

## **AQUIFER PROJECT: “Innovative instruments for an integrated management of groundwater in a context of an increasing scarcity of hydrological resources”**

### **PRODUCTO DEL PROYECTO:**

#### **P2.4. “Herramienta de apoyo al análisis integrado de soluciones innovadoras de gestión de recursos hídricos mediante métodos probabilísticos”**

*Fecha: 17/04/2023*

**Documento elaborado por el Beneficiario Principal**



## CONTENIDO

<b>1. Introducción .....</b>	<b>2</b>
<b>2. Desarrollo.....</b>	<b>3</b>

# 1. Introducción

El proyecto Interreg Sudoe AQUIFER titulado "Herramientas innovadoras para la integración de las aguas subterráneas en un contexto de creciente escasez de recursos hídricos", está financiado por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER) en el marco del programa Interreg SUDOE V (2014-2020). Su principal objetivo es capitalizar, probar, difundir y transferir prácticas innovadoras para la preservación, el seguimiento y la gestión integrada de los acuíferos que sean útiles a la hora de tomar decisiones sobre la gestión de los recursos hídricos subterráneos. Para lograr este objetivo, el proyecto se divide en 4 grupos de tareas específicas que agrupan 15 tareas concretas con 25 entregables y 10 productos. Por otro lado, el proyecto incluye tres grupos de tareas transversales que agrupan 17 tareas concretas.

El presente documento se refiere al **Producto 2.4 “Herramienta de apoyo al análisis integrado de soluciones innovadoras de gestión de recursos hídricos mediante métodos probabilísticos”**.

## 2. Desarrollo

Para atender al objetivo principal de generar herramientas de ayuda en la toma de decisiones, se ha desarrollado completamente un Sistema de Apoyo a la Decisión (SAD) basado en Redes Bayesianas Orientas a Objetos (OOBNs), específicamente diseñado para el sistema acuífero del Campo de Cartagena (Fig 1). Se han construido además otros tres SADs para los correspondientes tres casos de estudio que incluye el proyecto Interreg-Sudoe AQUIFER. Dichos SADs tienen una naturaleza cualitativa y la simulación de sus escenarios de gestión pueden ayudar a la futura toma de decisiones de intervenciones de gestión a implementar.

