



Título del Trabajo Fin de Máster:

***REDES BAYESIANAS PARA EL  
ANÁLISIS INTEGRADO DE LA  
GESTIÓN DE SISTEMAS DE  
RECURSOS HÍDRICOS. APLICACIÓN  
A LA CUENCA DEL RÍO JÚCAR.***

Intensificación:

***ORDENACIÓN, GESTIÓN Y RESTAURACIÓN DE CUENCAS***

Autor:

***BARBERO GARCÍA, ANA MARÍA***

Director/es:

***DR. PULIDO VELÁZQUEZ, MANUEL***

***DR. MOLINA GONZÁLEZ, JOSÉ LUIS***

Fecha: ***MARZO, 2012***



Título del Trabajo Fin de Máster:  
*REDES BAYESIANAS PARA EL ANÁLISIS INTEGRADO DE LA GESTIÓN  
DE SISTEMAS DE RECURSOS HÍDRICOS. APLICACIÓN A LA CUENCA  
DEL RÍO JÚCAR*

Autor: *BARBERO GARCÍA, ANA MARÍA*

<b>Tipo</b>	A <input type="checkbox"/> B <input checked="" type="checkbox"/>	<b>Lugar de Realización</b>	<b>VALENCIA</b>
<b>Director</b>	<b>MANUEL PULIDO VELÁZQUEZ</b>	<b>Fecha de Lectura</b>	<b>MARZO, 2012</b>
<b>Codirector1</b>	<b>JOSÉ L. MOLINA GONZÁLEZ</b>		
<b>Codirector2</b>			
<b>Tutor</b>			

RESUMEN

La gestión de Sistemas de Recursos Hídricos (SRH) frecuentemente implica el planteamiento de múltiples objetivos en conflicto y la toma de decisiones bajo condiciones de incertidumbre. Debido a la diversidad de intereses en los procesos de toma de decisiones, la gestión integrada es la clave del desarrollo sostenible de los recursos hídricos, ya que conlleva evaluar el impacto de una determinada estrategia de gestión teniendo en cuenta consideraciones ambientales, sociales, económicas y políticas entre otras, mediante un proceso participativo de toma de decisiones.

De esta forma, los Sistemas de Apoyo a la Decisión (SAD) permiten evaluar los impactos generados por diversas políticas o intervenciones de gestión encaminados a la resolución o mitigación de problemas relacionados con los recursos hídricos. En este estudio se presenta una metodología para analizar el comportamiento de un sistema de recursos hídricos a escala de cuenca bajo diferentes escenarios hidrológicos y de una política de gestión.

La metodología que aquí se propone tiene como objetivo el diseño de un SAD mediante el uso combinado de modelos de redes de flujo de simulación (Aquatool) y un sistema experto probabilístico (redes bayesianas). Se pretende estudiar formas eficientes de cuantificar y comunicar los impactos de las propuestas de gestión de SRH, mediante el uso combinado de herramientas de simulación y de tratamiento de incertidumbre (redes bayesianas), que faciliten la toma de decisiones y fomenten la capacidad participativa de los grupos implicados.



De esta forma, se incorpora el enfoque determinístico mediante la simulación y optimización de procesos de gestión de SRH a escala de cuenca (Aquatool) y el enfoque probabilístico de las redes bayesianas para el tratamiento de la incertidumbre. Para ello se identificaron medidas evaluación del rendimiento de un SRH y de incorporación de la incertidumbre en la gestión/planificación, analizando diversos indicadores de garantía, resiliencia, vulnerabilidad y sostenibilidad.

El caso de estudio es la cuenca del Río Júcar, ha sido simulado mediante el modulo SIMGES de Aquatool, tanto con series históricas como con series sintéticas generadas estocásticamente (análisis Monte Carlo) para un escenario base y un escenario de aplicación de medidas de gestión.

Mediante el uso de redes bayesianas, se realizó el posproceso de los resultados de las simulaciones evaluando probabilísticamente la influencia de la aportación anual previa y el volumen inicial de los embalses de cabecera sobre los estados de satisfacción de las demandas del sistema.

De esta forma, se entrega al gestor un modelo con los posibles escenarios hidrológicos previos (aportaciones anuales y volumen final en los embalses de cabecera) y los análisis de indicadores de comportamiento para los escenarios base y de aplicación de medida. A partir de las condiciones observadas del año previo, se conocerán las probabilidades de satisfacción de la demanda en el año de gestión según análisis de serie histórica o bien mediante series sintéticas.

Adicionalmente, si en la toma de decisiones se plantea la incorporación de una medida, el gestor podrá tomar decisiones basado en las diferencias probabilísticas resultantes de la introducción o no de dichas medidas y en el cambio del comportamiento de sus indicadores.

## SUMMARY

The difficulties of environmental management in general and water resource management in particular, involves many conflicting interests and the uncertainty surrounding the potential impacts of different strategies, for this reason water managers face the challenge of how best to manage the resource. The main idea of Integrated Water Resource Management (IWRM) it's not to simply evaluate the impact of a particular strategy on the water resource alone, also take into account any social, economic, environmental or cultural effects the policy may have. The decisions must involve the participation of members of the community affected by the strategy (stakeholders).

In this context, a Decision Support System (DSS) that enables decision makers to



simultaneously evaluate the impacts of optional strategies over a wide range of factors. In this thesis is presented a methodology to evaluate the behavior of a Water resource System at river basin level under hydrological and management conditions combining simulation tools and Bayesian networks.

This tool allows the integration of knowledge obtained from Simulation models such as Aquatool, providing a scientifically based approach to water resources planning at river basin level, and Bayesian Networks (BNs) assessing the uncertainties associated with hydrological inputs, parameters and model structural uncertainties.

They can be built with the participation of stakeholders, and have BNs explicitly take into account and openly represent uncertainty in decision making and they offer the opportunity to couple networks with other types of model.

Jucar's River Basin Simulation Model was simulated by SIMGES (a tool of Aquatool), under historical and naturalized stream flow series and stochastically generated series, for the initial scenario and the management scenario.

Data obtained from simulation scenarios was post processed with BNs tool (HUGIN), identifying the state of sub-groups of variables (volumetric reliability of the demand elements) given the states of other variables on which the sub-group is dependant (previous upper basin stream flow series and Reservoir final volume).

Combining those tools the model could be used as a method able to structure participation and decision making. The goal is to provide information about the impact of diverse hydrological and proposed strategies conditions, by giving to the water manager the probabilistic inference of the initial conditions at the beginning of the hydrological year and the proposed strategy in the amount of water deliver to the end users.

## RESUM

En la gestió de Sistemes de Recursos Hídrics (SRH) s'involucren múltiples objectius, ben sovint en conflicte i s'han d'assumir decisions en condicions d'alta incertesa. A causa de la diversitat d'interessos en els processos de presa de decisions, la gestió integrada és la clau del desenrotllament sostenible dels recursos hídrics, ja que considera avaluar l'impacte d'una determinada estratègia de gestió, i addicionalment té en compte consideracions ambientals, socials, econòmiques i polítiques entre altres, per mitjà d'un procés participatiu de presa de decisions.

En este context, els Sistemes de Suport a la Decisió (SAD) permeten avaluar els impactes de diverses estratègies proposades davant dels problemes relacionats als recursos



hídric. En este estudi es presenta una metodologia per a analitzar el comportament d'un sistema de recursos hídic a escala de conca davall diferents escenaris hidrològics i de mesures combinant l'ús de SAD com a models de simulació (Aquatool) i sistemes experts probabilístics (xarxes bayesianas).

D'esta manera, s'incorpora l'enfocament científic de la simulació i optimització de processos de gestió de SRH a escala de conca (Aquatool) i l'enfocament probabilístic de les xarxes bayesianas per al tractament de la incertesa. Adicionalment es va analitzar el comportament mitjà del sistema amb indicadors de garantia, resiliència, vulnerabilitat i sostenibilitat.

El Model de Simulació del Riu Xúquer va ser simulat en el module SIMGES d'Aquatool, amb sèries històriques i sèries sintètiques generades estocàsticament per a un escenari base i un escenari d'aplicació de mesures de gestió.

Per mitjà de l'ús de xarxes bayesianas, es va realitzar el postprocés d'informació de les simulacions avaluant probabilísticament la influència de l'aportació anual prèvia i el volum inicial dels embassaments de capçalera, sobre els estats de satisfacció de les demandes del sistema.

D'esta manera s'entrega al gestor un model amb els possibles escenaris hidrològics previs (aportacions anuals i volum final en els embassaments de capçalera) i les anàlisis d'indicadors de comportament per als escenaris base i d'aplicació de mesura.

A partir de la selecció de les condicions observades de l'any de gestió, es coneixeran els riscos d'augmentar la probabilitat d'estats No Satisfactoris de les demandes en l'escenari base. Adicionalment, si en la presa de decisions es planteja la incorporació d'una mesura, el gestor podrà prendre decisions basat en les diferències probabilístiques resultants de la introducció o no de les dites mesures i en el canvi del comportament dels seus indicadors.

**Palabras clave:**

***Gestión de Recursos Hídricos / Análisis Monte Carlo / Redes Bayesianas / Garantía de suministro /***

---

*A Antonio, Melba, Margarita & María Paula,  
a Iván Dussán, a la tía Satur & al tío Julio,  
con mucho cariño,  
por ser mis principales motivadores.*

---

## AGRADECIMIENTOS

Al niño Jesús y a la virgen, por ser mi sustento espiritual en esta etapa, por llenarme de fuerza y de confianza.

A Colfuturo Colombia, por la financiación parcial de mis estudios de maestría, mediante la concesión de una beca-crédito.

A la Universidad Nacional de Colombia, porque gracias a la formación que me brindó he logrado otro objetivo de mi carrera profesional.

A la Universidad Politécnica de Valencia, especialmente al Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente, por acogerme durante estos años.

A mis directores de tesis, Dr. Manuel Pulido y Dr. José Luis Molina, por su apoyo y enseñanzas, y por su colaboración para la entrega de la TFM dentro de los plazos acordados.

A Secretaría Académica del Máster, en especial a Javier Montalvo por su asesoría en temas de normativa para la entrega de la Tesina.

A mis amigos del Máster de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente por hacer de la maestría y de la estadía en Valencia una experiencia tan linda. En especial a las chic@s de Darcy: Lina, Ainhoa, Aranzazu, Eva, Karime, María, Ana Lía, Ale, Ruy, Luis y Chucho.

A la familia Barbero por el amor con el que me acogió en tierras españolas, en especial a Satur por ser una amiga y una valiosa compañía.

A mi familia en Colombia, por su interés en mis proyectos de vida, por su apoyo y por su amor eterno e incondicional. En especial a mis papás Melba y Antonio, mis hermanas Margarita y María Paula, mis tías Marta, Is y Myriam, Carlos y Laurita.

A Iván por su amor sin fronteras, por su apoyo y motivación, y por hacer que lo quiera cada día más.

## TABLA DE CONTENIDO

<b>AGRADECIMIENTOS .....</b>	<b>ii</b>
<b>TABLA DE CONTENIDO .....</b>	<b>iii</b>
<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>vii</b>
<b>LISTA DE TABLAS .....</b>	<b>x</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS .....</b>	<b>1</b>
1.1. INTRODUCCIÓN .....	1
1.2. OBJETIVOS.....	3
1.2.1. Objetivos generales.....	3
1.2.2. Objetivos específicos.....	3
1.3. MARCO ADMINISTRATIVO Y LEGAL.....	4
1.3.1. Comunidad Europea.....	4
1.3.2. Confederación Hidrográfica del Júcar (CHJ).....	5
1.3.3. Sistema Júcar.....	7
1.4. METODOLOGÍA .....	11
1.4.1. Escenarios de simulación .....	12
1.4.2. Análisis de Indicadores de comportamiento del sistema.....	14
1.4.3. Análisis probabilístico .....	14
1.4.4. Comparación .....	14

<b>2.</b>	<b>ESTADO DEL ARTE. MÉTODOS Y HERRAMIENTAS .....</b>	<b>16</b>
2.1.	GESTIÓN DE SISTEMAS DE RECURSOS HÍDRICOS MEDIANTE SISTEMAS DE APOYO A LA DECISIÓN (AQUATOOL) .....	16
2.2.	ANÁLISIS PROBABILÍSTICO CON EL USO DE REDES BAYESIANAS (HUGIN) .....	18
2.2.1.	Teoría de las Redes Bayesianas .....	19
2.2.2.	Componentes .....	21
2.2.3.	Redes Bayesianas Orientadas a Objetos (OOBNs) .....	21
2.2.4.	Software .....	23
2.3.	ANÁLISIS DE RESPUESTA DE SUMINISTROS CON INDICADORES DE COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA .....	23
2.3.1.	Sostenibilidad .....	24
2.3.2.	Límites de Confianza .....	26
2.3.3.	Garantía Volumétrica anual .....	27
2.4.	GENERACIÓN DE SERIES ESTOCÁSTICAS .....	29
<b>3.</b>	<b>CASO DE ESTUDIO: CUENCA DEL RÍO JÚCAR.....</b>	<b>34</b>
3.1.	DESCRIPCIÓN SISTEMA DEL RÍO JÚCAR.....	34
3.1.1.	Características generales .....	34
3.1.2.	Red fluvial.....	35
3.1.3.	Demandas .....	36
3.1.4.	Uso Agrícola .....	37
3.1.5.	Uso Urbano .....	39
3.1.6.	Uso Industrial.....	40

REDES BAYESIANAS PARA EL ANÁLISIS INTEGRADO DE LA GESTIÓN DE SRH.  
APLICACIÓN A LA CUENCA DEL RÍO JÚCAR

---

3.2.	DESCRIPCIÓN DE PROBLEMAS .....	41
3.2.1.	Cumplimiento de garantías .....	41
3.2.2.	Implementación de Medidas Traspase Júcar Vinalopó .....	41
3.3.	MODELO DE SIMULACIÓN .....	44
3.3.1.	Esquema de simulación del sistema Júcar .....	44
3.3.2.	Series de datos.....	47
3.3.3.	Variables de análisis.....	47
3.3.4.	Reglas de operación.....	53
3.3.5.	Información Económica para el análisis de beneficio.....	55
<b>4.</b>	<b>GENERACIÓN DE ESCENARIOS DE SIMULACIÓN.....</b>	<b>62</b>
4.1.	ESCENARIOS CON SERIES SINTÉTICAS .....	62
4.1.1.	Generación de series sintéticas.....	62
4.1.2.	Simulación de escenarios con series sintéticas en Aquatool .....	<del>7069</del>
4.2.	ESCENARIO CON MEDIDAS (TJV) .....	<del>7170</del>
<b>5.</b>	<b>ANÁLISIS DE INDICADORES DE GARANTÍA.....</b>	<b><del>7372</del></b>
5.1.	ANÁLISIS ESCENARIO BASE.....	<del>7372</del>
5.1.1.	Serie Histórica .....	<del>7372</del>
5.1.2.	Series Sintéticas.....	<del>7978</del>
5.2.	ANÁLISIS DEL SISTEMA CON Y SIN TRASVASE.....	<del>8887</del>
5.2.1.	Series Históricas.....	<del>8887</del>
5.2.2.	Series Sintéticas.....	<del>9594</del>

<b>6. MODELO DE REDES BAYESIANAS PARA EL ANÁLISIS</b>	
<b>PROBABILÍSTICO .....</b>	<b><u>9897</u></b>
6.1. PRUEBAS DE DEPENDENCIA .....	<u>9897</u>
6.2. ANÁLISIS PROBABILÍSTICO .....	<u>10099</u>
6.2.1. Garantías Volumétricas .....	<u>10099</u>
6.2.2. Beneficio Económico .....	<u>102101</u>
6.2.3. Comparación de resultados .....	<u>103102</u>
6.3. ANÁLISIS ESCENARIO BASE CON SERIE HISTÓRICA Y 30 SERIES SINTÉTICAS .....	<u>105104</u>
6.4. ANÁLISIS DEL SISTEMA CON Y SIN TRASVASE – PROBABILIDAD Y BENEFICIOS CON SERIE HISTÓRICA .....	<u>107106</u>
6.4.1. Probabilidad de garantía volumétrica anual de la demanda.....	<u>107106</u>
6.4.2. Beneficios Económicos.....	<u>110109</u>
6.5. ANÁLISIS EL SISTEMA CON Y SIN TRASVASE – 30 SERIES SINTÉTICAS <u>112111</u>	
6.5.1. Probabilidad de garantía volumétrica anual de la demanda.....	<u>112111</u>
6.5.2. Beneficios Económicos.....	<u>114113</u>
<b>7. SÍNTESIS Y CONCLUSIONES.....</b>	<b><u>117116</u></b>
<b>8. REFERENCIAS .....</b>	<b><u>120119</u></b>
<b>9. ANEXOS.....</b>	<b><u>124123</u></b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1	Proceso de identificación y selección de temas importantes ETI .....	6
Figura 2.1	Ejemplo de una Red Bayesiana Simple conformada por tres variables A, B y C.....	20
Figura 2.2	Cuartiles de la serie de Garantía Volumétrica anual.....	28
Figura 3.1	Sistema de explotación del Río Júcar (IIAMA 2006).....	34
Figura 3.2	Demarcación Hidrográfica del Júcar (CHJ, 2009).....	35
Figura 3.3	Masa de agua subterránea de la Mancha Oriental .....	38
Figura 3.4	Riegos del las riberas del Júcar (Ficha 4.01 ETI CHJ 2009) .....	39
Figura 3.5	Trasvase Júcar-Vinalopó (CHJ 2009).....	42
Figura 3.6	Esquema del modelo de simulación del Sistema Júcar implementado en SIMGES.....	46
Figura 3.7	Funciones económicas de demanda, déficit y coste de escasez (IIAMA 2006).....	55
Figura 3.8	Curva de demanda – Uso Agrícola MO .....	57
Figura 3.9	Curva de demanda – Uso Agrícola Cítricos-Hortalizas.....	58
Figura 3.10	Curva de demanda – Uso Agrícola Arrozales.....	59
Figura 3.11	Curva de demanda – Uso Urbano [Fuente: AHidroEco2006] .....	60
Figura 3.12	Curva de Demanda- Centrales Hidroeléctricas.....	61
Figura 3.13	Curva de Demanda- Central Nuclear.....	61
Figura 4.1	Autocorrelogramas de las series mensuales tipificadas y límites de test de Anderson.....	6766

REDES BAYESIANAS PARA EL ANÁLISIS INTEGRADO DE LA GESTIÓN DE SRH.  
APLICACIÓN A LA CUENCA DEL RÍO JÚCAR

---

Figura 4.2 Estadísticos series de aportaciones Alarcón y Contreras (Media) ..	<u>6867</u>
Figura 4.3 Estadísticos series de aportaciones Alarcón y Contreras (Desviación Típica).....	<u>6867</u>
Figura 4.4 Tramo final del esquema de simulación del sistema con la incorporación del Trasvase Júcar Vinalopó .....	<u>7271</u>
Figura 5.1 Indicadores para cálculo de sostenibilidad- Demanda Urbana en los Ríos - Escenario Base- Serie Histórica.....	<u>7473</u>
Figura 5.2 Indicadores para cálculo de sostenibilidad- Q mínimo en los Ríos - Escenario Base- Serie Histórica .....	<u>7473</u>
Figura 5.3 Indicadores para cálculo de sostenibilidad- Demanda Agrícola - Escenario Base- Serie Histórica .....	<u>7675</u>
Figura 5.4 Indicadores para cálculo de sostenibilidad- Demanda Industrial - Escenario Base- Serie Histórica .....	<u>7776</u>
Figura 5.5 Garantía Volumétrica anual – Escenario Base Serie Histórica .....	<u>7877</u>
Figura 5.6 Garantía volumétrica anual Escenario Base – 15 Series Sintéticas	<u>7978</u>
Figura 5.7 Garantía volumétrica anual Escenario Base – 30 Series Sintéticas	<u>8079</u>
Figura 5.8 Valores medio de Garantía anual probabilística bajo diferentes criterios de satisfacción de la demanda. Evaluando escenario base y con Trasvase .....	<u>8786</u>
Figura 5.9 Indicadores para cálculo de sostenibilidad- Demanda Urbana en los Ríos - Escenario con TJV- Serie Histórica.....	<u>8887</u>
Figura 5.10 Indicadores para cálculo de sostenibilidad- Q minimo en los Ríos – Escenario con TJV- Serie Histórica .....	<u>8988</u>
Figura 5.11 Indicadores de comportamiento de Tramo 1 Río Júcar con y sin TJV .....	<u>8988</u>
Figura 5.12 Indicadores para cálculo de sostenibilidad- Demanda Agrícola - Escenario con TJV- Serie Histórica .....	<u>9089</u>

Figura 5.13 Indicadores de comportamiento de la MO Zona Albacete Sup con y sin TJV .....	<del>9190</del>
Figura 5.14 Indicadores para cálculo de sostenibilidad- Demanda Industrial - Escenario con TJV - Serie Histórica .....	<del>9294</del>
Figura 5.15 Indicadores de comportamiento de la CH Millares con y sin TJV ..	<del>9392</del>
Figura 5.16 Garantía Volumétrica anual – Escenario con Medidas (TJV) Serie Histórica .....	<del>9493</del>
Figura 5.17 Garantía volumétrica anual Escenario medidas (TJV) – 30 Series Sintéticas .....	<del>9695</del>
Figura 6.1 Series de aportaciones anules de cabecera .....	<del>9998</del>
Figura 6.2 Estructura del modelo de Redes Bayesianas – Zoom Uso Agrario .....	<del>103402</del>
Figura 6.3 Interfaz Condiciones iniciales – Ejemplo ApoQ1- VoQ1 sin Traslase .....	<del>104403</del>
Figura 6.4 Condición ApoQ1 - Garantía Volumétrica en el Escenario Base simulado con Serie histórica .....	<del>108407</del>
Figura 6.5 Condición ApoQ1 - Garantía Volumétrica en el Escenario con Traslase simulado con Serie histórica .....	<del>108407</del>
Figura 6.6 Valores de probabilidad Beneficio Máximo Serie Histórica-- Ejemplo Demanda agrícola de Ribera Baja bajo condiciones ApoQ1- VoQ1 sin Traslase (a) y con Traslase (b) .....	<del>111410</del>
Figura 6.7 Condición ApoQ1 - Garantía Volumétrica en el Escenario Base simulado con Serie Sintética.....	<del>113412</del>
Figura 6.8 Condición ApoQ1 - Garantía Volumétrica en el Escenario con TJV simulado con Serie Sintética.....	<del>113412</del>
Figura 6.9 Valores de probabilidad Beneficio Máximo Serie Sintética-- Ejemplo Demanda agrícola bajo condiciones ApoQ1- VoQ3 sin Traslase (a) y con Traslase (b).....	<del>116415</del>

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1.1	Metodología de desarrollo del presente estudio .....	12
Tabla 2.1	Paquetes de Software disponibles para la construcción de BBNN (Landscape Logic 2009) .....	23
Tabla 3.1	Red Fluvial del Sistema Júcar (IIAMA 2006).....	36
Tabla 3.2	Demanda actual total (IIAMA 2006) .....	36
Tabla 3.3	Demanda UDA Sistema Júcar .....	37
Tabla 3.4	Aportaciones del Sistema Júcar.....	48
Tabla 3.5	Capacidad de Embalses del Sistema Júcar.....	49
Tabla 3.6	Demanda anual y prioridades en el sistema de usos agrícolas .....	50
Tabla 3.7	Caudal Objetivo anual y prioridades en el sistema de usos Industriales .....	51
Tabla 3.8	Demanda anual y prioridades en el sistema de usos urbanos.....	52
Tabla 3.9	Caudales mínimos y prioridades en el sistema.....	53
Tabla 3.10	Caudal mínimo mensual establecido en el modelo de simulación .....	54
Tabla 3.11	Coeficientes de cálculo Beneficio Demanda agrícola - MO .....	56
Tabla 3.12	Coeficientes de cálculo Beneficio Demanda agrícola – Cítricos (IIAMA 2006).....	57
Tabla 3.13	Coeficientes de cálculo Beneficio Demanda agrícola – Arrozales (IIAMA 2006).....	58
Tabla 3.14	Coeficientes de cálculo Beneficio Demanda Industrial (IIAMA 2006)	59
Tabla 3.15	Coeficientes de cálculo Beneficio Demanda Industrial (IIAMA 2006)	60

REDES BAYESIANAS PARA EL ANÁLISIS INTEGRADO DE LA GESTIÓN DE SRH.  
APLICACIÓN A LA CUENCA DEL RÍO JÚCAR

---

Tabla 4.1 Estadísticos de las aportaciones mensuales originales y límites de Senedecor y Cochran (test del sesgo).....	63
Tabla 4.2 Estadísticos de las aportaciones mensuales normalizadas, límites de Senedecor y Cochran y Ecuación de Normalización empleada .....	64
Tabla 4.3 Parámetros del Modelo AR (1).....	<del>6968</del>
Tabla 4.4 Valores medios de los estadísticos de las series sintéticas mensuales generadas con el modelo AR (1) .....	<del>6968</del>
Tabla 5.1 Garantía Volumétrica anual Uso Industrial y MO resultado del análisis de la Serie Histórica.....	<del>8180</del>
Tabla 5.2 Garantía Volumétrica anual Uso Industrial y MO resultado del análisis de las 15 Series Sintéticas.....	<del>8180</del>
Tabla 5.3 Garantía Volumétrica anual Uso Industrial y MO resultado del análisis de las 30 Series Sintéticas.....	<del>8180</del>
Tabla 5.4 Indicadores medios de comportamiento con 95% de satisfacción. Analizando las series sintéticas. ....	<del>8483</del>
Tabla 5.5 Límites de confianza dentro de los cuales existe un 90% de Probabilidad que se encuentre la media del indicador. Con criterio de satisfacción de demandas del 95% .....	<del>8584</del>
Tabla 5.6 Diferencias en Garantía Volumétrica anual. Análisis de las 30 Series Sintéticas (con TJV – sin TJV) .....	<del>9796</del>
Tabla 6.1 Coeficientes de autocorrelación r1 – Aportaciones de cabecera .....	<del>9897</del>
Tabla 6.2 Coeficientes de autocorrelación r1 – Aportación y Volumen Inicial en cabecera .....	<del>10099</del>
Tabla 6.3 Análisis de dependencia mediante SPSS - Aportación y Volumen Inicial en cabecera .....	<del>10099</del>
Tabla 6.4 Estados Variables Padres de la Red Bayesiana.....	<del>101400</del>
Tabla 6.5 Déficit máximo anual de suministro por tipo de demanda.....	<del>101400</del>

REDES BAYESIANAS PARA EL ANÁLISIS INTEGRADO DE LA GESTIÓN DE SRH.  
APLICACIÓN A LA CUENCA DEL RÍO JÚCAR

---

Tabla 6.6 Distribución de probabilidades de la serie histórica (a) y de las 30 series sintéticas (b) para diferentes condiciones de Aportación y Volumen inicial en cabecera .....	<u>106105</u>
Tabla 6.7 Condición ApoQ1 – Cambios de Garantía Volumétrica para el Escenario Base simulado con Serie Histórica.....	<u>109108</u>
Tabla 6.8 Condición ApoQ1 – Cambios de Garantía Volumétrica para el Escenario Base simulado con Serie Sintética.....	<u>112111</u>



## 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

### 1.1. INTRODUCCIÓN

El acceso al agua ha sido a lo largo de la historia de la humanidad *una fuente de poder* o de *conflicto*. También conocemos experiencias desafortunadas de antiguas civilizaciones poderosas que llegan al colapso por escasez o por una mala gestión sus recursos. (UNESCO 2007).

