

JORNADA TÉCNICA SOBRE EL ESTADO DE IMPLANTACIÓN  
DEL PLAN DE ACCIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

# INTELIGENCIA ARTIFICIAL Y AGUAS SUBTERRÁNEAS

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

Jose Vicente Clausell Borja y Elena Zuriaga Agustí  
Técnico Captaciones y Calidad Del Agua, Responsable de Innovación  
**FACSA**



# SIN'ARGIA

## 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



Ajuntament de  
Castelló

**Facsa**  
ciclo integral del agua

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



Captación



Preservar el acuífero



Abastecimiento y  
Distribución



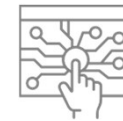
Reducir pérdidas y  
mejorar la  
monitorización



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

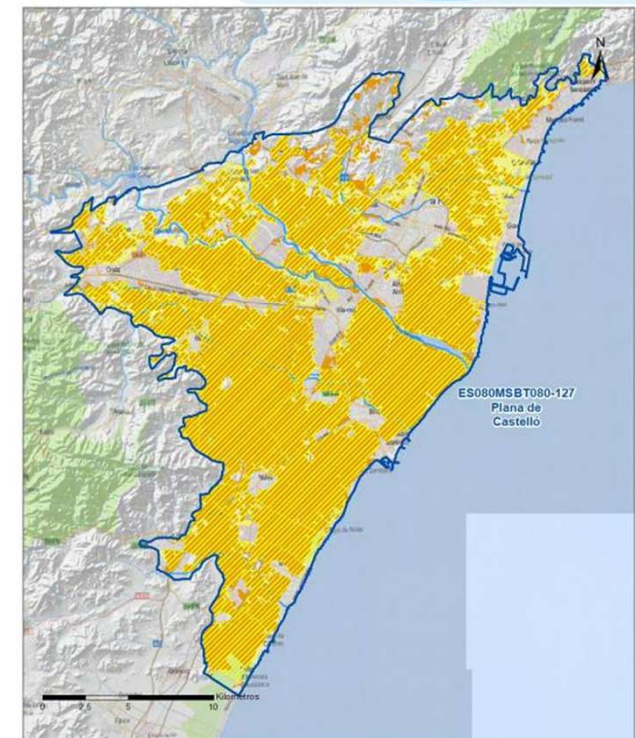
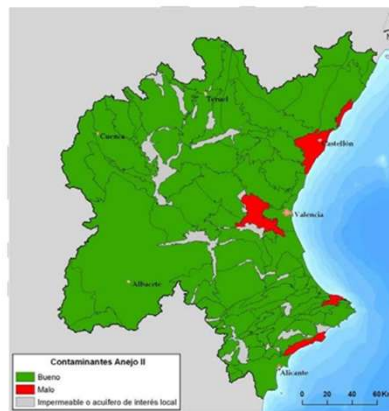
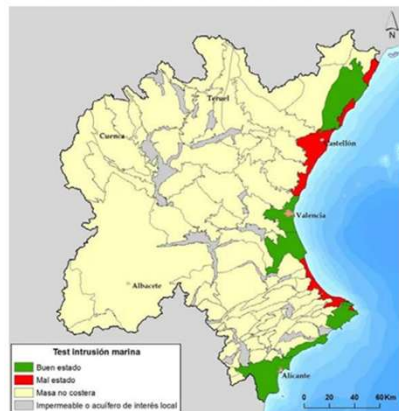


## Digitalización del uso urbano del agua en la Ciudad de Castellón

- 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.



**LEYENDA**

Red hidrográfica  
MSBT:  
ES080MSBT080-127  
Plana de Castelló

**Tipo de Presión Difusa (significativa):**

2.2 Agricultura: Plaguicidas  
2.2 Agricultura: Nitratos

# OBJETIVOS DEL ESTUDIO DEL ACUÍFERO



Ajuntament de  
Castelló

**Facsa**  
ciclo integral del agua

- 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.



## 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

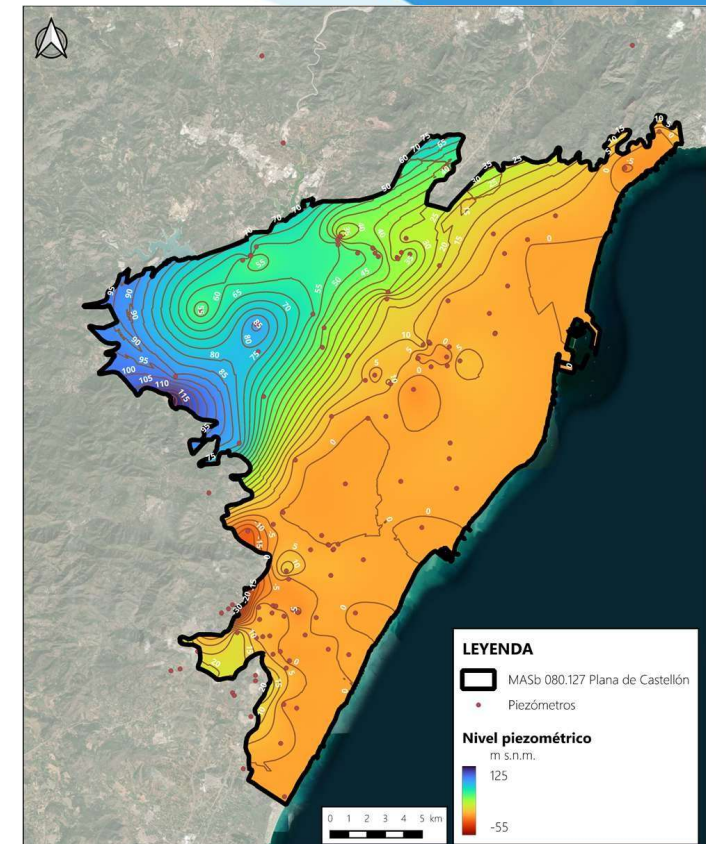


Ajuntament de  
Castelló

Facsa  
ciclo integral del agua

Condición inicial de piezometría, 2010

- 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.



