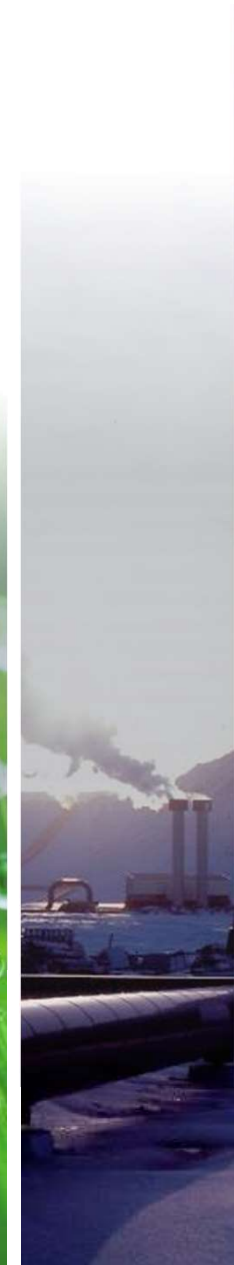
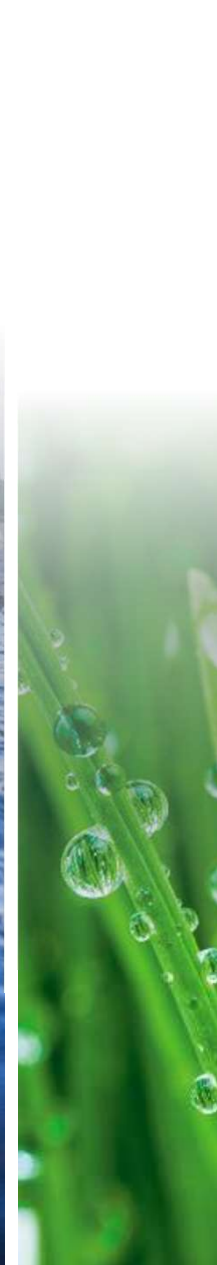


# Modelos numéricos avanzados (incluyendo IA) en simulación hidrogeológica

JORNADA TÉCNICA SOBRE IMPLANTACIÓN PLAN DE  
ACCIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

MITECO / 16/04/2024



# AMPHOS 21 y el grupo RSK



**ESPAÑA**  
 c) Veneçuela, 103, 2ª planta  
 08019 Barcelona  
 Tel.: +34 93 583 05 00

c) Raquel Meller, nº7,  
 Planta baja  
 28027 Madrid  
 Tel. ++34 91 123 55 62

**CHILE**  
 Avda. Nueva Tajamar, 481  
 WTC – Torre Sur – Of 1005  
 Las Condes, Santiago  
 Tel.: +562 2 7991630

**PERÚ**  
 Av. Primavera 785, Int.  
 201,  
 Urb. Chacarilla - San Borja  
 Lima 41  
 Tel.: +51 1 592 1275

 NUCLEAR NUCLEAR	 MINERÍA MINING	 AGUA WATER	 SOSTENIBILIDAD SUSTAINABILITY	 OIL&GAS OIL&GAS
Consultoría e ingeniería I+D Modelización numérica Digitalización				<b>A<sup>21</sup></b>

30 años de historia  
 400 empleados  
 Hidrogeología, geoquímica, geomecánica  
 Minería, Agua, Nuclear, Hidrocarburos

# AMPHOS 21 y el grupo RSK

**Responsible.  
Sustainable.  
Knowledgeable.**

RSK es una empresa líder mundial en el desarrollo de soluciones sostenibles. Nuestra familia está compuesta por más de 175 unidades de negocio de consultoría medioambiental, ingeniería y servicios técnicos que trabajan juntas para aportar soluciones prácticas a algunos de los mayores retos que enfrenta nuestra sociedad.

Mediante una amplia oferta integradora de servicios y productos, RSK ofrece a sus clientes en todo el mundo soluciones medioambientales completas.

**RSK**



## RSK en números, a día de hoy

**15.000+**

Empleados

**175+**

Unidades de negocio operativas en 7 divisiones

**10,000+**

Clientes activos

**£1.60bn**

Ventas totales

**£145m**

EBITDA

**9%**

Crecimiento orgánico anual desde 2011

**6**

Continentes

**40+**

Países

**250+**

Oficinas

### Modelos a escala regional y local

- Flujo de agua subterránea y transporte multiespecie
- Modelos descriptivos
- Paleomodelos
- Calibración automática (determinista y estocástica)
- Análisis de incertidumbre
- Medios fracturados
- Escalado de parámetros hidráulicos
- Dewatering
- Impacto de obras civiles

### Interacción agua subterránea-superficial

- Intrusión marina
- Descarga submarina de agua dulce
- Descarga de nitratos a aguas superficiales
- Identificación de áreas de recarga y descarga
- Zona hiporréica
- Efectos del cambio climático (variaciones del nivel del mar)
- Modelos de Soil Vegetation Atmosphere Transfer (SVAT)

### Procesos acoplados

- Flujo con densidad variable (debido a Temperatura o salinidad)
- Islas pequeñas y atolones
- Modelos hidrotermales
- Modelos termohidromecánicos
- Almacenamiento geológico de gases (CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>)
- Impactos ambientales de inyección de CO<sub>2</sub>, temperatura, salmuera (transporte reactivo + modelos HTC)
- Sellado de fracturas

### Repositorios subterráneos

- Hidrogeología de campo próximo
- Modelos a escala de repositorio
- Modelación de líneas de flujo
- Migración de gases (H<sub>2</sub>)
- Interacción entre partes del repositorio
- Flujo en coberturas multicapa
- Impacto de terremotos en el agua subterránea
- Transporte de radionucleidos incluyendo retención y desintegración radiactiva

### Transporte reactivo

- En la zona saturada y no saturada
- En medios fracturados con diffusion en la matriz
- Procesos de acumulación y liberación de radionucleidos
- Mezcla y reacciones bajo lagos salados
- Movilización de metales
- Sellado de fracturas en cemento

# A<sup>21</sup> | Modelación numérica

## Modelos a escala regional y local

- Flujo de agua subterránea y transporte multiespecie
- **Modelos descriptivos**
- **Paleomodelos**
- Calibración automática (determinista y estocástica)
- Análisis de incertidumbre
- Medios fracturados
- **Escalado de parámetros hidráulicos**
- **Dewatering**
- **Impacto de obras civiles**

## Interacción agua subterránea-superficial

- **Intrusión marina**
- Descarga submarina de agua dulce
- Descarga de nitratos a aguas superficiales
- Identificación de áreas de recarga y descarga
- Zona hiporréica
- Efectos del cambio climático (variaciones del nivel del mar)
- Modelos de Soil Vegetation Atmosphere Transfer (SVAT)