Siendo el sistema del río Júcar un territorio con recursos hídricos escasos y utilización intensiva, el agua puede convertirse en un factor limitante para el desarrollo económico y su déficit, una amenaza para el medio natural. Donde, uno de sus grandes retos es la garantía de suministro de agua, en cantidad y calidad suficiente, para el consumo humano, agricultura, y otras actividades económicas vinculadas.

Debido a la diversidad de intereses en los procesos de toma de decisiones, la gestión integrada es la clave del desarrollo sostenible de los recursos hídricos, ya que en la toma de decisiones armoniza consideraciones ambientales, sociales, económicas y políticas entre otras, mediante un proceso participativo de toma de decisiones para lograr los objetivos propuestos por la Directiva Marco de Agua, en el caso de Europa

Así, los Sistemas de Apoyo a la Decisión (SAD) permiten evaluar los impactos de diversas estrategias propuestas ante los problemas relacionados a los recursos hídricos. La participación activa de los grupos implicados (stakeholders) ayuda a promover el sentido de propiedad del proceso de toma de decisiones (Lynam et al. 2007, Carmona et al. 2010)

En la gestión de Sistemas de Recursos Hídricos (SRH) se involucran múltiples objetivos, con frecuencia en conflicto y se deben asumir decisiones en condiciones de alta incertidumbre.

Dicha incertidumbre está relacionada con la capacidad de predicción limitada de la precipitación, el comportamiento incierto de la hidrología de la cuenca y de las demandas, etc., y afecta la seguridad con la que se toman las decisiones basados en esta información. Además, el problema de ésta no radica únicamente en cómo cuantificarla sino también en cómo comunicarla de manera efectiva para la toma de decisiones por lo que es necesario buscar soluciones eficientes de interpretación.

En el presente estudio se propone combinar herramientas de simulación y sistemas expertos probabilísticos (redes bayesianas) en la gestión de SRH a escala de cuenca, que como Sistemas de Apoyo a la Decisión permiten el análisis de problemas, facilitan su comunicación e involucran los grupos implicados de forma participativa.

De esta forma, se considera la experiencia y asertividad en la simulación y optimización de procesos de gestión de SRH a escala de cuenca de SAD como por ejemplo Aquatool, con distintos indicadores de rendimiento del sistema y se integra el grado de incertidumbre de las relaciones de dependencia entre las variables mediante el enfoque probabilístico de las redes bayesianas.

## **1.2. OBJETIVOS**

### **1.2.1. Objetivos generales**

Estudiar formas eficientes de cuantificar y comunicar los impactos de las propuestas de gestión de SRH, mediante el uso combinado de herramientas de simulación y de tratamiento de incertidumbre (redes bayesianas), que faciliten la toma de decisiones y fomenten la capacidad participativa de los grupos implicados.

### **1.2.2. Objetivos específicos**

Identificar medidas de evaluación del rendimiento de un SRH y de incorporación de la incertidumbre en la toma de decisiones en la gestión/planificación de SRH.

Analizar probabilísticamente las series históricas anuales de los suministros del sistema simulados con un SAD, Aquatool, para los dos embalses de cabecera (Alarcón y Contreras) del río Júcar y su principal afluente, el río Gabriel, y estudiar correlaciones con las series de volúmenes y aportaciones anuales.

Realizar un análisis de Monte Carlo aplicado de indicadores de rendimiento del sistema como vulnerabilidad, resiliencia, garantía volumétrica, garantía anual y sostenibilidad del sistema usando escenarios hidrológicos equiprobables generados estocásticamente mediante modelación ARMA.

Analizar el sistema bajo diferentes escenarios de medidas planteadas en el Esquema de Temas Importantes del Río Júcar y, mediante el uso de redes bayesianas, representar, de forma general, las posibles respuestas del sistema y vincular temas de interés político, científico, social y ambiental, en la toma de decisiones.

### **1.3. MARCO ADMINISTRATIVO Y LEGAL**

#### **1.3.1. Comunidad Europea**

El 23 de octubre del año 2000 se aprobó la Directiva 2000/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de agua (Directiva Marco del Agua).

La Directiva Marco del Agua (DMA) tiene como objetivo prevenir el deterioro y mejorar el estado de los ecosistemas acuáticos y promover el uso sostenible del agua. Para esto, se debe tratar de compatibilizar la consecución del buen estado de las aguas superficiales y subterráneas con la atención a las demandas, mediante una gestión racional y sostenible. Además debe tratar de mitigar los efectos de las sequías e inundaciones.

Establece una serie de tareas con un estricto calendario para su cumplimiento, que repercute en todos los aspectos de la gestión de las aguas. Entre estas, ya han sido realizadas la transposición legislativa, con la modificación de la Ley de Aguas y el nuevo Reglamento de planificación hidrológica, la definición de las demarcaciones hidrográficas, la caracterización de las masas de agua y la adaptación de las redes de control del estado.

Sin embargo, el eje fundamental de aplicación de la DMA lo constituyen los planes hidrológicos de cuenca.

Los objetivos de los nuevos planes hidrológicos amplían los anteriores y se reorientan para alcanzar el buen estado de las masas de agua y la adecuada protección del Dominio Público Hidráulico (DPH). Consta de tres hitos principales:

- Primer hito: Programa, Calendario y Fórmulas de Consulta, Proyecto de Participación Pública y Estudio General de la Demarcación, se redactaron y publicaron en julio de 2007. Estos documentos fueron sometidos a un proceso de consulta pública durante un periodo de seis meses.

Segundo hito: Esquema de Temas Importantes de la demarcación (ETI). El artículo 79 del Reglamento de Planificación Hidrológica, aprobado por el Real Decreto 907/2007, de 6 de julio, regula el contenido formal del documento Esquema de Temas Importantes (ETI). El ETI contiene la descripción y valoración de los principales problemas actuales y previsibles de la demarcación relacionados con el agua y las potenciales alternativas de actuación, acordes a los programas de medidas elaborados por las administraciones competentes.

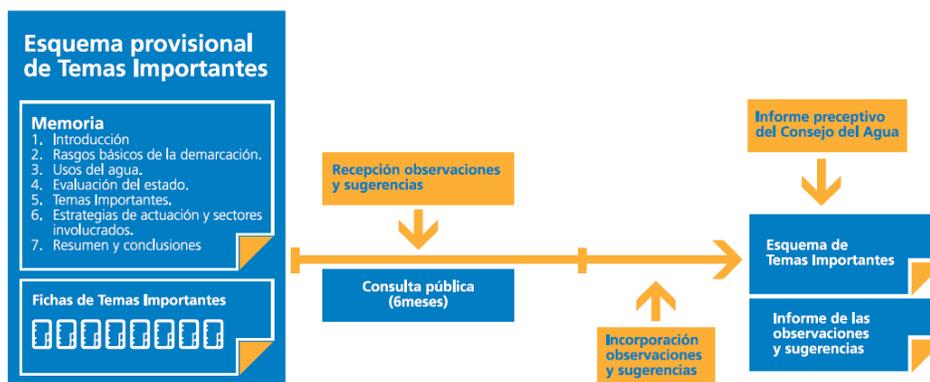
- Tercer hito: Proyecto de Plan Hidrológico. Una vez finalizado el proceso del ETI, se determinarán las posibles decisiones que puedan adoptarse para determinar los distintos elementos que configuren el Plan, en el cual armonicen las necesidades de distintos sectores con incidencia en el uso y disfrute del agua, respetando el medio ambiente y coordinando con otras planificaciones sectoriales.

### **1.3.2. Confederación Hidrográfica del Júcar (CHJ)**

En la Confederación Hidrográfica del Júcar, con el fin de identificar y seleccionar los temas importantes, se ha desarrollado un proceso de participación pública activo que ha contado con la Confederación Hidrográfica del Júcar, otras Administraciones Públicas afectadas y la Mesa de Participación durante tres ciclos de reuniones sectoriales celebrados en 2008, y 2009.

El Organismo de cuenca elaboró un primer borrador de *Identificación de Temas Importantes* que, junto con la metodología de selección aportada por la Dirección General del Agua (DGA), se dio a conocer en la segunda reunión de la Mesa de Participación, celebrada en la sede central de la CHJ en Valencia el 27 de marzo de 2008.

**Figura 1.1** Proceso de identificación y selección de temas importantes ETI



En las Reuniones Sectoriales de la Mesa de Participación (1-ONG y Fundaciones, 2-Usuarios, 3-Organizaciones Sindicales y Empresariales y 4-Administraciones Públicas), se detalló la metodología utilizada en la identificación de los Temas Importantes y se instó a los asistentes a aportar sus propuestas respecto a los temas propuestos, tanto de identificación (eliminación o incremento de Temas Importantes) o de priorización (ordenación de los temas según importancia o relevancia).

Se realizaron dos ciclos de reuniones adicionales en junio de 2008 y febrero de 2009, a partir de los cuales se publicaron cuatro Documentos Técnicos de Referencia (DTR):

- Identificación y delimitación de masas de agua superficial y subterráneas

- Identificación de las zonas protegidas, sus objetivos específicos y su grado de cumplimiento.
- Metodología y Resultados de la Estimación de Demandas.
- Evaluación del Estado de las Masas de Agua Superficial y Subterránea.

Una vez identificados los problemas más importantes de la demarcación y simultáneamente al proceso reglado de consulta pública, se podrán constituir Comisiones de Trabajo Territoriales, con el objetivo de integrar la visión territorial en el establecimiento de las posibles alternativas de actuación para alcanzar los objetivos medioambientales.

Actualmente, se pueden encontrar en la página de la CHJ, el proceso de participación pública e Informes de observaciones y alegaciones, en los cuales se incluye una descripción del proceso de participación activa llevado a cabo.

El EpTI va a ser un elemento clave en la elaboración del *Proyecto de Plan Hidrológico*. En él se realiza un primer análisis a partir de la información disponible en el momento, que deberá ampliarse y matizarse en la propia redacción del Plan.

### **1.3.3. Sistema Júcar**

Se entiende por Tema Importante en Materia de Gestión de Aguas a los efectos del EpTI las cuestiones que ponen en riesgo el cumplimiento de los objetivos de la planificación. Dichas cuestiones se pueden agrupar en cuatro categorías

- Aspectos medioambientales
- Atención de las demandas y racionalidad del uso
- Seguridad frente a fenómenos meteorológicos extremos

- Conocimiento y gobernanza

Las dos primeras cuestiones responden directamente a los objetivos de la planificación hidrológica. Respecto a los fenómenos meteorológicos extremos deben ser analizados, ya que los planes hidrológicos deben tratar de mitigar los efectos que ocasionen las inundaciones y sequías, que son de suficiente relevancia en la cuenca del Júcar. Por último, los temas de conocimiento y gobernanza son los que dificultan la consecución de los objetivos y que deben ser analizados y resueltos para poder alcanzarlos.

Las fichas del Anexo B del ETI de la CHJ (ETI\_CHJ2009), se profundizan los problemas, medidas y organismos implicados en cada Tema Importante encontrado en la Demarcación, dentro de las cuales elementos específicos del sistema Júcar fueron analizados en las siguientes fichas:

*Caudales Ecológicos y Requerimientos Ambientales*

- 01.01 Adecuación del régimen de caudales ecológicos en el río Júcar y su relación con las garantías de los usos del sistema.
- 01.03 Consecución del buen potencial ecológico en l'Albufera de Valencia.
- T.01 Caudal ecológico en el estuario del Júcar.

*Restauración de Ecosistemas Fluviales*

- 02.01. Control de especies invasoras: macrófitos en los ríos Albaida, Barcheta, Verde y en el tramo bajo del río Júcar.
- 02.03 Regeneración vegetal en zonas naturales y forestales en el tramo alto de los ríos Júcar y Gabriel y en el tramo medio de los ríos Serpis, Mijares y Magro.

Calidad Masas de Agua

- 03.01 Adecuación del tratamiento y mejora de la capacidad de la depuración en los municipios de Albacete, La Roda y Almansa y en los núcleos urbanos de la cuenca del río Valdemembra.
- 03.02 Control de la contaminación y mejora de la calidad físico-química de las aguas y sedimentos del tramo bajo del río Júcar.
- T.02 Presencia de productos fitosanitarios en las zonas de transición: Estany de Cullera y desembocadura del río Júcar

Atención de las Demandas y Racionalidad del Uso

- 04.01 Mejora de la garantía y eficiencia de los riegos tradicionales de la Ribera del Júcar.
- 04.02 Explotación sostenible del acuífero de la Mancha Oriental y sus aprovechamientos.
- 04.03 Explotación sostenible de las masas de agua subterránea y sus aprovechamientos en el Vinalopó.
- 04.04 Mejora de la garantía y calidad del agua del abastecimiento del área metropolitana de Valencia.
- 04.07 Mejora de la garantía y calidad del abastecimiento urbano en las comarcas de la Ribera del Júcar
- 04.10 Mejora de la garantía y calidad del agua del abastecimiento urbano del Camp de Morvedre, con especial atención al control de la intrusión marina en la Plana de Sagunto.

- 04.11 Mejora de la garantía y calidad del abastecimiento urbano en la Marina Baja.

*Fenómenos Extremos*

- 05.01 Reducción del riesgo de inundación del tramo bajo del río Júcar: comarcas de la Ribera Alta y Ribera Baja.
- 05.04 Reducción del riesgo de inundación en Albacete y sus zonas de influencia.
- 05.07 Planificación y Gestión de las situaciones de sequía en los sistemas de explotación.

*Conocimiento y Gobernanza*

- 06.02 Normas de explotación en el sistema Júcar.
- 06.03 Análisis de los requerimientos hídricos de las zonas húmedas con especial atención a la conservación de los valores ambientales relevantes en las zonas protegidas.
- 06.07 Seguimiento ambiental y mitigación de los efectos de las sequías sobre las zonas vulnerables de la cuenca del Júcar (tramo del río Júcar en la zona de la Mancha Oriental, y tramo bajo del Júcar y Albufera de Valencia).

Los anteriores Temas Importantes requieren, como se mencionó anteriormente, procesos participativos de toma de decisiones y su aplicación se complica al involucrar un gran número de interesados y al buscar cumplir metas multiobjetivo. Mostrando la importancia de desarrollar herramientas que permitan facilitar el análisis de las posibles consecuencias de las medidas planteadas.

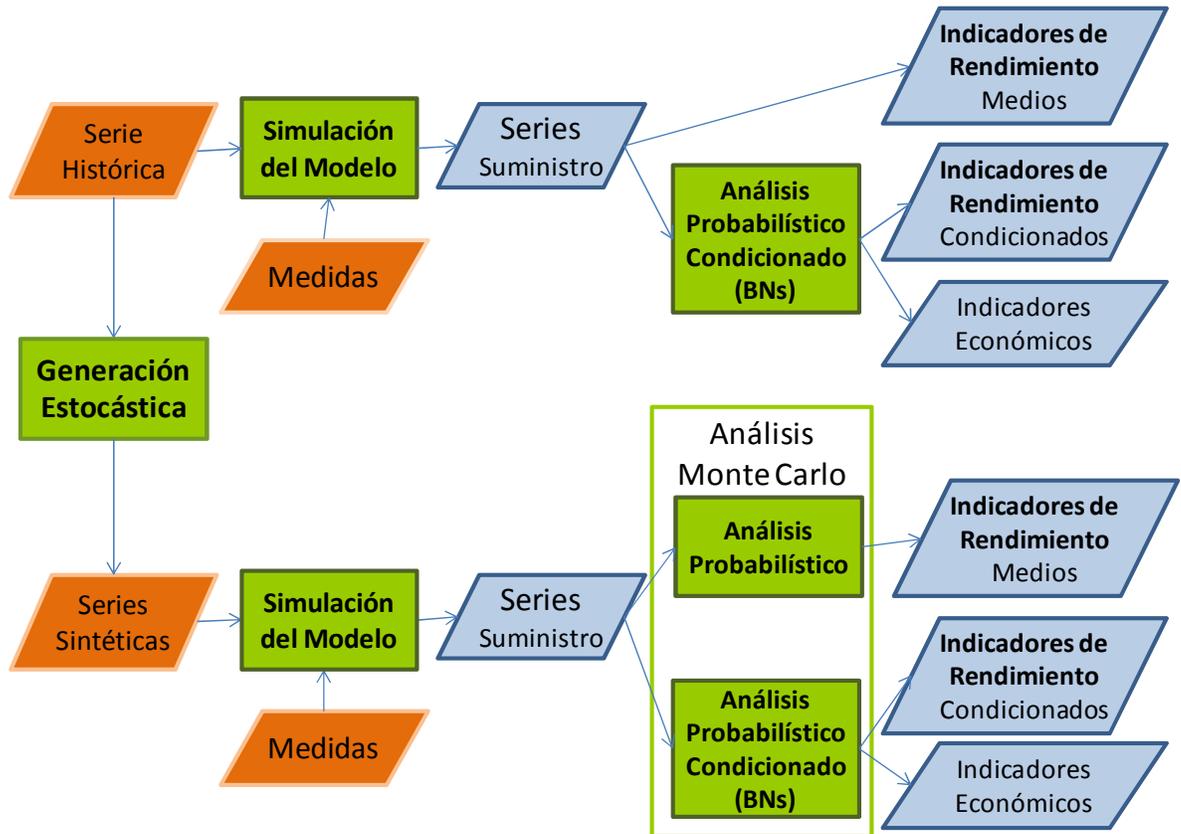
#### **1.4. METODOLOGÍA**

El sistema Júcar cuenta con un modelo de simulación de la gestión implementado en el módulo SIMGES de AQUATOOL, resultante de una larga trayectoria de modelos desarrollados por el Grupo de Ingeniería de Recursos Hídricos del IIAMA para la Confederación Hidrográfica del Júcar. Aunque el modelo está siendo actualizado constantemente para el desarrollo de los nuevos Planes Hidrológicos de Cuenca en cumplimiento de la Directiva Marco europea, aquí se usará el desarrollado por el IIAMA de la Universidad Politécnica de Valencia bajo convenio con EPTISA, Servicios de Ingeniería S.A, en el proyecto *“Desarrollo y aplicación de metodologías y herramientas en la cuenca piloto del río Júcar para los análisis económicos requeridos en la Directiva Marco Europea del Agua (IIAMA et al 2006).*

En el mencionado modelo están representados todas las componentes relevantes del sistema (recursos superficiales y subterráneos, infraestructura, demandas, etc.), permitiendo una representación razonable de distintas políticas de gestión.

Los datos de partida del presente estudio serán los del *escenario base*, que cuenta con una serie histórica de datos mensuales de 61 años (octubre 1940-septiembre 2000). A la información obtenida de dicho escenario se le realizarán diferentes análisis con el fin de evaluar el comportamiento del sistema bajo diferentes condiciones hidrológicas (series sintéticas) y aplicando medidas relacionadas con la gestión del mismo.

Tabla 1.1 Metodología de desarrollo del presente estudio



#### 1.4.1. Escenarios de simulación

Empleando el módulo SIMGES del SAD Aquatool se simularán diferentes escenarios con el fin de obtener datos de gestión que permitan analizar el comportamiento del sistema y comparar diferentes condiciones tanto hidrológicas como de medidas.

##### Escenario Base con serie histórica de aportación

El *escenario de base* corresponde al Modelo para análisis económicos del Sistema Júcar (IIAMA et al 2006). En este escenario se simulará la serie histórica de

aportación y se obtendrá la información de series anuales de suministro de las variables de interés en materia de garantía.

*Escenario Base con Series Sintéticas de aportación*

Se determinarán las posibles variaciones del sistema bajo la aplicación de diferentes escenarios hidrológicos equiprobables, obtenidos mediante generación estocástica de series sintéticas con un modelo ARMA.

Se simulará el *escenario base* generando escenarios para cada serie y modificando los datos de entrada de aportaciones de los embalses de cabecera Alarcón y Contreras.

*Escenarios de Medidas con Serie Histórica de aportación*

Este análisis se realiza para determinar las posibles variaciones del sistema bajo la aplicación de medidas a nivel de cuenca. Se analiza la incorporación del Trasvase Júcar Vinalopó en el azud la Marquesa, por tener un efecto de gran importancia en la gestión del agua, al involucrar impactos políticos, sociales y ambientales en los cambios en la distribución y almacenamiento del recurso.

Se simulará el *escenario base* incorporando nuevos elementos de conducción y demanda (como el caso del trasvase) generando una toma aguas abajo de los nodos de toma de la Ribera Baja.

*Escenarios de Medidas con Series Sintéticas de aportación*

Se simulará el *escenario de medidas (TJV)* generando escenarios para cada serie y modificando los datos de entrada de aportaciones de los embalses de cabecera Alarcón y Contreras.

#### **1.4.2. Análisis de Indicadores de comportamiento del sistema**

Las series de suministro serán analizadas para obtener índices como Garantía Volumétrica, Vulnerabilidad, Resiliencia, Garantía Aual y Sostenibilidad del sistema que faciliten la toma de decisiones en la gestión de la cuenca, evaluando el comportamiento condicionado a diferentes escenarios hidrológicos y escenarios de medidas de interés político, social y ambiental.

#### **1.4.3. Análisis probabilístico**

Para cada uno de los escenarios se evaluarán probabilísticamente los porcentajes de suministro a las demandas del sistema bajo condiciones previas de aportación anual y volumen inicial (septiembre), mediante el software comercial HUGIN Expert (Hugin, 2007).

Este proceso se realizará en el *escenario base* con los resultados de la serie histórica y de 15 y 30 series sintéticas, estas últimas con el fin de analizar la importancia de generación de un mayor número de datos para el análisis del sistema.

En el *escenario de medidas (TJV)* el proceso se realizará con los resultados de la serie histórica y de las 30 series sintéticas.

