bajos) <https://www.wolterskluwer.com> / Enablon QEHS Suite <http://insights.enablon.com>
- **Hach** <https://es.hach.com>
- **Benchmark Gensuite Water Watch Software** (USA) <https://benchmarkgensuite.com>
- **Cartegraph** (USA) <https://www.cartegraph.com/software-for/water-utility-management>
- **Sphera Water Management Software** (USA) <https://sphera.com/water-management-software>
- **Intelix** (USA) <https://www.intelix.com/products/applications/water-quality-management-software>
- **Cority** (Canadá) <https://www.cority.com/environmental-cloud/water-management-software>
- **Enviance** (Canadá) <https://enviance.in/services>
- **Locus** (USA) <https://www.locustec.com/applications/industry/water-utilities>
- **Versa** (USA) <https://www.versa-valves.com/industries/utilities/water>
- **EE modeling systems** (USA) <https://www.eemodelingsystem.com>
- **Waterloohydrogeologic** (Canadá) <https://www.waterloohydrogeologic.com>
- **Innovyze** (Autodesk) (USA) Sistemas de software para control y gestión de drenaje de la empresa Autodesk <https://innovyze.com>
- **AMR-G** (Israel) <https://www.smartamr.com> startup con solución de smart meter desarrollada con financiación de proyecto europeo.
- **Transcend Design Generator (TDG)** (USA) <https://dg.transcendh2o.com> startup con solución para diseño de infraestructuras de agua con algoritmos genéticos de AI.

En España

Utilities y gestión integral:

- **Agbar/Suez** (Barcelona / Francia) <https://www.agbar.es>

³<https://www.bentley.com/wp-content/uploads/wp-sabesp-abes-congress-ltr-en-lr.pdf>

- **Veolia** (Zaragoza / Francia) <https://www.veoliawatertechnologies.es>
- **Aguas de Valencia** (Valencia) <https://www.aguasdevalencia.es>
- **Global Omnium** (Valencia) <https://www.globalomnium.com> Ha implementado el gemelo digital con monitoreo y análisis de datos a tiempo real de **GoAigua** de Idrica <https://www.idrica.com/goaigua/water>, que le está permitiendo mejoras notables en eficiencia y ahorro de agua⁴.
- **FACSA / Grupo Gimeno** (Castellón) <https://www.facsa.com> La empresa participó, junto con el grupo de Fluidos Multifásicos de la **UJI** en el proyecto **VIRAL**⁵, una solución innovadora para el control de EDAR mediante simulación CFD e Inteligencia Artificial. Ambas instituciones cooperan también impulsando la Cátedra FACSA-UJI de innovación en los retos del agua⁶ y crearon el Hub **Water UJI** del sector tecnológico para Castellón.
- **Hidralia** (Andalucía) <https://www.hidralia-sa.es>
- **Viaqua** (Galicia) <https://www.viaqua.gal>
- **Gestagua** (Grupo Saur, Francia) <https://www.gestagua.es>
- **Labagua** (Alicante, sedes en toda España) <https://www.labagua.com>

Empresas/startups especializadas en España:

- **Idrica** (Castellón, Valencia) <https://www.idrica.com> compañía especializada en soluciones de gestión del ciclo del agua, fundada por **Fomento Urbano de Castellón, S.A.** como resultado del proceso de transformación digital de **Global Omnium**. Desarrolla soluciones de software, análisis y gestión integral de infraestructuras de agua (Xylem Vue / GoAigua). <https://www.idrica.com/goaigua/water>
- **NTT DATA** (Japón, presencia en España) <https://www.nttdata.com> compañía japonesa de tecnologías de la información. Ofrece servicios y soluciones digitales que cubren toda la cadena de valor del ciclo integral del agua. El próximo año 2024 tiene previsto lanzar un sistema de IA para monitorizar niveles de agua en ríos y embalses⁷
- **Almar Water Solutions** <https://almarwater.com/es> desarrolla soluciones de infraestructuras hídricas bajo esquemas PPP.
- **Netmore** <https://netmoregroup.com> Tecnologías IoT para sector agua y energía. Red LoRaWAN
- **FIBSEN** (Valencia) <https://www.fibsen.com> tecnología para monitorizar las redes de tuberías de distribución de agua urbana en tiempo real⁸. La empresa ha participado en los proyectos: **OPTIFIB** - *Hydraulic performance optimization of drinking water supply by fiber-optic sensing project*. **FIBAGUA** - *Smart fiber-optic sensors project for a sustainable and healthy water supply* y **TALOS** - *Telemetry-assisted leakage optical sensors project*.