# Modelo conceptual: Hidroquímica de cloruros

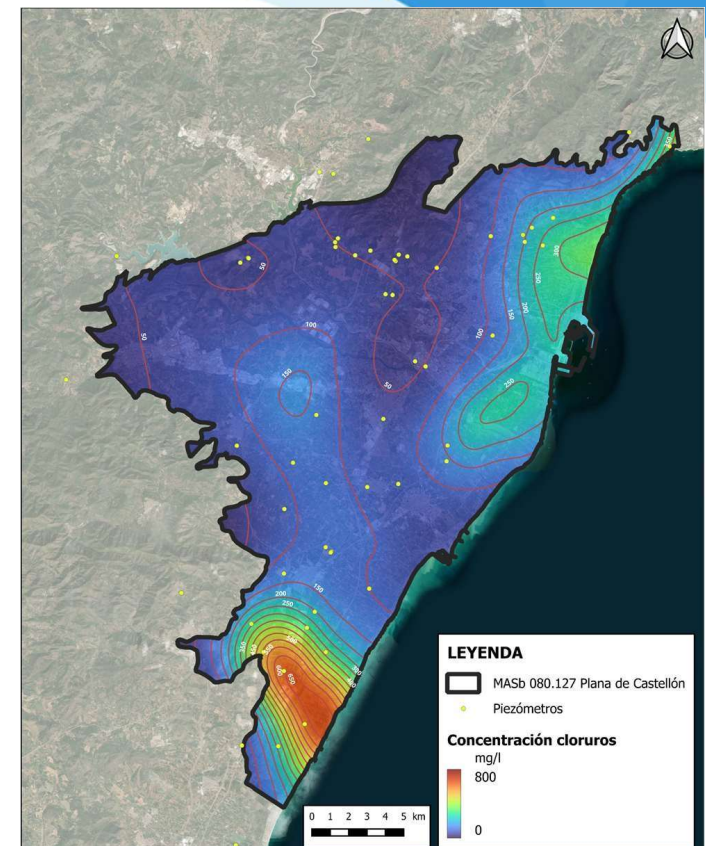


Ajuntament de  
Castelló

Facsa  
ciclo integral del agua

- 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

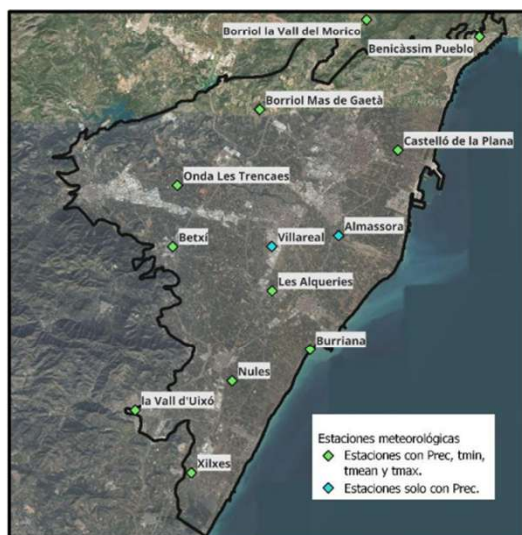


# Modelo conceptual: Balance hídrico del acuífero de la Plana



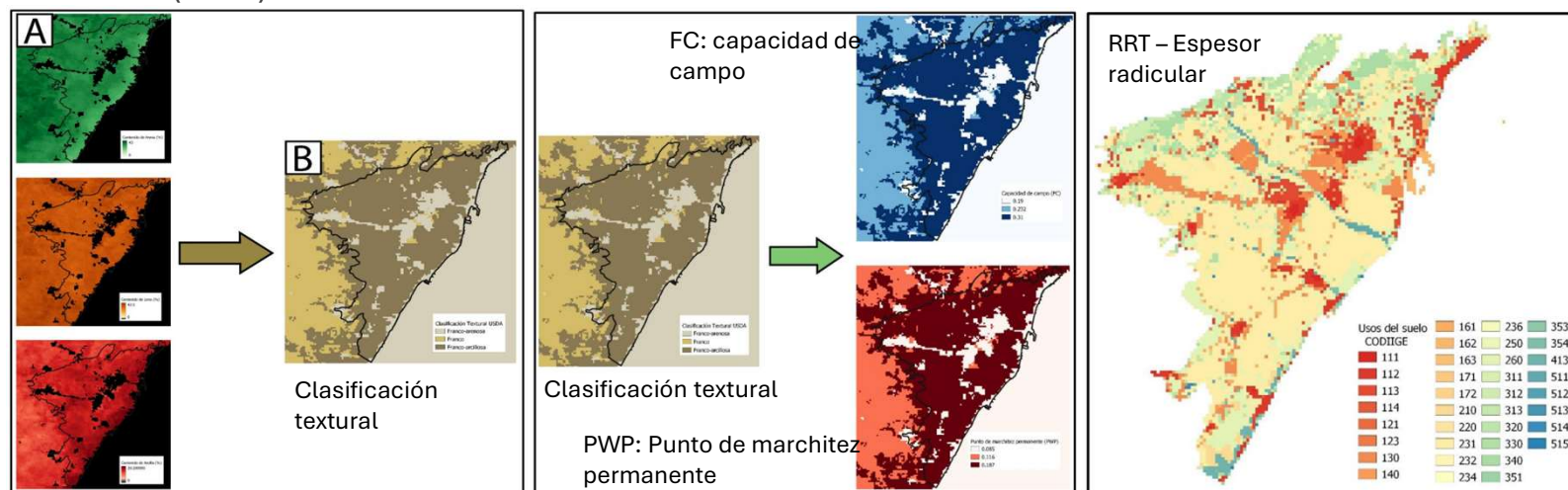
Ajuntament de Castelló

**Facsa**  
ciclo integral del agua



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 bombeos 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

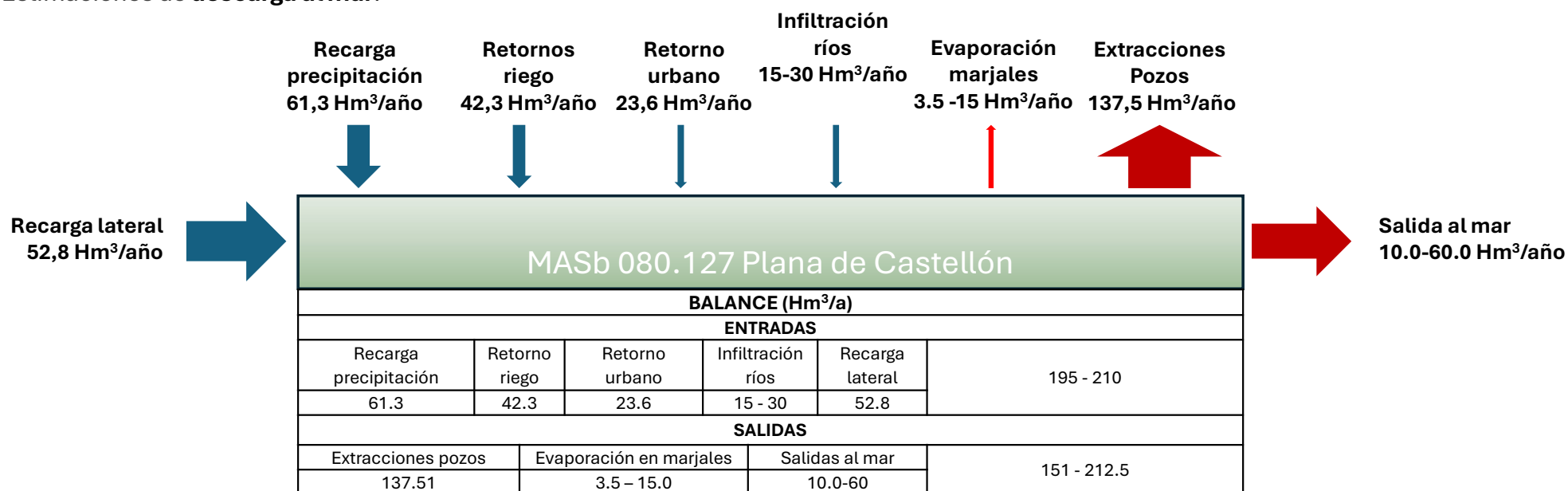


Ajuntament de Castelló

**Facsa**  
ciclo integral del agua

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**.



# Modelo conceptual de funcionamiento hidrogeológico



Ajuntament de  
Castelló

**Facsa**  
ciclo integral del agua

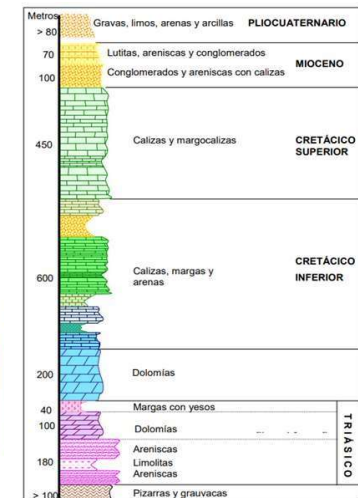
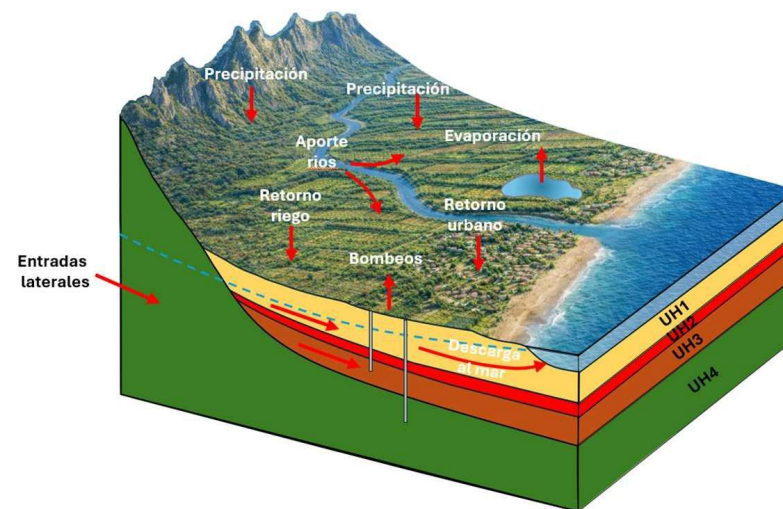
## MASb con cuatro UH diferenciadas:

- 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



Ajuntament de  
Castelló

**Facsa**  
ciclo integral del agua

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



Ajuntament de Castelló

**Facsa**  
ciclo integral del agua

Profundidad NP  
iAquant, 250x250



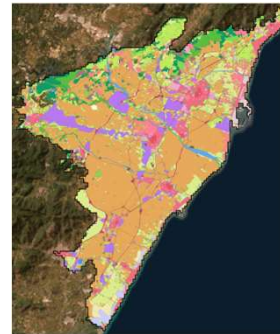
Calculo de recarga  
iAquant, 250x250



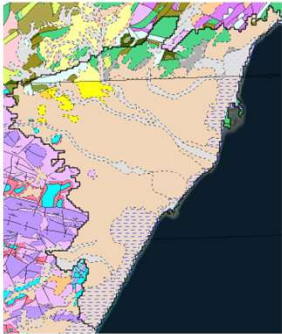
MDT IGN  
resolución 5m



Usos del suelo  
1:200000



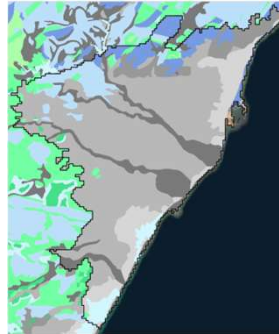
Geología IGME  
1:200000/1:50000



Litoestratigrafía IGME  
1:200000



Permeabilidad  
IGME 1:200000

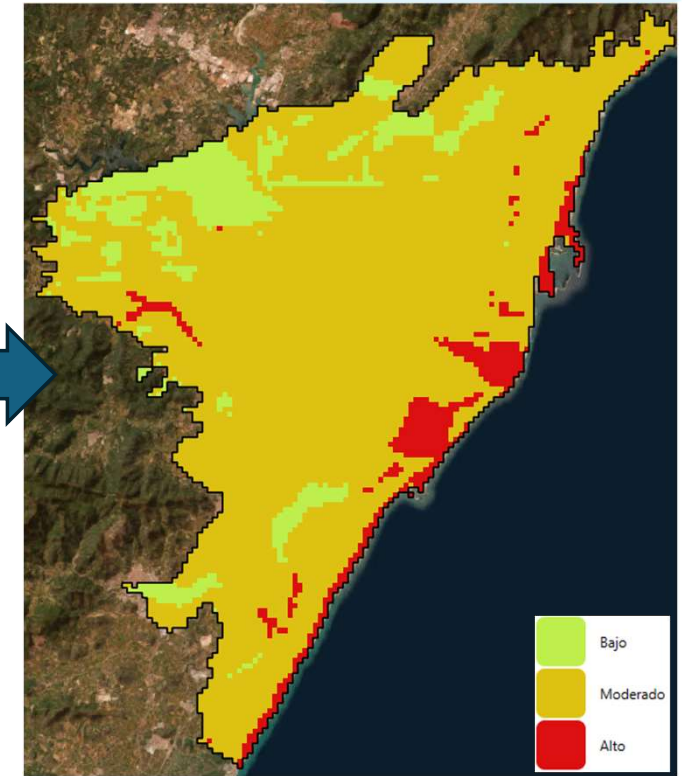


Hidrogeología  
IGME 1:200000

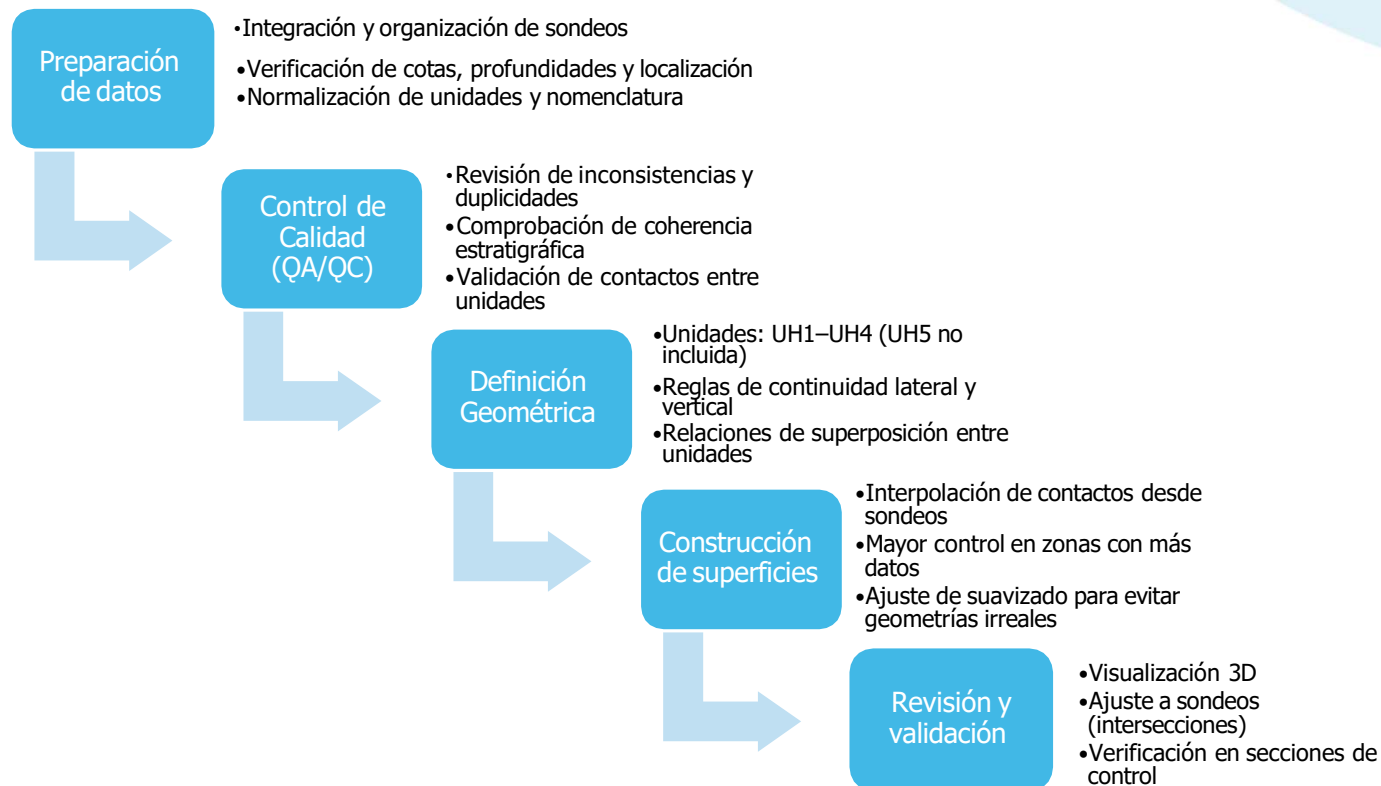


Qgis

MAPA DE VULNERABILIDAD DRASTIC



## Construcción del modelo hidrogeológico



# Modelo geológico



Ajuntament de Castelló

**Facsa**  
ciclo integral del agua

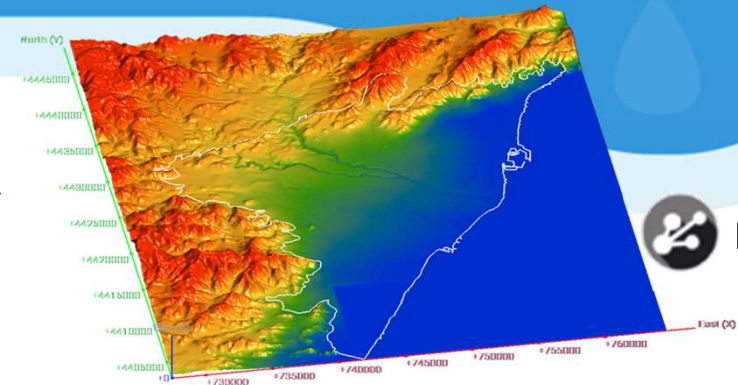
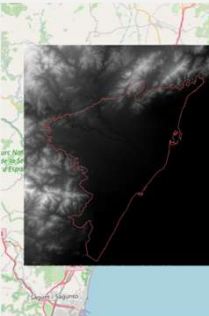
Topografía → Digital Elevation Model (5 m) → DEM05