## Procesos acoplados

- **Flujo con densidad variable** (debido a Temperatura o salinidad)
- Islas pequeñas y atolones
- Modelos hidrotermales
- Modelos termohidromecánicos
- Almacenamiento geológico de gases (CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>)
- Impactos ambientales de inyección de CO<sub>2</sub>, temperatura, salmuera (transporte reactivo + modelos HTC)
- Sellado de fracturas

## Repositorios subterráneos

- Hidrogeología de campo próximo
- Modelos a escala de repositorio
- Modelación de líneas de flujo
- Migración de gases (H<sub>2</sub>)
- Interacción entre partes del repositorio
- **Flujo en coberturas multicapa**
- Impacto de terremotos en el agua subterránea
- Transporte de radionucleidos incluyendo retención y desintegración radiactiva

## Transporte reactivo

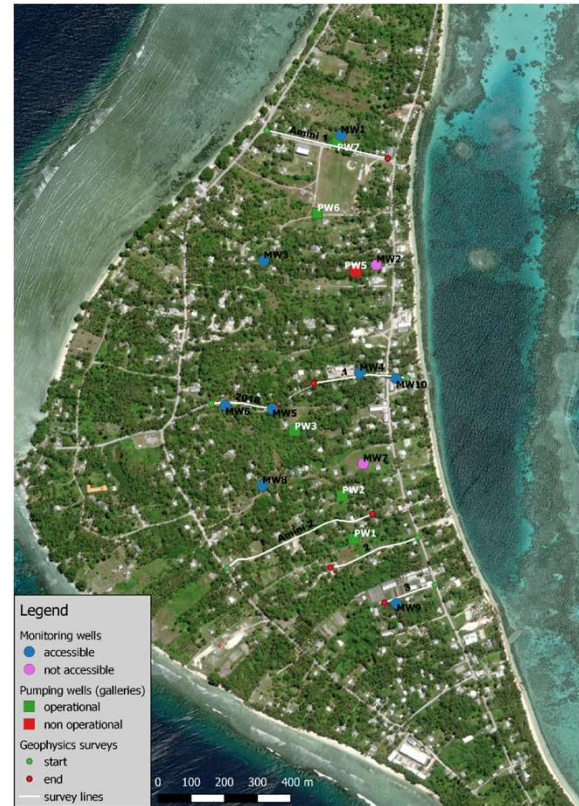
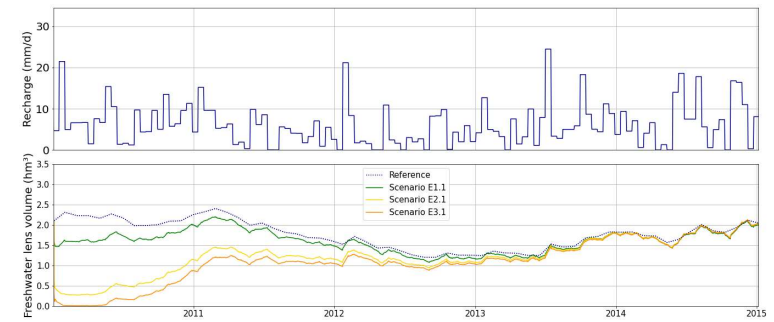
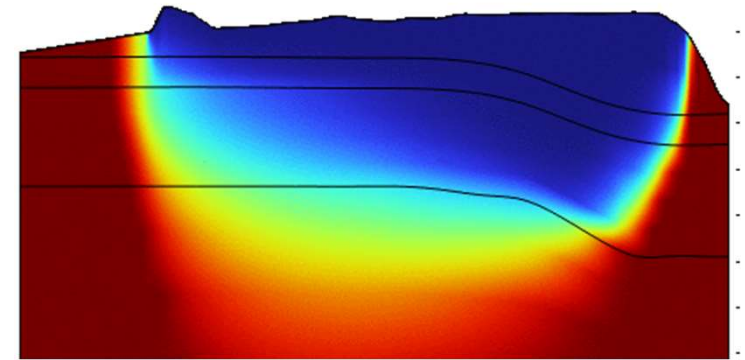
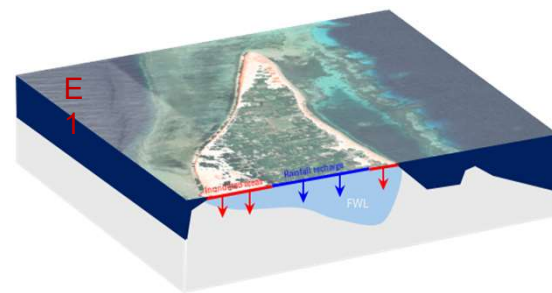
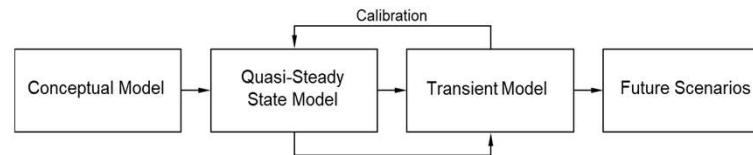
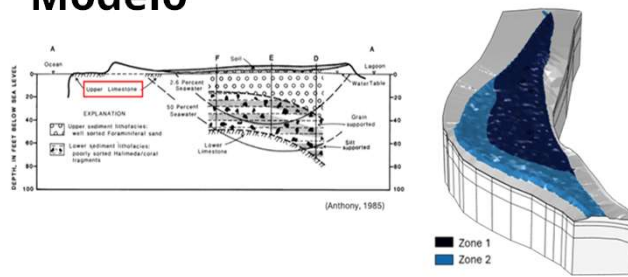
- En la zona saturada y no saturada
- En medios fracturados con diffusion en la matriz
- Procesos de acumulación y liberación de radionucleidos
- Mezcla y reacciones bajo lagos salados
- Movilización de metales
- Sellado de fracturas en cemento

Simulaciones hidrogeológicas mediante  
**Inteligencia Artificial (Machine Learning)**