⁴<https://www.idrica.com/case-studies/digital-twin-valencia/>

⁵<https://www.facsa.com/idi-2/viral/>

⁶<https://www.catedradelagua.uji.es/la-catedra-facsa-uji-analiza-los-retos-del-agua-en-el-sector-ceramico-en-el-marco-del-proyecto-water-uji/>

⁷<https://www.japanindustrynews.com/2023/07/ai-based-water-monitoring-system-pilot-launched-by-ntt-docomo-group/>

⁸<https://valenciaplaza.com/startup-valenciana-fibsen-lleva-sistema-evitar-perdidas-agua-grecia>

- **Bluntplanet** (Donostia) <https://buntplanet.com> BuntBrain, Inteligencia Artificial para la gestión inteligente del agua- La empresa ha implantado su tecnología a grandes empresas de gestión del ciclo integral del agua tales como FACSA⁹, ESVAL y Aguas del Valle¹⁰. En 2020, obtuvo financiación en el proyecto europeo *AccuWater*
- **Talent Swarm** (Madrid) <https://talentswarm.com> startup que desarrolla plataforma de modelado CAD y gemelos digitales para la gestión del agua. Colabora con el grupo constructor de infraestructuras **Sacyr**, aplicando estos sistemas en sus plantas de desalinización de agua.
- **Neurite** (Barcelona) <https://www.neuritelab.com>
- **Createch360°** (Vic, Barcelona) <https://www.createch360.com> optimización energética de las EDAR con modelos de IA.
- **Tedagua/Grupo Cobra** (Canarias y Madrid) <https://www.tedagua.com> empresa creada en Canarias e integrada en el grupo Cobra, con presencia internacional, especializada en tecnologías de desalinización. El año pasado obtuvo una ayuda estatal del programa red.es para desarrollar un Gemelo Digital para la gestión de las plantas desalinizadoras.
- **3edata** (Lugo) <https://3edata.es> empresa especializada en proyectos de gestión de datos medioambientales.
- **FUTUREWATER SL** (Murcia) <https://www.futurewater.es> especializada en investigación y consultoría en servicios hídricos.
- **h2i** (Zaragoza) <https://hdosi.es> ha implementado una plataforma IoT/IA para la Diputación Foral de Álava para ayudar a mejorar la resiliencia a la sequía.
- **Agrow Analytics** (Valencia) <https://www.agrowanalytics.com> AI aplicada al manejo agronómico del riego.
- **LEQUIA** (Universidad de Girona) <http://www.lequia.udg.edu>, trabaja en aplicación de IA en el ámbito del control de la calidad del agua y potabilización¹¹
- **Qatium** (Valencia) <https://qatium.com> plataforma de gestión del agua colaborativa con IA.¹²
- **ABM** (Riudellots, Girona) (hoy parte del grupo británico **RSK Group**) <https://www.abm.cat> empresa de soluciones especializadas en ingeniería hidráulica. Ha desarrollado varias herramientas (*DAMCAT*, *EVADCAT*, etc.) de monitoreo de datos de infraestructuras hidráulicas, para instituciones como la Agencia Catalana del Agua (ACA).
- **Amphos 21** (Barcelona, presencia en Chile) <https://www.amphos21.com> consultoría ambiental y estratégica. Junto con AMB, han desarrollado la aplicación *AIFlood4* de

⁹<https://www.facsa.com/facsa-aplica-la-inteligencia-artificial-para-mejorar-el-rendimiento-de-las-redes-de-abastecimiento-de-agua/>

¹⁰BuntPlanet renueva la confianza de Txingudiko zerbitzuak-Servicios de Txingudi (junio 2, 2023) <https://buntplanet.com/es/2023/06/02/buntplanet-renueva-la-confianza-de-txingudiko-zerbitzuak-servicios-de-txingudi-2/>; BuntPlanet implanta en ESVAL y Aguas del Valle su software BuntBrain de gestión inteligente de redes y activos, (abril 21, 2023) <https://buntplanet.com/es/2023/04/21/buntplanet-implanta-en-esval-y-aguas-del-valle-su-software-buntbrain-de-gestion-inteligente-de-redes-y-activos/>

¹¹WATSPProof - Implementación y validación de un sistema experto de ayuda a la decisión para el control y gestión de plantas de potabilización <http://www.lequia.udg.edu/ca/recerca/projectes-vigents/item/3020-watsproof.html>

¹²<https://www.aquatechtrade.com/news/utilities/tech-dive-ai-and-water>

determinación de zonas inundables a tiempo real¹³.