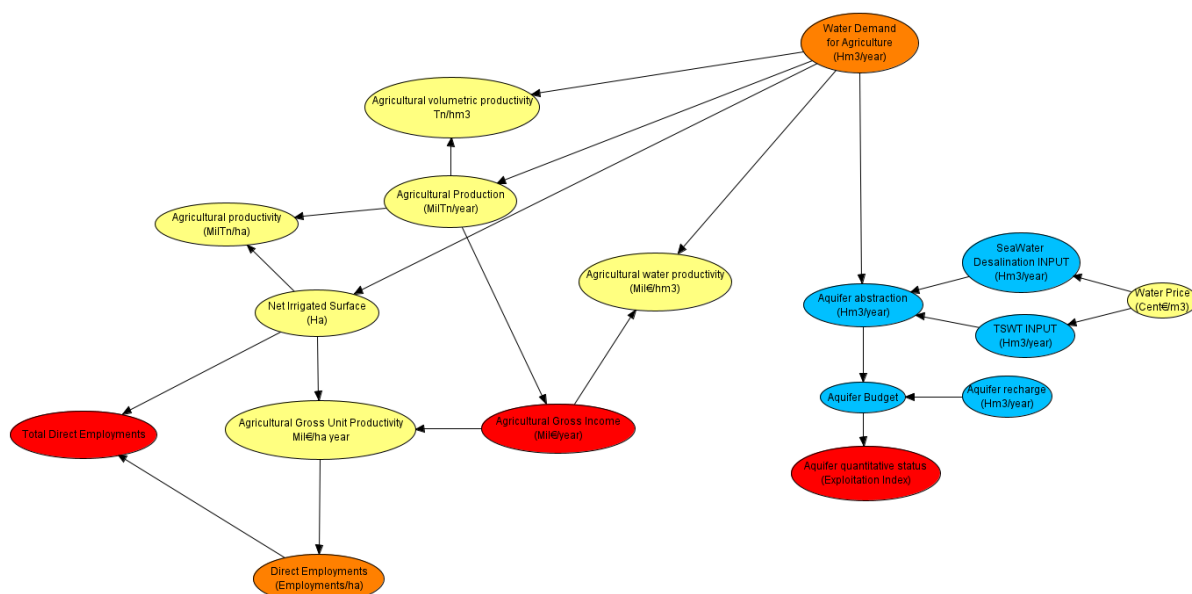


FIGURA 1. SISTEMA DE APOYO A LA DECISIÓN BASADO EN REDES BAYESIANAS ORIENTAS A OBJETOS

El SAD del acuífero Cuaternario del Campo de Cartagena basado en BNs está formado por 17 variables o nodos interrelacionados. Dichas variables se han agrupado en cuatro categorías en función de tres bloques temáticos y de si representan objetivos finales del estudio. Se sintetizan en la Tabla 1; hidrológicas (color azul), económicas (color amarillo),

sociales (color naranja) y objetivos finales del sistema (color rojo). Las siguientes tablas, de la 2 a 18 recogen las variables con sus estados.

**TABLA 1. VARIABLES INVOLUCRADAS EN EL SAD BASADO EN OOBNS**

GRUPO	NOMBRE	EXPLICACIÓN
1. Hidrológicas	SeaWater Desalination INPUT (Hm <sup>3</sup> /year)	INPUT de agua desalada al sistema, en Hm <sup>3</sup> /año
	TSWT INPUT (Hm <sup>3</sup> /year)	INPUT de agua del Trasvase Tajo-Segura al sistema, en Hm <sup>3</sup> /año
	Aquifer recharge (Hm <sup>3</sup> /year)	INPUT de agua al acuífero por recarga anual en Hm <sup>3</sup> /año
	Aquifer abstraction (Hm <sup>3</sup> /year)	Extracción anual de agua del acuífero en Hm <sup>3</sup> /año
	Aquifer Budget (Hm <sup>3</sup> /year)	Balance hídrico del acuífero en Hm <sup>3</sup> /año.
2. Sociales	Water Demand for Agriculture (Hm <sup>3</sup> /year)	Demanda hídrica para agricultura en Hm <sup>3</sup> /año
	Direct Employments (Employments/ha)	Número de empleos directos generados en agricultura por hectárea
3. Económicas	Water Price (Cent€/m <sup>3</sup> )	Precio del agua en céntimos de € por m <sup>3</sup>
	Agricultural water profitability (Mil€/hm <sup>3</sup> )	Rentabilidad agrícola del agua
	Agricultural volumetric productivity (Tn/hm <sup>3</sup> )	Productividad volumétrica agrícola
	Agricultural Production (MilTn/year)	Producción agrícola
	Agricultural productivity (MilTn/ha)	Producción agrícola por hectárea
	Net Irrigated Surface (Ha)	Área de regadío en hectáreas
	Agricultural Gross Unit Income (Mil€/ha year)	Renta bruta agrícola por hectárea
5. Objetivos finales	Aquifer quantitative status (Exploitation Index)	Índice de Explotación (IE) de la MASb
	Agricultural Gross Income (Mil€/year)	Renta agrícola bruta en millones de €
	Total Direct Employments	Número de empleos directos generados por la actividad agrícola

El SAD está dividido en 4 grandes grupos en función de la naturaleza temática de las variables involucradas. El primer grupo lo forman las variables socioeconómicas, el segundo grupo es el hidrológico, representan el balance hídrico del sistema; el tercero las variables sociales y, por último, las variables objetivo. En cuanto a tipo de variables en función de su

dependencia/independencia, las variables “padre” (independientes) son “Water Demand for agriculture” y “Water Price”.

Los escenarios de gestión hídrica contemplados son los siguientes:

- Escenario 1. Business as usual (BAU)
- Escenario 2. Maximización del precio del agua
- Escenario 3. Minimización del precio del agua
- Escenario 4. Maximización de la demanda hídrica para regadío
- Escenario 5. Minimización de la demanda hídrica para regadío
- Escenario 6. Maximización de la demanda hídrica para industria
- Escenario 7. Minimización de la demanda hídrica para industria
- Escenario 8. Maximización de la demanda hídrica para uso doméstico
- Escenario 9. Minimización de la demanda hídrica para uso doméstico

Los resultados obtenidos pueden permitir orientar las políticas agrarias y de gestión del agua y más concretamente de los acuíferos involucrados. De esta forma, la hibridación de Sistemas de Apoyo a la Decisión junto con desarrollos predictivos más específicos y de detalle, es un campo de la Hidrología que está actualmente en auge. Esto se produce gracias a las técnicas pertenecientes al campo de la Inteligencia Artificial como es el caso de la técnica de Redes Bayesianas, entre otras.