QGIS

Confederación Hidrográfica del Júcar

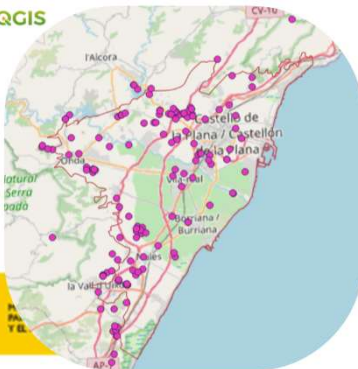
MAS Subterránea Plana de Castellón

Cuadrado de estudio



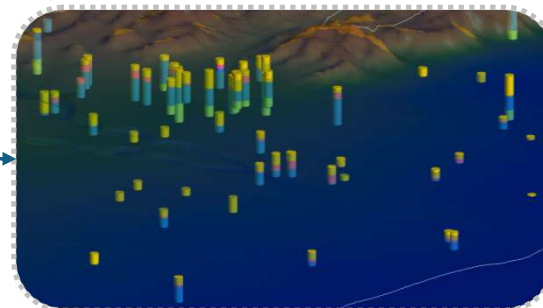
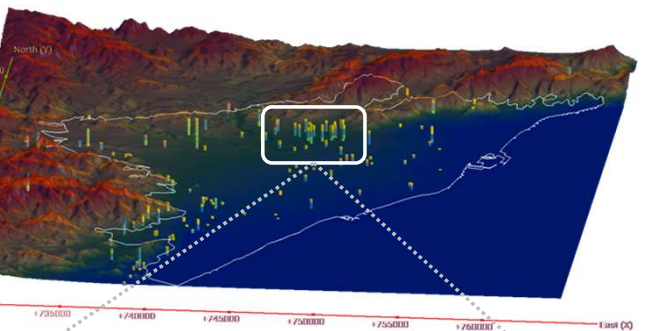
Litología → Testificaciones de ≈ 140 sondeos en la zona de estudio

QGIS



ID	PROYECTO	PROFUNDIDAD (m)	TIPO	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	ESPAES
2196437	CENEFENARMO	0	3	Conglomerados	UH1	3,5
2196437	CENEFENARMO	7	10	Arcillas	UH1	6,5
2196437	CENEFENARMO	16	36	Conglomerados	UH1	24
2196437	CENEFENARMO	36	41	Arcas y arenas	UH1	36,5
2196437	CENEFENARMO	41	46	Conglomerados y arcillas	UH1	44,5
2196437	CENEFENARMO	48	60	Gravas y arenas	UH1	56,5
2196437	CENEFENARMO	60	66	Arcillas	UH1	66,5
2196443	CENEFENARMO 2	0	1	Conglomerado	UH1	0,5
2196443	CENEFENARMO 2	1	2	Gravas y arcillas	UH1	3
2196443	CENEFENARMO 2	6	6	Conglomerado	UH1	5,5
2196443	CENEFENARMO 2	6	10	Gravas y arcillas	UH1	12
2196443	CENEFENARMO 2	18	39	Gravas sueltas	UH1	33,5
2196443	CENEFENARMO 2	23	34	Arcillas y arenas	UH1	32,2
2196443	CENEFENARMO 2	30,4	40	Gravas y arenas	UH1	40,2
2196443	CENEFENARMO 2	40	40	Arcillas y arenas	UH1	40,2
2196443	CENEFENARMO 2	46	56	Arcillas	UH2	50,5
2196443	CENEFENARMO 2	50	56	Arcas y gravas	UH2	50,5
2196443	CENEFENARMO 2	58	56	Gravas y arenas	UH2	58,5
2196443	CENEFENARMO 2	58	64	Arcillas	UH2	61,5
2196449	ABUNDANCIA 2	0	36	Materiales detríticos	Cuaternario	19
2196449	ABUNDANCIA 2	38	40	Gravas gruesas	UH1	41,5
2196449	ABUNDANCIA 2	46	66	Hormasas detríticas	UH1	56
2196449	ABUNDANCIA 2	65	70	Arenas	UH1	67,5
2196449	ABUNDANCIA 2	0	11	Arcillas	UH1	3,5
2196455	AGUASCINCO	11	25	Gravas y arenas	UH1	38
2196461	CASITA B	0	20	Gravas gruesas y arenas	UH1	23,5
2196461	CASITA B	20	30	Arcas y arcillas	UH1	27,5
2196461	CASITA B	30	30	Gravas y arenas	UH1	30,5
2196461	CASITA B	39	49	Arcas blancas	UH1	42
2196461	CASITA B	49	60	Arcas blancas	UH1	50,5
2196461	CASITA B	58	60	Arcas blancas	UH2	61,5
2196461	CASITA B	60	70	Gravas y arenas	UH2	66,5
2196461	CASITA B	70	111	Gravas y arenas	UH3	90,5
2196461	CASITA B	111	122	Arcas y arcillas	UH3	116,5
2196461	CASITA B	122	120	Gravas y arenas	UH3	120
2196461	CASITA B	127	136	Gravas y arenas	UH3	142,5
2196461	CASITA B	136	140	Arcillas y arenas	UH3	139
2196461	CASITA B	140	150	Gravas y arenas	UH3	142,5
2196461	CASITA B	150	172	Arenas	UH3	171
2196467	Casita	0	1	Residuo cultural	UH1	2,5

