

# CONEXIÓN AGUA



Talleres



Financiado por  
la Unión Europea  
NextGenerationEU



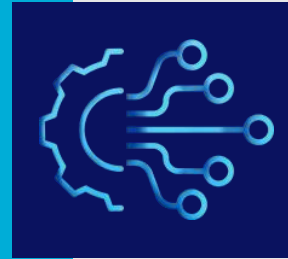
GOBIERNO  
DE ESPAÑA

MINISTERIO  
PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA  
Y EL RETO DEMOGRÁFICO



Plan de  
Recuperación,  
Transformación  
y Resiliencia

# Índice



1. Información general de la entidad y de la ayuda concedida
2. Soluciones tecnológicas adoptadas
3. Casos reales del proyecto y muestra de resultados

1. Información general  
de la  
entidad y de la  
ayuda concedida

PERTE  
Digitalización del  
uso urbano del  
agua en la Ciudad  
de Castellón de la  
Plana

# SINÁRGICA



Ajuntament de  
Castelló

Facsa   
ciclo integral del agua

## Digitalización del uso urbano del agua en la Ciudad de Castellón

Importe proyecto

**7.412.394,81 €**

Subvención

**80,8%**

Actuaciones

**19**

Plataforma de digitalización transversal para la ciudad de Castellón:

- Gestión de activos, sensórica
- Cuadros de mando
- Algoritmos de predicción
- Interoperable



# Digitalización del uso urbano del agua en la Ciudad de Castellón

El proyecto contempla **19 actuaciones** en el ciclo integral del agua.



Captación



Preservar el acuífero



Abastecimiento y  
Distribución



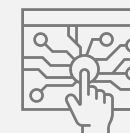
Reducir pérdidas y  
mejorar la  
monitorización



Saneamiento y  
Depuración



Prevenir  
inundaciones y  
vertidos, PIGSS y  
mejorar la  
monitorización



Digitalización



Transparencia y  
Sostenibilidad  
hídrica y ambiental



Captura

*Sensores en pozos y acuíferos: nivel piezométrico, cloruros, nitratos, sulfatos, turbidez, pH, conductividad*

*Sensores en puntos de red y de consumo: cloro residual, niveles, turbidez, pH, conductividad, caudales, telelectura, presión*

*Sensores en alivios, en puntos de vertido y en la EDAR: caudal, nivel, alivio, lluvia, calidad (turbidez, cloro, sólidos, E. coli, DBO)*

*Sensores en puntos de riego: turbidez, cloro residual, caudal*

*Integración continua con los sistemas de gestión, de control y de tiempo real (SCADA)*

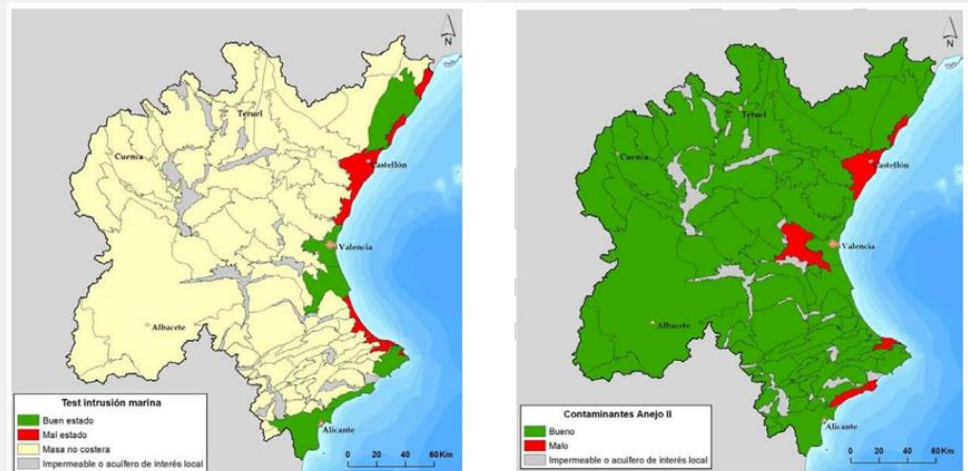
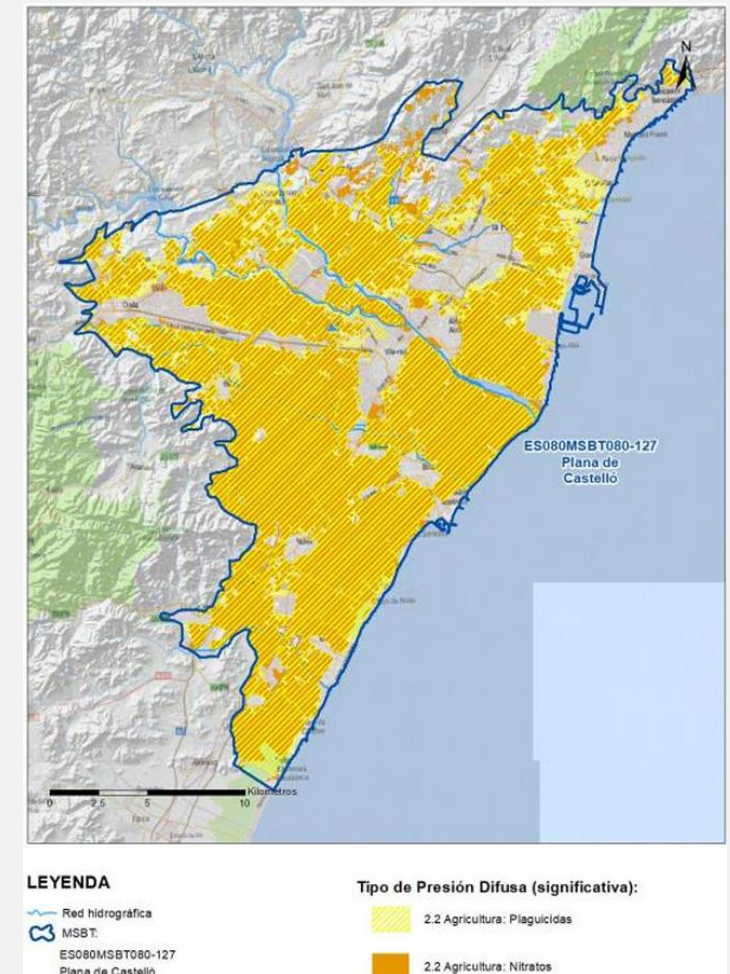
Transmisión

Despliegue y ampliación de *redes de comunicación IP, OPC-UA y LoRaWAN*

# Digitalización del uso urbano del agua en la Ciudad de Castellón

- La **provincia de Castellón** presenta una característica distintiva: casi la totalidad del abastecimiento urbano proviene de aguas subterráneas.
- Dependencia de los acuíferos.
- La **ciudad de Castellón de la Plana** se abastece 100% mediante agua subterránea. Caso singular en España.

- La Masa de Agua Subterránea Plana de Castellón se encuentra incluida dentro de las **Zonas Vulnerables a la contaminación agrícola** por la presencia de **nitratos y pesticidas**. Además, se ha producido un **descenso piezométrico** y alteraciones en la dirección del flujo con **intrusión salina** en la masa de agua dulce.
- El agua destinada a consumo se capta del subnivel profundo que tiene buena calidad.



## 2. Soluciones tecnológicas adoptadas

- Modelo del acuífero de la Plana de Castellón

# OBJETIVOS DEL ESTUDIO DEL ACUÍFERO

- Necesidad de **controlar la masa de agua subterránea** que abastece a Castellón.
- Disponer de una **herramienta para realizar simulaciones** para poder determinar diversas situaciones.
- Mejorar la **monitorización de la calidad y piezometría** del acuífero.
- Calcular los **perímetros de protección** de los pozos que abastecen la ciudad.

# PLAN DE TRABAJO

## Captación

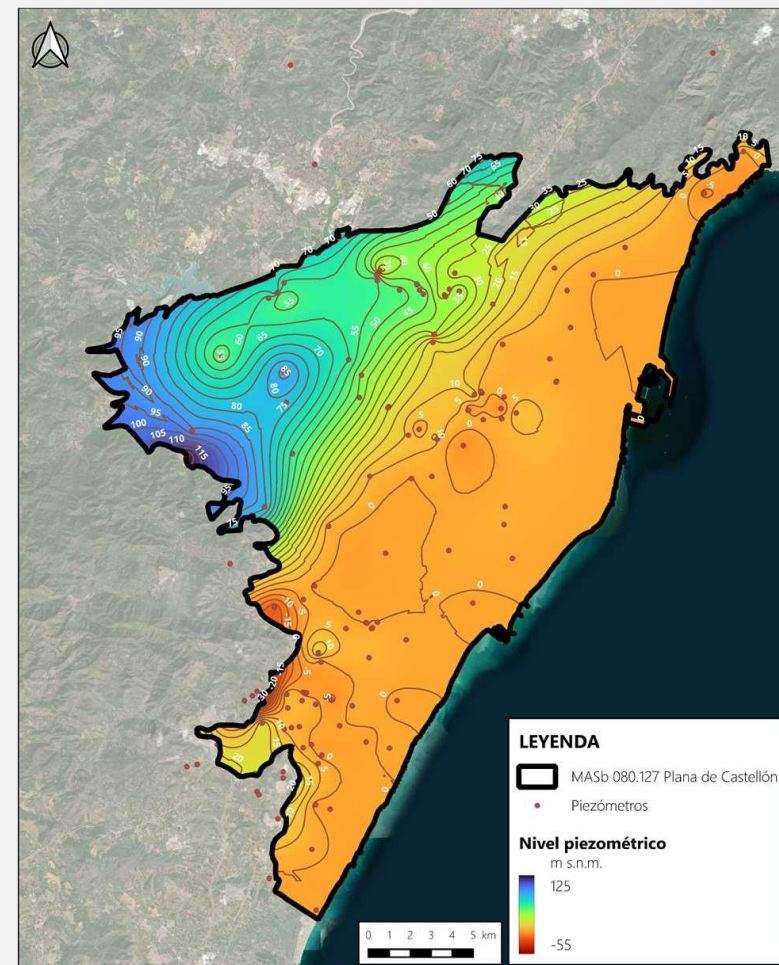


- Desarrollo de un **modelo conceptual**: piezometría, cloruros, balance hídrico
- **Análisis de vulnerabilidad** a la contaminación del acuífero
- Desarrollo de un **modelo geológico** del acuífero con la definición de UH
- Desarrollo de un **modelo numérico de flujo y transporte**
- Cálculo de los **perímetros de protección**

# Modelo conceptual: piezometría

- Se dispone de información de niveles de **127 puntos**, proporcionados por FACSA y la CHJ.
- Rango temporal cubierto **desde 1981 hasta 2025**.
- La condición inicial de niveles se ha calculado para 2010, fecha del pseudoestacionario considerado para la modelación.
- En términos generales, las direcciones de flujo son en sentido NW-SE, de montaña hacia mar.
- Se observan conos de depresión marcados en el sector suroeste y en menor grado en el sector central y noreste.
- En el sector suroeste de la MASb se puede interpretar un flujo del mar hacia el interior.