En el caso del caso de estudio del Campo de Cartagena, para el escenario BAU, los principales valores de las variables más importantes reflejan un valor de 0.35 empleos por hectárea, una renta agraria media de unos 4444 mil€/ha, una producción agrícola de 486 milTn/ha, así como una renta agraria bruta de 167320 mil€/año, una demanda hídrica para agricultura de 145 hm<sup>3</sup>/año, con un valor de Índice de Explotación, del estado cuantitativo del acuífero de 0.63. Para el escenario 2 (Maximización del precio del agua), se aprecia un aumento del Índice de Explotación a 0.74, y para el escenario 3 (Minimización del precio del agua), se aprecia una disminución a 0.52. Para el escenario 4 de Maximización de la demanda hídrica para regadío, se obtiene un N<sup>o</sup> de Empleos de 0.39, por hectárea, una Renta Agraria media de 6250 mil €/ha, una Producción Agrícola de 700 milTn/ha, una Renta agraria bruta de 250000 mil€/año, un Estado cuantitativo del acuífero con un Índice de Explotación

de 0.52. Para el escenario 5 de Minimización de la demanda hídrica para regadío, se obtiene un N° de Empleos de 0.35 por hectárea, una Renta Agraria media de 4210 mil €/ha, una Producción Agrícola de 440 milTn/ha, una Renta agraria bruta de 150400 mil€/año, y un Estado cuantitativo del acuífero de 0.52.

Además, para atender a los objetivos secundarios planteados en la oferta, se ha considerado necesario realizar un desarrollo muy potente de modelización causal. En este sentido, el análisis de las relaciones causales de los procesos hidrológicos es un campo muy inexplorado. Está aún menos investigado el uso de la modelización del Razonamiento Causal para el estudio de los procesos hidrodinámicos de las aguas subterráneas. En este caso, el objetivo es analizar y modelar la relación del binomio Precipitación-Piezometría. Para ello, se ha captado, analizado e interpretado la causalidad inherente contenida en los registros de datos temporales. Esto se ha hecho mediante el Razonamiento Causal Bayesiano que es una técnica perteneciente a la Inteligencia Artificial basada en el Teorema Bayesiano. Los datos de precipitaciones y niveles de agua subterránea (piezometría) se han tomado en registros de datos horarios. La herramienta/producto se llama AquiferLevel\_PredicT y ha sido publicada en la siguiente publicación (Molina y García-Aróstegui, 2022).