**Ciente:**  
Pacific Community  
**Ubicación:**  
Majuro Atoll, Islas Marshalls  
**Fecha:**  
2023 - 2024

## Modelo



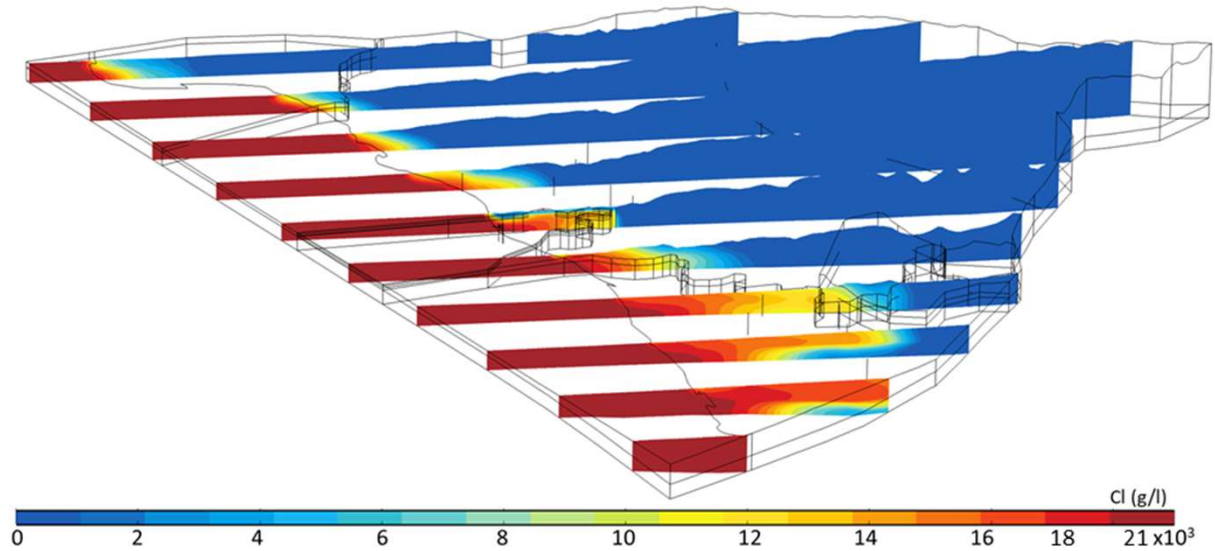
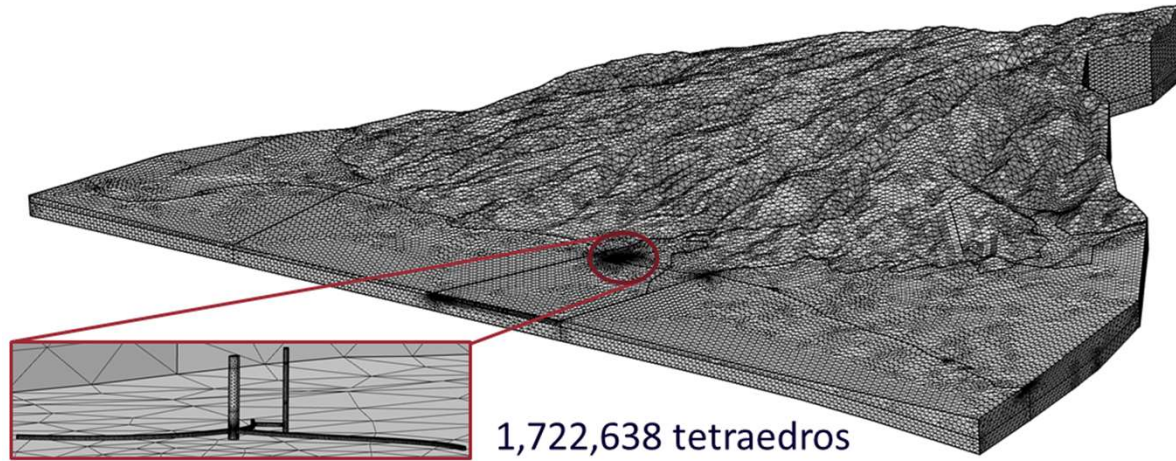


Pacific  
Community  
Communauté  
du Pacifique

**Cliente:**  
Pacific Community  
**Ubicación:**  
Majuro Atoll, Islas Marshalls  
**Fecha:**  
2023 - 2024



**Cliente:**  
Elmasa  
**Ubicación:**  
Maspalomas, Gran Canaria  
**Fecha:**  
2019





Pacific  
Community  
Communauté  
du Pacifique

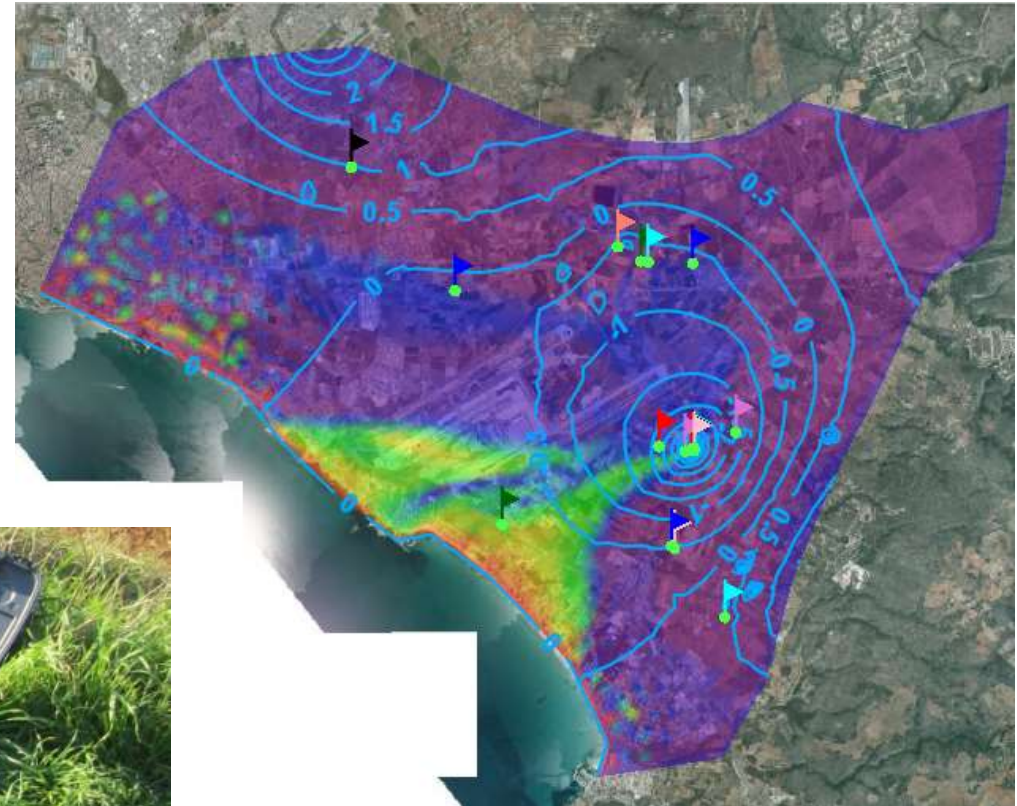
**Cliente:**  
Pacific Community  
**Ubicación:**  
Majuro Atoll, Islas Marshalls  
**Fecha:**  
2023 - 2024