- **Cimico** (Donostia) <https://www.cimico.tech> startup donostiarra que ha desarrollado una herramienta de simulación específica para biopelículas (*Filmath*[™]) que permite optimizar el diseño del tratamiento biológico de una depuradora simulando sus condiciones reales específicas.
- **Hydrens** (Castellón) <https://www.hydrens.com> startup perteneciente al Grupo Gimeno que trabaja en simulación hidrodinámica.

Centros de referencia

Norteamérica:

- Servicio geológico nacional USGS <https://www.usgs.gov>
- Universidad de Texas A&M <https://www.tamu.edu>
- EPA (United States Environmental Protection Agency) <https://www.epa.gov> La agencia desarrolló el Software de modelizado matemático tradicional hidráulico y de calidad del agua *EPANET*, hoy de dominio público y ampliamente usado.

Asia:

- Academia de Ciencias China *(CAS) <https://english.cas.cn>
- Numerosas universidades Chinas como la de Hohai, Beijing Normal, Wuhan, Tsinghua, la Northwest A&F, Nanging o la Sun Yat-Sen University, entre otras.
- Academia Rusa de Ciencias <https://new.ras.ru>

Europa:

- Water Europe (Bélgica) <https://watereurope.eu> centro promotor europeo de proyectos y consorcios de innovación en el sector del agua.
- Watershare Europe <https://www.watershare.eu> red de organizaciones de investigación sobre el agua.
- Universidad de Wageningen (Países Bajos) <https://www.wur.nl>
- TU Delft (Países Bajos) <https://www.tudelft.nl>
- INRAE (Francia) <https://www.inrae.fr>
- CNRS (Francia) <https://www.cnrs.fr>
- KU Leuven (Bélgica) <https://www.kuleuven.be>
- Universidad de Copenhagen (Dinamarca) <https://www.ku.dk/>
- Universidad de Uppsala (Suecia) <https://www.uu.se/>
- Fraunhofer (Alemania) <https://www.fraunhofer.de/>
- NTUA (Grecia) <https://www.ntua.gr/>

¹³<https://www.abm.cat/es/2a-jornada-campus-aigua-innovacion-eficiencia-gestion-agua-soluciones-futuro-sostenible/>

- VITO (Bélgica) <https://vito.be> centro flamenco en el área del desarrollo sostenible y las cleantech.
- BOKU (Austria) <https://forschung.boku.ac.at> instituto de hidrología austríaco.
- Universidad de Aalborg (Dinamarca) <https://www.monplas.eu/aau>
- UU (Reino Unido) <https://www.unitedutilities.com>
- GFZ (Potsdam, Alemania) <https://www.gfz-potsdam.de>
- TUM (Munich, Alemania) <https://www.wasser.tum.de>

En España:

- El CSIC
- Centro tecnológicos:
 - Cetaqua (Barcelona, Andalucía, Galicia, Chile) <https://www.cetaqua.com> centro tecnológico público-privado formado por centros de investigación de referencia y participación privada de empresas del sector del agua (Agbar, Veolia Chile, Aguas Andinas, Hidralia y Viaqua).
 - Eurecat (lidera la comunidad RIS3CAT de Agua), <https://eurecat.org/portfolio-items/comunitatidf>
 - CIDTA (Salamanca) <https://cidta.usal.es>
 - Vicomtech (Donostia) <https://www.vicomtech.org>, que ha desarrollado una Plataforma integral IA de gestión eficiente de una EDAR (proyecto *SISTELIA*¹⁴) en colaboración con Veolia y otras empresas.
 - Instituto tecnológico de Galicia <https://itg.es/ciclo-integral-del-agua>
- Clusteres del Agua, tales como el *ICT4water* europeo, la Plataforma Tecnológica Española del Agua (*PTEA*) o el Catalan Water Partnership (*CWP*), entre otros.

