

# Modelització del cicle de l'aigua durant Episodis de Sequera

## Simulació amb Dinàmica de Sistemes

Pràctica de Simulació Contínua

Insight Maker - Sistemes Dinàmics

11 de novembre de 2025

- 1 Introducció: Insight Maker
- 2 Context: La Sequera a Catalunya
- 3 Marc Teòric: El Semàfor de la Sequera
- 4 Dades de Partida
- 5 Estructura del Model Base
- 6 Assumpcions del Model
- 7 Objectius de la Pràctica
- 8 Extensions del Model

# Què és Insight Maker?

## Eina de simulació en línia

- Modelització de sistemes dinàmics
- Interfície visual i intuitiva
- Gratuïta i accessible via web
- Ideal per a prototipatge ràpid

## Característiques clau

- Stocks: Acumuladors (nivells)
- Flows: Fluxos entre stocks
- Converters: Variables calculades
- Links: Connexions causals

*Permet modelar bucles de retroalimentació i comportaments no lineals*

# La Problemàtica: Sequera 2022-2023

## Context

Catalunya pateix episodis recurrents de sequera que amenaçen:

- L'abastament urbà d'aigua potable
- L'agricultura i la indústria
- Els ecosistemes fluvials

## Mesures de gestió disponibles

- ① **Restriccions de consum** (obligatòries i voluntàries)
- ② **Dessalinitzadores** (El Prat i Tordera)
- ③ **Regeneració d'aigües residuals**
- ④ **Transvasaments** entre conques

# El Semàfor de la Sequera de l'ACA

Escenari	% Embassament	Estalvi Forçat	Color
Normalitat	> 60%	0%	Blau
Prealerta	40 – 60%	0%	Verd
Alerta	25 – 40%	12%	Groc
Excepcionalitat	16 – 25%	20%	Taronja
Emergència	< 16%	40%	Vermell

Taula: Llindars oficials i restriccions per escenari

## Nota

Els percentatges d'estalvi són sobre el consum habitual

# Equacions bàsiques del sistema

## Balanç de massa dels embassaments

$$\frac{dV_{\text{emb}}}{dt} = Q_{\text{aport}} - Q_{\text{desemb}} \quad (1)$$

on  $V_{\text{emb}}$  és el volum embassat,  $Q_{\text{aport}}$  les aportacions naturals i  $Q_{\text{desemb}}$  el desembassament.

## Consum efectiu

$$Q_{\text{consum}} = Q_{\text{base}} \cdot (1 - r_{\text{forçat}}) \cdot (1 - r_{\text{voluntari}}) \quad (2)$$

on  $r_{\text{forçat}}$  és la restricció oficial i  $r_{\text{voluntari}}$  l'estalvi voluntari.

## Cabal del riu

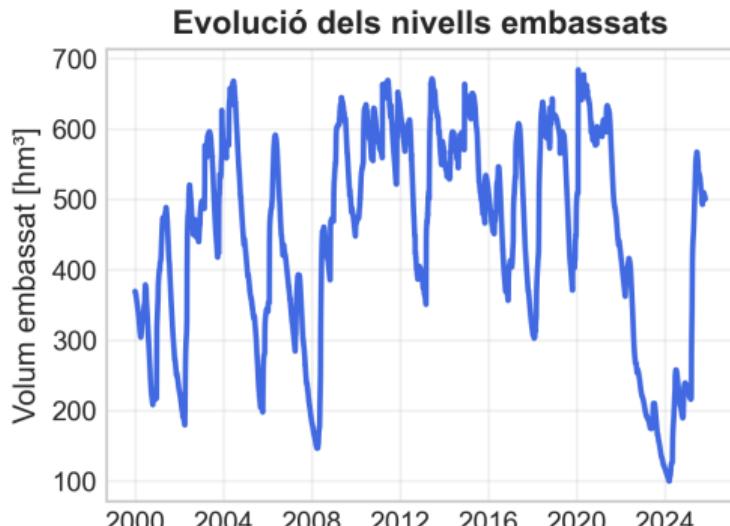
$$Q_{\text{riu}} \equiv Q_{\text{desemb}} = \max(Q_{\text{eco}}, Q_{\text{eco}} + Q_{\text{consum}} - Q_{\text{dessal}} - Q_{\text{regen}}, Q_{\text{vessament}}) \quad (3)$$

on  $Q_{\text{eco}}$  és el cabal ecològic mínim,  $Q_{\text{dessal}}$  la dessalinització i  $Q_{\text{regen}}$  la reutilització d'aigua.