**Cliente:**  
Elmasa  
**Ubicación:**  
Maspalomas, Gran Canaria  
**Fecha:**  
2019



**Cliente:**  
EMAYA  
**Ubicación:**  
Palma de Mallorca, España  
**Fecha:**  
2019 - 2020





A<sup>21</sup>



**Cliente:**  
Pacific Community  
**Ubicación:**  
Majuro Atoll, Islas Marshalls  
**Fecha:**  
2023 - 2024

A<sup>21</sup>



**Cliente:**  
Elmasa  
**Ubicación:**  
Maspalomas, Gran Canaria  
**Fecha:**  
2019

A<sup>21</sup>



**Cliente:**  
EMAYA  
**Ubicación:**  
Palma de Mallorca, España  
**Fecha:**  
2019 - 2020

A<sup>21</sup>



**Cliente:**  
IGME-CSIC  
**Ubicación:**  
Mar Menor, Murcia, Spain  
**Fecha:**  
2022 - 2023



# Intrusión marina

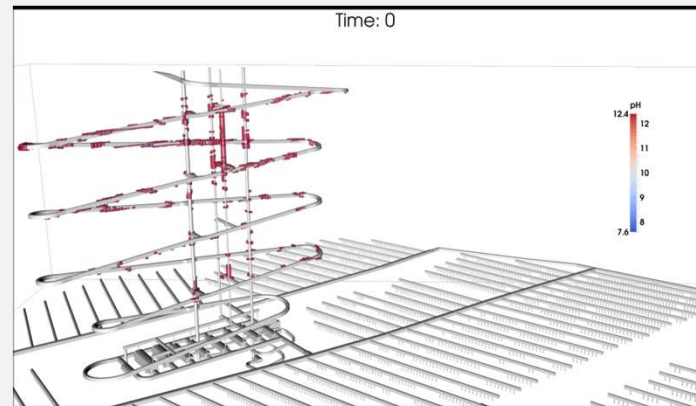
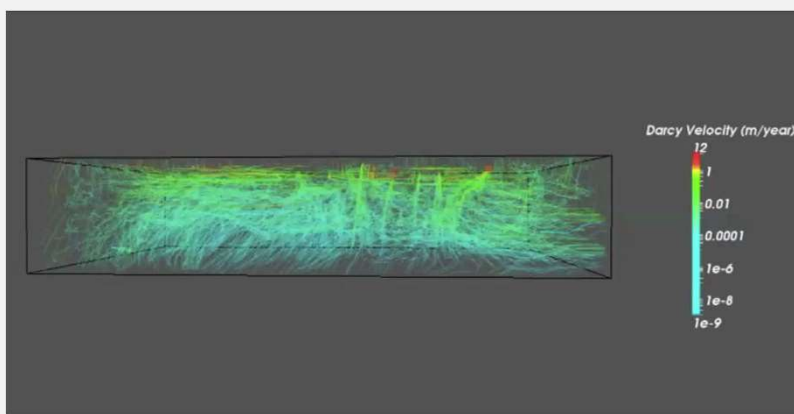
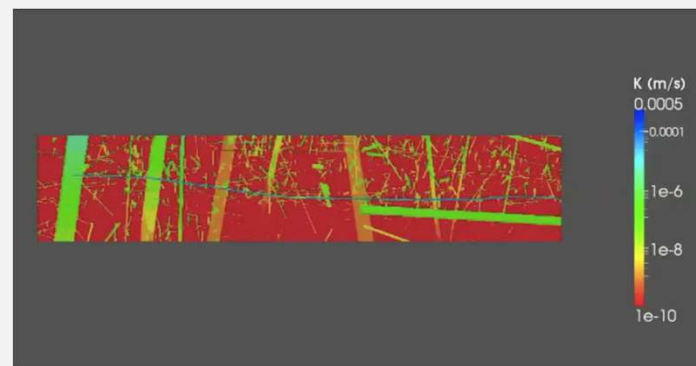
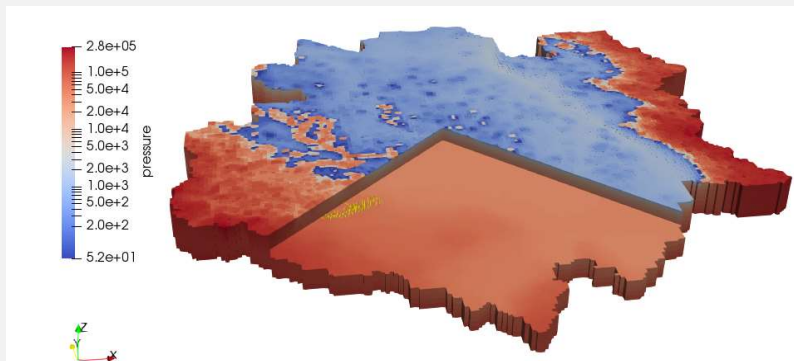
Demarcación hidrográfica	Total MASb costeras	Sin intrusión marina	Con intrusión marina local	Con intrusión marina zonal	Con intrusión marina general
Norte	10	10	0	0	0
Guadiana	1	0	0	1	0
Guadalquivir	5	2	0	2	1
Sur	19	9	4	4	2
Segura	6	2	2	1	1
Júcar	10	0	1	7	2
Ebro	1	0	0	1	0
Cataluña	13	2	4	1	6
Baleares	23	14	0	5	4
Canarias	7	0	0	7	0
Total	95	39	11	29	16

**Tabla 1.** Número de masas de agua subterránea (MASb) costeras en cada demarcación hidrográfica y su estado respecto a la intrusión marina en el entorno de 2010 (López-Geta y Fernández Ruiz, 2012).

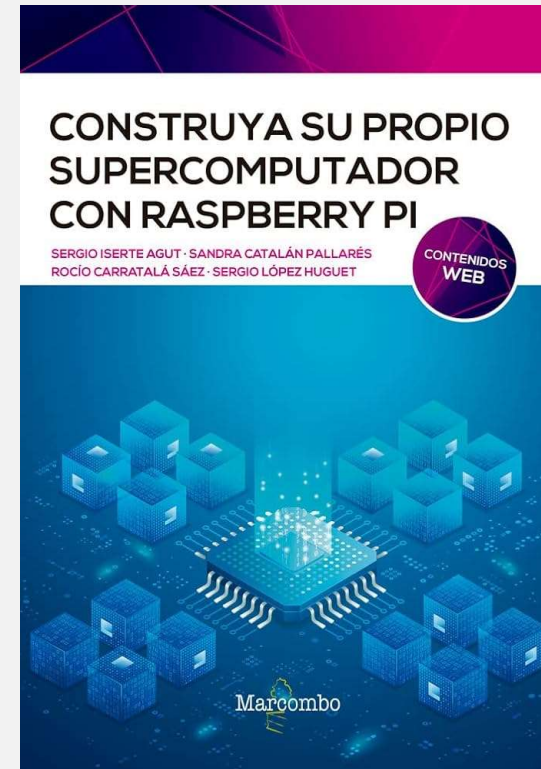
60%  
(67%)