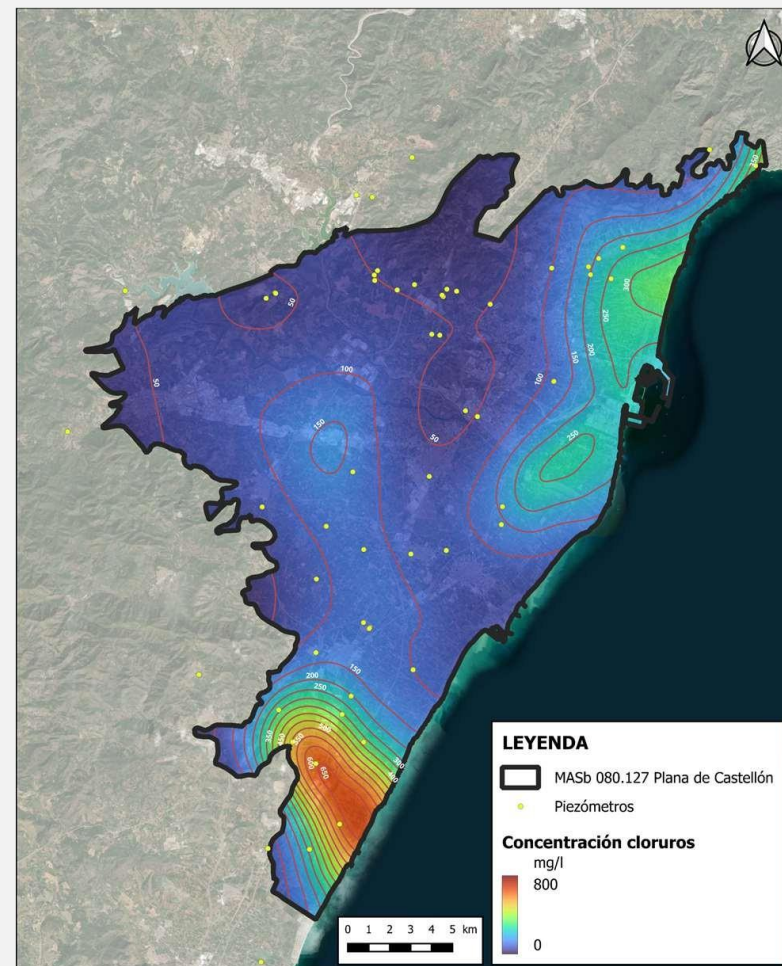
Condición inicial de piezometría, 2010



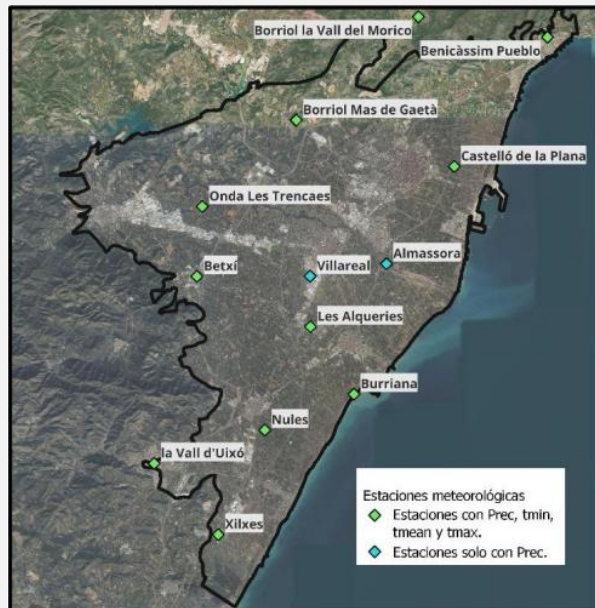
# Modelo conceptual: Hidroquímica de cloruros

- Se dispone de información de contenido de cloruros en aguas subterráneas en **149 puntos**, proporcionados por FACSA y la CHJ.
- Rango temporal cubierto **desde 1977 hasta 2025**.
- La condición inicial de cloruros se ha calculado para 2010, fecha del pseudoestacionario considerado para la modelación.
- Se observa que, en el sector suroeste, donde se ha identificado un flujo intrusivo desde el mar, hay un aumento de la concentración de cloruros.
- En menor grado, se observan otras dos anomalías de cloruros en el sector de la MASb.

Condición inicial de concentración de cloruros, 2010

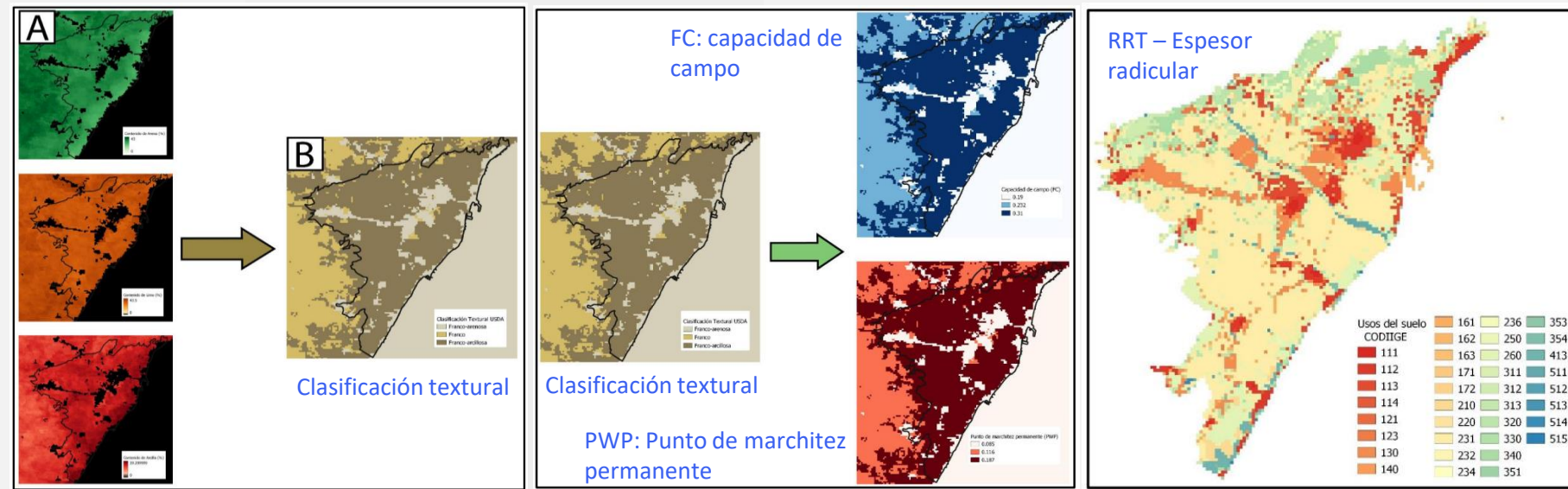


# Modelo conceptual: Balance hídrico del acuífero de la Plana



13 estaciones meteorológicas

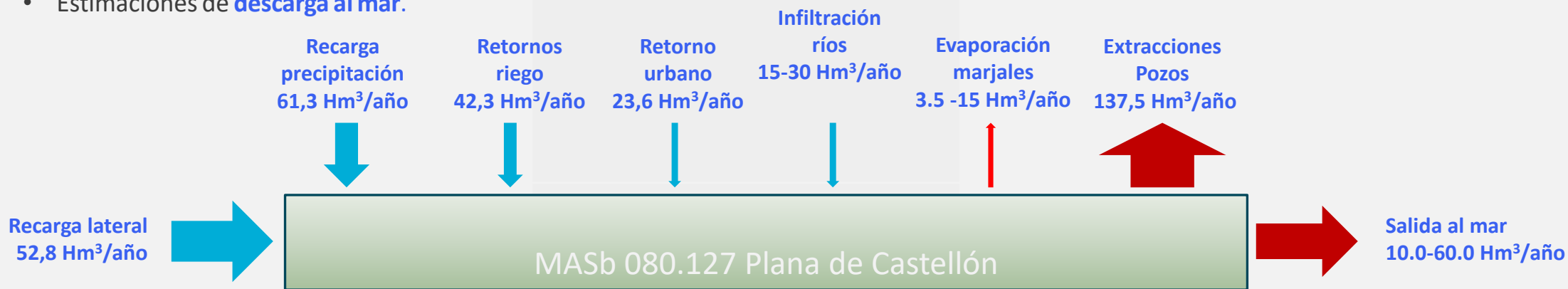
- Cuantificación de **entradas y salidas** de agua del acuífero para poder hacer un balance hídrico y estimar recargas.
- Para definir las entradas, se toman **datos climáticos, edafológicos y usos de suelo**. Para las salidas se consideran datos de **bombes** de la CHJ.
- Se han calculado parámetros como la evapotranspiración o la reserva de agua en el suelo (SWR).



# Modelo conceptual: Balance hídrico del acuífero de la Plana

Los términos del balance hídrico se han calculado mediante :

- Balance de agua en el suelo mediante software propio de iAQUANT, **WATERPYBAL**.
- Cálculos de **retorno por riego** a partir de registros de volúmenes extraídos de aguas superficiales y subterráneas para riego.
- Cálculos de **retorno urbano** a partir de registros de aguas abastecidas y de pérdidas.
- Cálculos de **entradas laterales** mediante estimaciones de flujo pasante.
- Estimaciones de **evaporación** en lamina libre para las zonas de los marjales.
- Estimaciones de **descarga al mar**.