Aplicando modelo de redes bayesianas (HUGIN) se analizará la probabilidad de beneficios económicos (ganancia/perdida) correspondientes a los diferentes usos.

#### **1.4.4. Comparación**

El modelo de redes bayesianas generado servirá como interfaz para analizar el *escenario base* (sistema en la situación de gestión actual) y el *escenario con TJV*

(incorporando la medida del Trasvase Júcar-Vinalopó), bajo diferentes condiciones de previas en cabecera de aportaciones anuales y volúmenes iniciales.

Lo anterior a partir de la información generada con la serie histórica (60 datos) y con la correspondiente a las 30 series sintéticas (1860 datos)

## **2. ESTADO DEL ARTE. MÉTODOS Y HERRAMIENTAS**

### **2.1. GESTIÓN DE SISTEMAS DE RECURSOS HÍDRICOS MEDIANTE SISTEMAS DE APOYO A LA DECISIÓN (AQUATOOL)**

Bajo el nuevo marco legal de la Directiva Marco del Agua, han tomado gran importancia las estrategias de gestión que no se limiten a la búsqueda de la eficacia en la gestión de los sistemas de recursos hídricos, sino que adicionalmente tengan un carácter integral, sostenible y participativo.

El entorno de desarrollo de Sistemas de Apoyo a la Decisión, la herramienta AQUATOOL aporta diversas herramientas para resolver los diferentes problemas que pueden plantearse en el análisis de SRH desde el punto de vista de planificación y gestión sistemática (Solera et al 2003). El uso de modelos de simulación a escala de cuenca se considera indispensable para lograr un análisis integrado de los sistemas de recursos hídricos y para preservar la interconexión entre diferentes elementos, permitiendo la discretización espacial y temporal de los resultados.

El programa AQUATOOL ha sido ampliamente utilizado en España por empresas consultoras y organismos públicos nacionales e internacionales para el desarrollo de modelo de gestión de cuencas.

Éste programa integra herramientas para el desarrollo de modelos de simulación y optimización de la gestión de sistemas de recursos hídricos. El módulo de simulación SIMWIN, permite la construcción de modelos de simulación de la gestión para cualquier sistema de recursos hídricos, sea cual sea su grado de complejidad, incluyendo tanto las aguas superficiales como las subterráneas y la interacción entre ambas.

El modelo de simulación SIMGES del SAD AQUATOOL (Andreu et al., 1992 y 1996), ha sido desarrollado en el Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente de la Universidad Politécnica de Valencia. SIMGES es un modelo general para la simulación de la gestión de sistemas en los que se dispone de diversos elementos de regulación o almacenamiento tanto superficiales como subterráneos, de captación, de transporte, y de utilización y/o consumo, incluyendo el uso conjunto de aguas superficiales y subterráneas.

La simulación se efectúa a nivel mensual y reproduce el flujo del agua a través del sistema siguiendo las reglas de gestión establecidas por el usuario.

Las decisiones mensuales de gestión del recurso son definidas mediante un proceso de optimización pura de flujo en redes (redes conservativas) basado en el algoritmo *Out-Of-Kilter* (Bazaraa et al., 1990), al que se incorpora un proceso iterativo para poder incluir procesos no lineales como filtraciones en embalses y conducciones, pérdidas por evaporación en embalses o relaciones río-acuífero. La función objetivo consiste en la minimización de la suma ponderada del déficit en la satisfacción de las demandas y de las restricciones de caudal mínimo, y desviaciones de objetivos de volumen embalsado y producción hidroeléctrica. Una vez que el algoritmo encuentra una solución óptima inicial para el sistema superficial, los acuíferos son simulados y se obtiene la relación río-acuífero, siendo corregidos los valores anteriores e incorporados en un proceso iterativo hasta que se alcanza la convergencia.

Los resultados de las simulaciones del modelo incluyen, para el esquema diseñado, la evolución de todas las variables de interés: aportaciones, volúmenes embalsados, sueltas, caudales circulantes, valor de las variables de control en los acuíferos, etc., a nivel mensual, anual y valores medios para el período de

simulación, así como déficits y garantías para las distintas demandas. Interfases y postprocesadores gráficos interactivos facilitan la creación de esquemas, introducción de datos y el análisis de resultados.

## **2.2. ANÁLISIS PROBABILÍSTICO CON EL USO DE REDES BAYESIANAS (HUGIN)**

Las Redes Bayesianas (BNs), además de emplearse como Sistemas de Apoyo a la Decisión en la solución de problemas en una amplia gama de especialidades, permiten captar la variabilidad e incertidumbre de los procesos hidrológicos desde un punto de vista probabilístico.

Las redes bayesianas, como sistema experto probabilístico, utilizan como base de conocimiento, la estructura del espacio probabilístico y como motor de inferencia, probabilidades condicionales. Esto permite el manejo de incertidumbre y pretende que la propagación de probabilidades sea exacta, rápida y no cause problemas de excesivo número de parámetros. Para ello se representan las relaciones de (in)dependencia condicionada mediante un grafo dirigido acíclico.

Las BNs modelan un fenómeno mediante un conjunto de variables y las relaciones de dependencia entre ellas. Dado este modelo, se puede estimar la probabilidad posterior de las variables no conocidas, en base a las variables conocidas (inferencia bayesiana) o encontrar la relación probabilística entre variables.

Integran cualquier tipo de variables, con información a cualquier escala y de diferentes áreas involucradas en un problema. Por lo cual, están siendo desarrolladas como herramientas facilitadoras de toma de decisiones en diferentes partes del mundo.

Por ejemplo, en el Reino Unido, Dinamarca, Italia y España, como la parte del proyecto de MÉRIT (Bromley 2005). En el caso del Reino Unido en la cuenca Loddon (Bromley et.al 2005) las redes se enfocan en gestión de demanda doméstica de agua, en Dinamarca (Havelse) en la evaluación medidas para tratar la contaminación, en Italia (Vomano) se evalúan los impactos de crecimiento de demandas y en España (Mancha Oriental) se enfocan en la gestión integrada de los recursos hídricos.

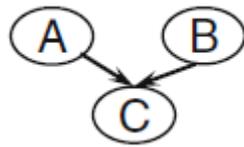
Recientemente en España se ha empleado esta herramienta en el análisis integrado de un sistema de recursos hídricos abastecido en su totalidad por aguas subterráneas procedentes de cuatro acuíferos en la Región del Altiplano de Murcia, en el sureste de España, (Molina et.al 2011) y en un sistema de apoyo a la decisión para un modelo agroeconómico en la cuenca alta del Guadiana (Carmona et.al 2011).

### **2.2.1. Teoría de las Redes Bayesianas**

Las redes bayesianas (BNs), representan una estructura acíclica de dependencia entre variables aleatorias para razonamiento probabilístico. (Ames et al. 2005; Cain 2001; Bromley et al. 2005). Cada variable está caracterizada por sus correspondientes estados, los cuales pueden ser definidos por valores numéricos, intervalos, estimaciones cualitativas o funciones booleanas. Las relaciones entre variables se establecen en términos de dependencia probabilística. A cada variable le corresponde una tabla de probabilidad condicionada (CPT), la cual presenta la distribución de probabilidad de dicha variable en cada uno de sus estados, dados los estados de sus variables padres. La información de probabilidad condicional se puede obtener de diferentes fuentes: mediciones directas, modelos matemáticos y opinión de expertos.

Si se consideran tres nodos (A, B y C) donde A y B son variables independientes y C depende condicionalmente de A y B, tal como se representa en la siguiente figura:

**Figura 2.1 Ejemplo de una Red Bayesiana Simple conformada por tres variables A, B y C**



- A y B variables independientes y C depende de A y B.
- A y B son los “padres” y C (“hijo”)
- Los posibles estados de las variables son A (a<sub>1</sub>, a<sub>2</sub>); B (b<sub>1</sub>, b<sub>2</sub>); C (c<sub>1</sub>, c<sub>2</sub>)

Si A, B y C tienen dos posibles estados, la red bayesiana estimará las probabilidades marginales P(A = a<sub>1</sub>), P(A = a<sub>2</sub>), P(B = b<sub>1</sub>), P(B = b<sub>2</sub>) y las tablas de probabilidad condicionadas por la variable C.:

#### **Ec. 1 Estimación de probabilidades**

$$\begin{aligned} &P(C = c_1/A = a_1, B = b_1), P(C = c_1/A = a_1, B = b_2), \\ &P(C = c_1/A = a_2, B = b_1), P(C = c_1/A = a_2, B = b_2), \\ &P(C = c_2/A = a_1, B = b_1), P(C = c_2/A = a_1, B = b_2), \\ &P(C = c_2/A = a_2, B = b_1), P(C = c_2/A = a_2, B = b_2). \end{aligned}$$

La propagación de información a través de una red bayesiana se realiza estimando estas probabilidades y permite evaluar las consecuencias de decisiones o condiciones observadas (estados de los padres del sistema) en la probabilidad de los estados de las variables dependientes (inferencia probabilística)

El fundamento matemático de este proceso es el teorema de Bayes, dado por la siguiente expresión:

#### **Ec. 2 Teorema de Bayes**

$$P(a_1, b_1/c_1) = P(c_1/a_1, b_1) \cdot P(a_1, b_1)/P(c_1)$$

Estos cálculos pueden realizarse empleando software comercial especializado como Hugin Researcher (Hugin Expert A/S 2008), empleado en el presente estudio.

### **2.2.2. Componentes**

**Nodos (Variables):** En una red bayesiana, cada nodo corresponde a una variable, que a su vez representa una entidad del mundo real. Los valores de los nodos están definidos en términos de los estados que puede adoptar la variable. Las relaciones entre nodos se indican mediante arcos y se describen mediante probabilidad condicional que captura la dependencia entre las variables. Los padres del sistema: son las condiciones observadas del sistema, cuyas decisiones tendrán inferencia probabilística sobre los estados de las variables dependientes (hijos).

**Arcos (Enlaces):** Los arcos que unen los nodos indican relaciones de influencia causal; la dirección indica causa (nodos padres) – efecto (nodos hijos).

**Tablas de probabilidad:** el cambio de probabilidad de un estado de una variable es propagado a través de la red usando las tablas de probabilidad condicionada, las cuales: dirigen las relaciones entre variables, permiten la inclusión de eventos extremos y poco probables, y permiten comunicar percepciones de quienes participan en la toma de decisiones.

### **2.2.3. Redes Bayesianas Orientadas a Objetos (OOBNs)**

Las redes Bayesianas Orientadas a Objetos (OOBNs) están basadas en la Programación Orientada a Objetos (“Object Oriented Programming”, OOP). El

OOP está basado en el concepto de conjunto de objetos que cooperan entre ellos (interrelacionados).

Una red Bayesiana tradicional no es capaz de recibir o transmitir información desde fuera de la red. Por el contrario, una Red Bayesiana Orientada a Objetos (OOBN) puede unirse a otras OOBNs para formar un conjunto de redes, que pueden relacionarse entre sí y transmitirse la información de una a otra. La transferencia de información se logra mediante la creación de variables de salida y de entrada en cada red. Este tipo de variables son capaces de importar y exportar información entre las redes individuales. Las variables que ejercen de unión entre redes se llaman nodos interfase (“interfase nodes”). En este modelo de OOBNs se diseña una red final (“master network”), en la que se representan las redes anteriores mediante un tipo de variables llamadas nodos de instancia (“instance nodes”), que son una clase de variables que representan a otra red remota (Molina et.al. 2010).

De esta forma, la principal diferencia entre las BNs tradicionales, y las OOBNs radica en que éstas contienen nodos de instancia “instance nodes”. Como los sistemas están frecuentemente compuestos por componentes idénticos y repetidos, las OOBNs permiten relacionar redes con partes idénticas y evitar la repetición de esos componentes. Una variable de instancia “instance node” representa a otra red remota (sub-red) y su utilización hace muy sencilla la inclusión de elementos repetidos sin tener que repetir físicamente los fragmentos.

Otra característica relevante consiste en que una red (subred) que está representada en otra red mediante “instance nodes” puede tener a su vez otras “instance nodes”, por tanto una misma red puede actuar de sub-red y de master-red al mismo tiempo.

#### 2.2.4. Software

Las redes bayesianas se construyen comúnmente empleando paquetes de software disponibles.

**Tabla 2.1 Paquetes de Software disponibles para la construcción de BBNN (Landscape Logic 2009)**

*Table 2. Some software packages available for building Bayesian Networks.*

Package	Graphical User Interface?	Parameter learning?	Structural learning?	Utility nodes supported?	Free?	Inference algorithm
Analytica	Yes	No	No	Yes	No	MC sampling
GeNie	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Various <sup>a</sup>
Hugin Expert	Yes	Yes	Yes <sup>b</sup>	Yes	No	Junction tree
Netica	Yes	Yes	No	Yes	No	Junction tree

a GeNie supports many different inference algorithms, see [http://genie.sis.pitt.edu/wiki/GeNie\\_Documentation](http://genie.sis.pitt.edu/wiki/GeNie_Documentation).

b Using conditional independency tests.

### 2.3. ANÁLISIS DE RESPUESTA DE SUMINISTROS CON INDICADORES DE COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA

La simulación matemática y modelos de optimización proporcionan información de gran importancia una medida de garantía de demanda, cuantificada como la probabilidad fallo (o déficit) en una demanda dada durante el horizonte de gestión. Este índice de garantía es usado para la toma de decisiones, identificando las demandas que no cumplen con un criterio mínimo de satisfacción preestablecido.

Modelos de Gestión de Sistemas de Recursos Hídricos proporcionan una gran cantidad de información que por lo general no es tomada en cuenta en la toma de decisiones debido a su naturaleza compleja y técnica, por esta razón existe la necesidad de generar los medios que permitan el acceso y fácil interpretación de la información valiosa que proporcionan.

El presente estudio analiza indicadores planteados en estudios previos (Hashimoto et al., 1982; Loucks, 1997; Ajami et.al 2008) y otros adaptados, como vulnerabilidad relativa, garantía volumétrica total, sostenibilidad y resiliencia. Adicionalmente, se pretende plantear criterios de interpretación de rendimientos de garantías, analizando el comportamiento de satisfacción de demanda anual, a partir de la garantía volumétrica anual (Gva) por medio de gráficas de cuartiles.

### 2.3.1. Sostenibilidad

En Loucks, 1997 y posteriormente en Ajami et.al. (2008) se propone evaluar a nivel global el comportamiento del sistema mediante el indicador de Sostenibilidad que agrupa los indicadores de Vulnerabilidad relativa, Resiliencia y Garantía Volumétrica total.

Estableciendo como estado satisfactorio de la demanda el cumplimiento del 95% de la misma, se genera una variable booleana ( $Z_t$ ) que indicará la satisfacción o no de la condición y un índice  $W_t$  que captura la transición del estado satisfactorio y no satisfactorio (Hashimoto et.al 1982).

#### Ec. 3 Estados de satisfacción variable $Z_t$ y $W_t$

$$Z = \begin{cases} 1, & \text{if } X_t \in S \\ 0, & \text{if } X_t \in U \end{cases} \quad W_t = \begin{cases} 1, & \text{if } X_t \in U \text{ y } X_{t+1} \in S \\ 0, & \text{en otro caso} \end{cases}$$

La garantía volumétrica se suele expresar como el porcentaje de la demanda que es suministrado a lo largo de todo el período de simulación (Hashimoto et al., 1982):

#### Ec. 4 Garantía volumétrica total

$$Cr = \sum \text{Suministro total} / \sum \text{Demanda total}$$

Como indicador adicional a los presentados en el estudio de Ajami, también se evaluó la garantía anual probabilística (G) como 1 menos la probabilidad de fallo. Con el fin de ver las diferencias con el índice Cr (Ajami et.al 2008) de garantía volumétrica total.

**Ec. 5 Garantía anual probabilística**

$$G = 1 - \frac{T - \sum_{t=1}^T Z_t}{T}$$

La resiliencia y vulnerabilidad se definen considerando los periodos de estado no satisfactorio ( $X_t$ ),  $J_1, \dots, J_N$ , o aquellos en que se produce fallo. Los fallos se producen cuando el suministro es inferior a un determinado porcentaje de la demanda (Hashimoto et al., 1982; Fowler et al., 2003).  $T$  es la longitud total de la serie de tiempo. La resiliencia ( $C_{RS}$ ) indica la capacidad de recuperación del sistema del estado de fallo. Puede ser expresa como la probabilidad de si el sistema está en estado de fallo, el próximo estado será satisfactorio.

La Vulnerabilidad ( $C_V$ ) es una medida de la magnitud o grado de fallo. Una forma de definirla es considerar el máximo deficit en una secuencia de fallos continuos. La Vulnerabilidad relativa ( $C_{VR}$ ) es un indicador adimensional que se expresa como la vulnerabilidad dividida por el suministro total.

**Ec. 6 Resiliencia**

$$C_{rs} = \frac{\sum_{t=1}^T W_t}{T - \sum_{t=1}^T Z_t}$$

**Ec. 7 Vulnerabilidad**

$$C_V = \max \left\{ \sum_{t \in J_i} C - X_t, \quad i = 1 \dots N \right\}$$

**Ec. 8 Vulnerabilidad Relativa**

$$C_{VR} = \frac{C_V}{\sum_{t \in J_N} (Z_t)}$$

El indicador que representa el comportamiento general del sistema es la sostenibilidad, y está dado por la siguiente expresión (Loucks, 1997) que combina garantía, resiliencia y vulnerabilidad:

**Ec. 9 Índice de Sostenibilidad**

$$S = (C_r)(C_{rs})(1 - C_{VR})$$

**2.3.2. Límites de Confianza**

El análisis del comportamiento de sistemas de simulación se centra en el valor promedio de los indicadores, tales como la garantía probabilística anual (1 menos la probabilidad de fallo). (Loucks, 2005)

Resulta de gran interés conocer la seguridad con la cual se afirma que el valor medio de este indicador (en la muestra de simulaciones) se aproxima al verdadero valor de la media poblacional.

Es posible realizar el análisis probabilístico de estos indicadores a partir de la formulación de intervalos de confianza. Donde, el intervalo de confianza es un intervalo que contendrá el valor real poblacional del parámetro con una probabilidad específica. (Loucks, 2005)

Los Intervalos de confianza para el valor de la media se calculan a partir del estadístico-t:

**Ec. 10 Estadístico - t**

$$t = \frac{\bar{x} - \mu_x}{s_x / \sqrt{N}}$$

La cual se aproxima a una distribución para muestras grandes, aunque la muestra de simulaciones analizadas en este estudio (1 base más 30 sintéticas), no es muy grande, se considera que aproximando a la distribución normal se puede conseguir la probabilidad para tener la suficiente seguridad de que los valores muestrales de la garantía se aproximen a los reales.

**Ec. 11 Intervalos de confianza del valor de la media muestral con respecto a la real**

$$\bar{x} - t_{\alpha, N-1} \frac{\sigma}{\sqrt{N}} \leq \mu_x \leq \bar{x} + t_{\alpha, N-1} \frac{\sigma}{\sqrt{N}}$$

Donde, si se quiere conocer la probabilidad (P) de que el valor medio real del indicador analizado éste dentro del intervalo, se calcula el intervalo con un valor de alfa(  $\alpha$ )= (1 -P)/2 y perdiendo un grado de libertad (lag 1). Éste valor también estará en función de la media y la desviación típica de la muestra analizada.

**2.3.3. Garantía Volumétrica anual**

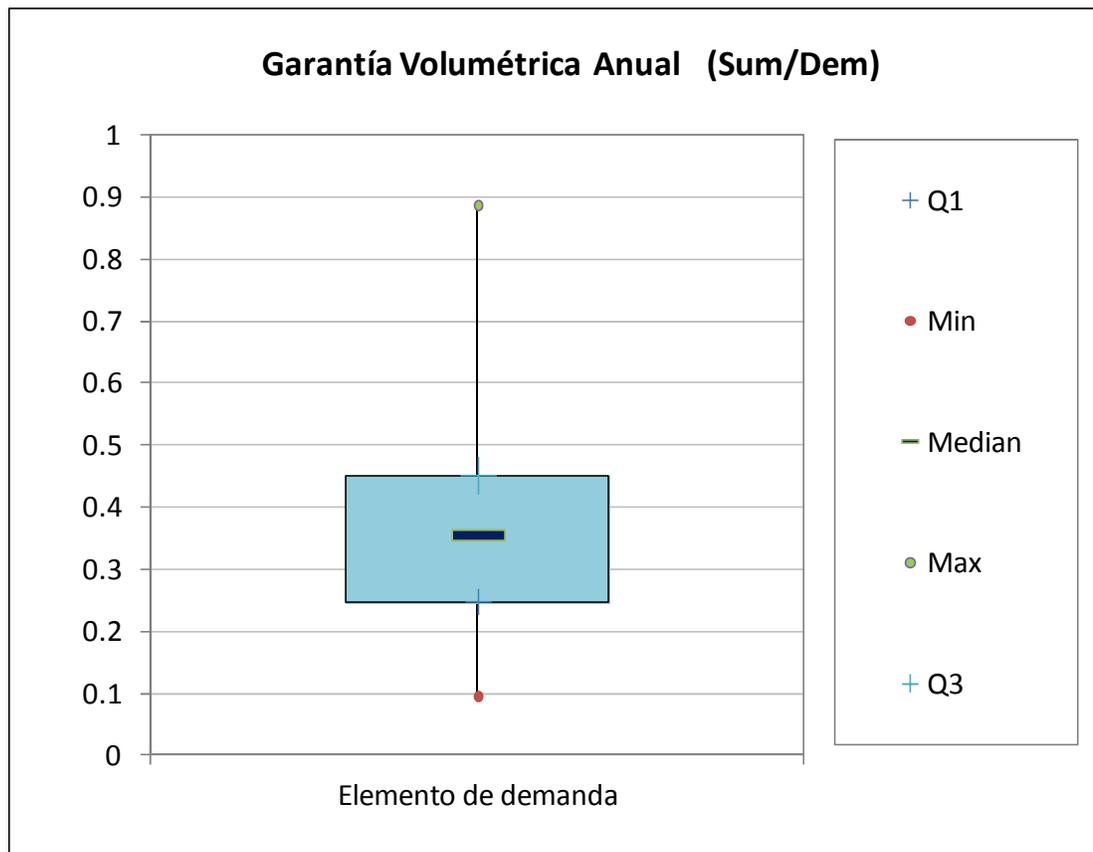
A partir de las series anuales de suministros y las demandas establecidas para cada uno de los elementos del sistema analizados se calculó el porcentaje de suministro anual. Éste indicador permite analizar durante la serie los porcentajes de satisfacción que tuvo cada demanda anualmente.

**Ec. 12 Garantía Volumétrica anual**

$$\text{Gva: } \text{Suministro anual (hm}^3\text{)} / \text{Demanda anual (hm}^3\text{)}$$

Para facilitar el tratamiento de los datos y visualizar los resultados se calculan los cuartiles de las series de porcentaje de suministro anual y se presentan en diagramas boxplot:

Figura 2.2 Cuartiles de la serie de Garantía Volumétrica anual



A partir de la gráfica se observa que para el elemento del ejemplo:

- (Min): existen años en los cuales se cumple únicamente con el 10% de la demanda
- (Q1): en un 25 % de los años el suministro anual es inferior al 25% de la demanda

- (Q2) en un 50% de los años se satisface un 36% de la demanda
- (Q3) en un 75% de los casos se alcanza un máximo de 45% de satisfacción
- (Máx): el porcentaje de satisfacción de la demanda máximo alcanzado es de un 90%

## 2.4. GENERACIÓN DE SERIES ESTOCÁSTICAS

Para facilitar la generación estocástica se empleó una herramienta disponible. El Modelo MashWin (UPV 2002) es una herramienta de preproceso del SAD Aquatool (UPV) que consiste en un modelo de análisis estadístico y generación estocástica para series temporales de aportaciones de un sistema de recursos hídricos. Es una herramienta que permite la definición de la estructura estocástica que mejor se ajusta a un conjunto de series temporales de aportaciones y la generación de series sintéticas multivariadas.

El modelo combina la modelación periódica estocástica mensual mediante una modelación autoregresiva y de media móvil (ARMA) multivariada, con una desagregación espacial mensual por el modelo condensado de Lane. Además, realiza una gran variedad de test de ajuste para todas las fases del análisis.