# Dades Disponibles

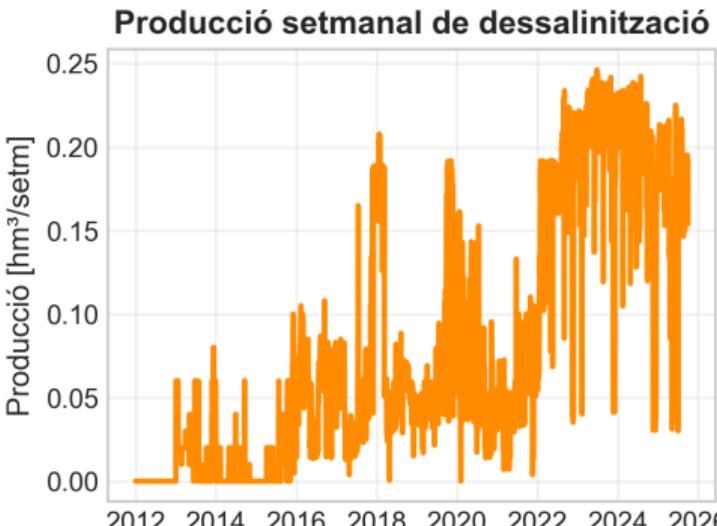
## Dades històriques setmanals

- Volum embassat total [ $\text{hm}^3$ ]
- Aportacions totals [ $\text{hm}^3/\text{setm}$ ]
- Producció dessalinitzadores [ $\text{hm}^3/\text{setm}$ ]
- Període: 2000-2025

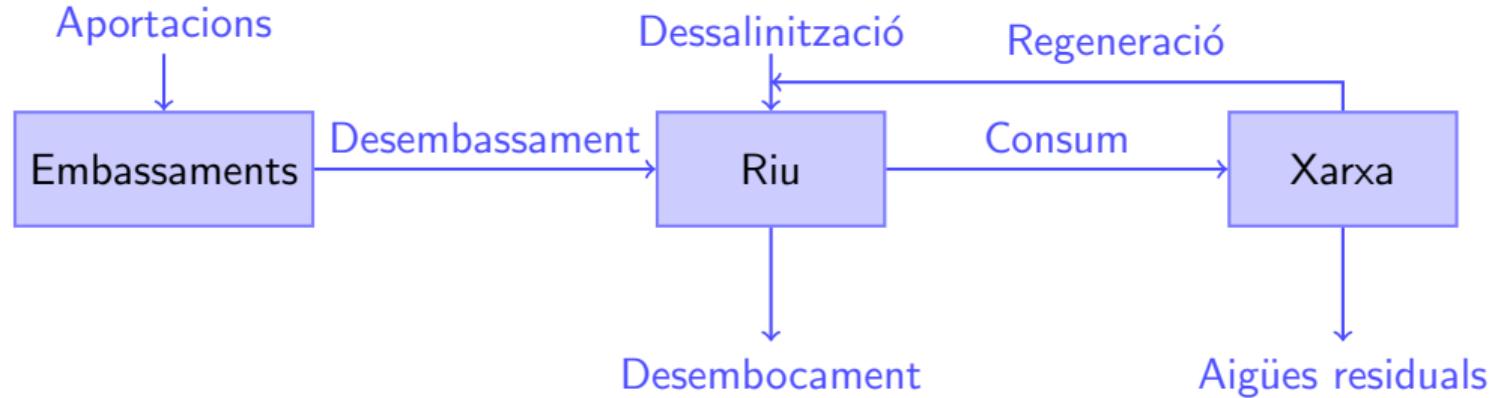


## Paràmetres del sistema

- Capacitat màxima:  $\sim 693 \text{ hm}^3$
- Consum setmanal estimat:  $14 \text{ hm}^3/\text{setm}$
- Dessalinització màxima:  $\sim 1.5 \text{ hm}^3/\text{setm}$
- Cabal mínim:  $3\text{hm}^3$  - Regen.  $1\text{hm}^3/\text{setm}$



# Diagrama Conceptual del Model



*Estructura bàsica: 3 stocks + fluxos controlats per nivell d'embassament i de consum*

# Components del Model

## STOCKS (Nivells)

- ① **Embassaments:** Volum agregat
- ② **Riu:** Buffer intermedi
- ③ **Xarxa:** Aigua distribuïda

## FLOWs (Fluxos)

- Aportacions naturals
- Dessalinització
- Desembassament
- Consum (domèstic, agrícola i industrial)
- Desembocament
- Aigües residuals