¹⁴<https://www.vicomtech.org/es/idi-tangible/casos-exito/caso/plataforma-integral-ia-de-gestion-eficiente-de-una-edar>

Conclusiones

Se han repasado los desarrollos recientes de gestión del agua que involucran métodos avanzados de simulación, técnicas CAD, aplicación de gemelos digitales y uso de modelos y algoritmos de aprendizaje automático e Inteligencia Artificial para modelizar las infraestructuras de agua y facilitar la toma de decisiones inteligentes a tiempo real y la anticipación mediante modelos predictivos.

En cuanto a nuevos desarrollos tecnológicos, se constata la fuerte actividad de empresas chinas, que están llevando a cabo grandes proyectos hidráulicos y a la vez registran el mayor número de desarrollos patentados sobre nuevas técnicas de modelado del territorio con gemelos digitales y uso de modelos predictivos con IA.

Las principales áreas tecnológicas en desarrollo en los últimos años se asocian con el uso de redes neuronales y combinaciones de redes neuronales (entre los algoritmos más usados destacan las redes recurrentes (*Hopfield networks*), la retropropagación en aprendizaje automático (*backpropagation*) (por ejemplo usando *gradient descent*) o los sistemas de simulación virtual basados en partículas de enjambre o *particle swarm optimisation, PSO*). Se usan en aplicaciones para adaptación al cambio climático, control y monitoreo de inundaciones, predicción de riesgos, optimización y control de la filtración de agua, entre otros.

Otras áreas relevantes específicas se asocian a sistemas de Control de caudal y a métodos de tratamiento biológico de aguas.

Las áreas de desarrollo tecnológico que más han crecido en los últimos años son el reconocimiento y generación de imágenes y video usando redes neuronales, los modelos computacionales que usan algoritmos o programación genética y los que usan redes neuronales temporales (tales como elementos delay, *oscillating neurons* o *pulsed inputs*).

Las grandes empresas de gestión e infraestructuras de agua, tienen ya integradas plataformas digitales de gestión de instalaciones y recursos en la nube, que han ido evolucionado a partir de los sistemas de adquisición y control de datos (SCADA) e incorporando tecnologías que usan algoritmos de IA para optimizar los procesos que involucran cada vez más variables, entrenando a partir de grandes datos y control a tiempo real (RTC) -incluyendo los datos generados por los sensores de entornos IoT en el caso de las infraestructuras de red- que permiten generar modelos de optimización y predictivos del desempeño del sistema, de la calidad del agua, del uso energético, de las pérdidas, etc. e incluso incidir en la optimización del propio diseño de las infraestructuras.

Otras utilities han usado la IA en asistentes virtuales y chatbots principalmente para facilitar la comunicación con operarios¹ en labores de mantenimiento de infraestructura y en algunos casos, más escasos, para la comunicación con clientes en casos de incidencias y gestiones, aunque la mayoría de este tipo de soluciones son aún, más bien parte de estrategias de marketing o fidelización con los clientes, que soluciones con una utilidad real.

En cuanto a la utilización de gemelos digitales, varios gobiernos y regiones ya han empezado a implementar estos sistemas para mapear y monitorizar de manera continuada el territorio, integrando datos disponibles y modelización, de modo a apoyar políticas de planificación, gestión de riesgos de inundación y sequía principalmente y anticipación en relación a los grandes cambios climáticos a mayor largo plazo; asimismo, se identifican algunas utilities que han implementado este tipo de sistemas, reportando beneficios y ahorro de OPEX.

Algunas referencias

- iagua <https://www.iagua.es>
- Urban Waste Water Treatment Directive <https://rod.eionet.europa.eu/obligations/613>
- Aguas residuales <https://www.aguasresiduales.info>
- Global Leakage Summit <https://www.global-leakage-summit.com>
- SMAGUA (Zaragoza) <https://www.feriazaragoza.es/smagua-2023>
- Smart City World Congress (Barcelona) <https://www.smartcityexpo.com>
- Congreso Mundial de la Asociación Internacional de Ingeniería e Investigación Hidroambiental (IAHR) <https://council.science/es/events/39-world-congress-iahr>
- Waterbase - UWWTD: Urban Waste Water Treatment Directive – reported data <https://www.eea.europa.eu/en/datahub/datahubitem-view/6244937d-1c2c-47f5-bdf1-33ca01ff1715>
- Global Water intel <https://www.globalwaterintel.com>
- Aqua tech trade <https://www.aquatechtrade.com>
- German Water Partnership <https://germanwaterpartnership.de>
- Water Online <https://www.wateronline.com>
- Swan Forum <https://swan-forum.com>
- Deyak (Kosani, Grecia) <https://deyakat.gr>
- Estrategia Galicia Digital 2030 <https://amtega.xunta.gal/es/proceso-de-elaboracion-da-estrategia-dixital-de-galicia-2030>
- Principios para diseño de gemelos digitales (*Geminis Principles*) del National Digital Twin (NDT) del Reino Unido <https://www.cdbb.cam.ac.uk/DFTG/GeminiPrinciples>
- IWA <https://iwa-network.org>
- Smart Water Utilities <https://www.smart-water-utilities.com>