### Estadísticos básicos

Se calcularon las medias, desviaciones típicas y coeficiente de sesgo para cada uno de los meses del año, de acuerdo con las siguientes ecuaciones:

**Ec. 13 Estadísticos básicos**

$$\bar{Q}_t = \frac{\sum_{v=1}^N Q_{v,t}}{N} \quad s_t = \sqrt{\frac{\sum_{v=1}^N (Q_{v,t} - \bar{Q}_t)^2}{N-1}} \quad g_t = \frac{N \sum_{v=1}^N (Q_{v,t} - \bar{Q}_t)^3}{(N-1)(N-2) s_t^3}$$

Donde,

- $\overline{Q_t}$ : Media mensual de los caudales del mes t
- $Q_{v,t}$ : Caudal del mes t del año v (v=1,...,N)
- N: Número total de años
- $S_t$ : Desviación típica mensual del mes t
- $G_t$ : Coeficiente de sesgo mensual del mes t

Normalización y estandarización de datos

Se estudiaron cuatro funciones de normalización y también da la opción de no normalizar la serie. Estas funciones pueden ser diferentes de un mes a otro y son aplicadas comúnmente en hidrología operacional. (Salas et al. 1980)

**Ec. 14 Error cuadrático**

$$X_{vt} = (Q_{vt})^{0.5}$$

**Ec. 15 Logaritmo Neperiano**

$$X_{vt} = \ln(Q_{vt} + 1)$$

**Ec. 16 Doble Logaritmo neperiano**

$$X_{vt} = \ln(\ln(Q_{vt} + 1))$$

**Ec. 17 Potencial**

$$X_{vt} = (Q_{vt} - a)^b$$

**Ec. 18 Sin Normalización**

$$X_{vt} = X_{vt}$$

Para escoger las ecuaciones correspondientes a cada mes de las series, con el programa se obtienen los estadísticos mensuales de la serie normalizada, se realiza un Test de Normalidad (UPV 2002).

Se considera estadísticamente que la serie está distribuida normalmente si el valor del coeficiente de sesgo de la serie está dentro del intervalo de sesgo Snedecor y Cochran (1997) citado por Salas et.al 1980, dado por la siguiente expresión:

**Ec. 19 Intervalo de normalidad del sesgo Snedecor y Cochran**

$$\left\{ \begin{array}{ll} [-3.9601N^{-0.4598}, +3.9601N^{-0.4598}] & \text{para } N < 150 \\ \left[ -1.96 \sqrt{\frac{6}{N}}, +1.96 \sqrt{\frac{6}{N}} \right], & \text{para } N \geq 150 \end{array} \right\}$$

Después de tener la serie normalizada se procede a tipificarlas mediante la [Ec. 20](#), con el fin de eliminar las periodicidades en las series mensuales y facilitar el reconocimiento de las diferencias entre ellas.

**Ec. 20 Estandarización de datos de aportaciones normalizados**

$$Y_{vt} = \frac{(X_{vt} - \bar{X}_t)}{s_t}$$

Así, es posible evaluar las correlaciones entre las distintas series, las cuales sirven esencialmente para seleccionar el modelo ARMA, a partir de las funciones de autorrelación.

Modelos ARMA

Una clase de modelos muy utilizados en series temporales es el formado por la combinación de un proceso AR y un proceso MA. La mezcla de procesos autoregresivos y de media móvil con p términos AR y q términos MA se denomina un proceso ARMA de orden (p; q). Se define con la [Ec. 21](#).

**Ec. 21 Generación estocástica de series temporales - Proceso ARMA**

$$Z_t = \sum_{i=1}^p (\phi_i \cdot Z_{t-i}) + \varepsilon_t - \sum_{j=1}^q (\theta_j \cdot \varepsilon_{t-j})$$

donde  $\phi_i$  son los coeficientes auto regresivos y  $\theta_i$  los de media móvil.  $\varepsilon_t$  es una serie de residuos que se asume normal e independiente, según una normal  $N(0; \sigma_\varepsilon^2)$

Un modelo ARMA(p,q) de una serie estacionaria (por ejemplo, serie anual) tiene p+q+2 parámetros (los p+q coeficientes más la media de la serie normalizada y la varianza de los residuos)

Es importante reconocer que con la introducción de modelos combinados AR y MA se gana en parsimonia a la hora de especificar un modelo

Análisis de resultados

Si se consigue construir un modelo que entregue buenas predicciones, se puede permitir al analista pasar a controlar un proceso dado. Es decir, las predicciones aportan elementos para tomar decisiones de control óptimo de un proceso.

A partir de las funciones de autocorrelación de las series tipificadas y los límites del intervalo de independencia temporal (Anderson, 1941 citado por Salas et.al 1980), es posible conocer mejor la estructura de dependencia temporal de las series y da una idea del modelo que se debe ajustar (UPV 2002).

Las series sintéticas generadas deben mostrar propiedades estadísticas similares a aquéllas de la serie histórica, es decir de la serie que se conoce y, a partir de la cual se desea generar valores posteriores en el tiempo. La fuente por lo tanto es

“la serie histórica”, y a partir de sus propiedades, se generarán las series sintéticas de igual tamaño.

Adicionalmente, para escoger el modelo se debe aplicar el principio de parsimonia de los modelos de series temporales planteado por Box & Jenkins (Box et.al. 1976), donde cualquier procedimiento de identificación de modelo debe tender a identificar modelos parsimoniosos que logren una eficiente estimación de parámetros y predicción de la serie temporal.

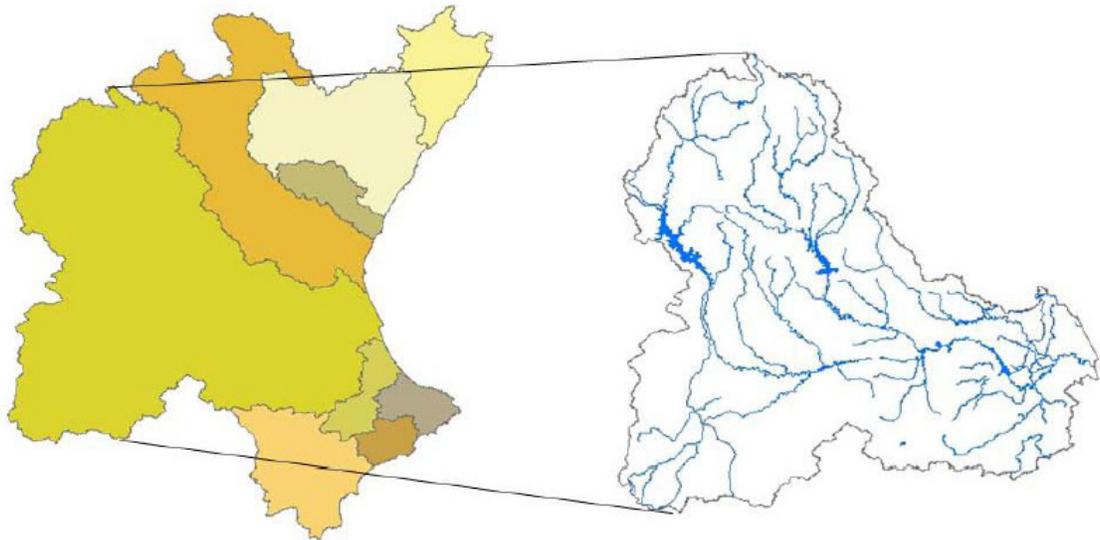
### 3. CASO DE ESTUDIO: CUENCA DEL RÍO JÚCAR

#### 3.1. DESCRIPCIÓN SISTEMA DEL RÍO JÚCAR

##### 3.1.1. Características generales

El sistema Júcar se encuentra dentro del ámbito de la Confederación hidrográfica del Júcar (CHJ), la cual está constituida por 9 sistemas de explotación: Cenia-Maestrazgo, Mijares-Plana de Castellón, Palancia-LosValles, Turia, Júcar, Serpis, Marina Alta, Marina Baja y Vinalopó-Alacantí.

**Figura 3.1 Sistema de explotación del Río Júcar (IIAMA 2006)**



Se trata del sistema de explotación más extenso (22.378 km<sup>2</sup>) y con más recursos hídricos de la Confederación Hidrográfica del Júcar y se articula en 18 unidades hidrogeológicas (IIAMA 2006)

El sistema Júcar comprende la totalidad de la cuenca del río Júcar, además del área y servicios efectivamente atendidos por el Canal Júcar-Turia y las

subcuencas litorales comprendidas entre la Gola de El Saler y el límite de los términos municipales de Cullera y Tavernes de Valldigna, incluyendo también la Cuenca endorreica de Pozohondo.

**Figura 3.2 Demarcación Hidrográfica del Júcar (CHJ, 2009)**



### 3.1.2. Red fluvial

Los cauces del sistema Júcar tienen un régimen marcadamente mediterráneo, caracterizado por unas fuertes sequías en verano e inundaciones en otoño.

La red hidrográfica del Sistema Júcar está constituida por el propio río Júcar y sus afluentes, entre los que cabe destacar por su importancia los ríos Valdemembra, Arquillo, Magro, Albaida, Reconque, Sellent y el mayor de todos, el Cabriel.

Las características más relevantes de los cauces más importantes del sistema se presentan en la siguiente tabla.

**Tabla 3.1 Red Fluvial del Sistema Júcar (IIAMA 2006)**

Río	Longitud (km)	Cuenca (km <sup>2</sup> )	Nacimiento Sistema	Desemboca
Júcar	497.5	21578.5	Cerro de San Felipe (Mtes.Universales)	Cullera
Cabriel	262.2	4754.2	Muela de San Juan (Mtes.Universales)	Júcar
Albaida	38	1300.5	Sierra Mariola (Alcoy)	Júcar MD
Magro	125.9	1543.7	Sierra de Mira	Júcar MI

### 3.1.3. Demandas

La demanda total consuntiva de la Cuenca del Júcar es alrededor 1385 hm<sup>3</sup>/año, siendo la demanda principal la agraria, con 1248 hm<sup>3</sup>/año, lo que representa casi un 90% de la demanda consuntiva y la demanda urbana supone 137 hm<sup>3</sup>/año que representa algo más del 10%.

El uso industrial consiste en la demanda para enfriamiento de la Central Nuclear Cofrentes alrededor de 35 hm<sup>3</sup>/año y al caudal objetivo turbinado por las centrales hidroeléctricas Cofrentes, Cortes II y Millares correspondiente a 4655 hm<sup>3</sup>/año. Ver

[Tabla 3.2](#)~~Tabla 3.2.~~

**Tabla 3.2 Demanda actual total (IIAMA 2006)**

Uso	Demanda (hm <sup>3</sup> /año)	%
Uso Agrícola	1248	21%
Uso Urbano	137	2%
Uso Industrial	4655	77%
Total	6040	100%

### 3.1.4. Uso Agrícola

Las Unidades de Demanda Agraria (UDA) corresponden a una zona que comparte características comunes: ubicación geográfica, origen del agua, tecnologías de riego, infraestructuras, etc. En el ámbito del sistema Júcar las UDA son de origen subterráneo y superficial. En general, las UDA de origen superficial se localizan principalmente en la Plana de Valencia, asociadas al tramo bajo del río Júcar.

El uso agrícola es de gran importancia en el sistema Júcar, dado que incluye los riegos tradicionales del Júcar y los regadíos de la Mancha Oriental, ambos con una gran superficie e importantes consumidores de recursos. Los mayores consumos se producen en las UDA de la Acequia Real del Júcar y la Ribera Baja, con 674 hm<sup>3</sup>/año, y en la Mancha Oriental con 445 hm<sup>3</sup>/año (IIAMA 2006).

**Tabla 3.3 Demanda UDA Sistema Júcar**

UDA		Demanda (hm <sup>3</sup> /año)	%
Ribera Baja	Cuatro Puelos	26	2%
	Sueca	174	14%
	Cullera	117	9%
Acequia Real del Júcar		357	29%
Canal Jucar Turia		60	5%
Escalona y Carcagente		54	4%
MO	Zona Albacete	445	36%
	Sustitución MO	15	1%
Total		1248	100%

#### Riegos Mancha Oriental

La demanda agrícola principal del sistema está localizada en la zona de la Mancha Oriental, donde se encuentra una amplia extensión de riegos por bombeo que ha

provocado el descenso del nivel freático del acuífero con efecto drenante de los caudales del río Júcar.

**Figura 3.3 Masa de agua subterránea de la Mancha Oriental**



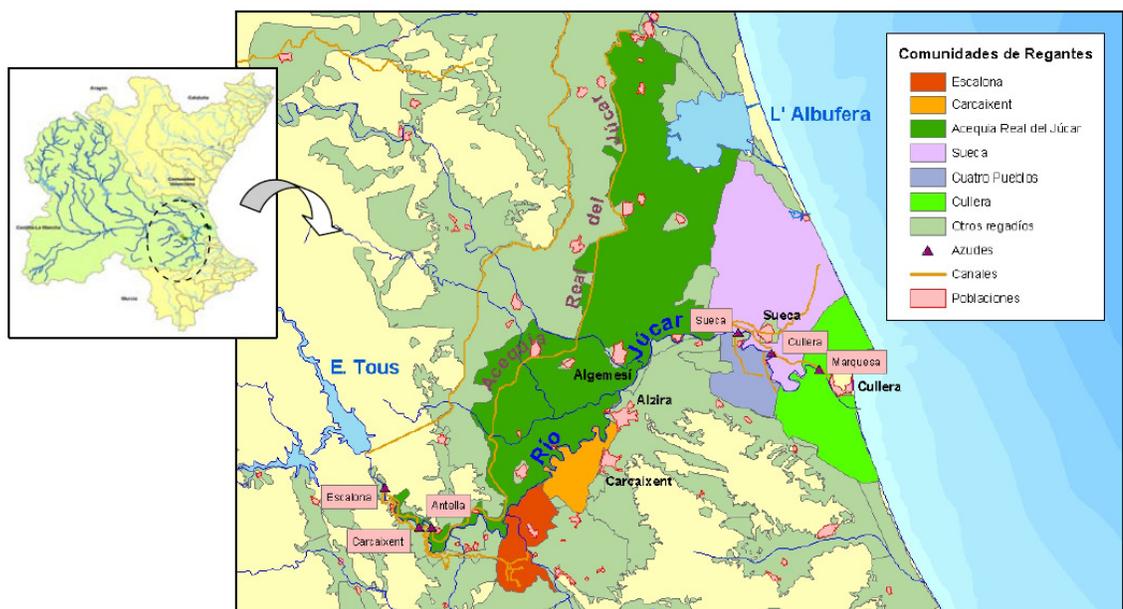
*Riegos históricos o tradicionales del Júcar*

Están situados en el sector este de la provincia de Valencia, y una parte del mismo está incluido dentro de los límites del Parque Natural de L'Albufera. A efectos de planificación hidrológica, se agrupan en tres unidades de demanda agrícola:

- Escalona y Carcagente: incluye los regadíos de la Real Acequia de Escalona y de la Real Acequia de Carcagente.

- Acequia Real del Júcar: incluye los regadíos de la Acequia Particular de Antella y la Acequia Real del Júcar
- Ribera Baja: incluye los regadíos de las comunidades de regantes de Sueca, Cullera y Cuatro Pueblos además de las pequeñas elevaciones de aguas del río de los términos de Polinyà de Xúquer y Riola.

**Figura 3.4 Riegos del las riberas del Júcar (Ficha 4.01 ETI CHJ 2009)**



### 3.1.5. Uso Urbano

Las demandas urbanas se concretan en las tomas para el abastecimiento de las ciudades de Valencia, Sagunto, Albacete y de la Marina Baja.

*Abastecidas mediante el Canal Júcar Turia*

Área Metropolitana Valencia: La ciudad de Valencia recibe agua, principalmente del sistema Júcar a través del Canal Júcar Turia y en mucha menor medida, del sistema Turia. El agua para abastecimiento es el uso prioritario.

Sagunto: Desde el canal Júcar-Turia se realiza también parte del abastecimiento de la ciudad de Sagunto desde Julio de 2000.(CHJ 2007)

*Abastecidas mediante el Traspase Tajo Segura (ATS)*

Albacete: esta ciudad se abastece desde Junio de 2002 de aguas superficiales procedentes del embalse de Alarcón a través del Traspase Tajo Segura, habiéndose clausurado los pozos de los que tomaba agua con anterioridad (CHJ 2007).

Marina Baja: sistemas de explotación estrictamente intracomunitario (Comunidad Valenciana), se abastece mediante las obras del Acueducto Tajo-Segura.

**3.1.6. Uso Industrial**

Las centrales hidroeléctricas de Cofrentes, Cortes II, Millares y la toma por la refrigeración de la central nuclear de Cofrentes representan las principales demandas industriales abastecidas por aguas superficiales. Se trata en principalmente de demandas no consuntivas.

Las centrales térmicas necesitan para su refrigeración grandes cantidades de agua que devuelven en su mayor parte al sistema hídrico prácticamente sin grandes impactos en la cantidad y calidad salvo por el incremento de temperatura. La única central nuclear en la CHJ se ubica en Cofrentes, y tiene una potencia de

1085 MW, siendo la producción de la central en 2006 de 9219 GWh. Dada la cantidad de agua evaporada este uso se ha tenido en cuenta en la demanda industrial.

## **3.2. DESCRIPCIÓN DE PROBLEMAS**

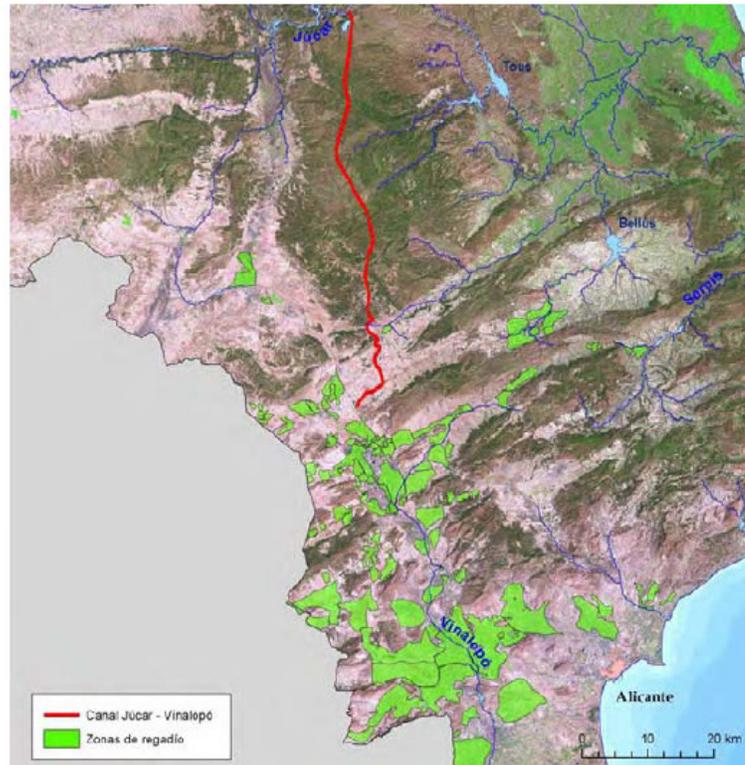
### **3.2.1. Cumplimiento de garantías**

El sistema del río Júcar es un territorio con recursos hídricos escasos y utilización intensiva. El agua puede convertirse en un factor limitante para el desarrollo económico y su déficit, una amenaza para el medio natural. Uno de sus grandes retos es la garantía de suministro de agua, en cantidad y calidad suficiente, para el consumo humano, agricultura, y otras actividades económicas vinculadas.

### **3.2.2. Implementación de Medidas Traslase Júcar Vinalopó**

El nuevo proyecto de la conducción Júcar-Vinalopó plantea la conexión del tramo bajo del río Júcar en el TM de Cullera con el tramo V del antiguo trazado. La conducción podrá trasvasar recursos excedentarios del río Júcar al Vinalopó con un máximo legal de 80 hm<sup>3</sup>/año, con los que se sustituirán preferentemente extracciones subterráneas de uso agrícola (ETI 2009)

**Figura 3.5** Trasvase Júcar-Vinalopó (CHJ 2009)



*Situación de los Riegos del medio y Bajo Vinalopó*

Se trata de una zona de 20.000 hectáreas sin incluir la zona regable Riegos de Levante, M.I., debido a que estas se abastecen de aguas procedentes del Segura. La zona está dedicada preferentemente a la producción de uva de mesa y productos hortícolas con un alto potencial de exportación. El aprovechamiento de recursos subterráneos ha puesto en peligro la subsistencia de los acuíferos, existiendo dos de ellos con declaración provisional de sobreexplotación.

Pese a que se ha tratado de mitigar mediante métodos culturales de adaptación, utilizándose dotaciones más bajas junto con una ligera reducción de la superficie cultivable, es un proceso que puede agudizarse a corto plazo si no se aplican recursos alternativos procedentes de otras cuencas. También está previsto la

utilización de aguas residuales y un plan de balsas, medidas todas ellas insuficientes a medio plazo y en algunos casos a corto (PHJ 1999).

#### *Situación esperada*

El motivo de trasvasar el agua es mitigar la sobreexplotación de los acuíferos y el déficit de agua en las zonas de Vinalopó-Alicantí. Este proyecto está estrechamente relacionado con el proyecto de modernización de regadío en la Acequia Real del Júcar (PHJ 1999).

En la Ficha 4.3 del ETI se identificaron 86 pozos en los que se podría realizar una sustitución de recursos subterráneos de  $51.6 \text{ hm}^3/\text{año}$  con aguas procedentes del sistema Júcar. Este volumen corresponde a las extracciones del año 2005 de sondeos con un derecho firme o en trámite de  $70.4 \text{ hm}^3$  y con esta hipótesis se mantendría una extracción de  $31.3 \text{ hm}^3$  en los pozos no sustituidos (ETI 2009). Los principales pozos sustituidos se concentran en las masas de agua subterránea del interior del sistema de explotación del Vinalopó, donde se emplazan las principales áreas agrícolas y de las que parten las principales conducciones hacia los aprovechamientos del resto del sistema de explotación.

#### *Situación actual (2011)*

El trasvase Júcar-Vinalopó cuenta con una toma situada en el Azud de la Marquesa. Se requiere evaluar si la toma del agua supondría menoscabar los derechos de los regantes tradicionales del Júcar que se encuentran reconocidos en el Plan Hidrológico del Júcar.

### 3.3. MODELO DE SIMULACIÓN

El modelo de simulación del sistema Júcar del cual se dispone es un modelo detallado implementado en el módulo SIMGES de AQUATOOL que ha sido aplicado con éxito en diversos estudios para la CHJ. Aunque el modelo está siendo actualizado constantemente para el desarrollo de los nuevos Planes Hidrológicos de Cuenca en cumplimiento de la Directiva Marco europea, aquí usaremos la versión empleada por el IIAMA de la Universidad Politécnica de Valencia en el marco del convenio con EPTISA en el proyecto *“Desarrollo y aplicación de metodologías y herramientas en la cuenca piloto del río Júcar para los análisis económicos requeridos en la Directiva Marco Europea del Agua* (IIAMA et al 2006). En dicho modelo están representadas todas las componentes relevantes del sistema (recursos superficiales y subterráneos, infraestructura, demandas, etc.), representando razonablemente distintas políticas de gestión y permitiendo obtener los resultados de aquellos elementos individuales que interesan el análisis del presente estudio.

#### 3.3.1. Esquema de simulación del sistema Júcar

El esquema del modelo de simulación del Sistema Júcar implementado en el módulo SIMGES de Aquatool ([Figura 3.6](#)~~Figura 3-6~~), presenta ocho elementos de aportaciones restituidas a régimen natural con una media anual de alrededor de 1560 hm<sup>3</sup> y siete (7) embalses con una capacidad máxima de aproximadamente 2000 hm<sup>3</sup>, El río Júcar es el cauce principal cuyo afluente de mayor importancia es el río Cabriel que desemboca a la altura del embalse Cortes II.

Como parte de las reglas de operación, en el modelo de simulación cada demanda del esquema tiene definida una prioridad en el reparto del agua, con respecto a las demás unidades de demandas.

Los elementos de mayor prioridad son las demandas urbanas, desde el embalse Alarcón por medio del Acueducto Tajo Segura se abastecen las poblaciones de Marina Baja y Albacete y desde el embalse de Tous por la conducción del Canal Júcar Turia se abastecen las poblaciones de Valenecia y Sagunto. Teniendo en cuenta que el uso que la Central Nuclear le da al agua es de refrigeración, por motivos de seguridad también se asigna una prioridad alta a este elemento.