BALANCE (Hm <sup>3</sup> /a)					
ENTRADAS					
Recarga precipitación	Retorno riego	Retorno urbano	Infiltración ríos	Recarga lateral	195 - 210
61.3	42.3	23.6	15 - 30	52.8	
SALIDAS					
Extracciones pozos		Evaporación en marjales		Salidas al mar	
137.51		3.5 - 15.0		10.0-60	

# Modelo conceptual de funcionamiento hidrogeológico

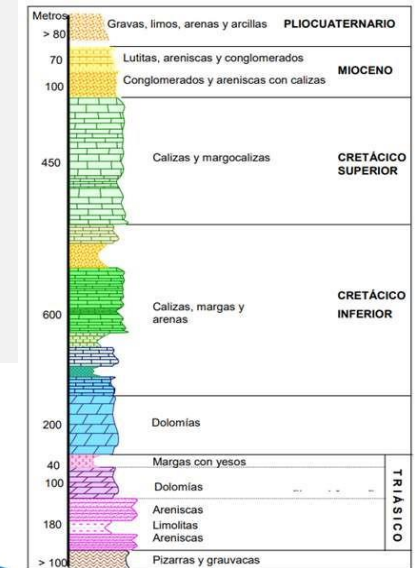
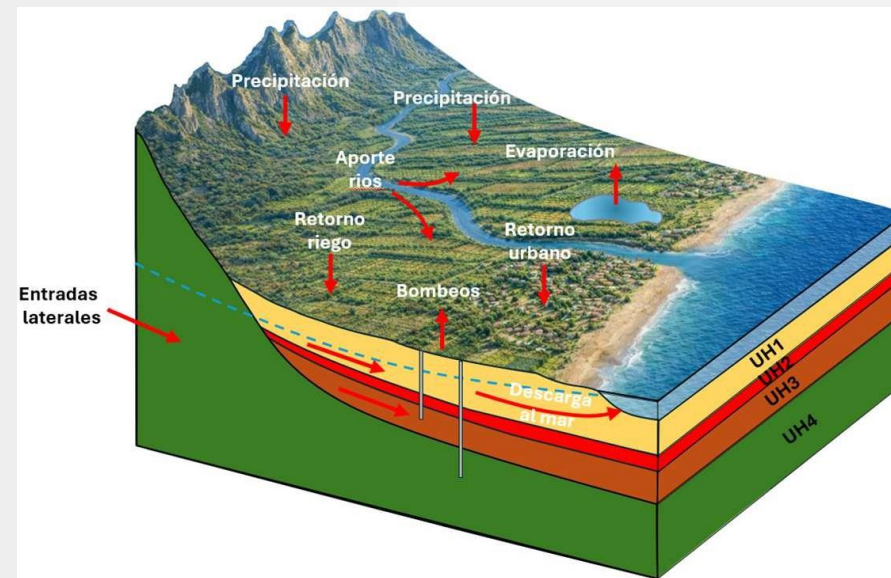
## MASb con cuatro UH diferenciadas:

- UH1; acuífero superficial detrítico cuaternario
- UH2; acuitardo intermedio detrítico cuaternario
- UH3; acuífero profundo detrítico pliocuaternario
- UH4; acuífero profundo carbonatado mesozoico

**Entradas al acuífero** por precipitación, entradas laterales profundas, retornos de riego y urbanos y aporte de ríos.

**Salidas del acuífero** por descarga al mar, captaciones de aguas subterráneas y, en menor grado, evaporación desde marjales.

En sectores litorales se detecta **intrusión salina**.



# Análisis de vulnerabilidad: DRASTIC

El **método DRASTIC**, es un método aditivo, en el que se evalúan y ponderan siete parámetros:

- **D** - **Profundidad** del agua; profundidad a la que se encuentra el nivel freático.
- **R** - **Recarga**; cantidad de agua que se infiltra y alimenta el acuífero.
- **A** - **Litología** del acuífero; características geológicas del acuífero que determinan su capacidad de almacenamiento y transmisión de agua.
- **S** - **Tipo de suelo**; propiedades del suelo que influyen en la infiltración y el movimiento del agua.
- **T** - **Topografía**; pendiente del terreno, que puede afectar el escurrimiento y la recarga.
- **I** - **Zona no saturada**; naturaleza de la zona entre la superficie topográfica y el nivel freático.
- **C** - **Conductividad hidráulica**; capacidad del acuífero para permitir el flujo de agua a través de él.

A celda o cada fracción de terreno contemplada se le asigna un valor para cada parámetro, ya sea cualitativo o cuantitativo, que va entre 1 y 10, de menor a mayor vulnerabilidad, y adicionalmente se aplica un factor de ponderación asignando un peso entre 1 y 5. El valor DRASTIC se obtiene de la expresión:

$$\text{Grado de vulnerabilidad} = D \cdot Dw + R \cdot Rw + A \cdot Aw + S \cdot Sw + T \cdot Tw + I \cdot Iw + C \cdot Cw$$

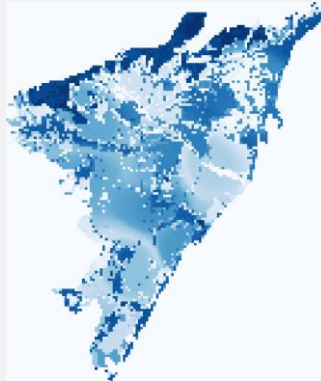
Valor DRASTIC	Grado vulnerabilidad
23-64	Muy bajo
64-105	Bajo
105-146	Moderado
146-187	Alto
187-230	Muy alto