Definición de UHs



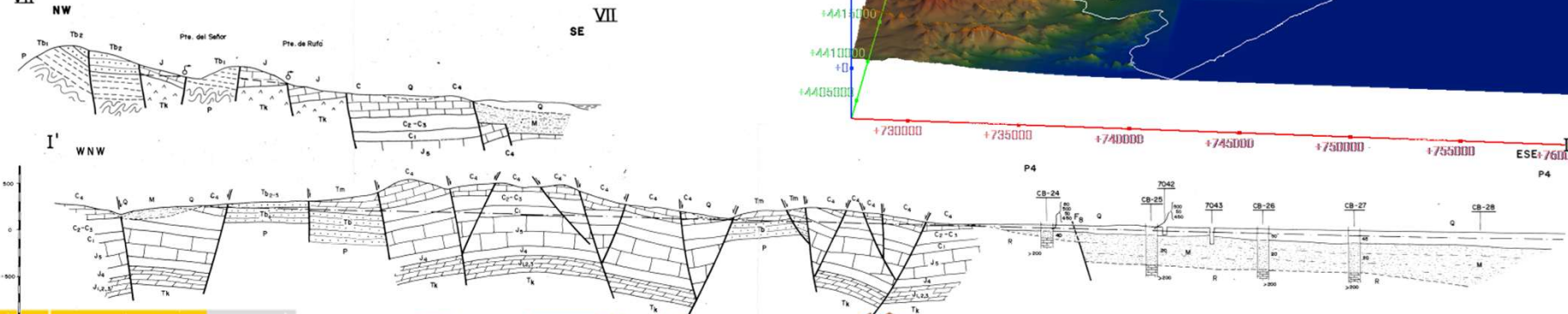
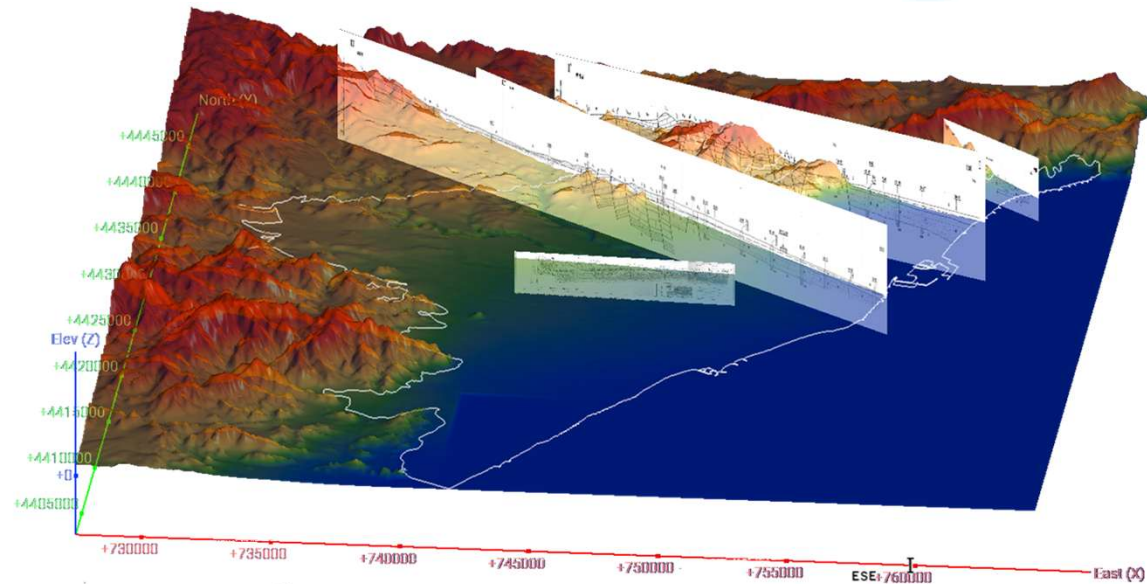
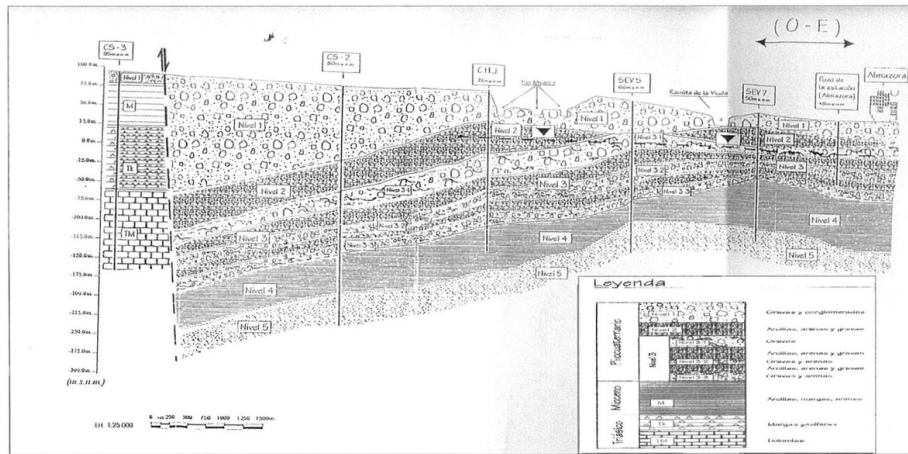
# Modelo geológico



Ajuntament de Castelló

**Facsa**  
ciclo integral del agua

Geología → Mapa geológico (IGME) + Revisión de informes

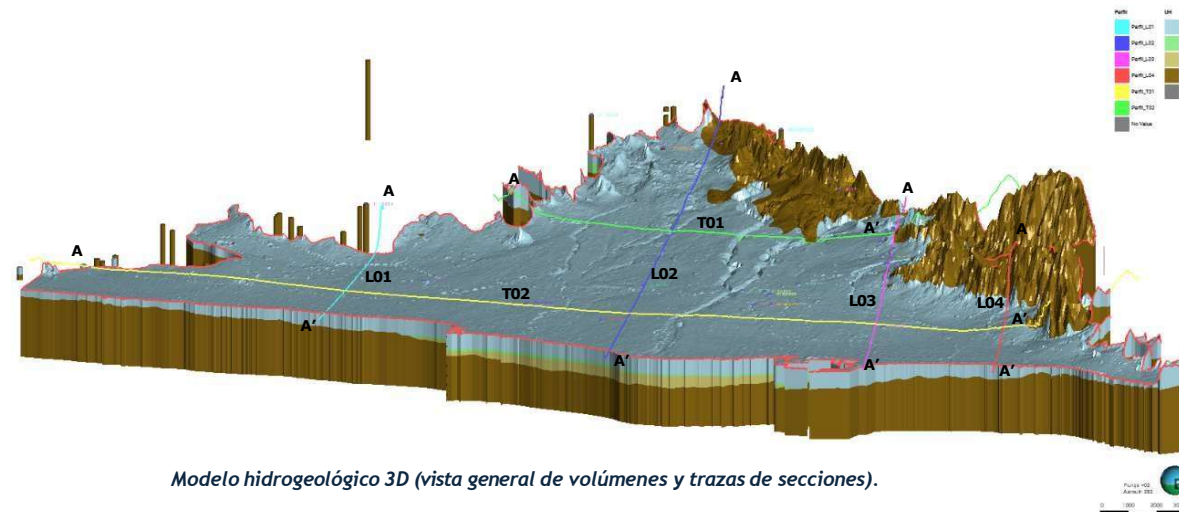


## Modelo 3D resultante y secciones

□ 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

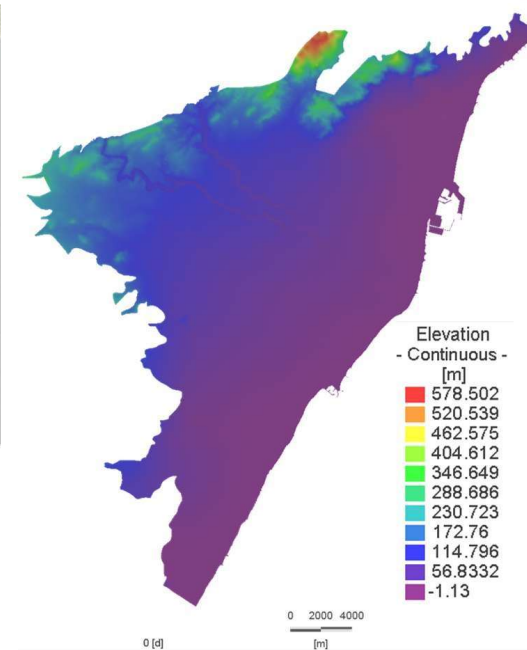
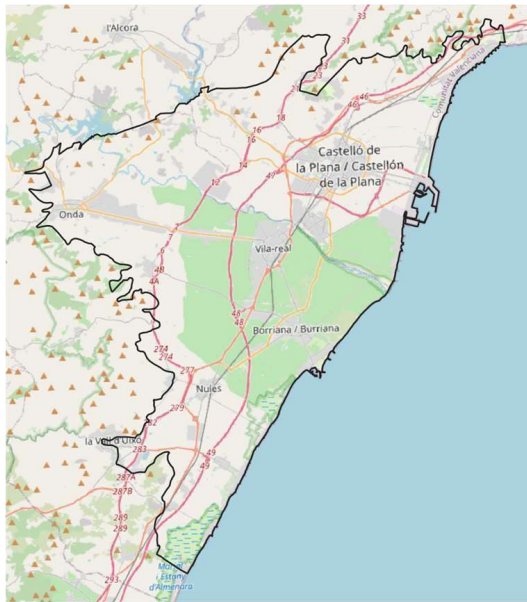