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969723001079>

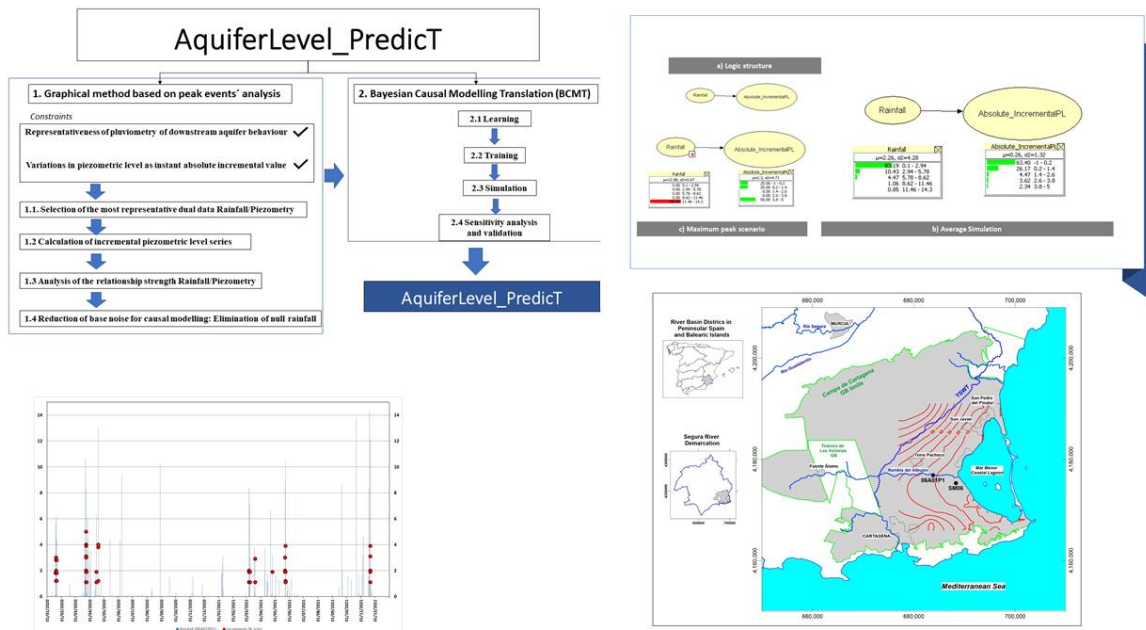
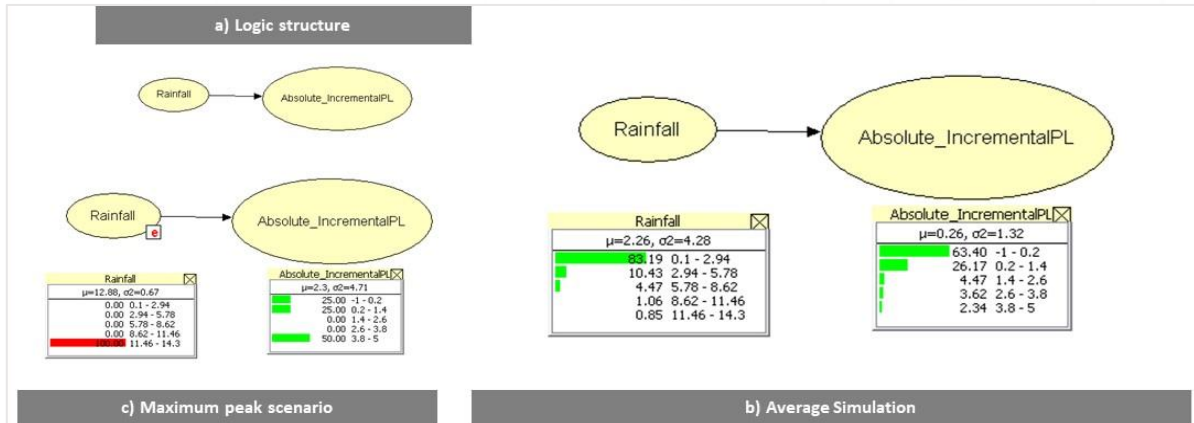


FIGURA 2. AQUIFERLEVEL\_PREDICT (MOLINA Y ARÓSTEGUI, 2022)

El aprendizaje se realizó de forma automática a través de un asistente de aprendizaje implementado en HUGIN® Expert versión 8.9 (HUGIN 2021). El aprendizaje comprendió dos series de datos "Rainfall" y "Absolute\_IncrementalPL", una serie por cada variable involucrada en este modelo. Ambas series fueron discretizadas en cinco intervalos y luego, en la fase de restricción de estructura, se conectan desde el nodo "precipitación" (padre) hasta el nodo "escorrentía" que es el hijo. La fase de entrenamiento se desarrolló con la parte inicial de la serie (720 horas) y luego se comparó con el ajuste gráfico desarrollado en la fase 1 y la experiencia del acuífero de los expertos.

El evento simulado comprendía 17544 horas de datos que representaban la máxima precipitación del año con 9 mm (l/m<sup>2</sup>h). Como ya se ha dicho, el nodo "Precipitación" se discretizó en cinco intervalos de igual rango: 0,1-2,94 mm/h; 2,94-5,78 mm/h; 5,78-8,62 mm/h; 8,62-11,46 mm/h; 11,46-14,3 mm/h. Los resultados muestran un comportamiento muy similar con el ajuste gráfico y matemático. En este sentido, la probabilidad media de incremento del nivel piezométrico es de 0,26 cm/h mientras que en el pico máximo es de 2,3 cm/h (Fig. 11).





**FIGURA 3. A) ESTRUCTURA LÓGICA DEL MODELO CAUSAL BIVARIANTE B) SIMULACIÓN DE LA MEDIA C) SIMULACIÓN DEL EVENTO MÁXIMO. FUENTE: HUGIN EXPERT. VERSIÓN 8.9**

Este documento ha sido desarrollado bajo la dirección de Dr. José Luis García Aróstegui, científico titular del CN IGME-CSIC y responsable del proyecto.