# Análisis de vulnerabilidad: DRASTIC

Profundidad NP  
iAquant, 250x250



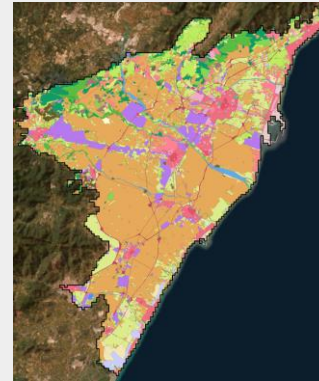
Calculo de recarga  
iAquant, 250x250



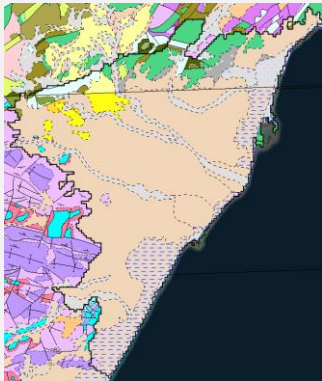
MDT IGN  
resolución 5m



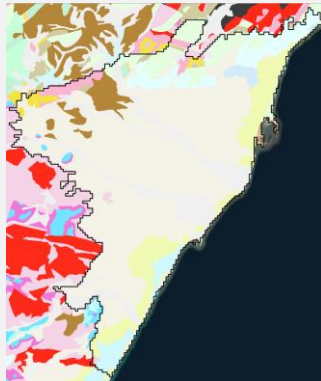
Usos del suelo  
1:200000



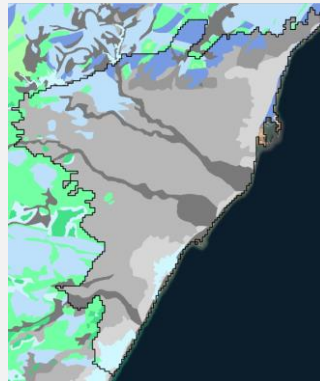
Geología IGME  
1:200000/1:50000



Litoestratigrafía IGME  
1:200000



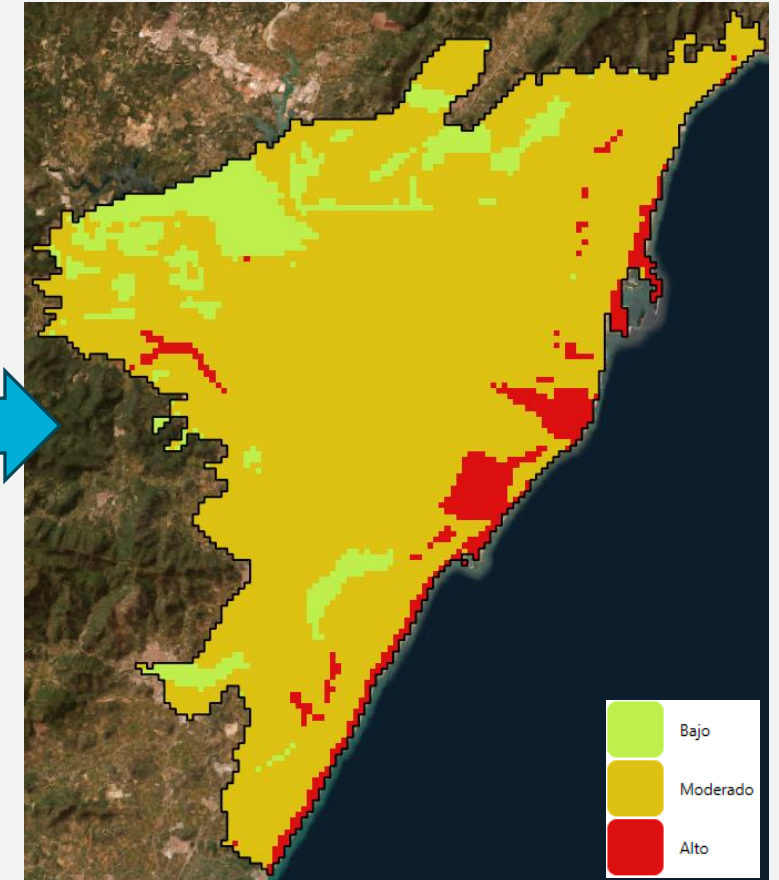
Permeabilidad  
IGME 1:200000



Hidrogeología  
IGME 1:200000

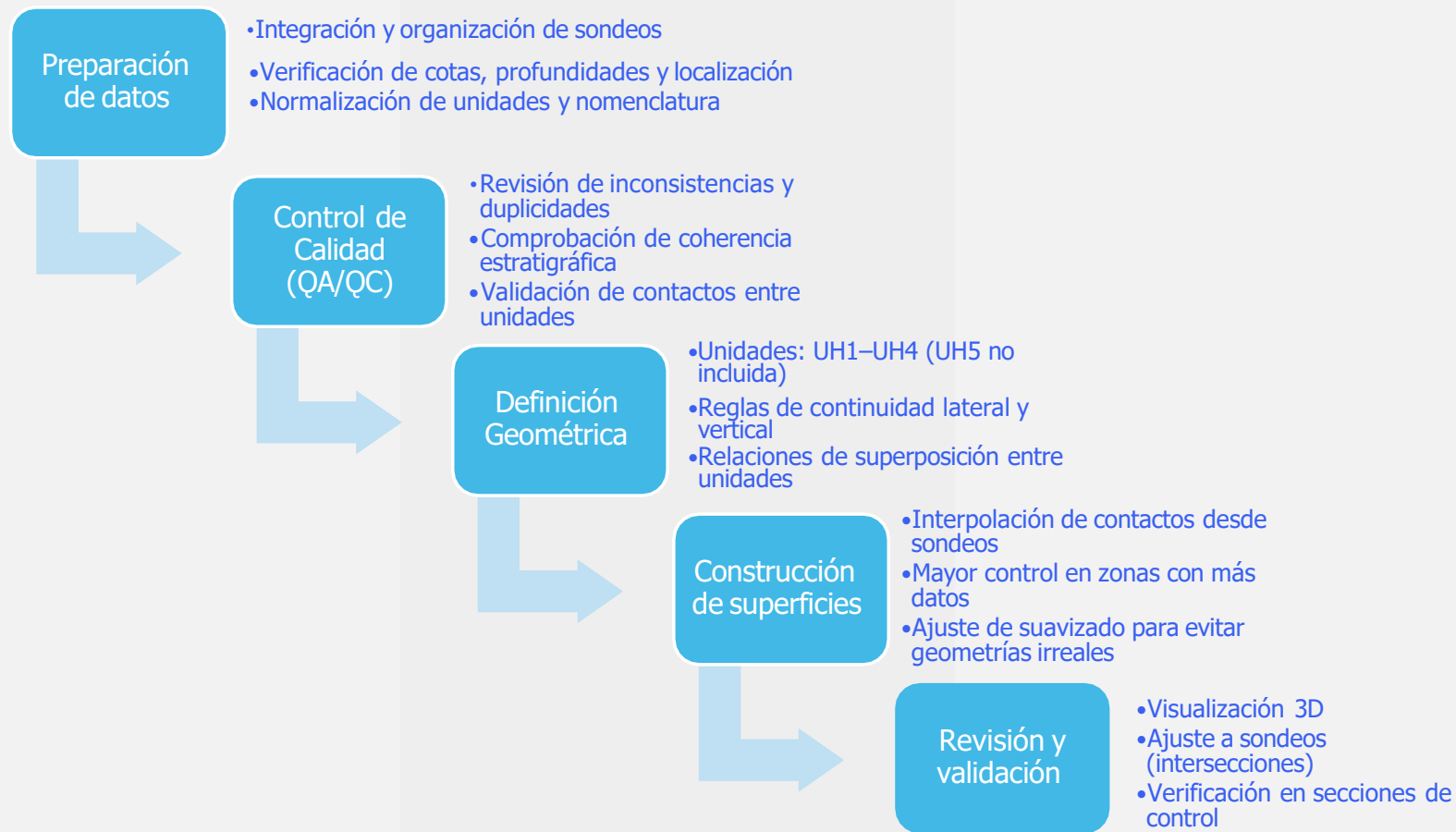


MAPA DE VULNERABILIDAD DRASTIC



# Modelo geológico

## Construcción del modelo hidrogeológico



# Modelo geológico

Topografía → Digital Elevation Model (5 m) → DEM05

QGIS

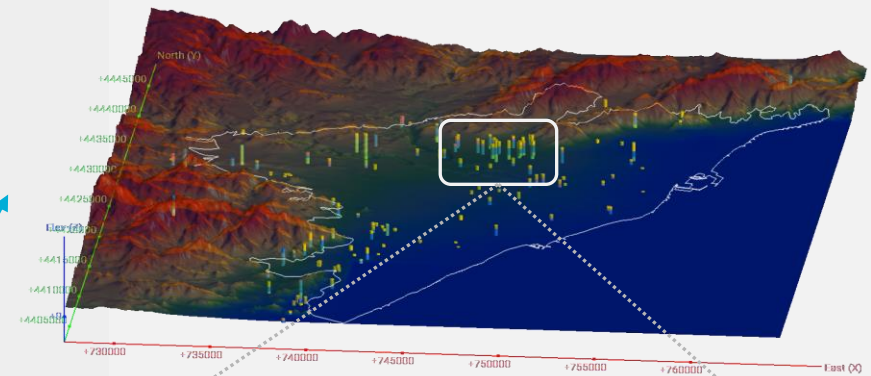
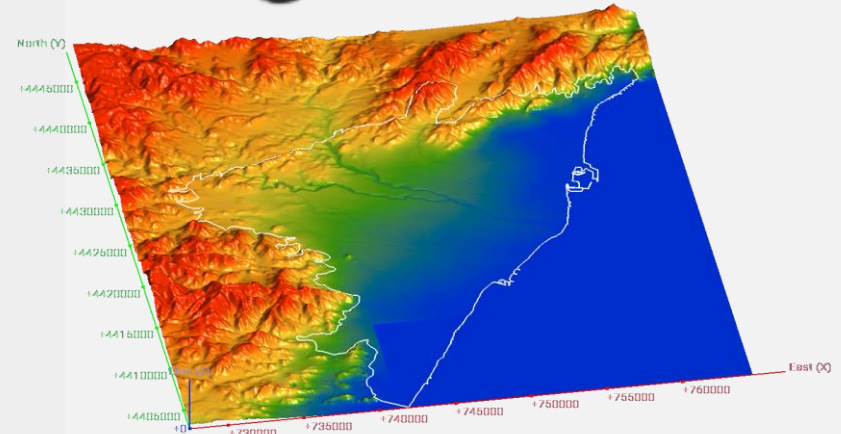
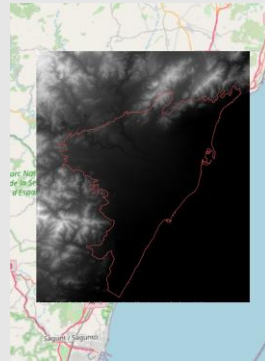
Confederación Hidrográfica del Júcar



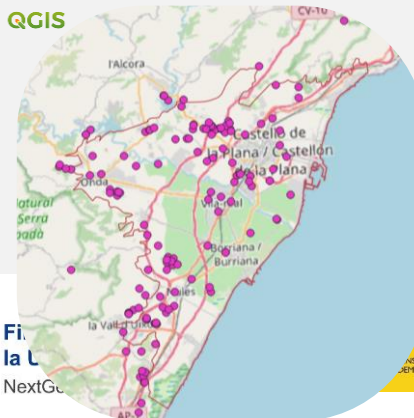
MAS Subterránea Plana de Castellón



Cuadrado de estudio

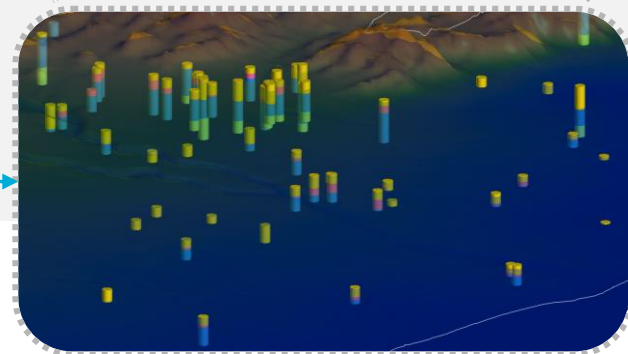


Litología → Testificaciones de ≈ 140 sondeos en la zona de estudio



ID	From	To	East	Age	Unit	ColorUH	MaxDepth
2196437	CENTENARIO	0	7	Conglomerados	UH1	3.5	3.5
2196437	CENTENARIO	10	10	Arcilla	UH1	2.4	2.4
2196437	CENTENARIO	38	41	Arena y grava	UH1	39.5	39.5
2196437	CENTENARIO	41	48	Conglomerado y arcilla	UH1	44.5	44.5
2196437	CENTENARIO	48	65	Grava y arena	UH1	56.5	56.5
2196437	CENTENARIO	65	69	Arcilla	UH2	65.5	65.5
2196443	CENTENARIO 2	0	1	Conglomerado	UH1	0.5	0.5
2196443	CENTENARIO 2	1	5	Grava y arcilla	UH1	3	3
2196443	CENTENARIO 2	5	6	Conglomerado	UH1	5.5	5.5
2196443	CENTENARIO 2	6	18	Grava y arcilla	UH1	12	12
2196443	CENTENARIO 2	18	29	Grava suelta	UH1	23.5	23.5
2196443	CENTENARIO 2	29	35.4	Arcilla y arena	UH1	30.2	30.2
2196443	CENTENARIO 2	35.4	45	Gravilla y arena	UH1	40.2	40.2
2196443	CENTENARIO 2	45	46	Arcilla y arena	UH1	45.5	45.5
2196443	CENTENARIO 2	46	58	Arcilla	UH2	55.5	55.5
2196443	CENTENARIO 2	58	58	Arcilla y arcilla	UH2	56.5	56.5
2196443	CENTENARIO 2	58	59	Grava y gravilla	UH2	58.5	58.5
2196443	CENTENARIO 2	59	64	Arcilla	UH2	61.5	61.5
2196449	ABUNDANCIA 2	0	20	Materiales destruicos	UH1	19	19
2196449	ABUNDANCIA 2	20	45	Calizas grues	UH1	41.5	41.5
2196449	ABUNDANCIA 2	45	60	Materiales destruicos	UH1	50	50
2196449	ABUNDANCIA 2	60	70	Arenisca	UH1	67.5	67.5
2196455	AGUSTINOS	0	11	Arcilla	UH1	5.5	5.5
2196455	AGUSTINOS	11	25	Gravas y arenas	UH1	18	18
2196461	CASETA B	0	20	Tierra, Grava y arcilla.	UH1	13.5	13.5
2196461	CASETA B	20	35	Arena y arcilla.	UH1	27.5	27.5
2196461	CASETA B	35	35	Arena y arena.	UH1	32.5	32.5
2196461	CASETA B	35	49	Arena blanca.	UH1	42	42
2196461	CASETA B	49	58	Arcilla roja.	UH2	67.5	67.5
2196461	CASETA B	58	60	Arcilla.	UH2	61.5	61.5
2196461	CASETA B	60	70	Arcilla y arena.	UH2	67.5	67.5
2196461	CASETA B	70	113	Grava y arena.	UH3	90.5	90.5
2196461	CASETA B	113	127	Arcilla y arcilla.	UH3	136.5	136.5
2196461	CASETA B	127	127	Arcilla y arena.	UH3	123.5	123.5
2196461	CASETA B	127	138	Grava y arena.	UH3	126	126
2196461	CASETA B	138	160	Arcilla y arena.	UH3	159	159
2196461	CASETA B	160	160	Grava y arena.	UH3	163.5	163.5
2196461	CASETA B	160	177	Arenisca.	UH3	171	171
2196467	Coslet	0	5	Pedregal calizo	UH1	2.5	2.5