¹<https://ascelibrary.org/doi/10.1061/JWRMD5.WRENG-5870>

Publicaciones científicas recientes

- Hesam Kamyab et al. The latest innovative avenues for the utilization of artificial Intelligence and big data analytics in water resource management, Results in Engineering, Volume 20, 2023, 101566, ISSN 2590-1230, <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101566>
- Alyson H. Rapp, et al. Adoption of Artificial Intelligence in Drinking Water Operations: A Survey of Progress in the United States (2023) Journal of Water Resources Planning and Management Volume 149, Issue 7 <https://doi.org/10.1061/JWRMD5.WRENG-5870>
- D. Selișteanu, E. Petre, R. Prejbeanu, I. M. Popescu and S. Mehedințeanu, Software Solutions for Simulation, Monitoring and Data Acquisition in Wastewater Treatment Plants, 2020 21th International Carpathian Control Conference (ICCC), High Tatras, Slovakia, 2020, pp. 1-6, doi: <https://10.1109/ICCC49264.2020.9257268>.
- Henriksen, H.J.; Schneider, R.; Koch, J.; Ondracek, M.; Troldborg, L.; Seidenfaden, I.K.; Kragh, S.J.; Bøgh, E.; Stisen, S. A New Digital Twin for Climate Change Adaptation, Water Management, and Disaster Risk Reduction (HIP Digital Twin). Water 2023, 15, 25. <https://doi.org/10.3390/w15010025>
- Kim, J., Kim, K., Lee, J., Kwon, M., Kim, H., and Jo, Y.: Digital Twin Water Management Platform - Innovative approach for optimal water management, EGU General Assembly 2023, Vienna, Austria, 24–28 Apr 2023, EGU23-4589, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu23-4589>, 2023.
- Zekri, S., Jabeur, N., & Gharrad, H. (2022). Smart Water Management Using Intelligent Digital Twins. COMPUTING AND INFORMATICS, 41(1), 135–153. https://doi.org/10.31577/cai_2022_1_135
- Yousra Mohamed (2020). Virtual Assistant Design for Water Systems Operation. UWSpace. <http://hdl.handle.net/10012/15554>
- Muñoz-Sabater, J., Dutra, E., Agustí-Panareda, A., Albergel, C., Arduini, G., Balsamo, G., Boussetta, S., Choulga, M., Harrigan, S., Hersbach, H., Martens, B., Miralles, D. G., Piles, M., Rodríguez-Fernández, N. J., Zsoter, E., Buontempo, C., and Thépaut, J.-N.: ERA5-Land: a state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications, Earth Syst. Sci. Data, 13, 4349–4383, <https://doi.org/10.5194/essd-13-4349-2021>, 2021. <https://essd.copernicus.org/articles/13/4349/2021>
- Hongfang Lu, Xin Ma, Hybrid decision tree-based machine learning models for short-term water quality prediction, Chemosphere, Volume 249, 2020, 126169, ISSN 0045-6535 <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126169>.
- A Hydrological Digital Twin by Artificial Neural Networks for Flood Simulation in Gardon de Sainte-Croix Basin, France Published under licence by IOP Publishing Ltd IOP Con-