17%  
(21%)

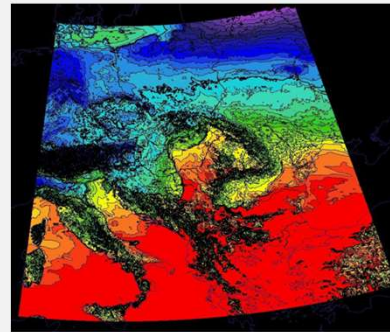
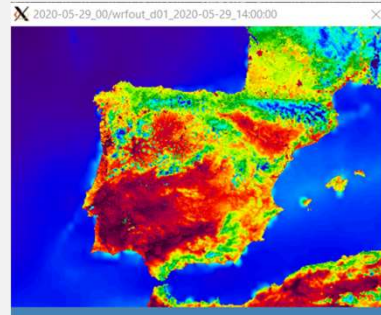
# Modelos a gran escala



## Modelos a gran escala

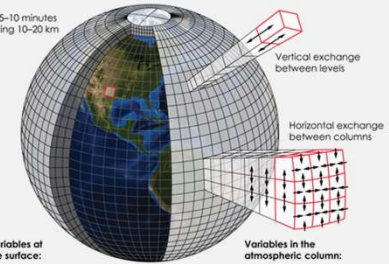


# ¿Podríamos hacer un modelo numérico hidrogeológico de toda España?



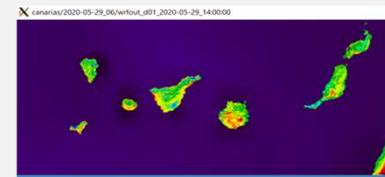
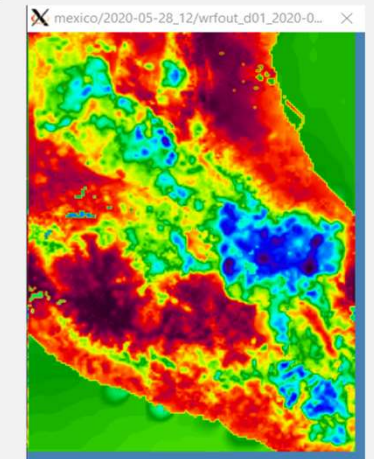
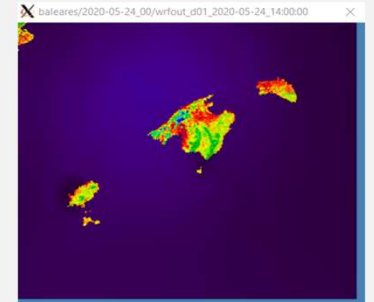
## Weather forecast modeling

Time step 5-10 minutes  
Grid spacing 10-20 km



Variables at the surface:  
Temperature  
Humidity  
Pressure  
Moisture fluxes  
Heat fluxes  
Radiation fluxes

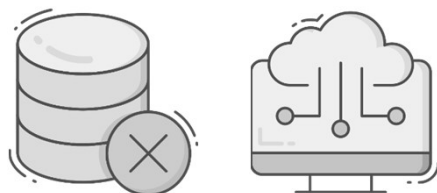
Variables in the atmospheric column:  
Wind vectors  
Humidity  
Clouds  
Temperature  
Height  
Precipitation  
Aerosols



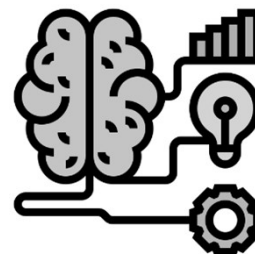
## Inteligencia artificial (machine learning)



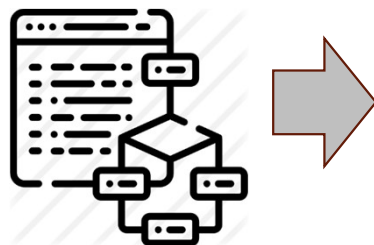
Las máquinas no aprenden (algunos humanos sí)



Los avances tecnológicos permiten obtener enormes cantidades de datos y procesarlos rápidamente



El “machine learning” es una rama de las ciencias de la computación que se basa en herramientas algorítmicas avanzadas



Un algoritmo es un conjunto ordenado y finito de operaciones matemáticas



Los algoritmos se pueden entrenar con bases de datos

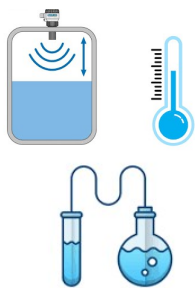


Al algoritmo entrenado lo llamamos modelo, y lo usamos para predecir

## Inteligencia artificial (machine learning)



Es la solución que optimiza la gestión del agua mediante el establecimiento de **sistemas de alerta temprana** basados en algoritmos de aprendizaje automático (Machine Learning)\*.