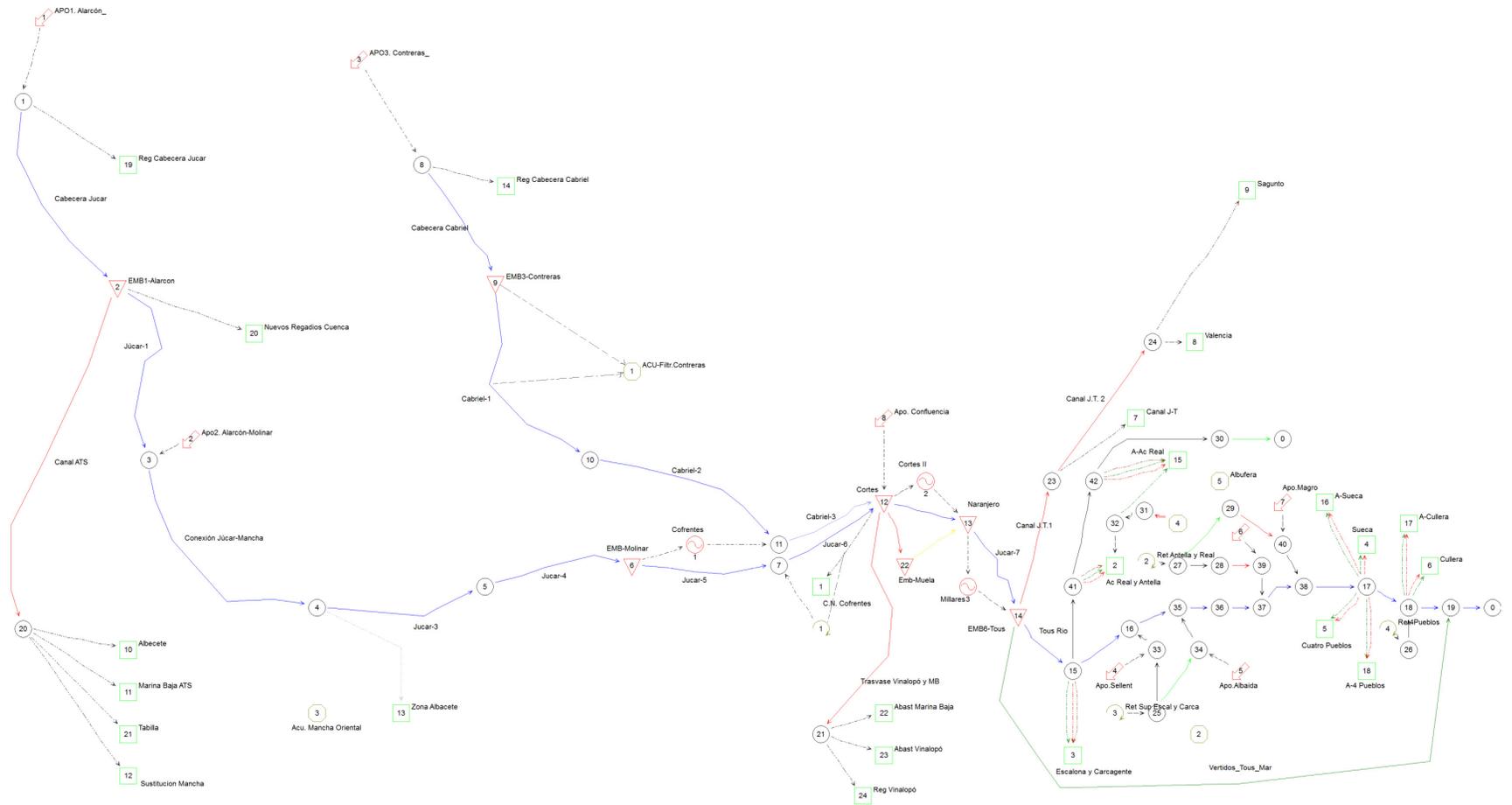
Seguidamente la prioridad se le asigna a las demandas agrícolas, repartidas en la zona de la Mancha Oriental y aguas abajo del embalse de Tous y por último se asigna la prioridad de las tres centrales hidroeléctricas.

Otra regla de operación que se aplica en el modelo consiste en el mantenimiento de niveles mínimos de embalse y en la imposición de caudales ecológicos en determinados tramos de río, las cuales se implementan en el modelo de manera que la gestión las respete de forma automática.

En los siguientes apartados se describirán con detalle los elementos y variables del modelo y las reglas de operación.

.

Figura 3.6 Esquema del modelo de simulación del Sistema Júcar implementado en SIMGES



### **3.3.2. Series de datos**

El periodo temporal está definido por la serie histórica de aportaciones actualmente disponible, que tiene una duración de 63 años, desde octubre de 1940 hasta septiembre de 2002. El empleo de series hidrológicas extensas permite considerar la variabilidad temporal en la disponibilidad del recurso.

Aunque la simulación hidrológica se hace a escala mensual, los resultados económicos se calculan mediante integración de las curvas de demanda anuales, considerando para cada año la suma de los flujos mensuales generados por el simulador.

### **3.3.3. Variables de análisis**

Los resultados de las simulaciones del modelo incluyen, para el esquema mostrado, la evolución de todas las variables de interés: aportaciones, volúmenes embalsados, sueltas, caudales circulantes, valor de las variables de control en los acuíferos, etc., a nivel mensual y anual (series temporales) y valores medios para el período de simulación, así como déficits y garantías para las distintas demandas. De todos los resultados del modelos, se han escogido para este estudio las siguientes variables:

- Aportación anual en Cabecera
- Volumen en Cabecera al principio de cada año hidrológico
- Suministro anual a las demandas

*Aportación en Cabecera*

Se creó una variable Apo\_Alar\_Cont, que corresponde a la sumatoria de las series anuales de aportaciones de cabecera correspondientes a APO-1Alar (aportaciones anuales al embalse de Alarcón) y APO3-Contreras (aportaciones anuales al embalse de Contreras). Corresponden al (53%) de las ocho aportaciones restituidas a régimen natural representadas en el sistema y al 73% de las aportaciones de cabecera, responsables del abastecimiento de la totalidad de las demandas del sistema.

- APO1.Alarcón se ubica en el embalse Alarcón, corresponde a la cuenca del río Júcar entre la cabecera y el citado embalse.
- APO3.Contreras se ubica en el embalse Contreras y unifica las aportaciones de toda la cuenca del Cabriel.

**Tabla 3.4 Aportaciones del Sistema Júcar**

Aportación	Apo1	Apo2	Apo3	Apo8	Apo.4 Sellent	Apo.5 Albaida	Apo.6 Verde	Apo.7 Magro	Apo Media Anual
Ubicación	Emb Alar	R.Júcar A.Abajo Alarcón	Emb Cont	Emb Cortes	Ribera Jucar	Ribera Jucar	Ribera Jucar	Ribera Jucar	Sistema Júcar
Promedio (hm <sup>3</sup> )	420.61	299.54	366.18	253.5	24.07	113.84	54.86	26.18	1558
Total=.%	27%	19%	24%	16%	2%	7%	4%	2%	100%

*Volumen Inicial en Cabecera*

La variable Vo\_Alar\_Cont hace referencia al volumen final del año hidrológico previo (septiembre), suma de los volúmenes en los dos embalses de cabecera Alarcón y Contreras. La capacidad máxima de estos embalses corresponde al 79% de la total calculada con los ocho embalses representados en el sistema.

**Tabla 3.5 Capacidad de Embalses del Sistema Júcar**

Embalse	Alarcón	Molinar	Contreras	Cortes	Naranjero	Muela	Tous
Prioridad	1	4	1	1	4	4	4
V <sub>máx</sub> (hm <sup>3</sup> )	1112	4.3	463.2	111	20	20	261.2
Total (1992)	55.8%	0.2%	23.3%	5.6%	1.0%	1.0%	13.1%
V <sub>obj</sub> (hm <sup>3</sup> )	900	4.3	240	100	18	20	125
V <sub>mín</sub> (hm <sup>3</sup> )	30	4.3	15	100	18	20	30

- Vo<sub>Alar</sub>: volumen final del año hidrológico (septiembre) del elemento EMB1- Alarcón (embalse de 1112 hm<sup>3</sup> de capacidad), en el cual se ubica APO1.Alarcón, que unifica las aportaciones prácticamente en régimen natural, debido a las escasas afecciones presentes aguas arriba del mismo.
- Vo<sub>Contreras</sub>: Volumen final del año hidrológico (septiembre) del elemento EMB3- Contreras (embalse de 463 hm<sup>3</sup> de capacidad) en el cual se ubica APO3.Contreras, que unifica las aportaciones del Cabriel.

Demandas anuales:

- Agrícola: Mancha Oriental y unidades de demanda del Canal Jucar-Turia, Acequia Real y Antella, Escalona y Carcagente, y los riegos de la Ribera Baja.
  - MO<sub>Sustitución</sub>: Tomas de la sustitución de bombeos de la Mancha Oriental conectada al nodo proveniente de la Conducción del Acueducto Tajo Segura (ATS), el cual parte del embalse Alarcón.
  - MO<sub>Zona Abacete</sub>: los bombeos de Zona Albacete se han representado como una demanda con toma ficticia en el río Júcar (caudal nulo) de manera que la demanda sólo se abastece del acuífero.
  - A<sub>Ci\_CJT</sub>: riegos del Canal Júcar-Turia, conectadas al nodo final del tramo 1 del Canal Júcar-Turia (CJT), el cual parte del Embalse Tous.

- A\_Az\_AcReal, A\_Ci-AcReal, A\_Ci\_Esc&Carc: riegos de la Ribera Alta correspondientes a las demandas agrícolas de Acequia Real y Antella (Cítricos y Arroz) y de Escalona y Carcagente (cítricos). Toman sus aguas del nodo 15 aguas abajo del embalse Tous.
- A\_Az\_Sueca, A\_Ci\_Sueca, A\_Az\_4Publ, A\_Ci\_4Publ: riegos de las Comunidades de Regantes de Sueca y Cuatro Pueblos que representan los cultivos de arroz y cítricos de Sueca y Cuatro Pueblos.
- A\_Az\_Cull, A\_Ci\_Cull: riegos de cítricos y arroz de Cullera. La demanda de Cuatro Pueblos retorna parte de su suministro donde puede ser aprovechado por la demanda de la Comunidad de Regantes de Cullera

**Tabla 3.6 Demanda anual y prioridades en el sistema de usos agrícolas**

Variable	Demanda (hm <sup>3</sup> )	Prioridad
A_Az_4Publ	22.19	4
A_Az_AcReal	107.71	6
A_Az_Cull	103.72	4
A_Az_Sueca	148.38	4
A_Ci-AcReal	249.29	6
A_Ci_4Publ	3.81	4
A_Ci_CJT	60	6
A_Ci_Cull	13.28	4
A_Ci_Esc&Carc	54	2
A_Ci_Sueca	25.62	4
MO_Zona_Albacete	445	1
MO_Sustitucion	15	6

- Industrial:
  - I\_CNCoifr: Central Nuclear de Cofrentes toma caudal del embalse de Cortes II (EMB4-Cortes II, volumen máximo 110 hm<sup>3</sup>, volumen mínimo 100 hm<sup>3</sup>). En la confluencia con el Reconque se incorpora la aportación

Molinar-Confluencia y el vertido industrial de la central nuclear de Cofrentes.

- I\_CHCofr: La Central Hidroeléctrica de Cofrentes toma caudal del embalse Molinar. Su caudal objetivo mensual constante es de 52 hm<sup>3</sup>/mes (624 hm<sup>3</sup>/año) y su caudal máximo de turbinación de 156 hm<sup>3</sup>/mes (60 m<sup>3</sup>/s), el cual se considera como límite máximo circulante para la conducción
- I\_CHCortes: La Central Hidroeléctrica de Cortes II se encuentra situada a pié de embalse, toma caudal del embalse de Cortes II (EMB4-Cortes II, volumen máximo 110 hm<sup>3</sup>, volumen mínimo 100 hm<sup>3</sup>). Su caudal objetivo mensual constante es de 285 hm<sup>3</sup>/mes (3420 hm<sup>3</sup>/año) y su caudal máximo de turbinación de 855 hm<sup>3</sup>/mes (326 m<sup>3</sup>/s).
- I\_CHMill: Central Hidroeléctrica de Millares, cuyo salto se representa tomando directamente del embalse de Naranjero (EMB5-Naranjero, volumen 20 hm<sup>3</sup>, volumen mínimo 18 hm<sup>3</sup>) y vertiendo en el embalse de Tous, su caudal objetivo mensual es 48 hm<sup>3</sup>/mes (576 hm<sup>3</sup>/año) y su caudal máximo de turbinación 144 hm<sup>3</sup>/mes (55 m<sup>3</sup>/s).

**Tabla 3.7 Caudal Objetivo anual y prioridades en el sistema de usos Industriales**

Variable	Demanda (hm <sup>3</sup> )	Prioridad
I_CHCofr	624	7
I_CHCortes	3420	7
I_CHMill	576	7
I_CNCoFr	35	1

• Urbana:

- U\_CATS\_Albacete, U\_CATS\_Mbaja : demandas de la ciudad de Albacete, el trasvase a la Marina Baja conectadas al nodo proveniente de la Conducción del Acueducto Tajo Segura(ATS), el cual parte del embalse Alarcón.

- U\_CJT\_Val, U\_CJT\_Sag: demandas de las poblaciones de Sagunto y Valencia, conectadas al nodo final del tramo 2 del Canal Júcar–Turia (CJT), el cual parte del Embalse Tous.

**Tabla 3.8 Demanda anual y prioridades en el sistema de usos urbanos**

Variable	Demanda (hm <sup>3</sup> )	Prioridad
U_CATS_Albacete	18	0
U_CATS_Mbaja	12	1
U_CJT_Val	95.01	0
U_CJT_Sag	12	0

- Tramos de río para análisis de Caudal mínimo:
  - RJ\_T1Alar: Tramo del río Júcar aguas abajo del embalse de Alarcón hasta la estación de Fuensanta, en la que se incorpora la aportación restituida a régimen natural correspondiente al tramo del río Júcar entre los embalses de Alarcón y Molinar, denominada APO2.Alarcón-Molinar
  - RJ\_T3MO: El tramo Júcar 3 representa el tramo desde la estación de los Frailes hasta el vertido de Alcalá del Júcar que recoge también los vertidos de los afluentes Valdemembra y Ledaña.
  - RJ\_T5Mol: Tramo Júcar 5 parte desde el embalse de Molinar y se extiende hasta la confluencia con el Reconque. En esa confluencia se incorpora la aportación Molinar- Confluencia y el vertido industrial de la central nuclear de Cofrentes. En este tramo se ha dispuesto un caudal mínimo de 300l/s (fuente: Iberdrola).
  - RC\_T1Cont: El tramo Gabriel-1, aguas abajo del embalse Contreras, recoge las filtraciones del embalse, las cuales se incorporan al río con un desfase temporal a través del acuífero ACU-Filtr.Contreras. Está seguido por los tramos Gabriel-2.y Gabriel-3, este último representa el

último tramo del río hasta su confluencia en el río Júcar en el embalse Cortes.

- RJ\_T7Nar: Tramo Jucar-7 conecta el embalse Naranjero con el embalse de Tous (EMB6-Tous, volumen máximo de 378 hm<sup>3</sup>, limitado de agosto a noviembre a 72 hm<sup>3</sup> para protección contra avenidas).
- RJ\_Tous: Tramo Tous Rio que conecta el Embalse con el nudo 15, del cual toman sus dotaciones las demandas de Escalona y Carcagente y Acequia Real y Antella.

**Tabla 3.9 Caudales mínimos y prioridades en el sistema**

Variable	Qmin (hm <sup>3</sup> )	Prioridad
RC_T1Cont	12.62	0
RJ_T1Alar	63.2	0
RJ_T3MO	63.2	0
RJ_T5Mol	9.49	0
RJ_T7Nar	18.97	0
RJ_Tous	18.96	0

### 3.3.4. Reglas de operación

El módulo SIMGES del SAD Aquatool permite definir las reglas de operación del sistema según tres niveles de gestión:

- Determinación de una jerarquía de prioridades entre las demandas
- Imposición de caudales ecológicos y limitaciones medioambientales en general
- Mitigación y prevención de los eventos de sequía

En el modelo de simulación cada demanda del esquema tiene definida una prioridad en el reparto del agua, con respecto a las demás unidades de demandas. Dichas prioridades se asignaron conforme a los principios de la legislación

REDES BAYESIANAS PARA EL ANÁLISIS INTEGRADO DE LA GESTIÓN DE SRH.  
 APLICACIÓN A LA CUENCA DEL RÍO JÚCAR

---

española con lo establecido en el PHJ (apartado III.2), donde las demandas prioritarias son el abastecimiento urbano, seguido por las demandas agrícolas e industriales (IIAMA 2006). En las tablas de demandas (Tabla 3.6, Tabla 3.7 y Tabla 3.8) se indican las prioridades asumidas en el presente modelo.

Las limitaciones medioambientales como el mantenimiento de niveles mínimos de embalse o de caudales ecológicos en determinados tramos de río. Los caudales ecológicos están definidos en los siguientes tramos del río (Ver datos anuales de caudales en Tabla 3.9):

- Cabriel-1, salida de Contreras, hasta 400 l/s
- Júcar-1, salida de Alarcón, entre 1.8 y 2 m<sup>3</sup>/s
- Júcar-3, tramo aguas abajo conexión Mancha Oriental no tiene definido un mínimo pero se evaluará su garantía con un mínimo entre 1.8 y 2 m<sup>3</sup>/s.
- Júcar-5, salida embalse Molinar, 300l/s (fuente: Iberdrola)
- Júcar-7, salida embalse de Naranjero hasta Tous, 600 l/s (fuente Iberdrola)
- Tous-Río, salida embalse Tous, entre 560 y 620 l/s

**Tabla 3.10 Caudal mínimo mensual establecido en el modelo de simulación**

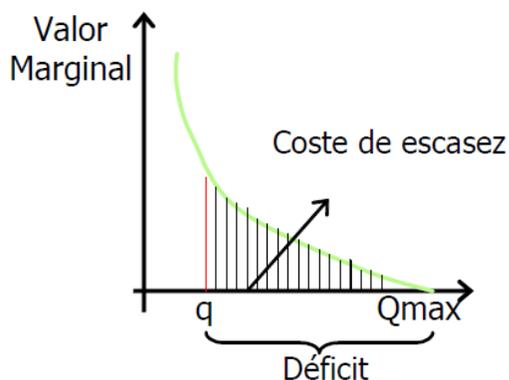
Río		Cabriel 1		Jucar 1		Jucar 5		Jucar 7		Tous-Río	
Mes	días	m <sup>3</sup> /s	hm <sup>3</sup>								
Oct	31	0.40	1.07	2.01	5.38	0.30	0.79	0.59	1.58	0.60	1.61
Nov	30	0.40	1.04	2.00	5.18	0.31	0.79	0.61	1.58	0.60	1.56
Dic	31	0.40	1.07	2.01	5.38	0.30	0.79	0.59	1.58	0.60	1.61
Ene	31	0.40	1.07	2.01	5.38	0.30	0.79	0.59	1.58	0.60	1.61
Feb	28	0.40	0.97	2.00	4.84	0.33	0.79	0.65	1.58	0.60	1.45
Mar	31	0.40	1.07	2.01	5.38	0.30	0.79	0.59	1.58	0.60	1.61
Abr	30	0.40	1.04	2.00	5.18	0.31	0.79	0.61	1.58	0.60	1.56
May	31	0.40	1.07	2.01	5.38	0.30	0.79	0.59	1.58	0.60	1.61
Jun	30	0.40	1.04	2.00	5.18	0.31	0.79	0.61	1.58	0.60	1.56
Jul	31	0.40	1.07	2.01	5.38	0.30	0.79	0.59	1.58	0.60	1.61

Río		Cabriel 1		Jucar 1		Jucar 5		Jucar 7		Tous-Rio	
Mes	días	m <sup>3</sup> /s	hm <sup>3</sup>								
Ago	31	0.40	1.07	2.01	5.38	0.30	0.79	0.59	1.58	0.60	1.61
Sep	30	0.40	1.04	2.00	5.18	0.31	0.79	0.61	1.58	0.60	1.56
Hm <sup>3</sup> /año			12.62		63.20		9.49		18.97		18.96

### 3.3.5. Información Económica para el análisis de beneficio

Las funciones económicas de demanda de cada uso expresan la relación entre el agua suministrada y su valor marginal a nivel anual, con el fin de representar el coste/beneficio unitario para el sistema los distintos niveles de flujo o suministro a cada elemento. (IIAMA 2006)

**Figura 3.7 Funciones económicas de demanda, déficit y coste de escasez (IIAMA 2006)**



Las funciones económicas de demanda para los principales usos de la cuenca, se aproximaron a la siguiente ecuación (IIAMA 2006):

**Ec. 22 Función económica de demanda**

$$y = a + b(x) + c(x)^2 + d/(x + e) + f(x)^g$$

Donde, la función que proporciona el beneficio para un volumen de agua disponible es igual al área bajo la curva de demanda hasta ese nivel de suministro, y equivale a la disposición total a pagar por esa cantidad de agua.

**Ec. 23 Beneficio económico de demanda**

$$B = a(x) + (b/2)(x)^2 + f/(g+1) (x)^{g+1}$$

Para cada uno de los diferentes usos se estimaron los coeficientes de dichas ecuaciones.

Uso Agrícola

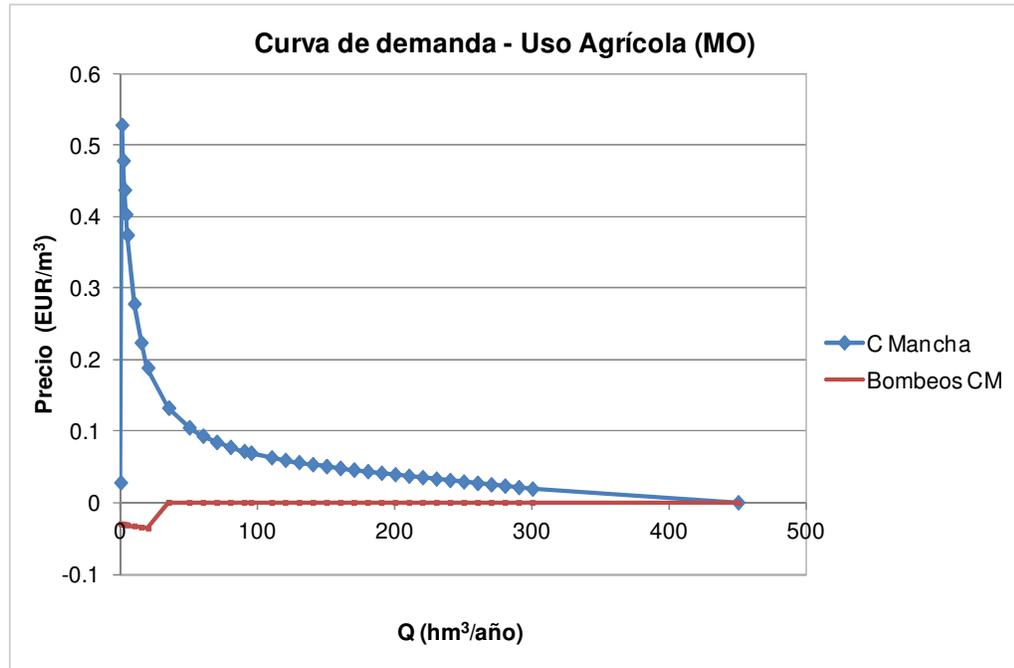
- Regadíos Mancha Oriental (Elemento Zona Albacete) y coste de bombeo:

El beneficio de la demanda de uso agrícola es calculado como el área bajo a curva de la función económica con la ecuación ([Ec. 22](#)) y el costo del bombeo es calculado como un valor de la función económica ([Ec. 22](#))

**Tabla 3.11 Coeficientes de cálculo Beneficio Demanda agrícola - MO**

	Regadíos MO	Bombeos CM
a	0.028	-0.03
b	0	-0.0003042
c	-0.00000026	
d	4.5	
e	8	
Xmax	445.00	445.00

**Figura 3.8 Curva de demanda – Uso Agrícola MO**



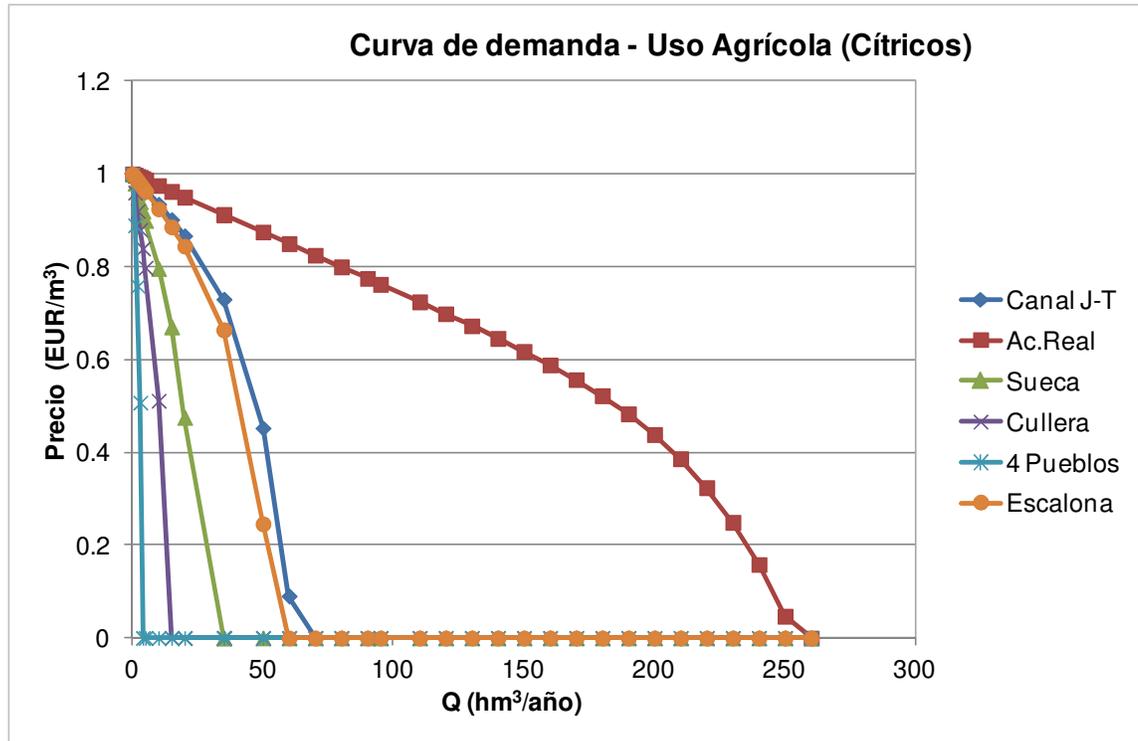
- Riegos aguas abajo del embalse de Tous:

Con el objetivo de reducir la complejidad en el modelo se sumaron los consumos correspondientes a los cítricos y la huerta en cuanto tienen una capacidad de pago similar.