Definición de UHs





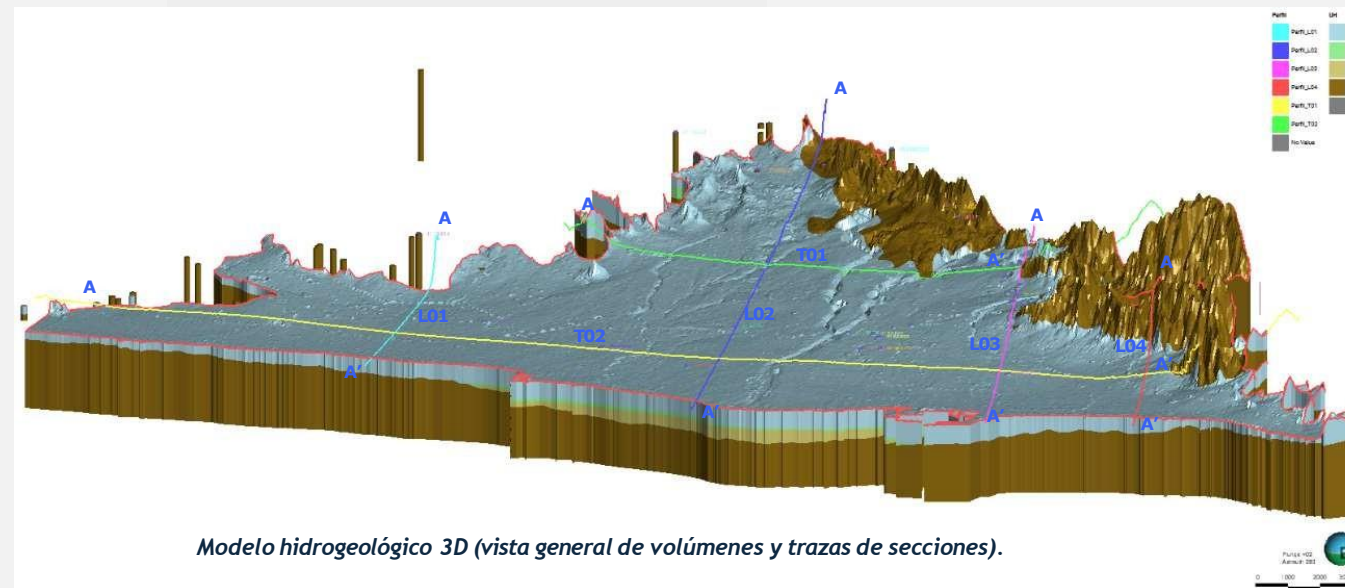
# Modelo geológico

## Modelo 3D resultante y secciones

El modelo 3D representa la disposición espacial de UH1-UH4, incluyendo su continuidad lateral y vertical y la geometría de los contactos principales.

Secciones generadas:

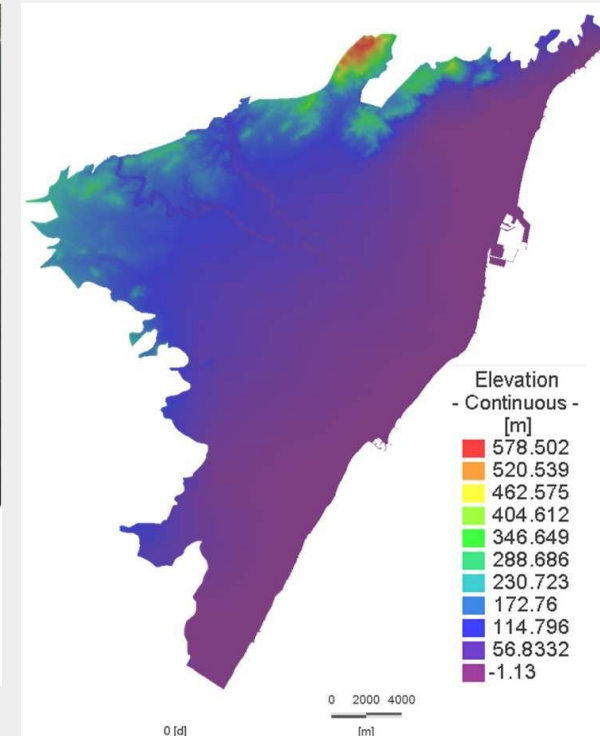
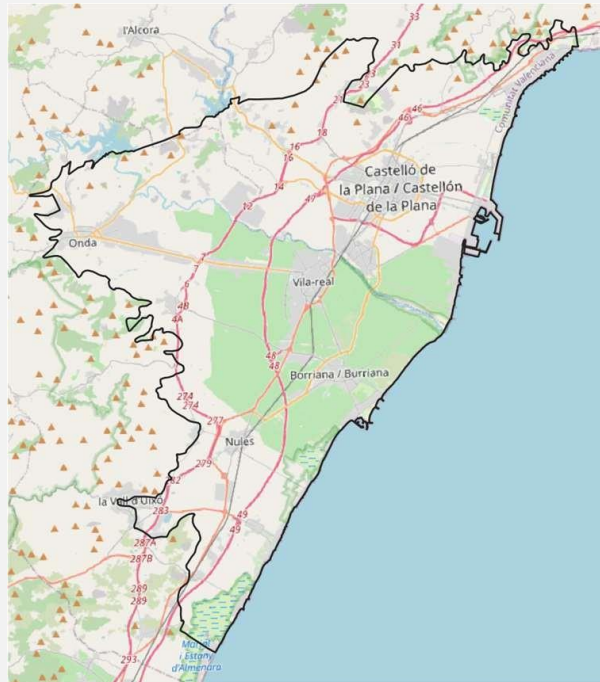
- Longitudinales: L01-L04
- Transversales: T01-T02



# Modelo numérico

## Dominio y discretización

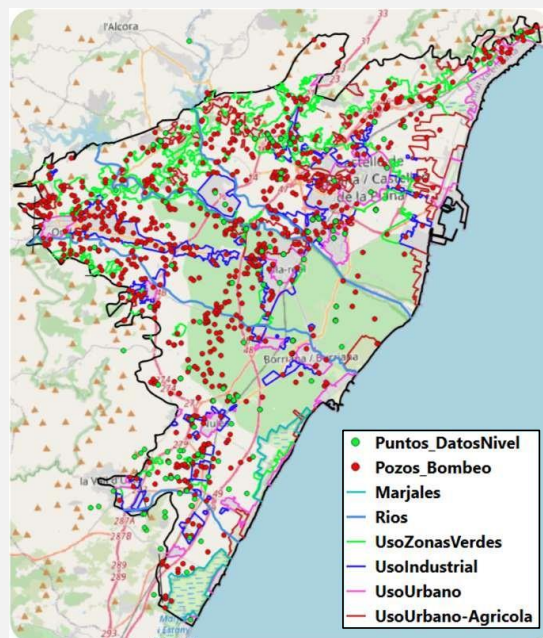
### Dominio



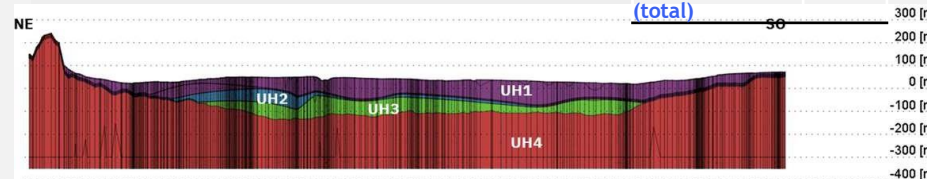
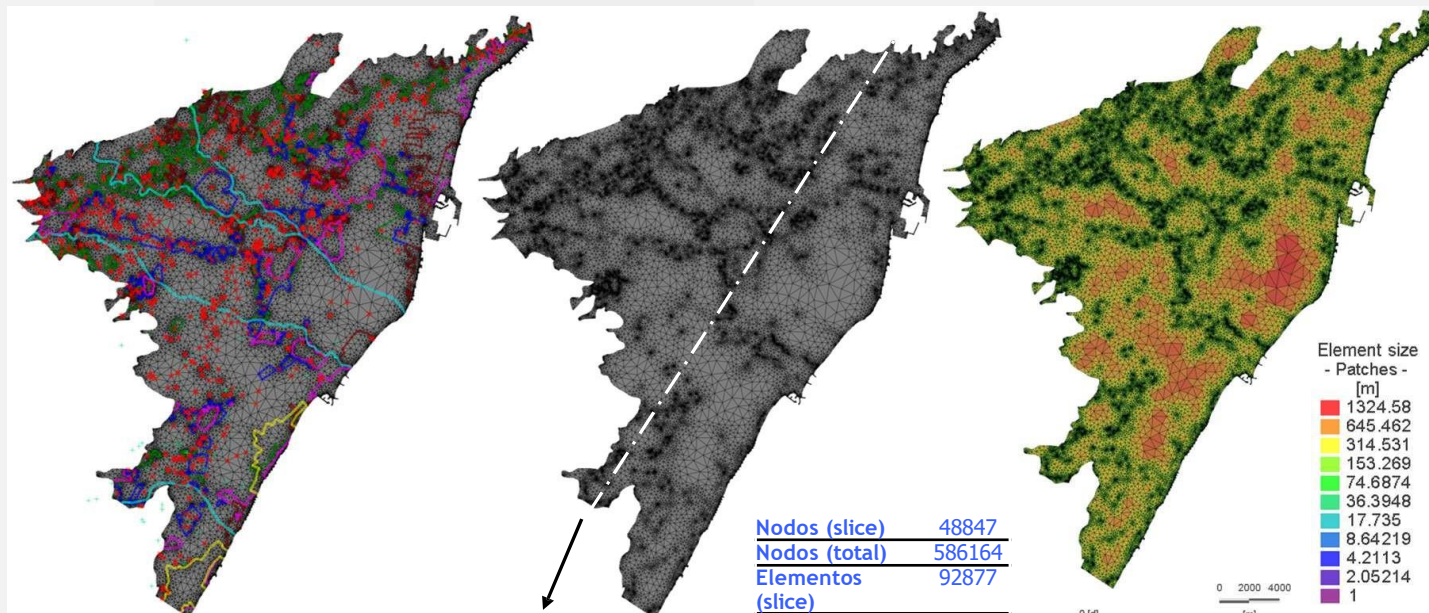
# Modelo numérico