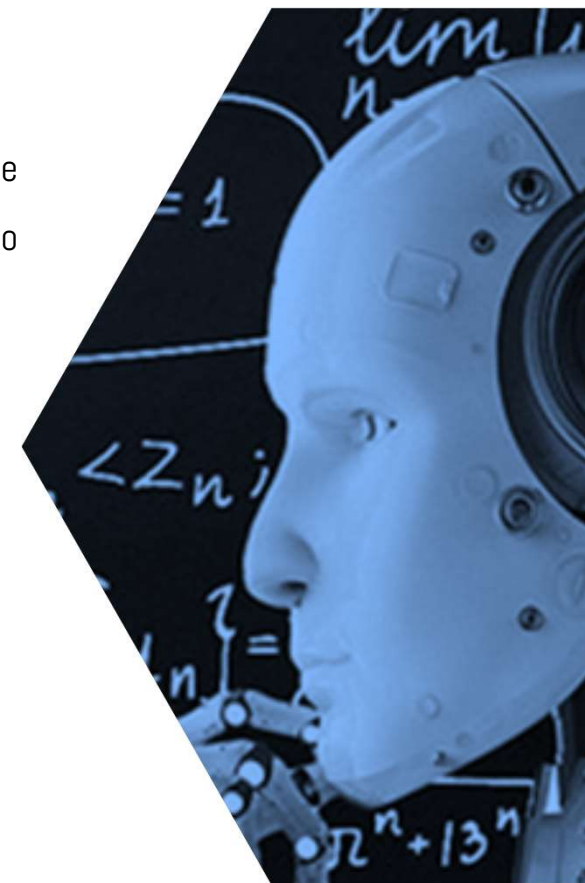
bases de datos



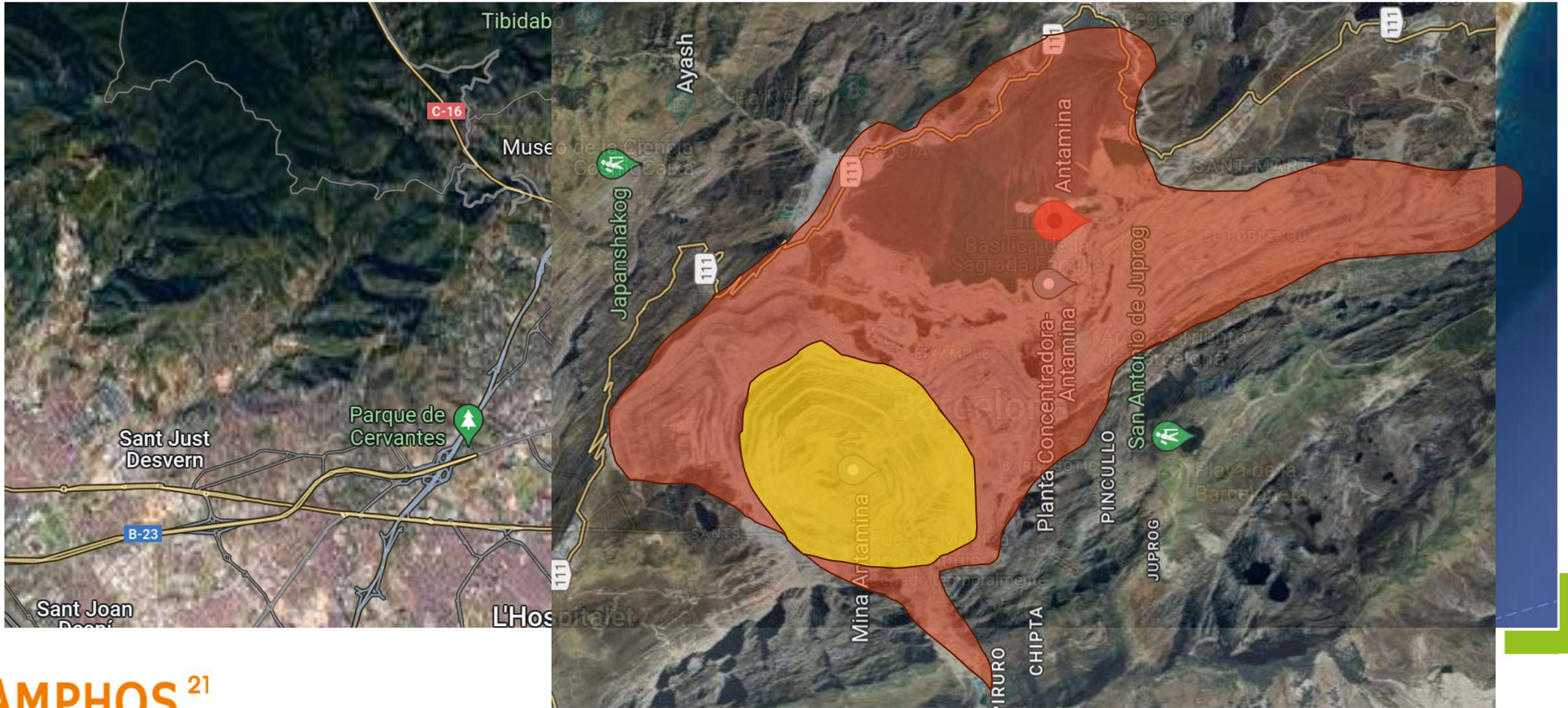
algoritmos predictivos



alerta y gestión

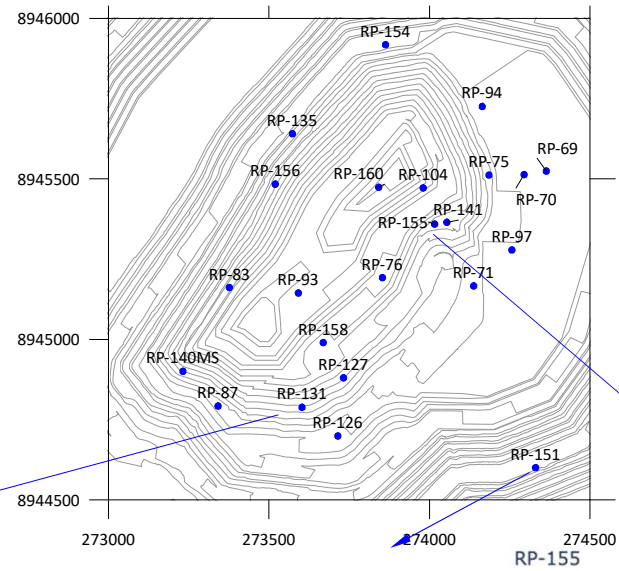


# Inteligencia artificial (machine learning)



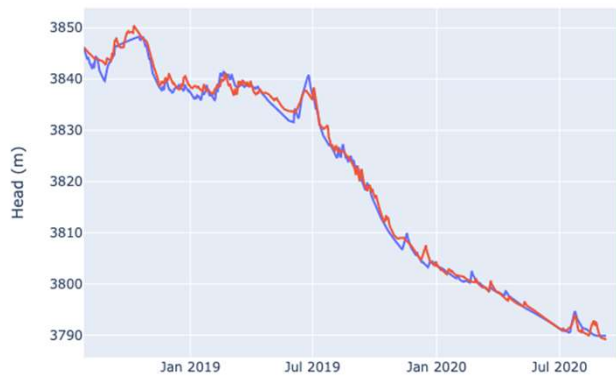


# Inteligencia artificial (machine learning)

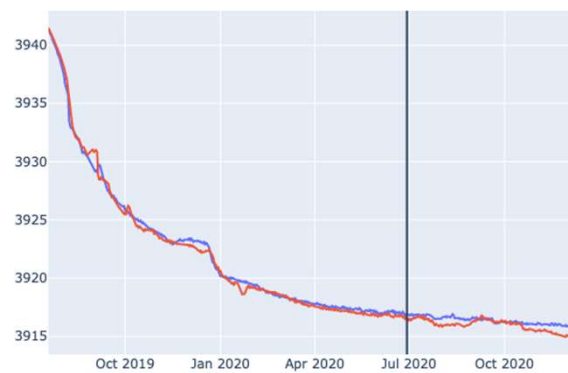


	Mean Absolute Error (m)
Training	0.14
Testing	0.46

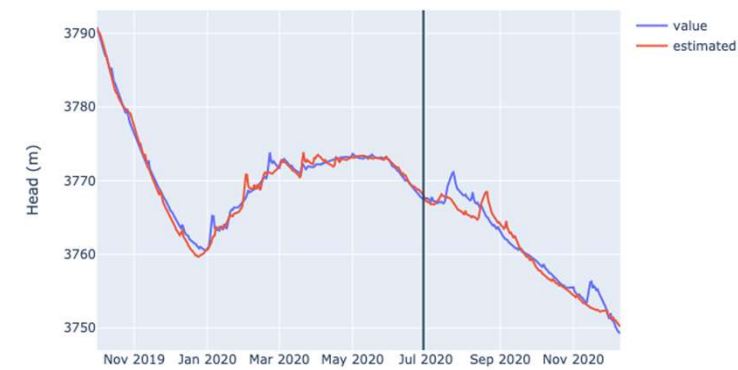