**Tabla 3.12 Coeficientes de cálculo Beneficio Demanda agrícola – Cítricos (IIAMA 2006)**

	A_Ci_AcReal	A_Ci_4Publ	A_Ci_CJT	A_Ci_Cull	A_Ci_Esc&Carc	A_Ci_Sueca
a	1	1	1	1	1	1
b	-0.0025	-0.11	-0.0065	-0.04	-0.0075	-0.02
f	-3.4E-19	-0.00067	-2.8E-09	-0.00000028	-5.8E-09	-3.9E-08
g	7.5	5	4.65	5.5	4.6	5
Xmax	249.29	3.81	60.00	13.28	54.00	25.62

Figura 3.9 Curva de demanda – Uso Agrícola Cítricos-Hortalizas

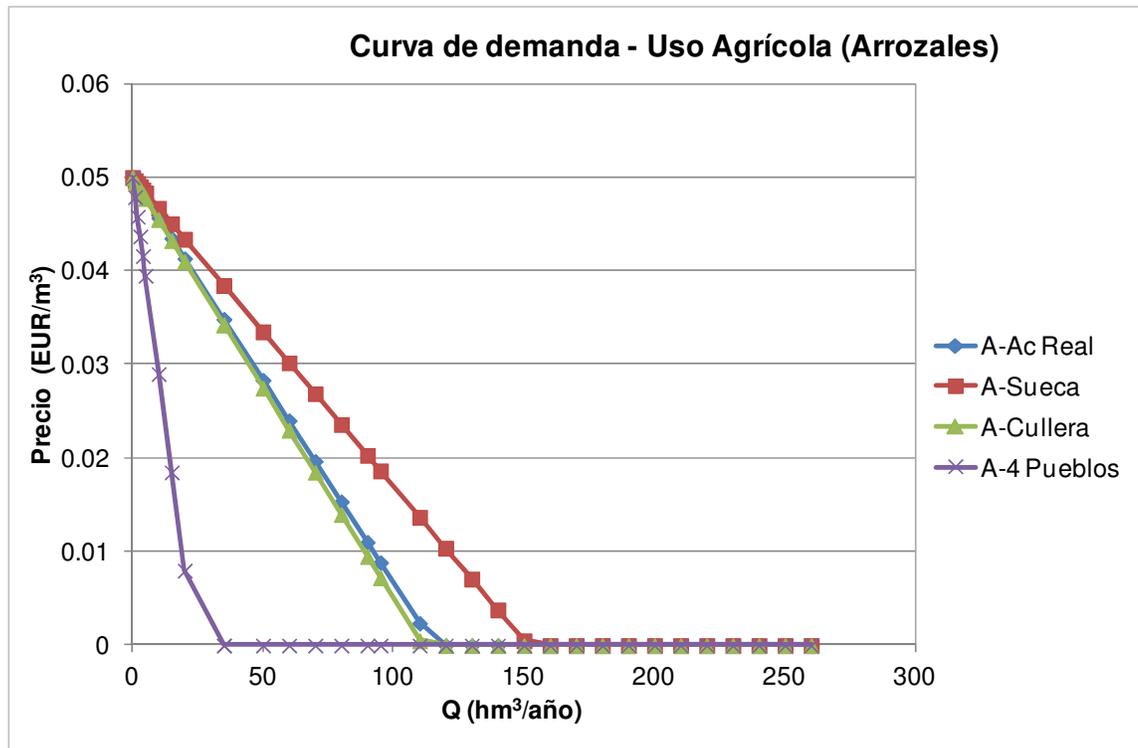


Los cultivos de arroz se caracterizan por una disposición de pago muy baja comparada con los demás usos presentes en la cuenca, lo que supone una contribución marginal al excedente total de los usuarios.

Tabla 3.13 Coeficientes de cálculo Beneficio Demanda agrícola – Arrozales (IIAMA 2006)

	A_Az_4Publ	A_Az_AcReal	A_Az_Cull	A_Az_Sueca
a	0.05	0.05	0.05	0.05
b	-0.0021	-0.000433	-0.00045	-0.00033
Xmax	22.19	107.71	103.72	148.38

Figura 3.10 Curva de demanda – Uso Agrícola Arrozales

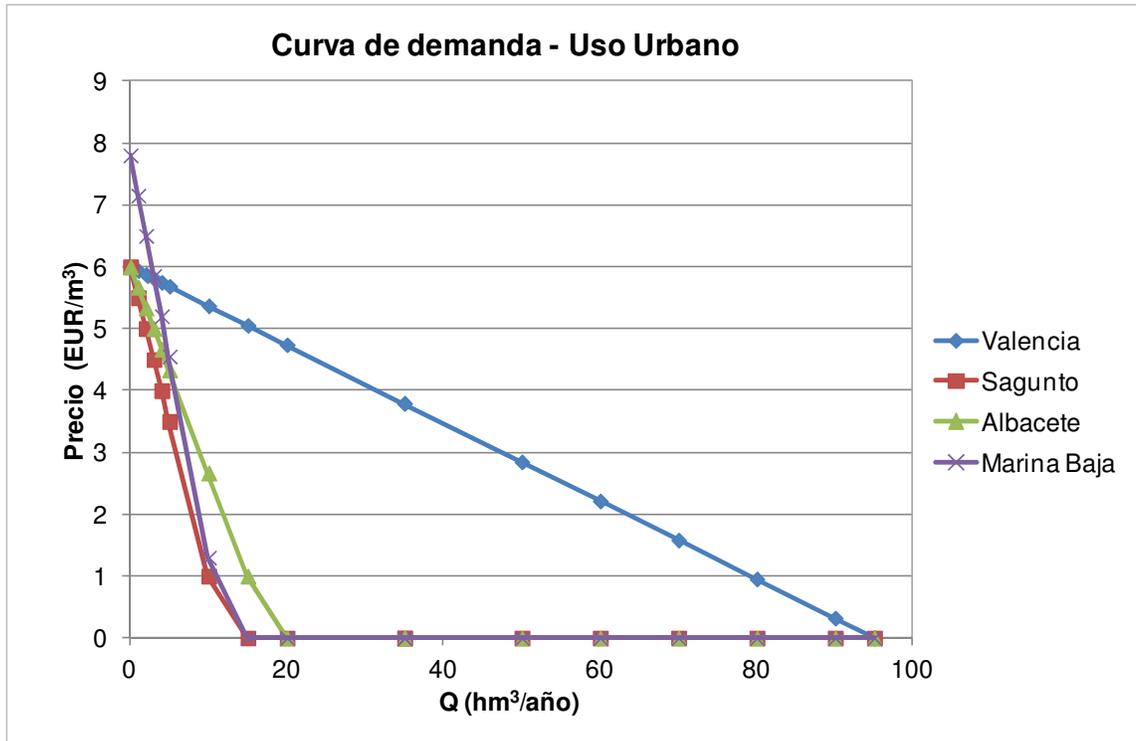


Uso Urbano

Tabla 3.14 Coeficientes de cálculo Beneficio Demanda Industrial (IIAMA 2006)

	Albacete	Marina Baja	Valencia	Sagunto
a	6	7.8	6	6
b	-0.3333	-0.65	-0.0631	-0.5
Xmax	18.00	12.00	95.01	12.00

Figura 3.11 Curva de demanda – Uso Urbano [Fuente: AHidroEco2006]



Uso Industrial

Tabla 3.15 Coeficientes de cálculo Beneficio Demanda Industrial (IIAMA 2006)

	I_CHCofr	I_CHCortes	I_CHMill	I_CNCoFr
a	0.0036	0.0036	0.0036	0.12
Xmax	624.00	3420.00	576.00	35.00

Figura 3.12 Curva de Demanda- Centrales Hidroeléctricas

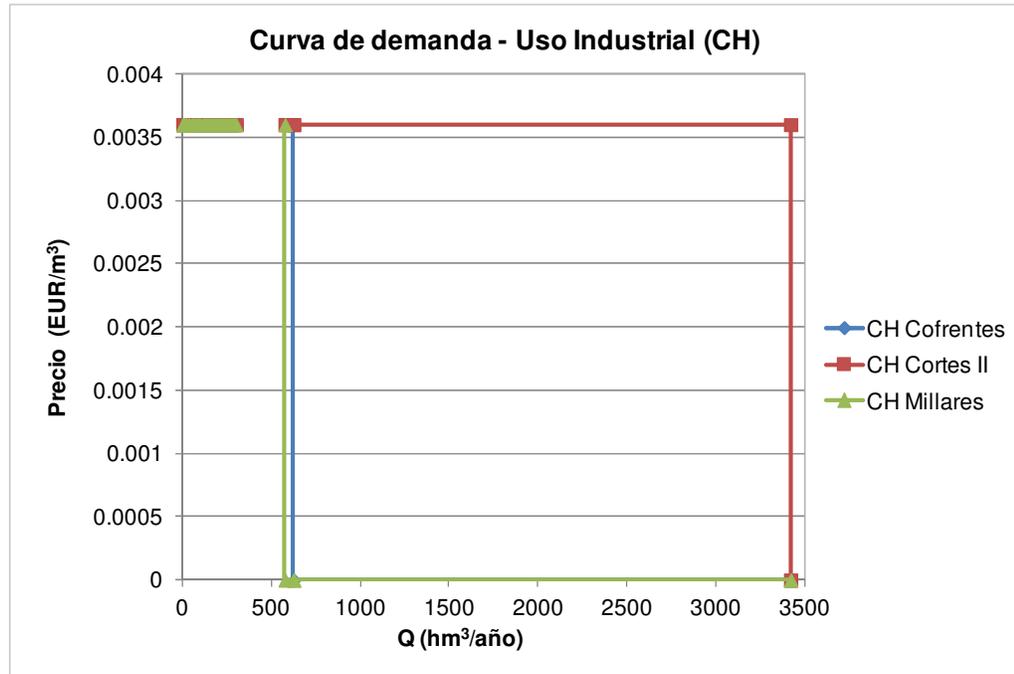
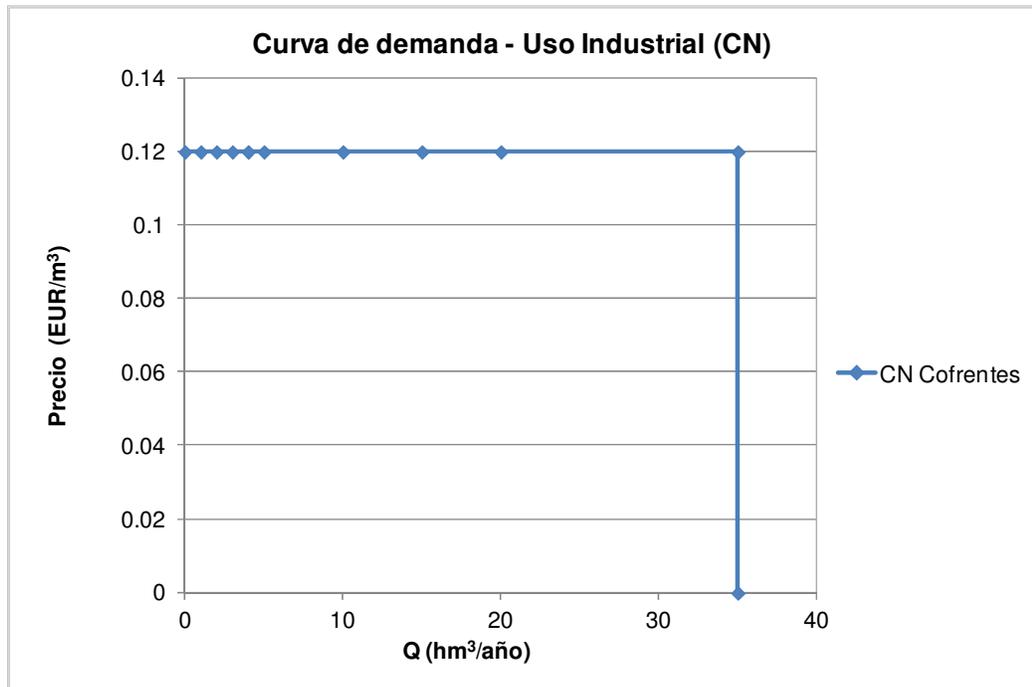


Figura 3.13 Curva de Demanda- Central Nuclear



#### **4. GENERACIÓN DE ESCENARIOS DE SIMULACIÓN**

La generación de escenarios permite llevar a cabo un análisis probabilístico de Monte Carlo de los resultados de la gestión del sistema, simulando con AQUATOOL, bajo diferentes condiciones tanto hidrológicas como de aplicación de medidas.

De tal forma, realizar un análisis de indicadores de rendimiento del sistema como vulnerabilidad, resiliencia, garantía volumétrica, garantía anual y sostenibilidad del sistema.

Así mismo, mediante el uso de las redes bayesianas analizar los resultados probabilísticos de garantía de cada una de las demandas bajo diferentes condiciones previas de aportación y volumen inicial en cabecera.

##### **4.1. ESCENARIOS CON SERIES SINTÉTICAS**

Análisis probabilístico de Monte Carlo de los resultados de la gestión del sistema, simulando con AQUATOOL bajo escenarios hidrológicos equiprobables con series de aportaciones generadas estocásticamente mediante modelación ARMA

###### **4.1.1. Generación de series sintéticas**

Para el análisis estadístico de las series y la modelación estocástica se ha empleado el módulo MASHWIN del SAD AQUATOOL.

REDES BAYESIANAS PARA EL ANÁLISIS INTEGRADO DE LA GESTIÓN DE SRH.  
 APLICACIÓN A LA CUENCA DEL RÍO JÚCAR

---

*Estadísticos de las series de aportaciones, normalización y tipificación*

A continuación se presentan los valores de los estadísticos de las series mensuales evaluados en cada uno de los procesos de la generación estocástica. Adicionalmente, se presentan los límites requeridos en el Test de normalidad para escoger la transformación de normalización que mejor se ajusta a cada uno de los meses evaluados, dado que siguen transformaciones sesgadas.

**Tabla 4.1 Estadísticos de las aportaciones mensuales originales y límites de Senedecor y Cochran (test del sesgo)**

ESTACIÓN ALARCÓN					
mes	media	dv.tip	sesgo	lim.inf.	lim.sup.
oct	17.361	12.91	2.328	-0.598	0.598
nov	24.987	19.74	2.081	-0.598	0.598
dic	32.143	25.819	1.756	-0.598	0.598
ene	53.716	56.79	1.898	-0.598	0.598
feb	57.316	50.789	1.821	-0.598	0.598
mar	59.979	57.121	1.854	-0.598	0.598
abr	47.29	28.262	0.85	-0.598	0.598
may	42.303	30.822	1.8	-0.598	0.598
jun	32.361	19.216	1.439	-0.598	0.598
jul	20.643	10.926	1.11	-0.598	0.598
ago	16.71	8.452	0.64	-0.598	0.598
sep	15.8	8.503	1.072	-0.598	0.598
ESTACIÓN CONTRERAS					
mes	media	dv.tip	sesgo	lim.inf.	lim.sup.
oct	22.669	12.237	1.575	-0.598	0.598
nov	23.351	11.421	1.144	-0.598	0.598
dic	29.715	18.577	1.729	-0.598	0.598
ene	38.97	31.517	1.831	-0.598	0.598
feb	41.372	33.589	2.274	-0.598	0.598
mar	45.236	37.1	1.975	-0.598	0.598

REDES BAYESIANAS PARA EL ANÁLISIS INTEGRADO DE LA GESTIÓN DE SRH.  
 APLICACIÓN A LA CUENCA DEL RÍO JÚCAR

abr	37.42	21.282	0.717	-0.598	0.598
may	36.046	21.116	0.999	-0.598	0.598
jun	30.108	16.573	0.523	-0.598	0.598
jul	22.738	11.84	1.019	-0.598	0.598
ago	19.674	9.26	0.458	-0.598	0.598
sep	18.879	8.165	0.376	-0.598	0.598

Para la normalización de datos se asignó a cada mes la función de normalización evaluando que el sesgo de la serie mensual normalizada se encuentra dentro de los límites de Senedecor y Cochran

**Tabla 4.2 Estadísticos de las aportaciones mensuales normalizadas, límites de Senedecor y Cochran y Ecuación de Normalización empleada**

ESTACIÓN ALARCÓN						
Mes	media	dv.tip	sesgo	lim.inf.	lim.sup.	ecuación de normalización
Oct	2.722	0.608	0.146	-0.598	0.598	2 - <del>Ec. 15 Logaritmo Neperiano</del> 15 - <del>Logaritmo Neperiano</del>
Nov	1.39	0.144	0.388	-0.598	0.598	3 - <del>Ec. 16 Doble Logaritmo neperiano</del> Ec. 16 - <del>Doble Logaritmo neperiano</del>
Dic	3.25	0.712	0.082	-0.598	0.598	2 - <del>Ec. 15 Logaritmo Neperiano</del> 15 - <del>Logaritmo Neperiano</del>
Ene	3.594	0.879	0.452	-0.598	0.598	2 - <del>Ec. 15 Logaritmo Neperiano</del> 15 - <del>Logaritmo Neperiano</del>
Feb	3.75	0.792	0.293	-0.598	0.598	2 - <del>Ec. 15 Logaritmo Neperiano</del> 15 - <del>Logaritmo Neperiano</del>
Mar	3.754	0.845	0.199	-0.598	0.598	2 - <del>Ec. 15 Logaritmo Neperiano</del> 15 - <del>Logaritmo Neperiano</del>
Abr	6.566	2.059	0.182	-0.598	0.598	1 - <del>Ec. 14 Error cuadrático</del> Ec. 14 - <del>Error cuadrático</del>
May	3.557	0.652	0.098	-0.598	0.598	2 - <del>Ec. 15 Logaritmo Neperiano</del> 15 - <del>Logaritmo Neperiano</del>
Jun	3.359	0.551	0.058	-0.598	0.598	2 - <del>Ec. 15 Logaritmo Neperiano</del> 15 - <del>Logaritmo Neperiano</del>
Jul	4.394	1.164	0.421	-0.598	0.598	1 - <del>Ec. 14 Error cuadrático</del> Ec. 14 - <del>Error cuadrático</del>
Ago	3.952	1.052	0.026	-0.598	0.598	1 - <del>Ec. 14 Error cuadrático</del> Ec. 14 - <del>Error cuadrático</del>
Sep	3.835	1.056	0.245	-0.598	0.598	1 - <del>Ec. 14 Error cuadrático</del> Ec. 14 - <del>Error cuadrático</del>
ESTACIÓN CONTRERAS						

REDES BAYESIANAS PARA EL ANÁLISIS INTEGRADO DE LA GESTIÓN DE SRH.  
 APLICACIÓN A LA CUENCA DEL RÍO JÚCAR

ESTACIÓN ALARCÓN						
Mes	media	dv.tip	sesgo	lim.inf.	lim.sup.	ecuación de normalización
mes	media	dv.tip	sesgo	lim.inf.	lim.sup.	ecuación de normalización
oct	3.047	0.487	0.046	-0.598	0.598	2 - <del>Ec. 15 Logaritmo Neperiano</del> Ec. 15 Logaritmo Neperiano
nov	3.09	0.459	-0.048	-0.598	0.598	2 - <del>Ec. 15 Logaritmo Neperiano</del> Ec. 15 Logaritmo Neperiano
dic	1.444	0.128	-0.037	-0.598	0.598	3 - <del>Ec. 16 Doble Logaritmo neperiano</del> Ec. 16 Doble Logaritmo neperiano
ene	1.479	0.155	0.074	-0.598	0.598	3 - <del>Ec. 16 Doble Logaritmo neperiano</del> Ec. 16 Doble Logaritmo neperiano
feb	3.498	0.706	0.132	-0.598	0.598	2 - <del>Ec. 15 Logaritmo Neperiano</del> Ec. 15 Logaritmo Neperiano
mar	3.578	0.712	0.194	-0.598	0.598	2 - <del>Ec. 15 Logaritmo Neperiano</del> Ec. 15 Logaritmo Neperiano
abr	5.869	1.74	0.206	-0.598	0.598	1 - <del>Ec. 14 Error cuadrático</del> Ec. 14 Error cuadrático
may	3.446	0.602	-0.269	-0.598	0.598	2 - <del>Ec. 15 Logaritmo Neperiano</del> Ec. 15 Logaritmo Neperiano
jun	5.266	1.554	0.001	-0.598	0.598	1 - <del>Ec. 14 Error cuadrático</del> Ec. 14 Error cuadrático
jul	4.611	1.226	0.248	-0.598	0.598	1 - <del>Ec. 14 Error cuadrático</del> Ec. 14 Error cuadrático
ago	4.308	1.063	0.014	-0.598	0.598	1 - <del>Ec. 14 Error cuadrático</del> Ec. 14 Error cuadrático
sep	4.24	0.958	-0.022	-0.598	0.598	1 - <del>Ec. 14 Error cuadrático</del> Ec. 14 Error cuadrático

Después de tener la serie normalizada se procede a tipificarlas mediante la Ec. 20~~Ec. 20~~, lo cual permite evaluar con mayor facilidad las correlaciones entre las distintas series, las cuales sirven esencialmente para seleccionar el modelo ARMA, a partir de las funciones de autorrelación.

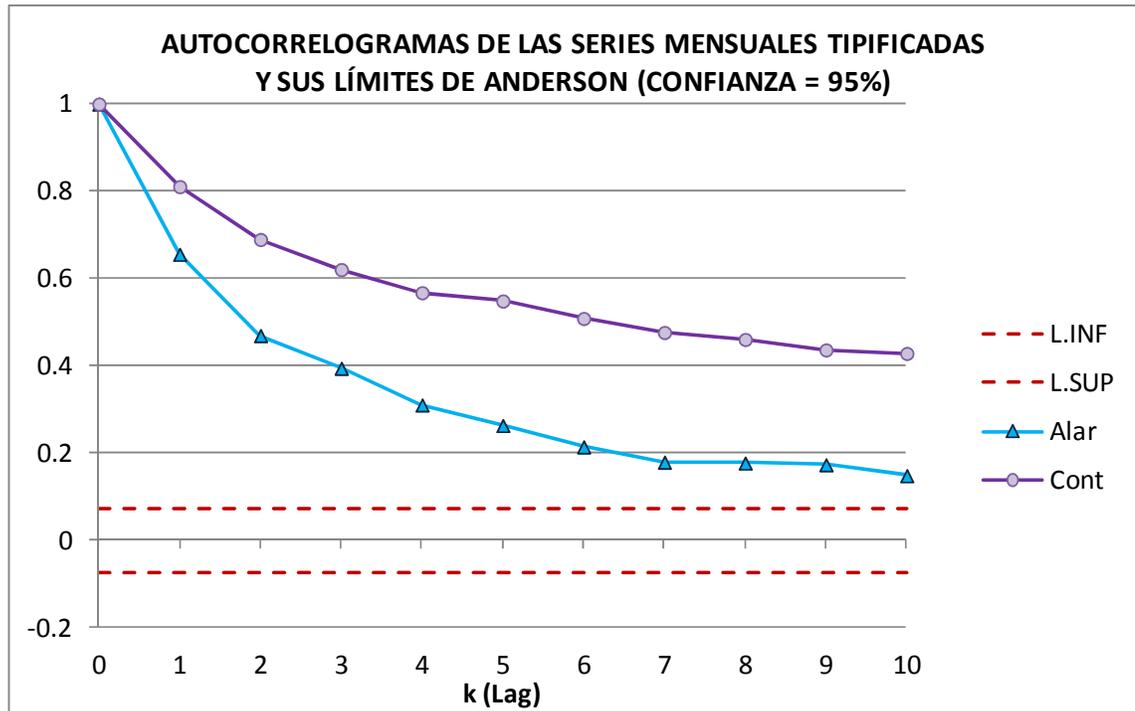
*Selección del Modelo ARMA de mejor ajuste*

Una vez normalizada y tipificada la serie mensual, para el proceso de selección del modelo de ajuste se estimó la función de autocorrelación (FAC), y se postularon un conjunto de modelos ARMA.