## Dominio y discretización

### Discretización espacial



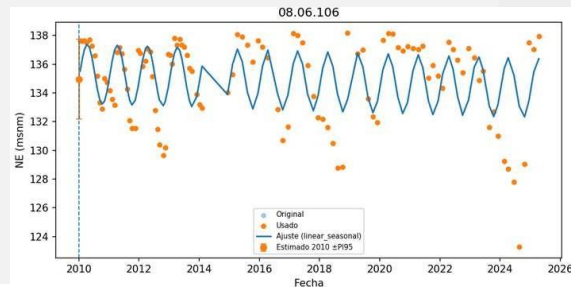
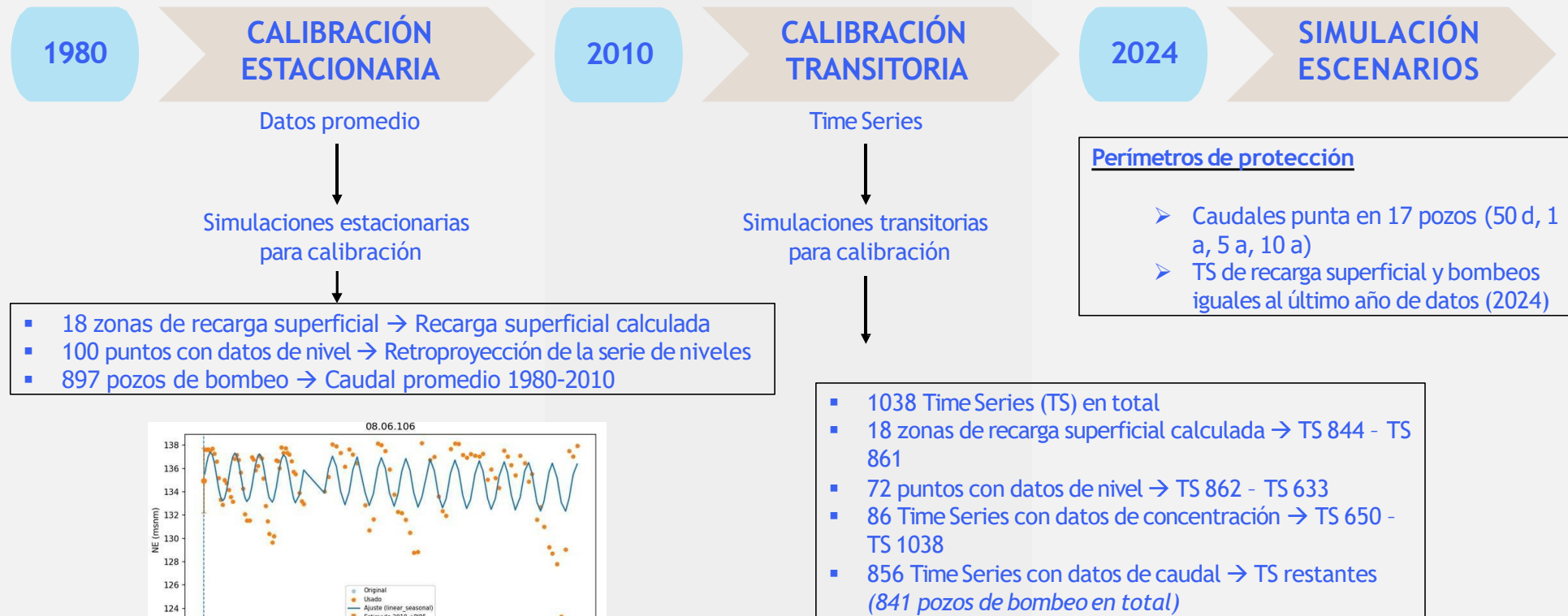
Zonaciones: UHs, US, ríos  
Puntos de bombeo  
Puntos de evaluación



# Modelo numérico

## Dominio y discretización

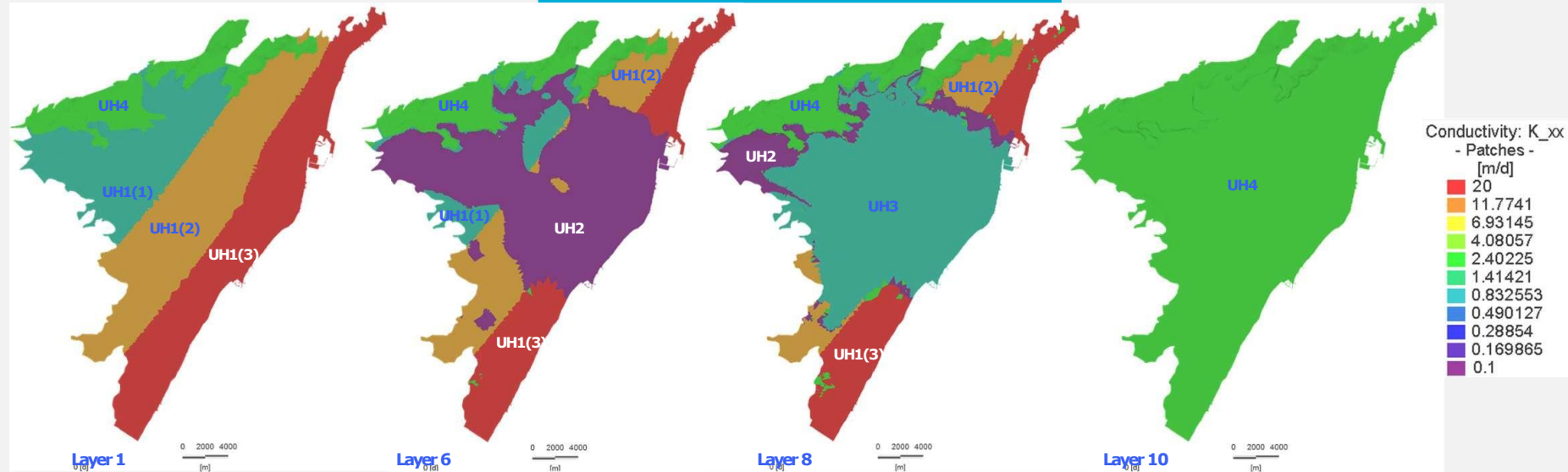
## Discretización temporal



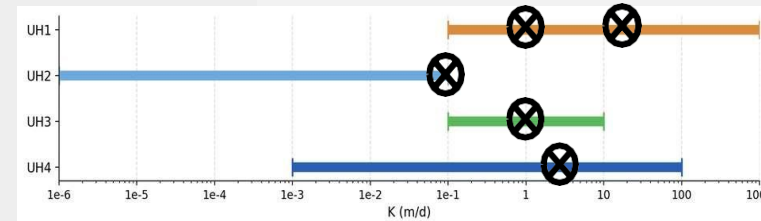
# Modelo numérico

## Parámetros hidrogeológicos

### Conductividades hidráulicas



Unidad	Rango de K (m·s <sup>-1</sup> )	Rango de K (m·d <sup>-1</sup> )	K (m·d <sup>-1</sup> ) - Calibración	Kz (m·d <sup>-1</sup> ) - Calibración
UH1	10 <sup>-6</sup> – 10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-1</sup> – 10 <sup>3</sup>	UH1_1	1
			UH1_2	10
			UH1_3	20
UH2	10 <sup>-11</sup> – 10 <sup>-6</sup>	10 <sup>-6</sup> – 10 <sup>-1</sup>	0.1	0.01
UH3	10 <sup>-6</sup> – 10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-1</sup> – 10 <sup>1</sup>	1	0.1
UH4	10 <sup>-8</sup> – 10 <sup>-3</sup>	10 <sup>-3</sup> – 10 <sup>2</sup>	2.5	0.25