## VARIABLES & CONVERTERS

- Nivell embassat [%]
- Cabal ecològic o mínim [hm<sup>3</sup>/setm]
- Capacitat màxima [hm<sup>3</sup>]
- Dessalinització màxima [hm<sup>3</sup>/setm]
- Restriccions forçades
- Estalvi voluntari (Màxim 3.5%)  
 $f(ScarcityPerception, ReservoirLevelTrend)$

## INPUTS (Dades externes)

- Sèrie històrica d'aportacions
- Producció dessalinitzadores històrica
- Volum històric embassat

# Objectius de la Modelització

## Objectiu 1: Calibració i Validació

- Reproduir els nivells històrics d'embassament (2000-2024)
- Utilitzar dessalació històrica com a input
- Ajustar consum base, restriccions i paràmetres del model

## Objectiu 2: Mitigació cost/efectiva de les sequeres

- Implementar **3 bucles de retroalimentació negativa:**

- ① **Bucle 1:** Nivell baix → Activació dessalinitzadores → Menys desembassament
- ② **Bucle 2:** Nivell baix → Restriccions + Percepció → Menys consum
- ③ **Bucle 3:** Nivell alt → Vessaments controlats → Més desembassament
- ④ Ajustar restriccions (intensitat i llindars) i gestió de vessaments
- ⑤ Configurar gestió dinàmica de la dessalinització i capacitat màxima.
- ⑥ Funció objectiu:

$$Cost\ Total = Estalvi \cdot 1500000 + Dessel. \cdot 400000 + Regen. \cdot 150000 + (Desal.\ Max - 1.5) \cdot 2000000$$

## Restriccions Forçades

Implementació esglaonada:

- Salts discrets
- Aplicació immediata

$$r_{forcat} = \begin{cases} 0\% & \text{si } V > 40\% \\ 12\% & \text{si } 25\% < V \leq 40\% \\ \vdots & \end{cases}$$

## Restriccions Voluntàries

Implementació *contínua*:

- Depèn de percepció d'escassetat
- Pot combinar nivell + tendència
- S'activa des de prealerta
- Pot modular-se per memòria social
  - Persisteix més enllà de les fases de sequera
  - Pot "oblidar-se" amb el temps

$$r_{vol} = \min(f(\text{level}, \text{trend}), M)$$

on  $M$  és la memòria social

# Experimentació: avaluant la solució

## Indicadors d'Avaluació Possibles

- Cost econòmic total (funció objectiu a minimitzar)
- Nombre de setmanes en alerta, excepcionalitat o en emergència (minimitzar)
- Volum mínim assolit (maximitzar)
- Estalvi total d'aigua (minimitzar)
- Desembassaments totals
- Grau d'utilització de les dessalinitzadores (factor de càrrega)

## Criteris de factibilitat

- El nivell dels embassaments ha de mantenir-se entre 0 y 100:  $V \in (0, 100)$
- Els compartiments *Riu* i *Xarxa* han de mantenir-se estables.
- El volum de regeneració ha de ser inferior al consum (Mantindreu màxim 1hm<sup>3</sup>/setm)

# Possibilitats d'Expansió i Millora

## 1. Desagregació Geogràfica: Sistema Ter-Llobregat

- **2 stocks:** Volum Ter + Volum Llobregat
- Aportacions específiques per cada conca (50% Ter, 40% Llobregat, 10% Muga i altres)
- Desagregació de Dossalitzadores → El Prat (Llobregat) i Tordera (Ter)
- **Transvasament Ter → Llobregat** (capacitat limitada)
- Restriccions independents per cada sistema / Aportacions post desembassament
- Demanda amb variabilitat estacional (més alta a l'estiu)

## 2. Desagregació per Embassaments Individuals

### Sistema Ter

- Sau
- Susqueda

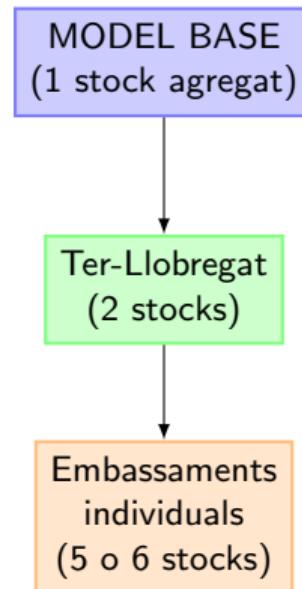
### Sistema Llobregat

- La Baells
- Sant Ponç
- La Llosa del Cavall

### Sistema Muga

- Darnius-Boadella

# Diagrama de Millora Progressiva



**Príncipi de modelització:** Començar simple, validar, incrementar complexitat