RP-131



RP-151



RP-155

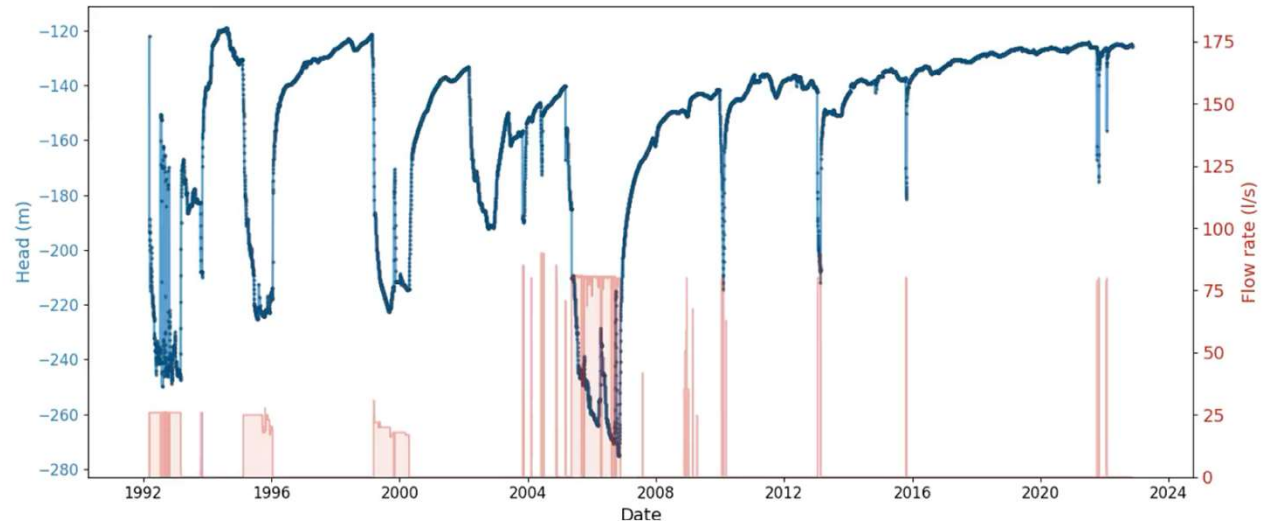


# Video killed the radio star?

Bombes en campo de pozos



Datos históricos

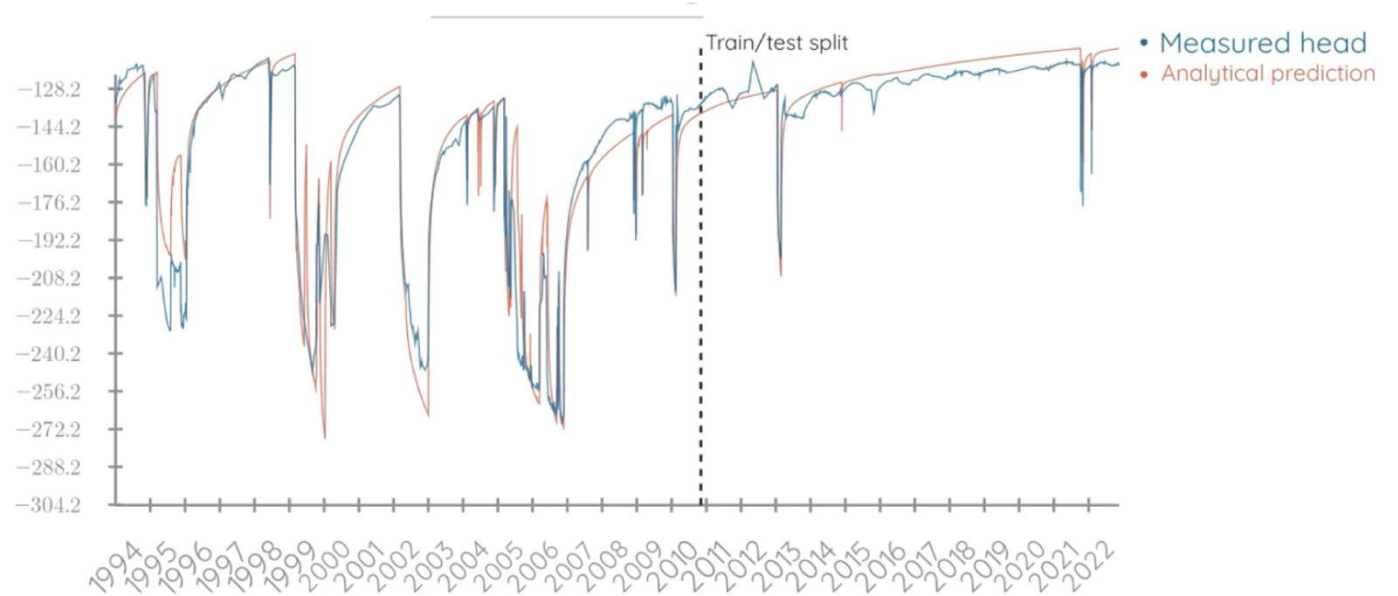


# Video killed the radio star?

## Bombes en campo de pozos



## Datos históricos



## Solución analítica

$$h(\mathbf{x}, t) = \sum_{j=1}^N \int_0^t dt' \frac{\exp \left[ -\frac{(\mathbf{x} - \mathbf{x}_j)^2}{4 \frac{T}{S} (t - t')} \right]}{4\pi T (t - t')} Q_j(t')$$