A partir de la Figura 4.1, se observa que los autocorrelogramas de las series de aportaciones de Alarcón y Contreras tienen memoria infinita, razón por la cual se postulan modelos tipo AR(p) o ARMA (p,q).

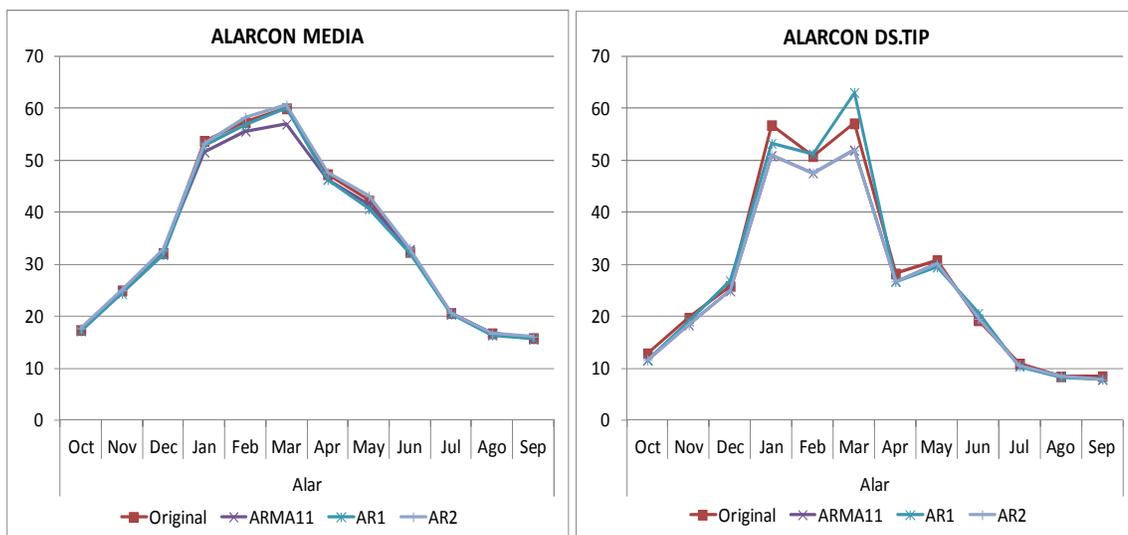
Se estimaron los coeficientes, se generaron 30 series de igual longitud a la histórica con los mencionados modelos AR(1), AR(2), ARMA(1,1,) multivariados postulados para las series de aportaciones de Alarcón y Contreras y se analizaron los estadísticos correspondientes.

Figura 4.1 Autocorrelogramas de las series mensuales tipificadas y límites de test de Anderson

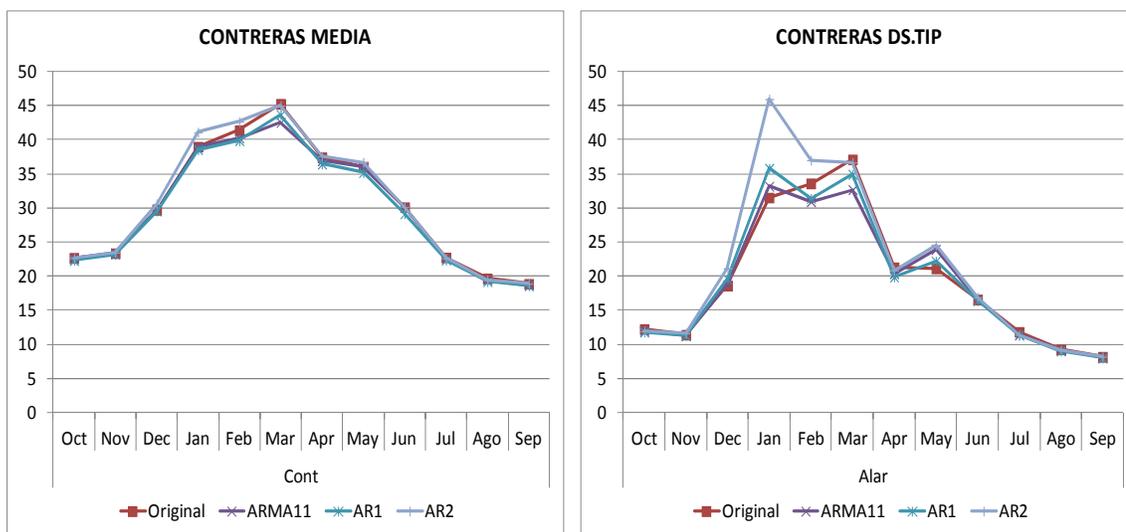


Observando el comportamiento de los estadísticos de las series, finalmente se ha escogido el modelo AR(1) por ser el que mejor preserva la media y desviación típica histórica en las 30 series sintéticas generadas. (Ver Figura 4.2 y Figura 4.3).

**Figura 4.2 Estadísticos series de aportaciones Alarcón y Contreras (Media)**



**Figura 4.3 Estadísticos series de aportaciones Alarcón y Contreras (Desviación Típica)**



EI

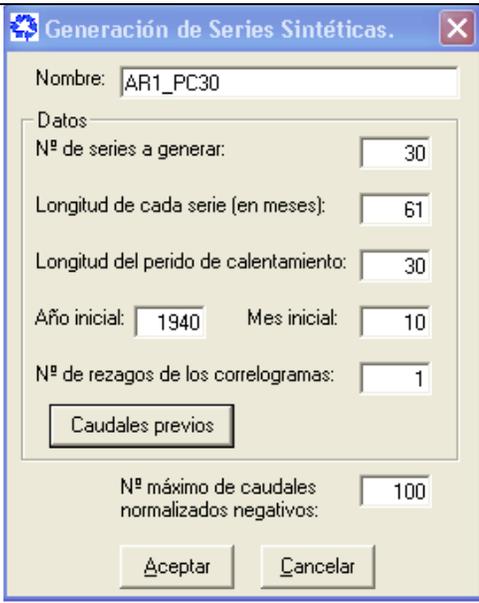
modelo multivariado AR (1) es el modelo autoregresivo puro más simple: representa el caudal del intervalo de tiempo  $t$  como una función del caudal del período precedente  $t-1$  y una variable aleatoria independiente y normalmente distribuida de media cero y una cierta varianza residual (uno de los parámetros del modelo).

Está dado por la siguiente ecuación matricial (ej. Box and Jenkins 1976; Salas et al. 1980; Bras and Rodriguez-Iturbe 1985; Hipel and McLeod 1994):

**Ec. 24 Ecuación matricial modelo AR1**

$$Z_t = \phi_1 \cdot Z_{t-1} + \varepsilon_t$$

**Tabla 4.3 Parámetros del Modelo AR (1)**

<p>PARÁMETROS DEL MODELO AR(1)</p> <p>MATRIZ FI1</p> <table style="margin-left: 20px;"> <tr><td>0.494</td><td>0.229</td></tr> <tr><td>0.012</td><td>0.802</td></tr> </table> <p>MATRIZ THETA0</p> <table style="margin-left: 20px;"> <tr><td>0.737</td><td>0.000</td></tr> <tr><td>0.318</td><td>0.492</td></tr> </table>	0.494	0.229	0.012	0.802	0.737	0.000	0.318	0.492	
0.494	0.229								
0.012	0.802								
0.737	0.000								
0.318	0.492								

**Tabla 4.4 Valores medios de los estadísticos de las series sintéticas mensuales generadas con el modelo AR (1)**

ESTACIÓN ALARCÓN					
MES	MEDIA	DV.TIP	SESGO	LIM.INF.	LIM.SUP.
OCT	17.193	11.594	1.592	-0.598	0.598
NOV	24.367	19.103	2.42	-0.598	0.598
DIC	31.841	26.822	2.31	-0.598	0.598
ENE	52.839	53.271	2.382	-0.598	0.598
FEB	56.748	51.249	2.054	-0.598	0.598
MAR	60.134	63.048	2.601	-0.598	0.598
ABR	46.281	26.714	0.751	-0.598	0.598
MAY	40.644	29.506	1.891	-0.598	0.598
JUN	32.297	20.596	1.695	-0.598	0.598

REDES BAYESIANAS PARA EL ANÁLISIS INTEGRADO DE LA GESTIÓN DE SRH.  
 APLICACIÓN A LA CUENCA DEL RÍO JÚCAR

JUL	20.365	10.425	0.715	-0.598	0.598
AGO	16.356	8.344	0.734	-0.598	0.598
SEP	15.694	7.916	0.736	-0.598	0.598
ESTACIÓN CONTRERAS					
MES	MEDIA	DV.TIP	SESGO	LIM.INF.	LIM.SUP.
OCT	22.32	11.813	1.362	-0.598	0.598
NOV	23.187	11.274	1.179	-0.598	0.598
DIC	29.529	19.551	2.116	-0.598	0.598
ENE	38.547	35.791	3.081	-0.598	0.598
FEB	39.847	31.397	2.014	-0.598	0.598
MAR	43.65	34.916	1.944	-0.598	0.598
ABR	36.432	19.86	0.729	-0.598	0.598
MAY	35.161	22.199	1.555	-0.598	0.598
JUN	29.154	16.379	0.837	-0.598	0.598
JUL	22.343	11.343	0.711	-0.598	0.598
AGO	19.189	9.001	0.575	-0.598	0.598
SEP	18.56	7.997	0.557	-0.598	0.598

#### 4.1.2. Simulación de escenarios con series sintéticas en Aquatool

Partiendo del modelo de simulación del escenario base, descrito en el apartado 3.3, se genera un escenario por cada serie de aportación sintética que se desea analizar, modificando en los archivos de aportaciones las series APO.1 Alarcón y APO 3. Contreras.

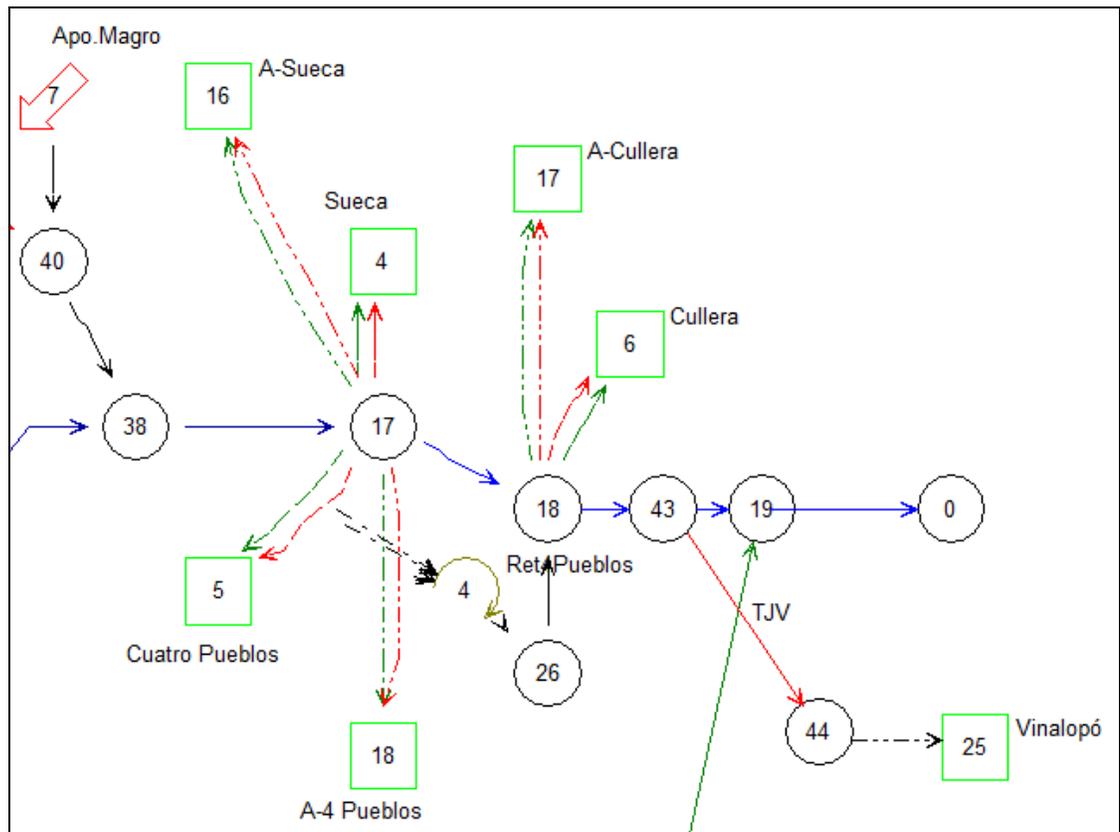
Con el fin de realizar el análisis de Monte Carlo se mantienen las reglas de operación, las demandas y en general los parámetros de la simulación, modificando únicamente las aportaciones mencionadas. De esta forma, analizar las respuestas de los elementos analizados y los cambios que se generan en el sistema bajo diferentes condiciones de aportación en cabecera.

#### **4.2. ESCENARIO CON MEDIDAS (TJV)**

La generación de escenarios con aplicación de medidas como la incorporación del Trasvase Júcar Vinalopó, permite llevar a cabo un análisis probabilístico de Monte Carlo de los resultados de la gestión del sistema, simulando con AQUATOOL, a partir del análisis de los cambios generados con la decisión de aplicar o no la medida.

Partiendo del modelo de simulación del escenario base, descrito en el apartado 3.3, se incorpora al sistema un elemento de demanda para los regadíos del Vinalopó, esta dotación tendrá un máximo de  $80 \text{ hm}^3/\text{año}$ , por lo que se asigna una demanda mensual de  $6.66 \text{ hm}^3$ , con una prioridad 10 (mayor a todos los demás elementos del sistema). Se conecta una conducción tipo 1 en el nodo 43 correspondiente al Azud de la Marquesa, a cuyo nodo final (44) se le asigna la toma del Vinalopó.

Figura 4.4 Tramo final del esquema de simulación del sistema con la incorporación del Trasvase Júcar Vinalopó



Con el fin de realizar el análisis de Monte Carlo se mantienen las reglas de operación, las otras demandas y en general los parámetros de la simulación, modificando únicamente el sistema con la demanda adicional de los regadíos del Vinalopó. De esta forma, analizar las respuestas de los elementos analizados y los cambios que se generan en el sistema bajo diferentes condiciones de aportación en cabecera y con la incorporación o no de la medida del Trasvase.

## 5. ANÁLISIS DE INDICADORES DE GARANTÍA

Como parte del proceso de toma de decisiones, los indicadores del comportamiento del sistema nos permiten valorar no solo el comportamiento anual de las demandas, adicionalmente consideran los periodos de estado no satisfactorio, la magnitud o grado de fallo y la dificultad para salir del estado de fallo

A partir del modelo de redes bayesianas que se plantea en este estudio se obtendrá el comportamiento probabilístico de las garantías volumétricas anuales de los elementos analizados bajo diferentes condiciones de aportación anual y volumen inicial previo, en diferentes escenarios hidrológicos y de medidas de interés político, social y ambiental

Una vez se evalúen los elementos que presentan un comportamiento crítico o en los cuales se tenga un especial interés, los análisis de índices de Garantía Volumétrica, Vulnerabilidad, Resiliencia, Garantía Anual (probabilística) y Sostenibilidad las series de suministro del sistema, permitirán al gestor conocer con más detalle el comportamiento de dichos elementos.

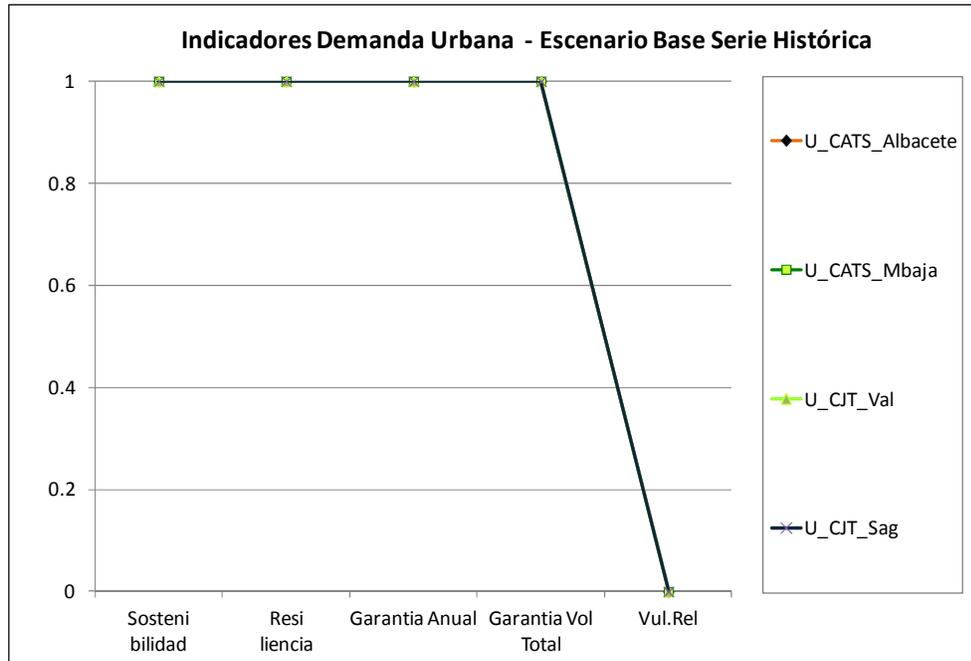
### 5.1. ANÁLISIS ESCENARIO BASE

#### 5.1.1. Serie Histórica

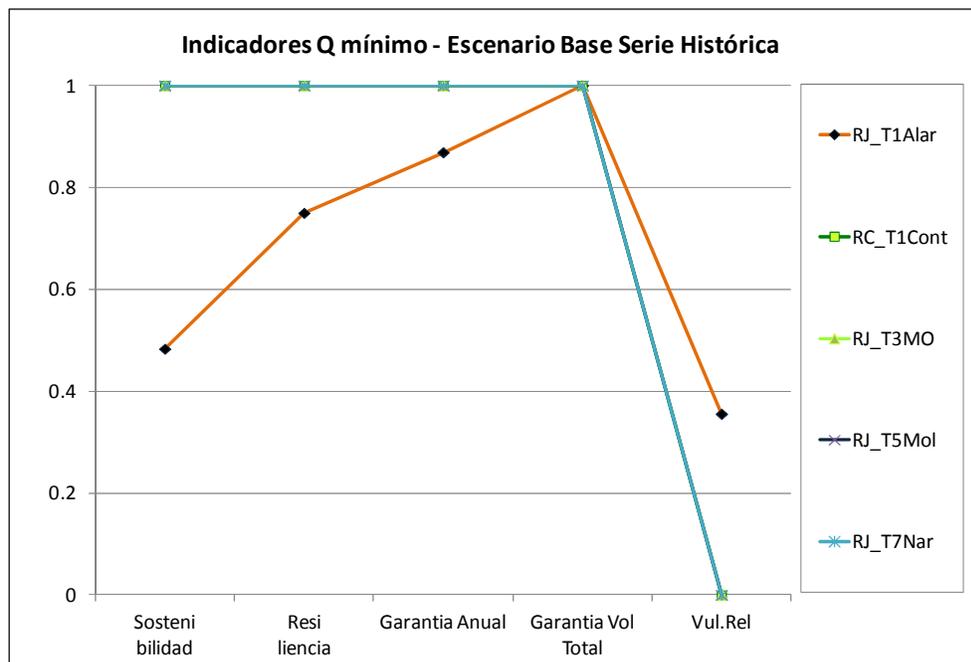
##### *Indicadores de sostenibilidad*

Debido a la prioridad alta asignada, el mejor comportamiento con respecto a indicadores de sostenibilidad (combinación de garantía, resiliencia y vulnerabilidad relativa, ver ~~Ec. 4~~ Ec. 4, Ec. 6, Ec. 7, Ec. 8 y Ec. 9) lo presenta el uso urbano (Figura 5.1).

**Figura 5.1 Indicadores para cálculo de sostenibilidad- Demanda Urbana en los Ríos - Escenario Base- Serie Histórica**



**Figura 5.2 Indicadores para cálculo de sostenibilidad- Q mínimo en los Ríos - Escenario Base- Serie Histórica**



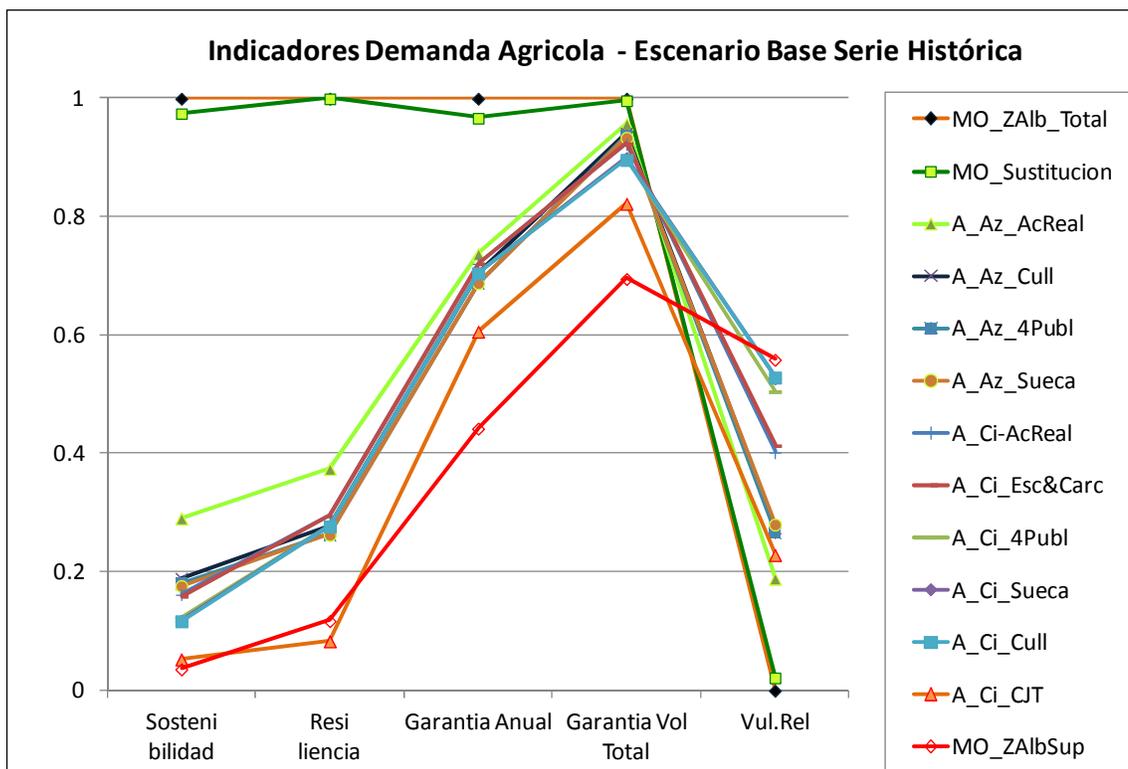
Los caudales mínimos de los ríos (Figura 5.1), en general presentan un comportamiento óptimo con excepción del Tramo 1 del Río Júcar, el cual presenta un índice de sostenibilidad menor a los demás tramos evaluados.

El índice de sostenibilidad del Tramo 1 del Júcar se ve afectado por su valor menor de resiliencia y mayor de vulnerabilidad, mostrando en la simulación se encontró períodos de fallo y una dificultad para salir de este estado. Lo que supondría que las sueltas del embalse Alarcón no ayudaron de forma alternativa a garantizar el caudal mínimo en períodos donde el río no contaba con recursos de suficientes.