Ajuntament de  
Castelló

**Facsa**  
ciclo integral del agua

## Dominio y discretización

### Dominio



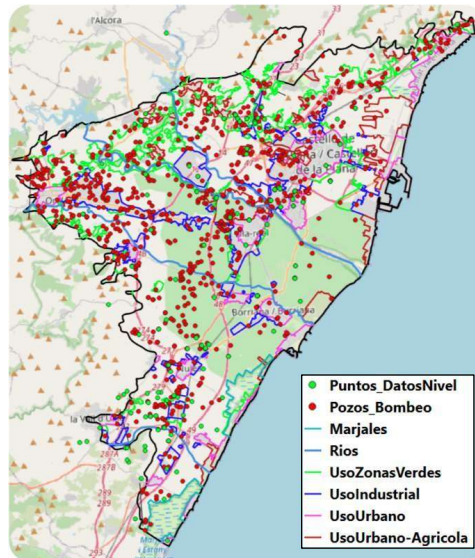
# Modelo numérico



Ajuntament de  
Castelló

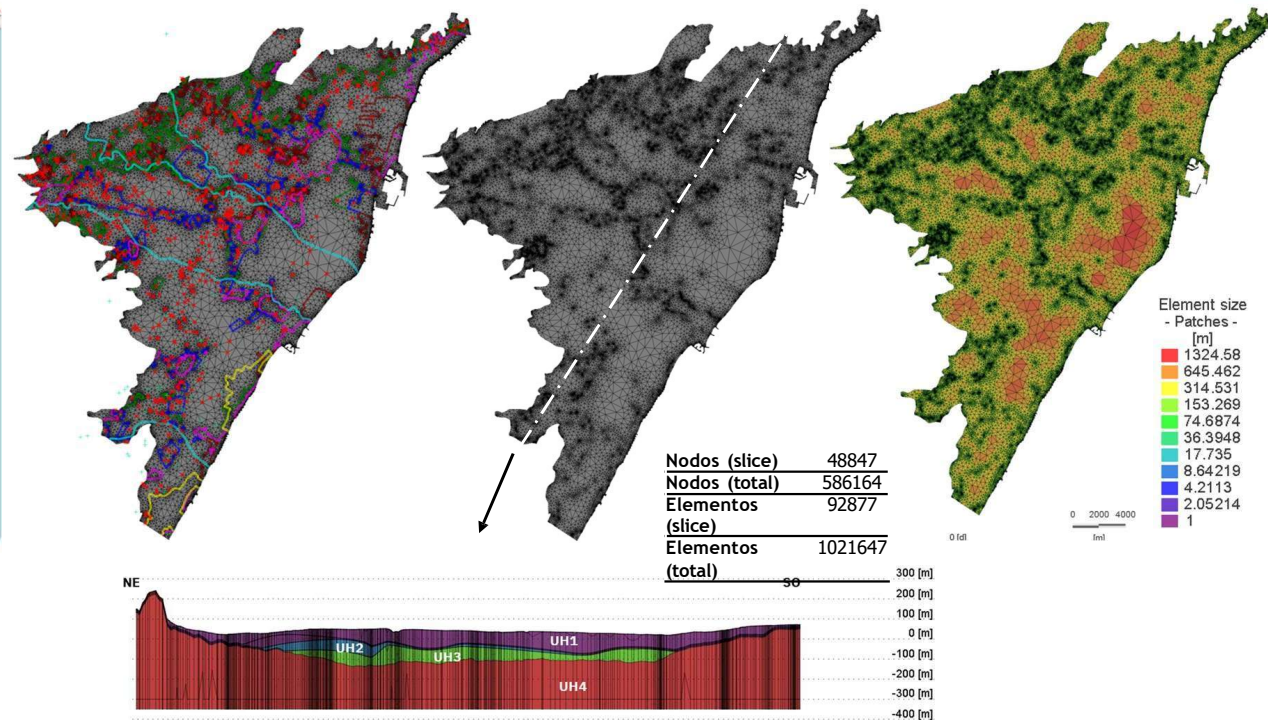
**Facsa**  
ciclo integral del agua

## Dominio y discretización



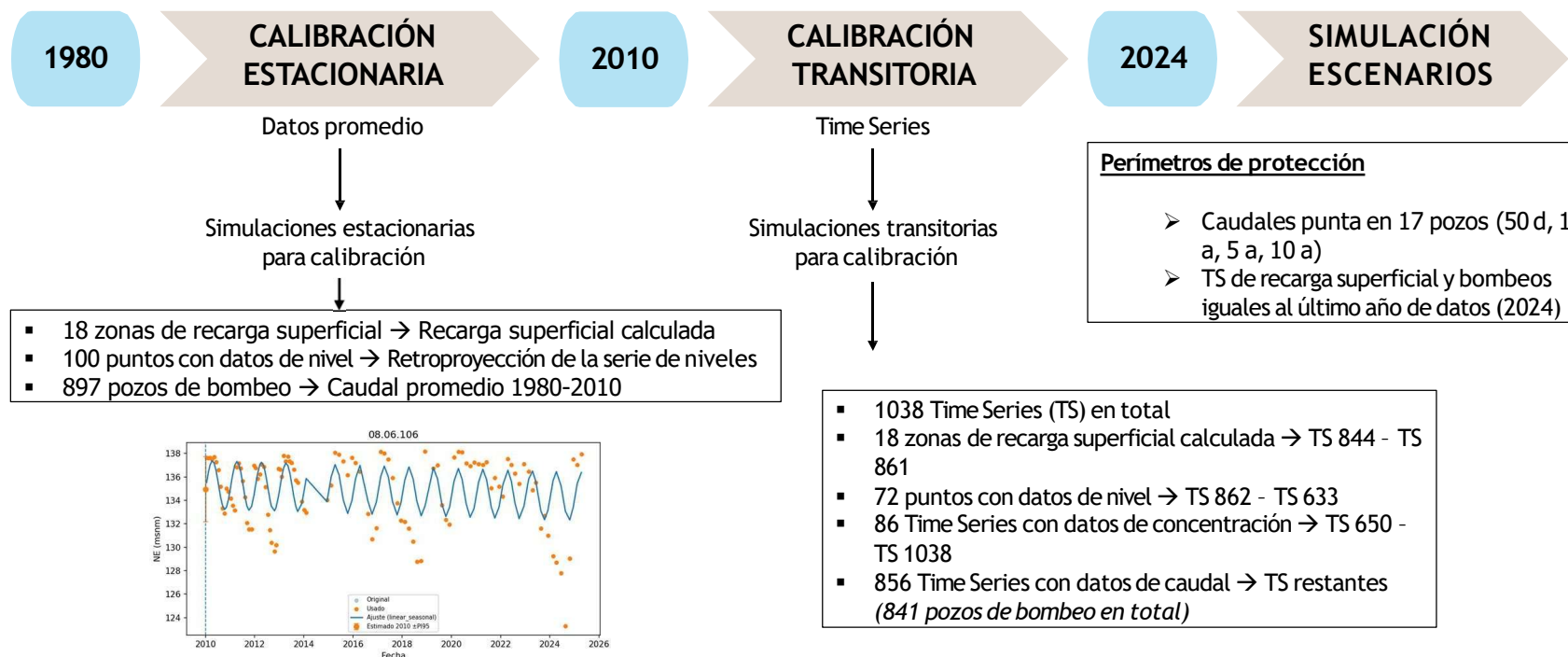
Zonaciones: UHs, US, ríos  
Puntos de bombeo  
Puntos de evaluación