- ference Series: Earth and Environmental Science, Volume 906, 7th World Multidisciplinary Earth Sciences Symposium (WMESS 2021) 6th-10th September 2021, Prague, Czech Republic Citation Cagri Inan Alperen et al 2021 IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 906 012112 DOI <https://doi.org/10.1088/1755-1315/906/1/012112>
- Frederik Kratzert, Daniel Klotz, Mathew Herrnegger, Alden K. Sampson, Sepp Hochreiter, Grey S. Nearing Methods Toward Improved Predictions in Ungauged Basins: Exploiting the Power of Machine Learning Technical reports First published: 23 November 2019 <https://doi.org/10.1029/2019WR026065>
 - Muhammed Sit, Bekir Z. Demiray, Zhongrun Xiang, Gregory J. Ewing, Yusuf Sermet, Ibrahim Demir; A comprehensive review of deep learning applications in hydrology and water resources. *Water Sci Technol* 15 December 2020; 82 (12): 2635–2670. doi: <https://doi.org/10.2166/wst.2020.369> <https://iwaponline.com/wst/article/82/12/2635/75838/A-comprehensive-review-of-deep-learning>
 - Liu Zhixin, Xu Jiayi, Liu Mingzhe, Yin Zhengtong, Liu Xuan, Yin Lirong, Zheng Wenfeng (2023) Remote sensing and geostatistics in urban water-resource monitoring: a review. *Marine and Freshwater Research* 74, 747-765. <https://doi.org/10.1071/MF22167> <https://www.publish.csiro.au/MF/MF22167>
 - Duie Tien Bui, Khabat Khosravi, John Tiefenbacher, Hoang Nguyen, Nerantzis Kazakis (2020) Improving prediction of water quality indices using novel hybrid machine-learning algorithms *Science of The Total Environment*, Volume 721, 2020, 137612, ISSN 0048-9697, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137612>.
 - Noh, S. J., Lee, E., Choi, H., Lee, G., and Kim, S.: Cellular Automata-based high-resolution hydrological modeling for urban digital water information, EGU General Assembly 2022, Vienna, Austria, 23–27 May 2022, EGU22-11531, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu22-11531>, 2022.
 - Guangtao Fu, Yiwen Jin, Siao Sun, Zhiguo Yuan, David Butler, The role of deep learning in urban water management: A critical review, *Water Research*, Volume 223, 2022, 118973, ISSN 0043-1354, <https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.118973>
Xing Chen; Qin Xu; Jing Cai Research on the urban water resources carrying capacity by using system dynamics simulation *Crossmark: Check for Updates Hydrology Research* (2023) 54 (3): 418–434. <https://doi.org/10.2166/nh.2023.101>
 - Wu, X.; Lu, G.; Wu, Z. Remote Sensing Technology in the Construction of Digital Twin Basins: Applications and Prospects. *Water* 2023, 15, 2040. <https://doi.org/10.3390/w15112040>
 - Walshire Lucas A., Gonzalez Megan E., Lillycrop Jeff, Seamster Emily, Winters Katherine E. (2023) Water Resources Infrastructure Digital Twins: Design, Development, and Future Efforts *Geo-Congress 2023 Proceedings* <https://doi.org/10.1061/9780784484692.041>
 - Wentao Liu, Sudao He, Jianpeng Mou, Ting Xue, Hongtian Chen, Weili Xiong, Digital twins-based process monitoring for wastewater treatment processes, *Reliability Engi-*

neering & System Safety, Volume 238, 2023, 109416, ISSN 0951-8320, <https://doi.org/10.1016/j.ress.2023.109416>.

- Rico Carranza, E., Mijic, A., and Whyte, J.: Co-Creating Digital Twins for Planning of Water Resources and Housing Development , EGU General Assembly 2023, Vienna, Austria, 24–28 Apr 2023, EGU23-17338, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu23-17338>, 2023.
- Li, T. Chen and Q. Kong, The Study on Problems and Solutions of Digital Twin Technology Application under River Chief System, 2022 8th International Conference on Hydraulic and Civil Engineering: Deep Space Intelligent Development and Utilization Forum (ICHCE), Xi'an, China, 2022, pp. 647-650, doi: <https://doi.org/10.1109/ICHCE57331.2022.10042548>.
- Lingzi Wang, Rengui Jiang, Xiaowan Chen, Jiancang Xie, Xinyi Liu, Linqian Tian, and Miao Wang Design and application of digital twin platform based smart Weihe River Basin, Proc. SPIE 12460, International Conference on Smart Transportation and City Engineering (STCE 2022), 1246048 (22 December 2022); <https://doi.org/10.1117/12.2658268>
- Hubert Jenny et al. Using Artificial Intelligence for Smart Water Management Systems (June 2020) Asian Development Bank ADB <http://dx.doi.org/10.22617/BRF200191-2>