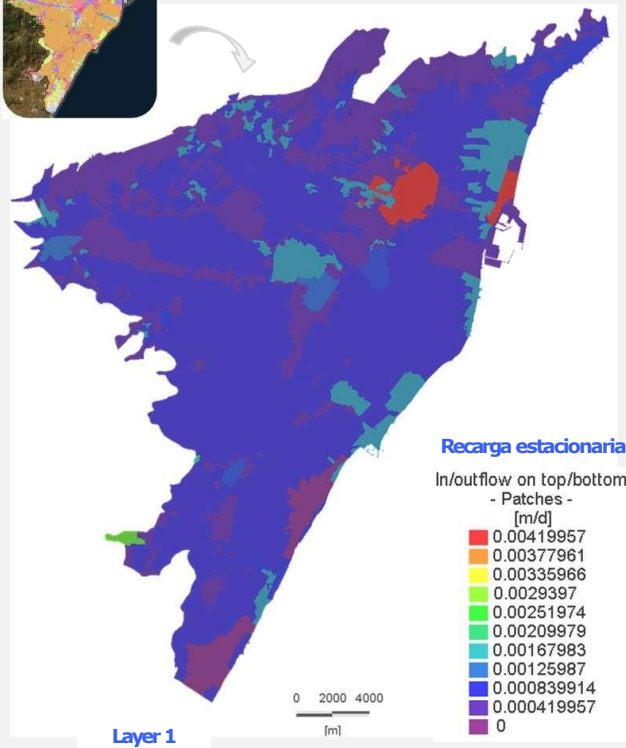
# Modelo numérico

## Condiciones de contorno

Mapa usos del suelo

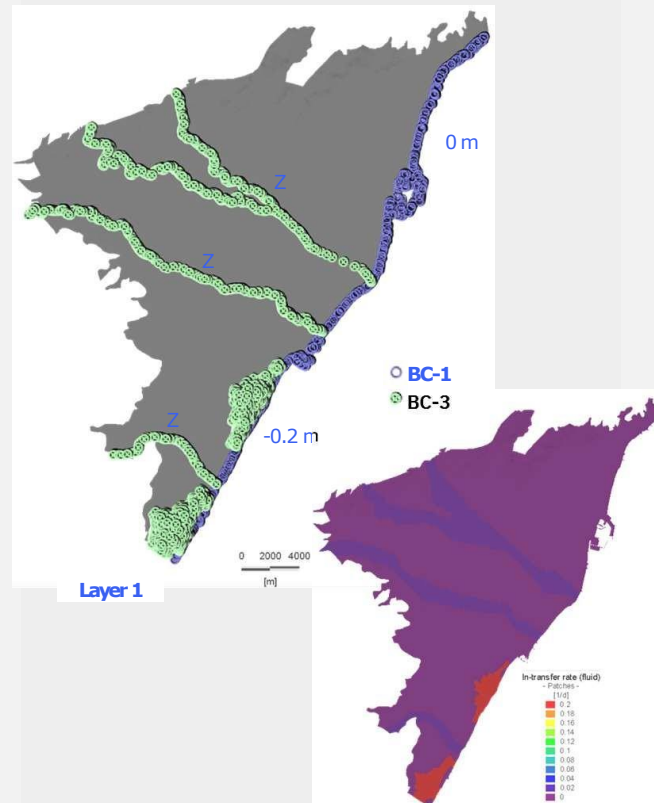


### Recarga superficial

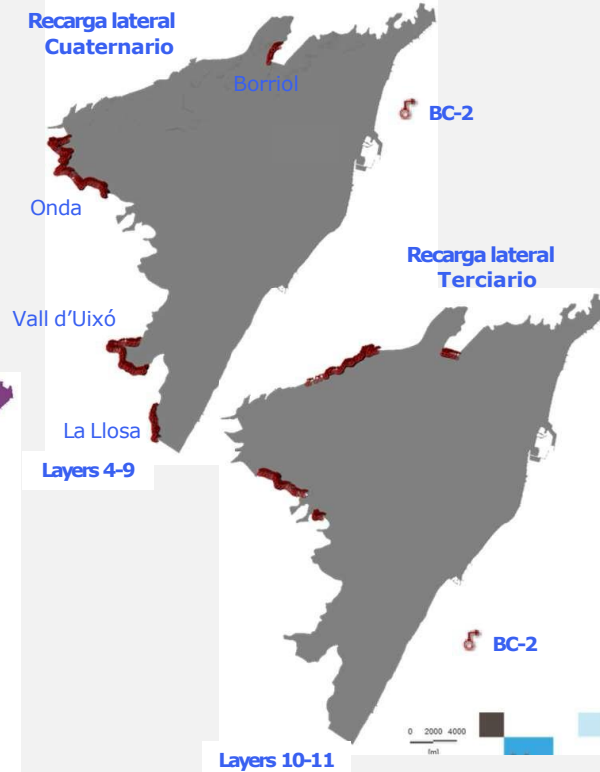


## Condiciones de flujo

### Mar – Marjales – Ríos



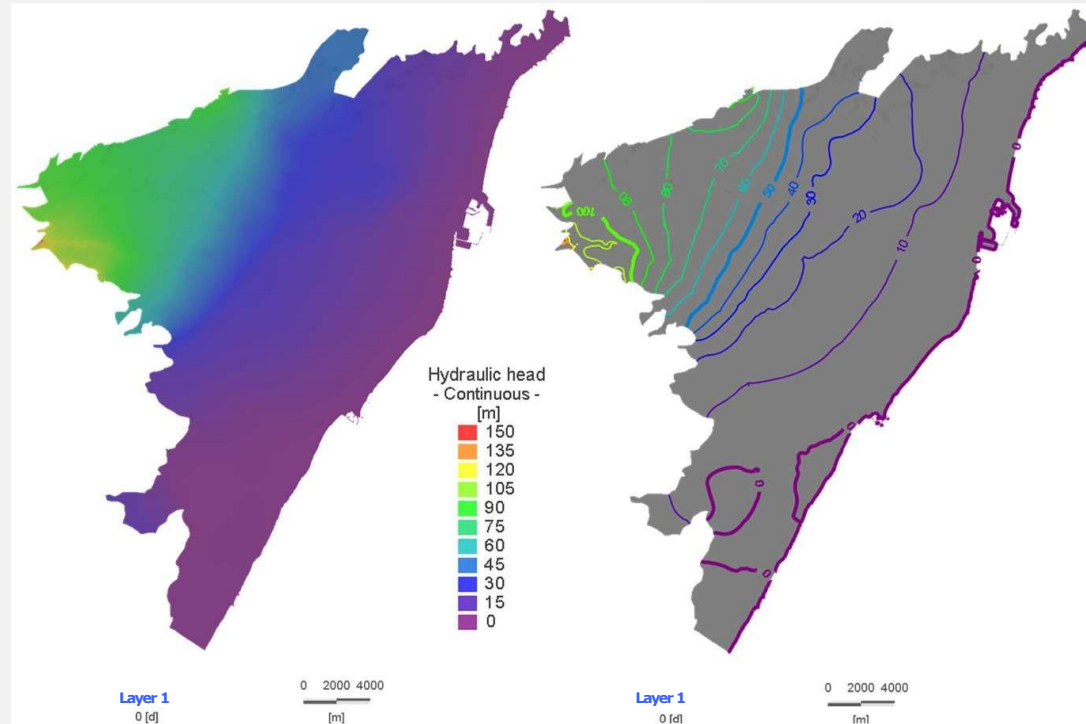
### Recarga lateral



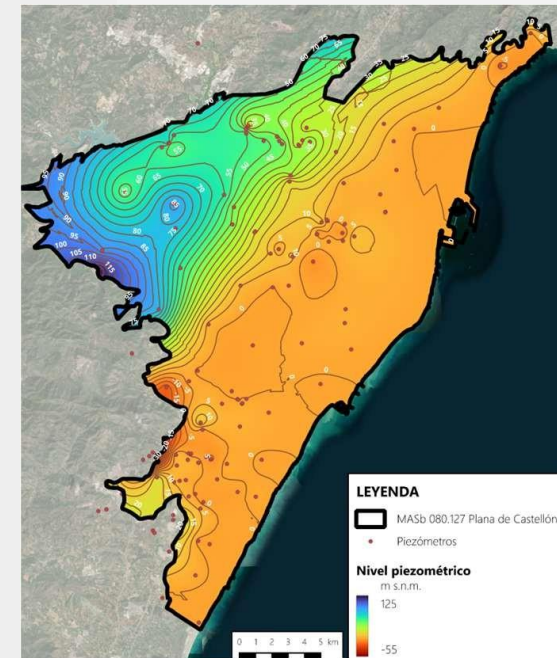
# Modelo numérico

## Calibración estacionaria. Piezometría y gráfico de dispersión

### Piezometría



### Conceptual



# Modelo numérico

## Calibración estacionaria. Piezometría y gráfico de dispersión

### Niveles en puntos de observación

Tabla Estadísticos

Parámetro	Nivel Observado (m)	Nivel Simulado (m)	Residual (m)
Max	108.38	113.03	24.95
Min	-25.28	-4.97	-24.68
N° de datos	100		
Residual Promedio (m)	7.78		
MAE (m)	7.78		
MAE (%)	5.82%		
RMSE (m)	9.99		
RMSE (%)	7.47%		

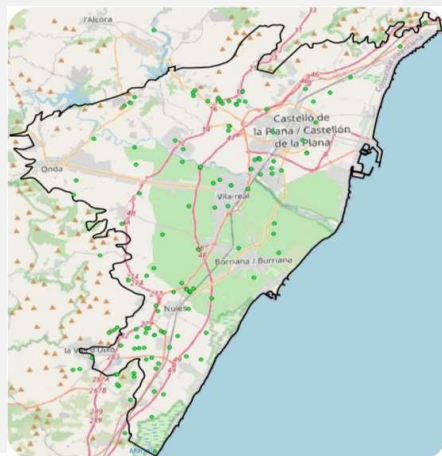
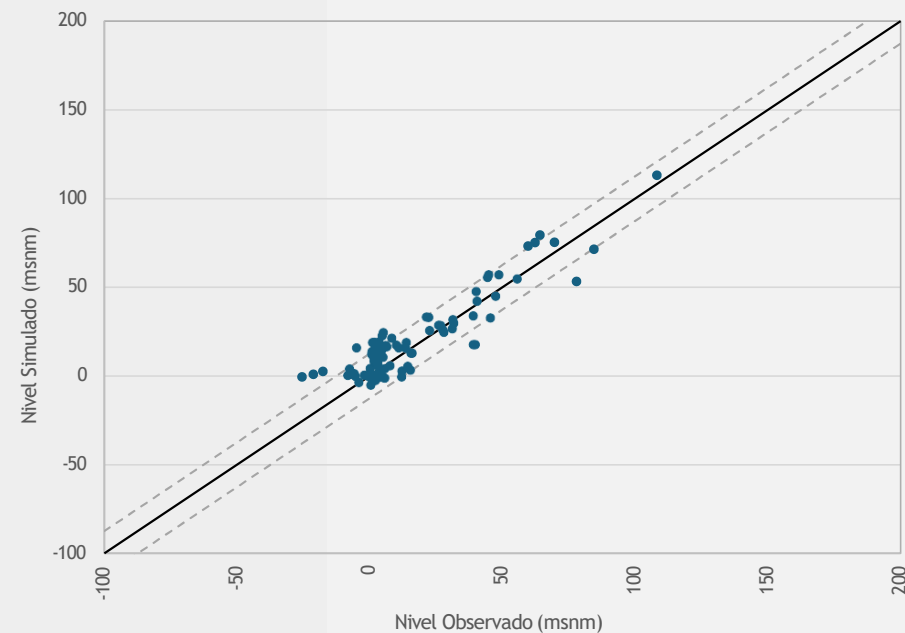
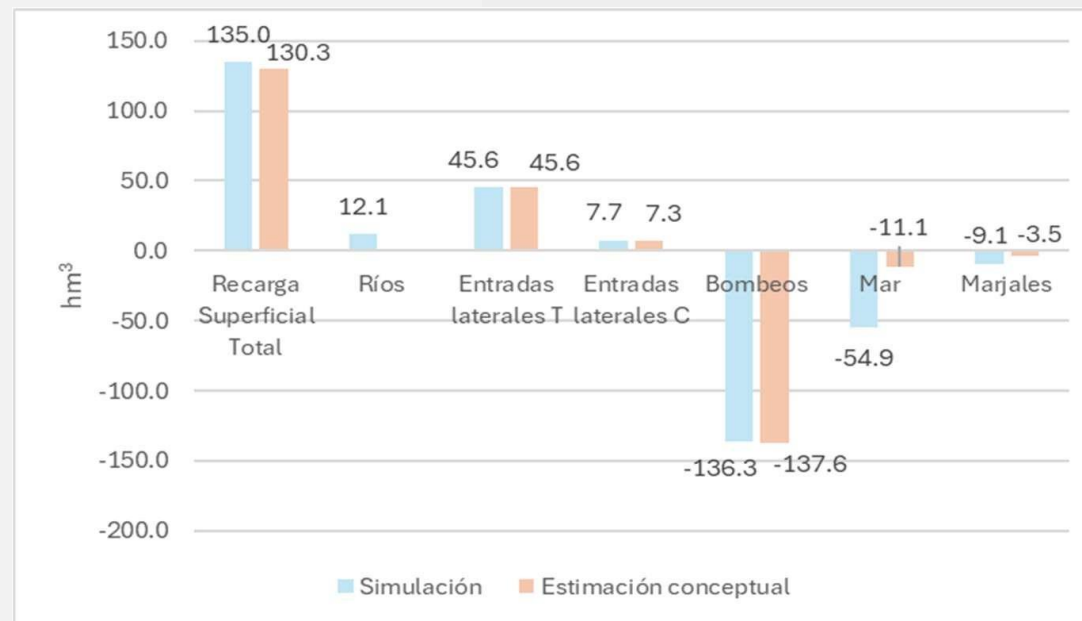