## Discretización espacial



## Dominio y discretización

## Discretización temporal



# Modelo numérico



Ajuntament de Castelló

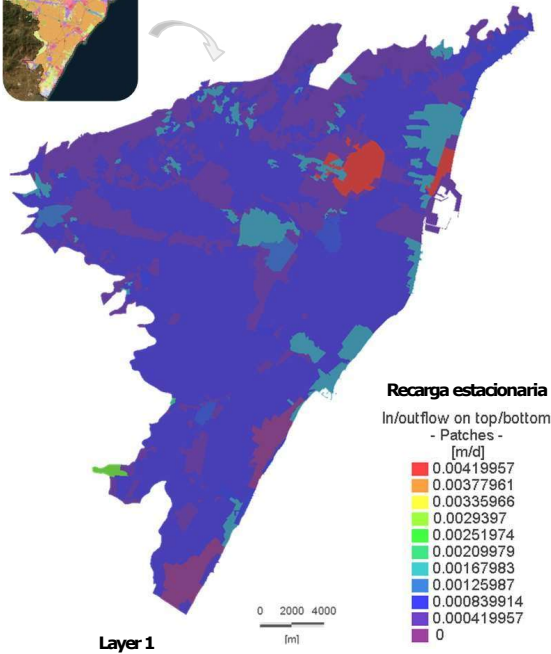
**Facsa**  
ciclo integral del agua

## Condiciones de contorno

Mapa usos del suelo

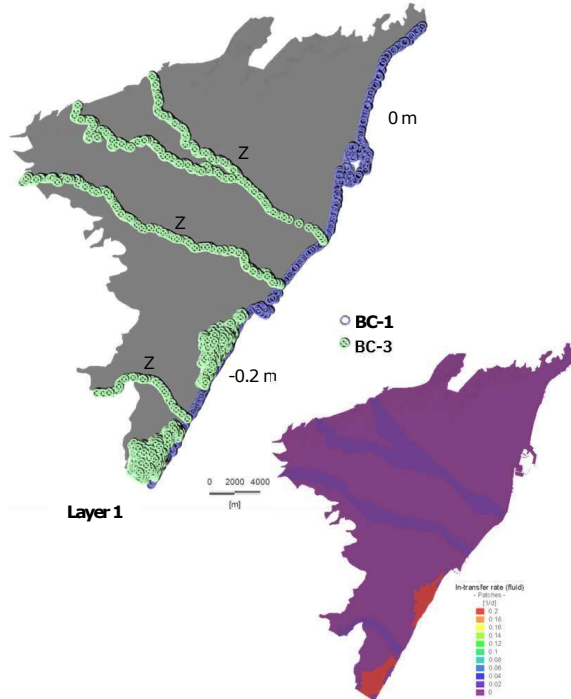


Recarga superficial

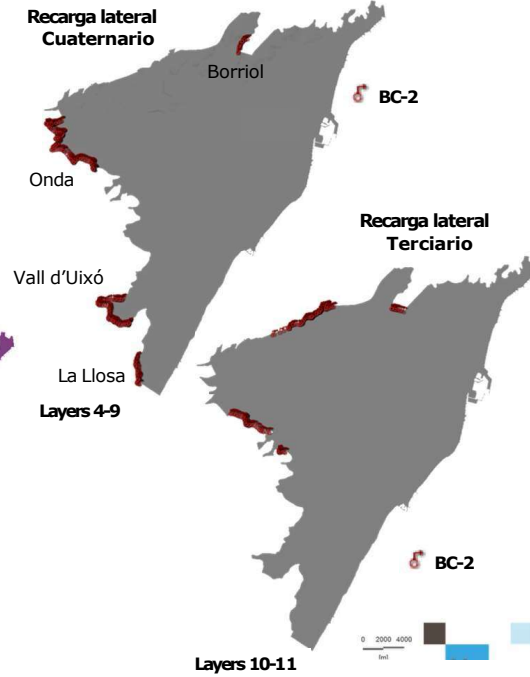


## Condiciones de flujo

Mar - Marjales - Ríos

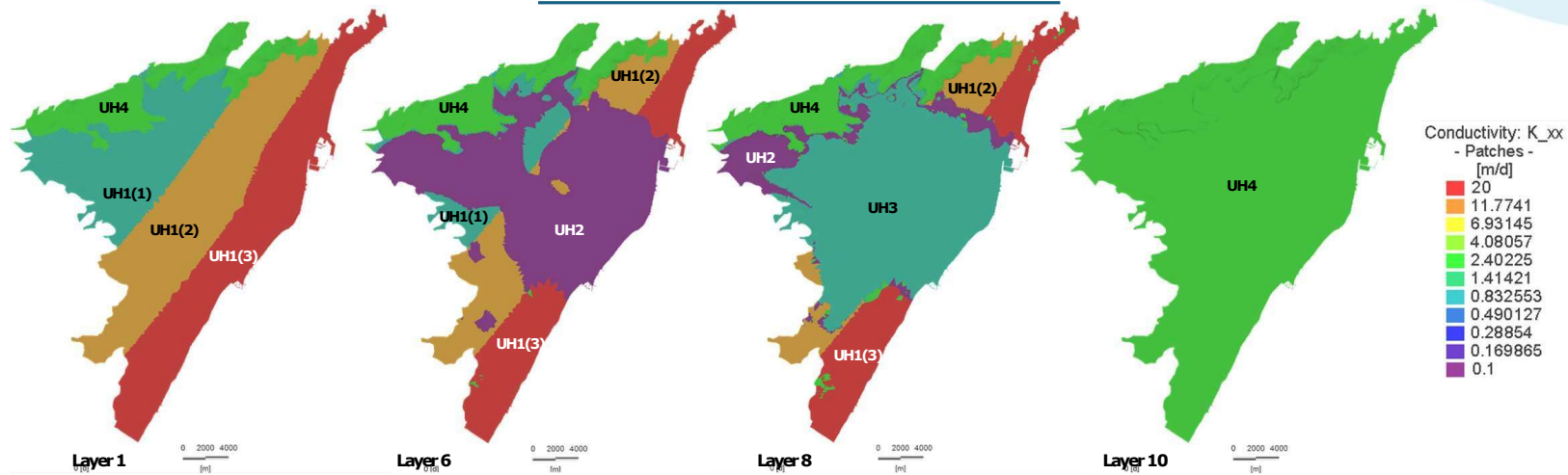


Recarga lateral

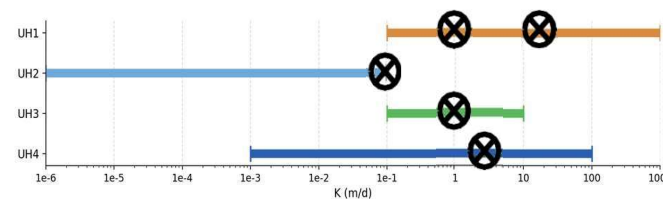


## Parámetros hidrogeológicos

### Conductividades hidráulicas

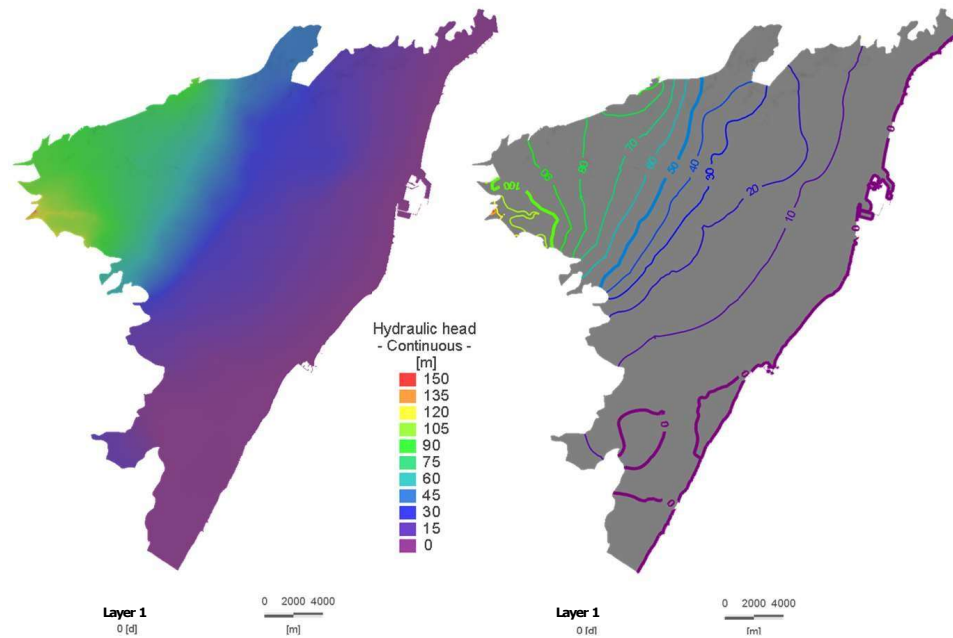


Unidad	Rango de K (m·s <sup>-1</sup> )	Rango de K (m·d <sup>-1</sup> )	K (m·d <sup>-1</sup> ) - Calibración	
			K (m·d <sup>-1</sup> ) - Calibración	Kz (m·d <sup>-1</sup> ) - Calibración
UH1	10 <sup>-6</sup> – 10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-1</sup> – 10 <sup>3</sup>	UH1_1	1
			UH1_2	10
			UH1_3	20
UH2	10 <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