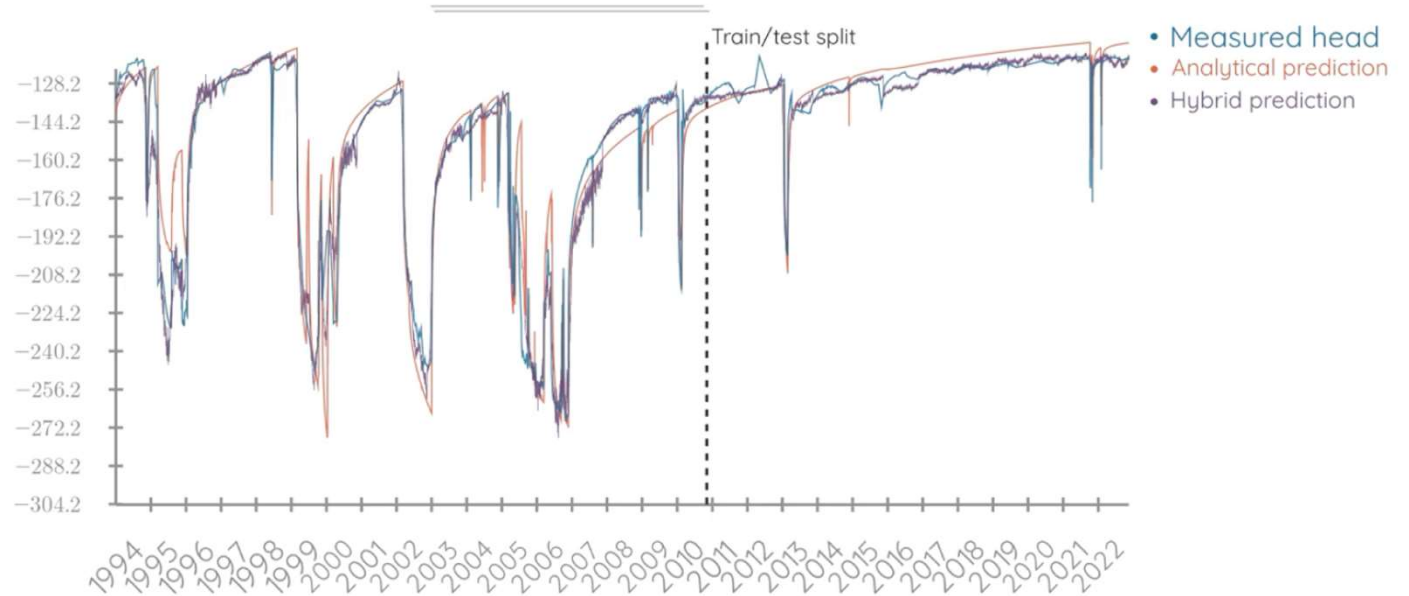


# Video killed the radio star?

Bombes en campo de pozos

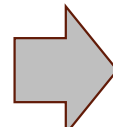


Datos históricos



Solución analítica

$$h(\mathbf{x}, t) = \sum_{j=1}^N \int_0^t dt' \frac{\exp\left[-\frac{(\mathbf{x}-\mathbf{x}_j)^2}{4\frac{T}{S}(t-t')}\right]}{4\pi T(t-t')} Q_j(t')$$

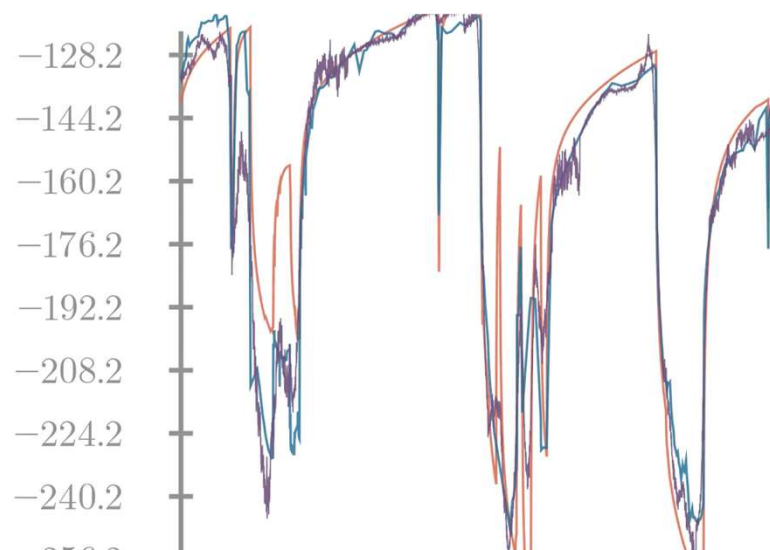


Modelo híbrido (con ML)



# Video killed the radio star?

## Bombes en campo de pozos

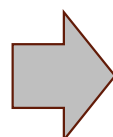


	Analytical Model	Hybrid Model (A + ML)
well_0	5.01 m	2.45 m
well_1	3.17 m	2.24 m
well_2	3.16 m	2.05 m
well_3	2.64 m	2.43 m
well_4	4.09 m	3.63 m
well_5	6.06 m	2.54 m
well_6	3.56 m	3.66 m
well_7	6.03 m	4.16 m
well_8	3.69 m	2.94 m

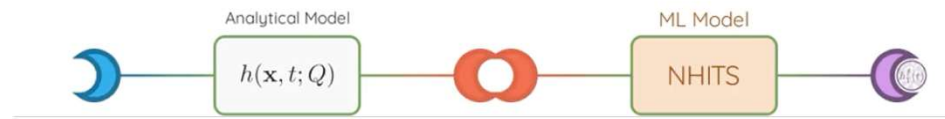
1.43x improvement

Solución analítica

$$h(\mathbf{x}, t) = \sum_{j=1}^N \int_0^t dt' \frac{\exp \left[ -\frac{(\mathbf{x}-\mathbf{x}_j)^2}{4T(t-t')} \right]}{4\pi T(t-t')} Q_j(t')$$




Modelo híbrido (con ML)



**How to cite:** Iraola, A., Pool, M., Nardi, A., Vilanova, E., Molinero, J., and Dentz, M.: A hybrid analytical and machine learning framework for groundwater resources management, EGU General Assembly 2024, Vienna, Austria, 14–19 Apr 2024, EGU24-18672, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu24-18672>, 2024.

## A modo de conclusión



Los modelos numéricos constituyen herramientas de gestión imprescindibles para la gestión de los recursos hídricos subterráneos

La tecnología actual permite desarrollar modelos numéricos sofisticados, incluyendo procesos acoplados no lineales y/o escalas espaciotemporales muy grandes

El video no mató a la estrella radiofónica, y la inteligencia artificial no matará al conocimiento hidrogeológico (modelos numéricos convencionales). Lo que si hará (ya lo hace) será acelerarlos hasta conseguir la posibilidad de predicción en tiempo real.



# AMPHOS<sup>21</sup>

an **RSK** company

## ESPAÑA

C. Venezuela, 103, 2ª planta  
08019 BARCELONA  
Tel.: +34 93 583 05 00

C. Raquel Meller, 7, plta. baja.  
Ciudad Lineal, 28027 MADRID  
Tel.: +34 911 235 562

## CHILE

Avda. Nueva Tajamar, 481  
WTC - Torre Sur - Of 1005  
Las Condes, SANTIAGO  
Tel.: +562 2 7991630

## PERÚ

Av. Primavera 781-785, Int. 201,  
San Borja, 15037 LIMA  
Tel.: +51 1 592 1275

City Center, Of. 1605  
Urb. Teresa de Jesús  
AREQUIPA 04014

[www.amphos21.com](http://www.amphos21.com)

[www.rskgroup.com](http://www.rskgroup.com)