Gráfico de dispersión



# Modelo numérico

## Calibración estacionaria. Balance



Conceptual	
Entradas	[195 - 210] hm³/año
Salidas	[151 - 212.5] hm³/año

Simulado	
Entradas	207.77 hm³/año
Salidas	207.77 hm³/año

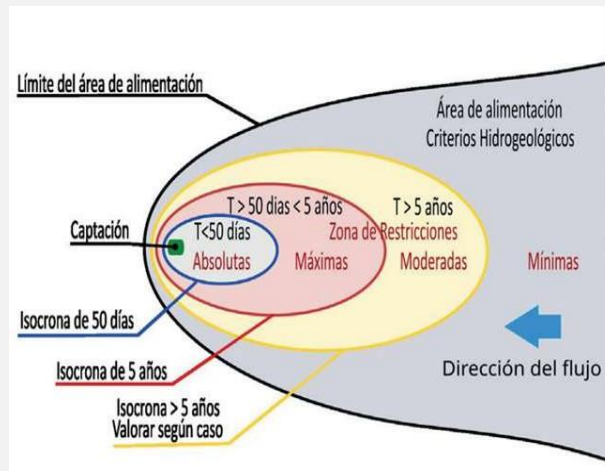
### 3. Casos reales del proyecto y muestra de resultados

- Perímetrosros de protección de los pozos de abastecimiento a la ciudad de Castellón

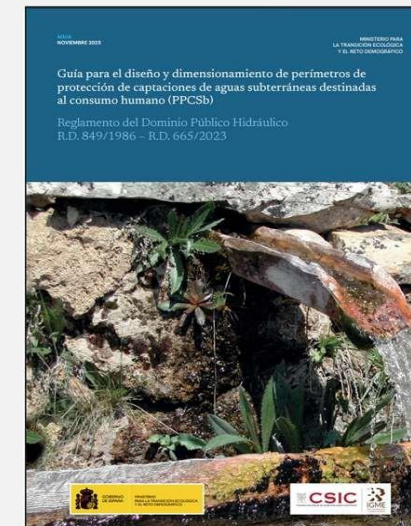
# Cálculo de perímetros de protección

El objetivo de un perímetro de protección es reforzar la protección de las aguas superficiales y subterráneas estableciendo un área en la cual de forma graduada se restringen o prohíben las actividades potencialmente contaminantes. Es un documento que debe trasladarse a las administraciones que regulan los usos del suelo.

Los perímetros de protección (pozos) deben aportarse por parte de los titulares de las concesiones de abastecimiento y son aprobados por el Organismo de Cuenca. Los perímetros de protección aprobados se incorporan en los Planes de Cuenca y pueden limitar el otorgamiento de nuevas concesiones e imponer limitaciones a autorizaciones de vertido.



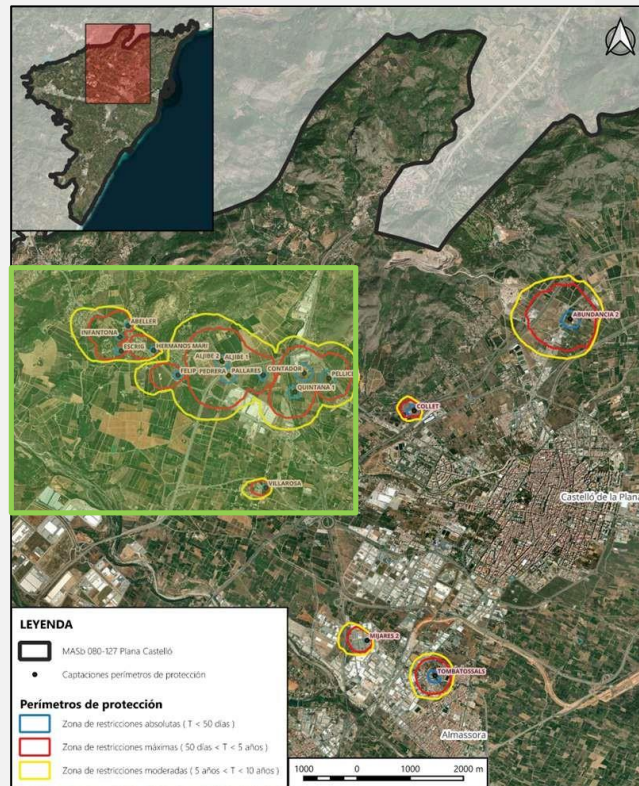
	Zona / Restricción			
	Inmediata / Absoluta	Próxima / Máxima	Alejada / Moderada	Envolvente / Mínima
Mecanismo de protección	Protección total	Inactivación de contaminantes degradables	Dilución y atenuación de contaminantes Alerta: control de la calidad del agua para detectar episodios de contaminación	Control de la calidad del agua para detectar episodios de contaminación
Actividades prohibidas	Todas, excepto las relacionadas con el mantenimiento y operación de la captación	Aquellas consideradas como contaminantes del suelo o agua	Las que almacenan, generan o emplean sustancias contaminantes que no se pueden inactivar en el medio antes de llegar a la captación	Las que almacenan, generan o emplean productos contaminantes de elevada persistencia o peligrosidad



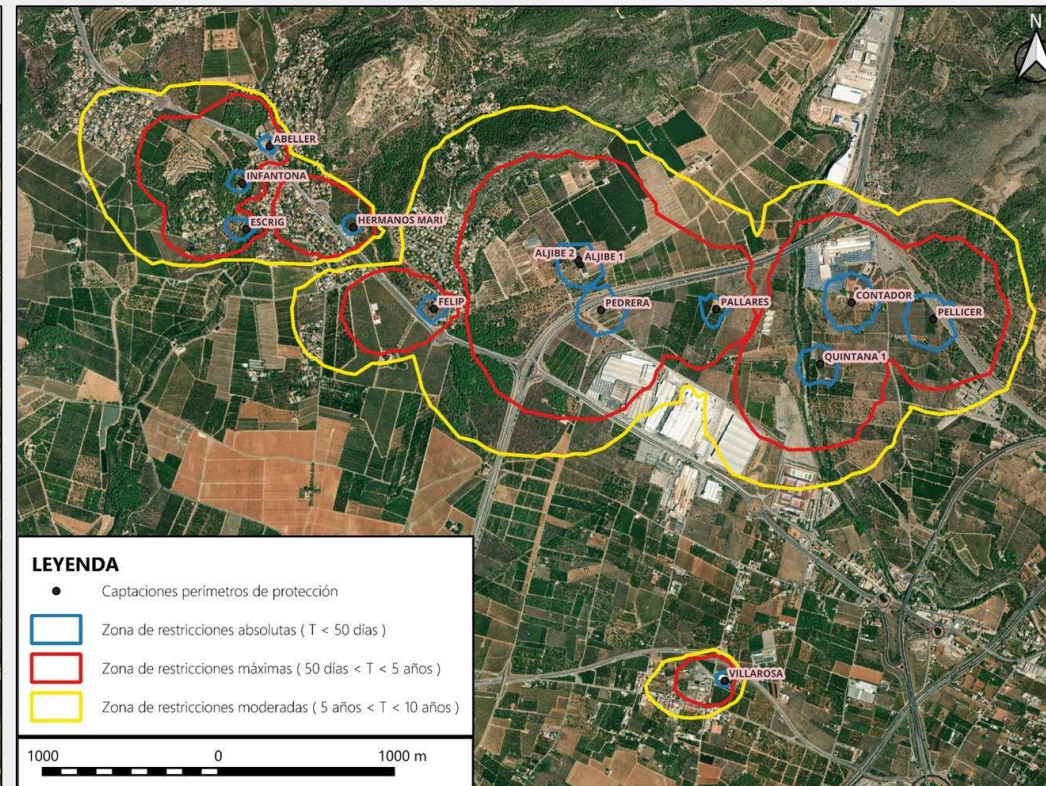
# Cálculo de perímetros de protección

Resultados obtenidos en el modelo numérico

General



Detalle



# Conclusiones

1. El **modelo conceptual** definido permite **caracterizar el funcionamiento hidrodinámico del acuífero** de la masa de agua de La Plana de Castellón, constituyendo la base para el desarrollo del modelo numérico de flujo y transporte.
2. La aplicación del **método DRASTIC** ha permitido obtener una **cartografía de la vulnerabilidad intrínseca del acuífero**, identificando los sectores más susceptibles a la contaminación.
3. El **modelo numérico** presenta un **ajuste satisfactorio frente a los datos observados**, lo que garantiza su capacidad para simular la evolución del sistema bajo distintos escenarios de presión y explotación.
4. La **modelización del transporte** ha permitido **delimitar los perímetros de protección** de las captaciones, mediante el cálculo de las envolventes de tiempo de tránsito y la obtención de las isócronas de 50 días, 5 años y 10 años.

# Gracias

ezuriaga@facsa.com  
jvclausell@facsa.com



**Financiado por  
la Unión Europea**  
NextGenerationEU



GOBIERNO  
DE ESPAÑA

MINISTERIO  
PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA  
Y EL RETO DEMOGRÁFICO



**Plan de  
Recuperación,  
Transformación  
y Resiliencia**