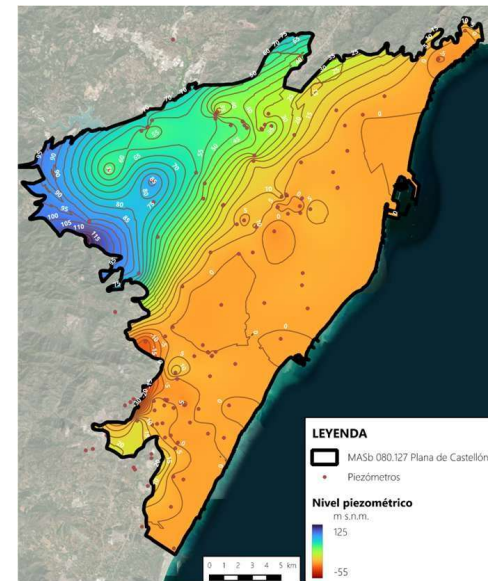


## Calibración estacionaria. Piezometría y gráfico de dispersión

**Piezometría**



Conceptual





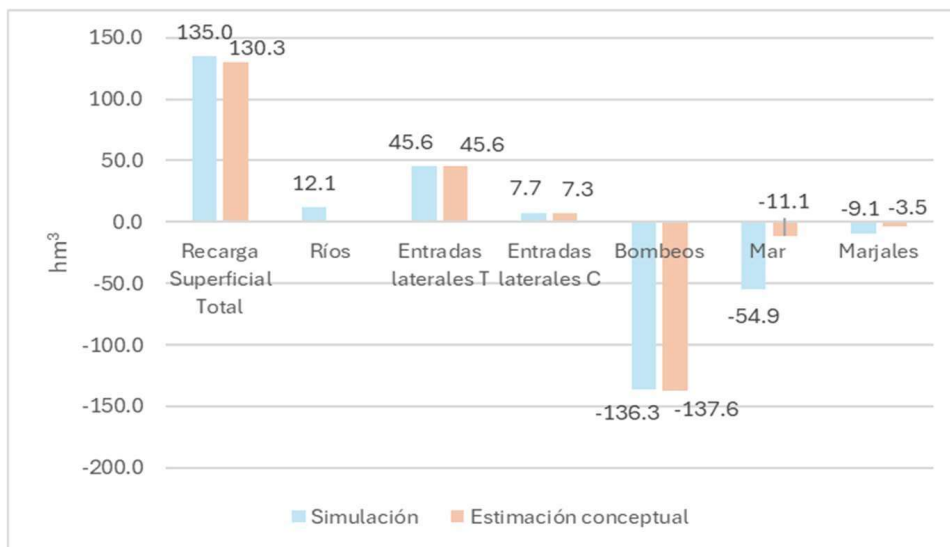
# Modelo numérico



Ajuntament de Castelló

**Facsa**  
ciclo integral del agua

## Calibración estacionaria. Balance



Conceptual	
Entradas	[195 - 210] hm <sup>3</sup> /año
Salidas	[151 - 212.5] hm <sup>3</sup> /año

Simulado	
Entradas	207.77 hm <sup>3</sup> /año
Salidas	207.77 hm <sup>3</sup> /año

# Cálculo de perímetros de protección

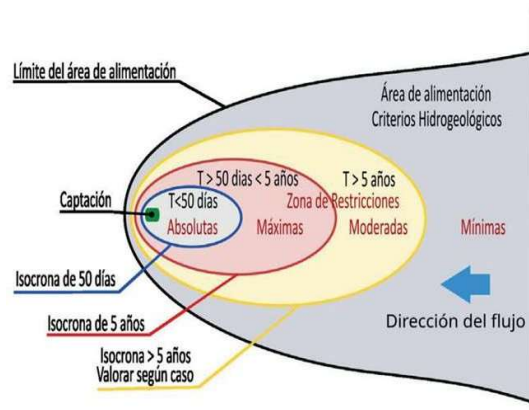


Ajuntament de Castelló

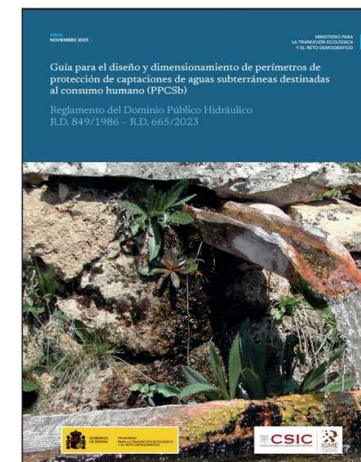
**Facsa**  
ciclo integral del agua

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

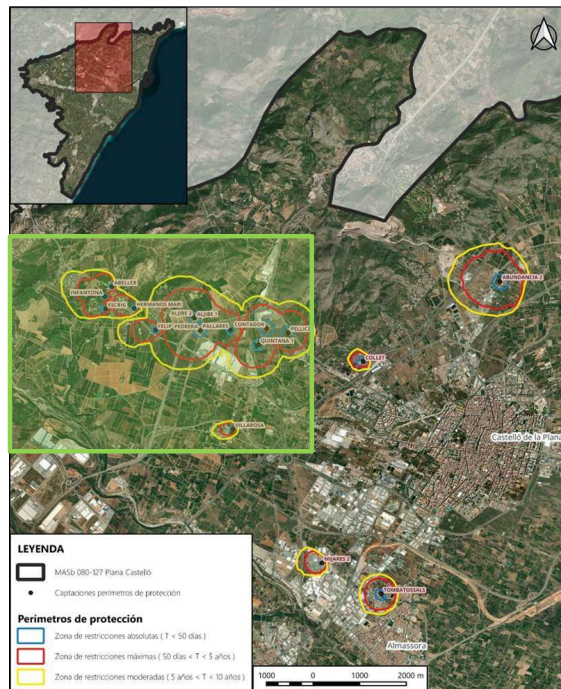


Ajuntament de  
Castelló

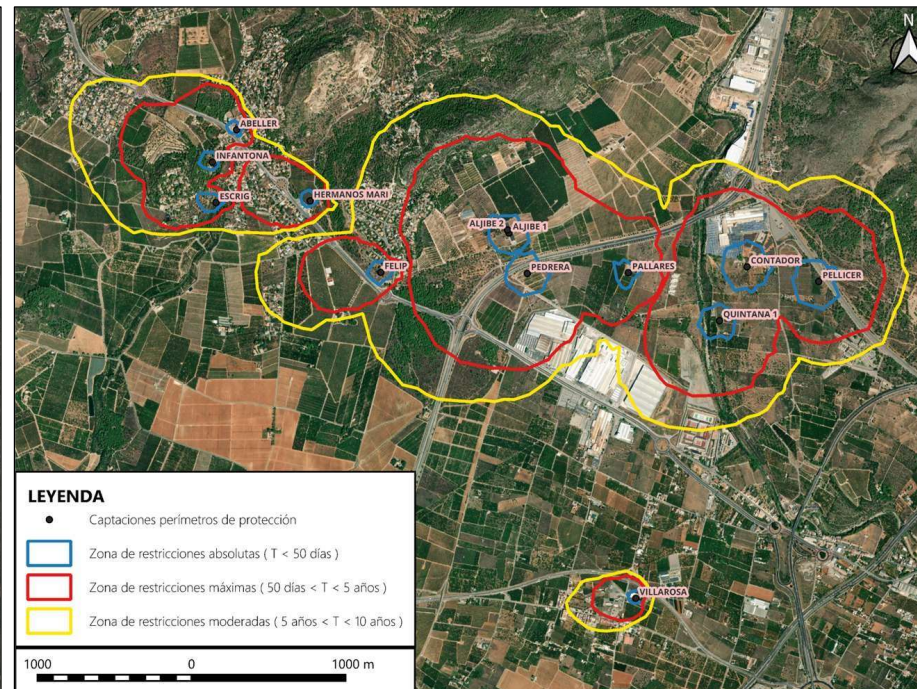
**Facsa**  
ciclo integral del agua

Resultados obtenidos en el modelo numérico

General



Detalle



# Conclusiones



Ajuntament de  
Castelló

**Facsa**  
ciclo integral del agua



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

## SINARCIA



Financiado por  
la Unión Europea  
NextGenerationEU