El comportamiento general de la demanda agraria (Figura 5.3) es similar, con valores bajos cercanos a 0.2 de sostenibilidad, de los cuales Escalona y Carcagente tienen mayor prioridad, seguida por los cítricos y arrozales de la Ribera Baja y por último los cítricos y arrozales de Acequia Real y Canal Júcar Turia.

Pese a los valores de garantía, la sostenibilidad de estos elementos se ve afectada por una baja resiliencia, por esta razón deben ser sometidos a este análisis en el proceso de toma de decisiones.

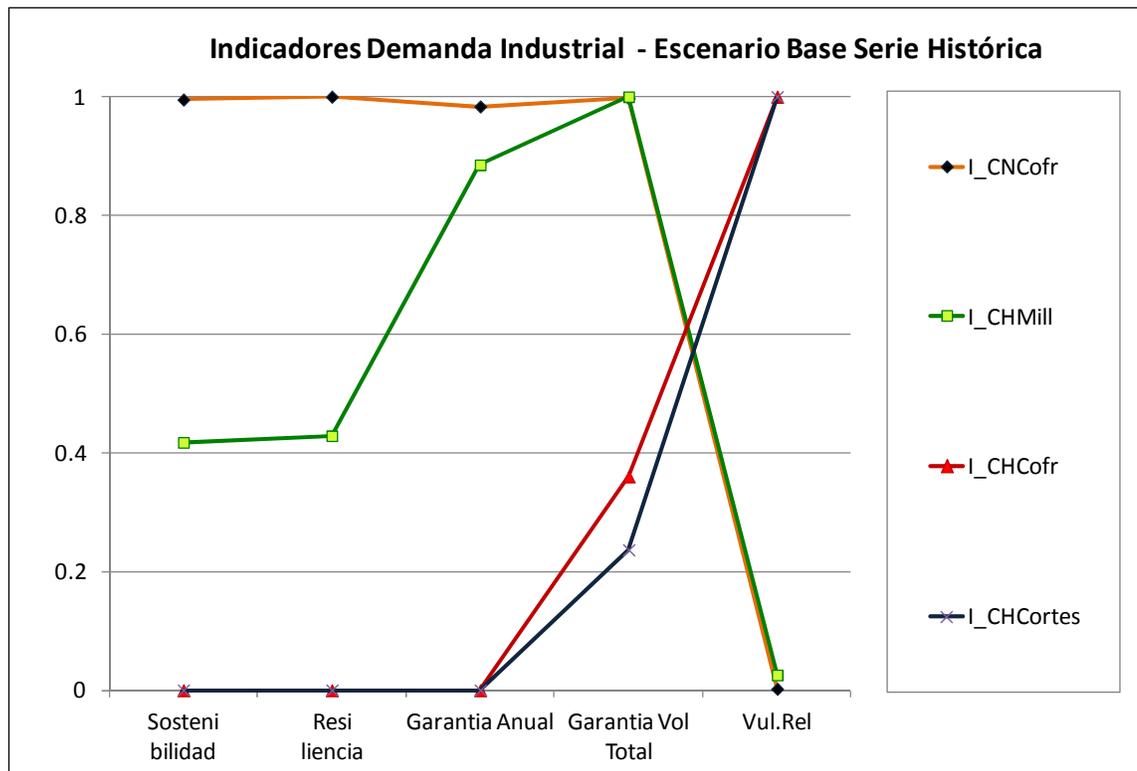
**Figura 5.3 Indicadores para cálculo de sostenibilidad- Demanda Agrícola - Escenario Base- Serie Histórica**



En el caso de la Zona Albacete (MO) (Figura 5.3) se observa que presenta un comportamiento óptimo de indicadores dado que el suministro es conjunto con bombes y queda garantizado al 100%

En el uso industrial se destacan los valores óptimos de sostenibilidad de la demanda de la Central Nuclear Cofrentes debido a la alta prioridad asignada por razones de seguridad, y los valores bajos de las Centrales Hidroeléctricas Cortes y Cofrentes, los cuales presentan las prioridades menores del sistema. Tal como se presenta en la Figura 5.4.

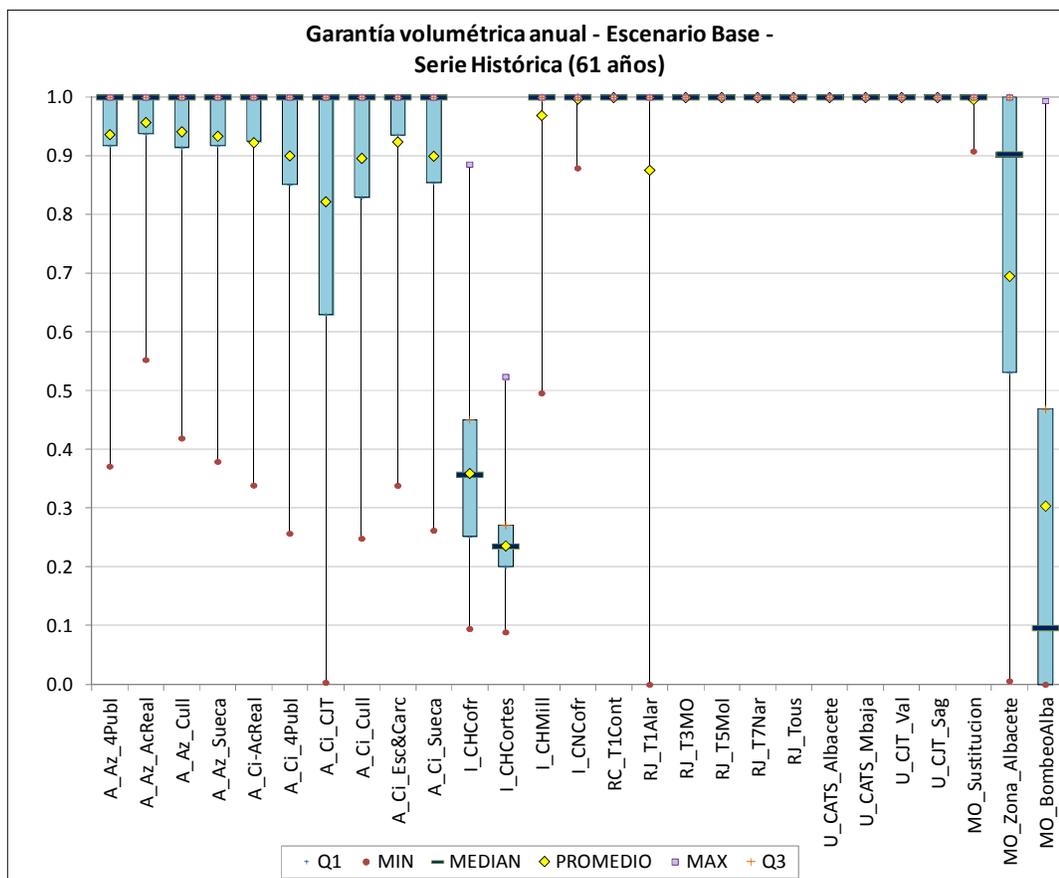
Figura 5.4 Indicadores para cálculo de sostenibilidad- Demanda Industrial - Escenario Base- Serie Histórica



Garantía Volumétrica anual

Se realizó el análisis del presente indicador, simulando el modelo para la serie histórica de aportaciones (61 años).

Figura 5.5 Garantía Volumétrica anual – Escenario Base Serie Histórica



A partir de la Figura 5.5 se encuentran los elementos con comportamiento crítico:

- (Min): suministro 0% para la demanda de A\_Ci\_4Publ, Rio Júcar tramo 1 y el suministro superficial de Zona Albacete, el cual es compensado con el suministro por bombeo.
- (Máx): la CH Cortes presenta un máximo de 52% de satisfacción del caudal objetivo de turbinado y la CH Cofrentes un máximo de 90%.
- (Q3): el máximo de CH Cofrentes es 90%, pero sigue siendo un elemento crítico al presentar hasta un 75 % de máximo 45% de satisfacción.

### 5.1.2. Series Sintéticas

#### Garantía Volumétrica anual

Se realizó también el análisis de garantías volumétricas anuales para los escenarios hidrológicos sintéticos generados (modelo AR1 multivariado), simulando con SIMGES (AQUATOOL), tanto para las primeras 15 series como para el total de las series (30) generadas. Con las nuevas series anuales de suministro se analizó la garantía volumétrica.

**Figura 5.6 Garantía volumétrica anual Escenario Base – 15 Series Sintéticas**

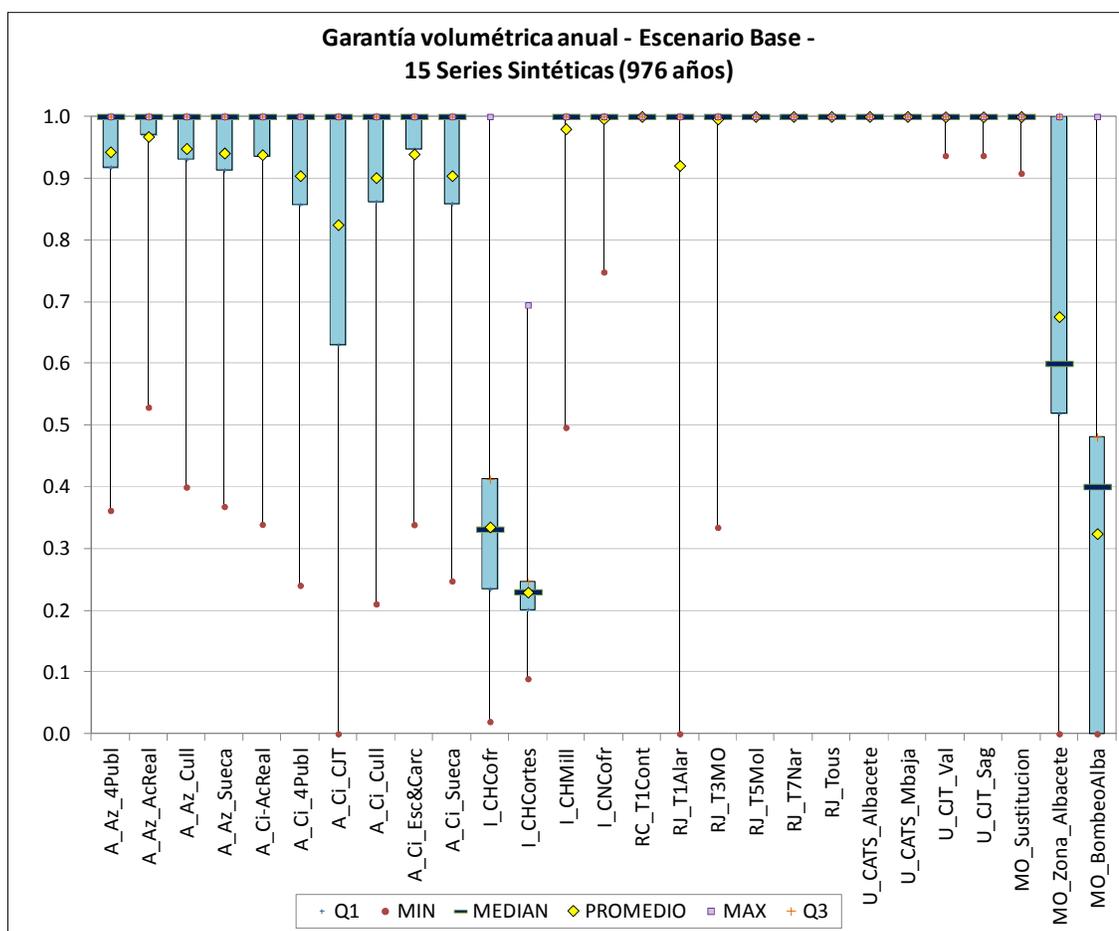
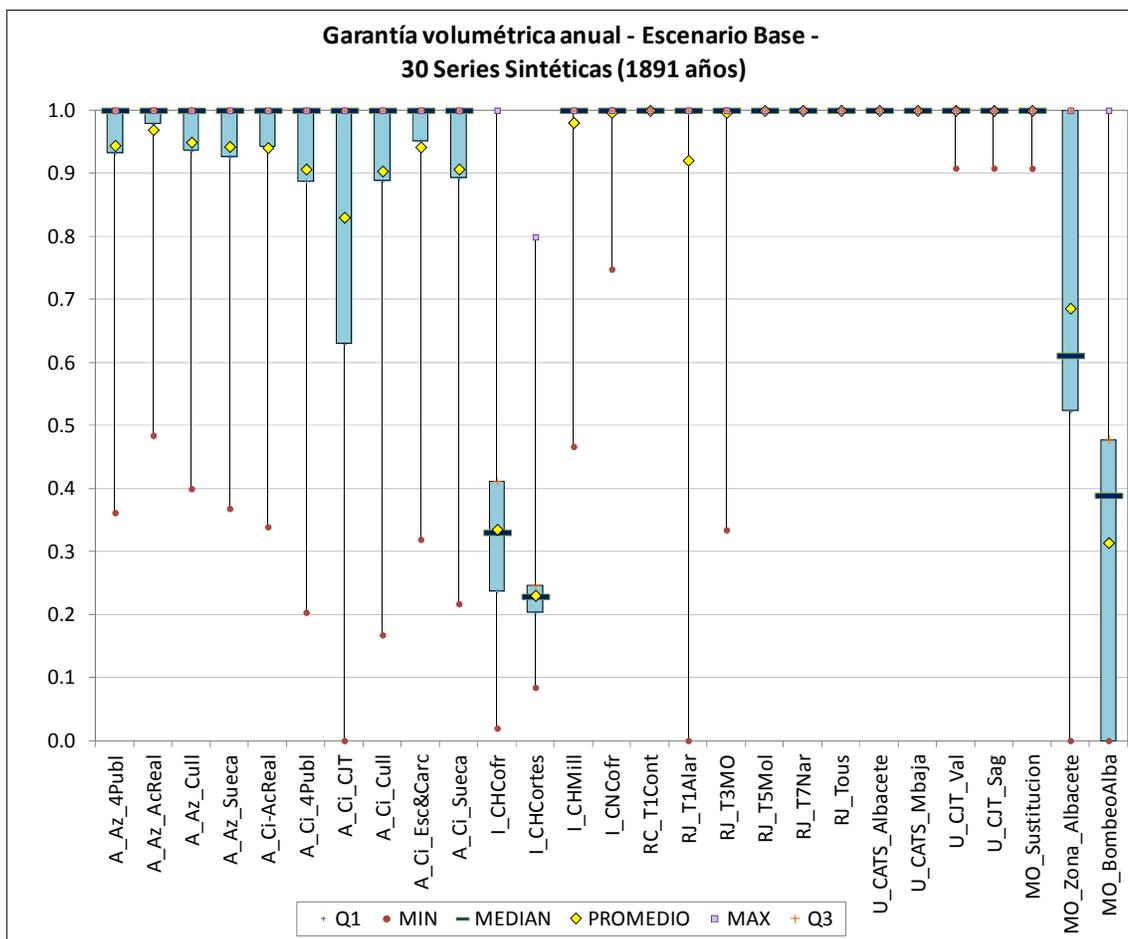


Figura 5.7 Garantía volumétrica anual Escenario Base – 30 Series Sintéticas



*Análisis del Escenario Base con Series Histórica y Sintéticas*

Los cambios más relevantes con respecto a la serie histórica se observan en el uso industrial, debido a que son los elementos de menor prioridad en el sistema, en el mínimo del Tramo 3 del Río Júcar aguas abajo de la conexión MO y en la repartición del uso conjunto para el abastecimiento de Zona Albacete, debido a que su suministro superficial está relacionada con el comportamiento de éste tramo del Júcar.

REDES BAYESIANAS PARA EL ANÁLISIS INTEGRADO DE LA GESTIÓN DE SRH.  
 APLICACIÓN A LA CUENCA DEL RÍO JÚCAR

---

A continuación, se presentan los valores de cuartiles resultado del análisis de cada una de las series:

**Tabla 5.1 Garantía Volumétrica anual Uso Industrial y MO resultado del análisis de la Serie Histórica**

	I_CHCofr	I_CHCortes	I_CNCoFr	RJ_T3MO	MO_Zona_Albacete	MO_BombeoAlba
Q1	0.25	0.20	1.00	1.00	0.53	0.00
Min	0.09	0.09	0.88	1.00	0.01	0.00
Median	0.36	0.24	1.00	1.00	0.90	0.10
Promedio	0.36	0.24	1.00	1.00	0.70	0.30
Max	0.89	0.52	1.00	1.00	1.00	0.99
Q3	0.45	0.27	1.00	1.00	1.00	0.47

**Tabla 5.2 Garantía Volumétrica anual Uso Industrial y MO resultado del análisis de las 15 Series Sintéticas**

	I_CHCofr	I_CHCortes	I_CNCoFr	RJ_T3MO	MO_Zona_Albacete	MO_BombeoAlba
Q1	0.23	0.20	1.00	1.00	0.52	0.00
Min	0.02	0.09	0.75	0.33	0.00	0.00
Median	0.33	0.23	1.00	1.00	0.60	0.40
Promedio	0.34	0.23	1.00	1.00	0.68	0.32
Max	1.00	0.69	1.00	1.00	1.00	1.00
Q3	0.41	0.25	1.00	1.00	1.00	0.48

**Tabla 5.3 Garantía Volumétrica anual Uso Industrial y MO resultado del análisis de las 30 Series Sintéticas**

	I_CHCofr	I_CHCortes	I_CNCoFr	RJ_T3MO	MO_Zona_Albacete	MO_BombeoAlba
Q1	0.24	0.20	1.00	1.00	0.52	0.00
Min	0.02	0.08	0.75	0.33	0.00	0.00
Median	0.33	0.23	1.00	1.00	0.61	0.39
Promedio	0.34	0.23	1.00	1.00	0.69	0.31
Max	1.00	0.80	1.00	1.00	1.00	1.00
Q3	0.41	0.25	1.00	1.00	1.00	0.48

Pese a que en el escenario base con serie histórica el Q mínimo de RJ\_T3MO estaba 100% satisfecha, con la simulación de los 15 escenarios se encontró un valor mínimo del 30% del Q mínimo. Su relación con el abastecimiento de la Zona Albacete se demuestra con el cambio de porcentaje de suministro conjunto con el que se abastece, pasando de encontrarse el 50% de sus datos 90% superficial y 10% por bombeos a un 60% superficial y 40% de bombeos.

Para la CH Cofrentes y Cortes el máximo de abastecimiento pasó de un 89% a 100% y de un 52% a 69% respectivamente, mejorando en ambos casos, pero los datos siguen estando repartidos con una distribución similar a la que se presentaba en la serie histórica.

Comparando el comportamiento general del sistema simulado con 15 series sintéticas y con 30 (Figura 5.6 y Figura 5.7), no se observan cambios significativos entre los dos análisis, de tal forma que no es necesario generar un mayor número de series. Adicionalmente, con los datos de cuartiles y media de los elementos de cambios significativos se observa que los cambios son similares comparados con la serie histórica. El valor en el cual se observa un cambio importante es en el máximo de CH Cortes, pero la distribución de frecuencias de sus datos se mantiene.

#### *Indicadores de Sostenibilidad y Límites de Confianza*

Para cada una de las demandas del sistema se estimaron los indicadores de garantía anual probabilística, garantía volumétrica total, vulnerabilidad, resiliencia y sostenibilidad para diferentes porcentajes de satisfacción.

En la se presenta la media de los indicadores resultantes de las la series histórica y las 30 series sintéticas (N=31) tanto para el escenario base como para el de medidas. Estos valores corresponden a un porcentaje de satisfacción del 95%.

Comprando los dos escenarios, se observa que los cambios más significativos se presentan en las demandas de uso agrícola, teniendo en cuenta que las demandas urbanas y la central Nuclear no se ven afectadas gracias el alto valor de prioridad y las centrales hidroeléctricas mantienen su estado no satisfactorio.

REDES BAYESIANAS PARA EL ANÁLISIS INTEGRADO DE LA GESTIÓN DE SRH.  
 APLICACIÓN A LA CUENCA DEL RÍO JÚCAR

**Tabla 5.4 Indicadores medios de comportamiento con 95% de satisfacción. Analizando las series sintéticas.**

	Escenario Base				Escenario con Trasvase				↑			
	Crs	rCv	S	G	Crs	rCv	S	G	Crs	rCv	S	G
A_Az_4Publ	0.41	0.13	0.34	0.73	0.34	0.16	0.27	0.63	-0.07	0.02	-0.07	-0.10
A_Az_AcReal	0.47	0.08	0.42	0.79	0.43	0.11	0.37	0.71	-0.04	0.03	-0.05	-0.08
A_Az_Cull	0.42	0.13	0.35	0.73	0.35	0.15	0.28	0.63	-0.07	0.02	-0.07	-0.10
A_Az_Sueca	0.40	0.12	0.34	0.72	0.33	0.16	0.26	0.63	-0.07	0.03	-0.07	-0.10
A_Ci-AcReal	0.38	0.12	0.32	0.74	0.35	0.18	0.27	0.65	-0.03	0.06	-0.05	-0.09
A_Ci_4Publ	0.35	0.21	0.26	0.70	0.31	0.28	0.20	0.60	-0.04	0.07	-0.06	-0.10
A_Ci_CJT	0.25	0.35	0.14	0.61	0.22	0.47	0.10	0.51	-0.03	0.11	-0.05	-0.10
A_Ci_Cull	0.37	0.21	0.28	0.71	0.32	0.29	0.21	0.61	-0.05	0.09	-0.07	-0.10
A_Ci_Esc&Carc	0.39	0.12	0.33	0.75	0.38	0.18	0.29	0.67	-0.01	0.06	-0.04	-0.08
A_Ci_Sueca	0.36	0.22	0.26	0.70	0.31	0.28	0.21	0.60	-0.04	0.06	-0.05	-0.11
I_CHCofr	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
I_CHCortes	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
I_CHMill	0.74	0.06	0.70	0.91	0.73	0.08	0.68	0.90	-0.01	0.02	-0.02	-0.01
I_CNCOfr	0.95	0.01	0.94	0.97	0.92	0.01	0.90	0.97	-0.03	0.00	-0.03	-0.01
RC_T1Cont	1.00	0.00	1.00	1.00	1.00	0.00	1.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
RJ_T1A1ar	0.93	0.10	0.83	0.91	0.95	0.09	0.86	0.91	0.02	-0.01	0.03	0.00
RJ_T3MO	0.97	0.03	0.94	0.99	0.98	0.03	0.96	0.99	0.02	0.00	0.02	0.00
RJ_T5Mol	1.00	0.00	1.00	1.00	1.00	0.00	1.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
RJ_T7Nar	1.00	0.00	1.00	1.00	1.00	0.00	1.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
RJ_Tous	1.00	0.00	1.00	1.00	1.00	0.00	1.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
U_CATS_Albacete	1.00	0.00	1.00	1.00	1.00	0.00	1.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
U_CATS_Mbaja	1.00	0.00	1.00	1.00	1.00	0.00	1.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
U_CJT_Val	1.00	0.00	1.00	1.00	1.00	0.00	1.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
U_CJT_Sag	1.00	0.00	1.00	1.00	1.00	0.00	1.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
MO_Sustitucion	1.00	0.00	1.00	1.00	1.00	0.00	1.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
TJV	0.00	0.00	0.00	0.00	0.21	0.22	0.15	0.50	0.21	0.22	0.15	0.50
MO_ZAlbSup	0.20	0.78	0.04	0.35	0.18	0.78	0.03	0.31	-0.03	0.00	-0.01	-0.04

Para comprobar la significancia de los cambio, estos resultados se analizan los límites de confianza, donde se podrá concluir que tienen un 90% de probabilidad de encontrarse dentro de los mismo. Los límites superior e inferior de la media de los indicadores se presentan en la Tabla 5.2.

REDES BAYESIANAS PARA EL ANÁLISIS INTEGRADO DE LA GESTIÓN DE SRH.  
 APLICACIÓN A LA CUENCA DEL RÍO JÚCAR

**Tabla 5.5 Límites de confianza dentro de los cuales existe un 90% de Probabilidad que se encuentre la media del indicador. Con criterio de satisfacción de demandas del 95%**

		Escenario Base				Escenario con Traslase			
		Crs	rCv	S	G	Crs	rCv	S	G
		0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95
A_Az_4Publ	Lim Inf	0.36	0.09	0.29	0.69	0.30	0.12	0.23	0.60
	Lim Sup	0.46	0.18	0.40	0.76	0.38	0.19	0.31	0.67
A_Az_AcReal	Lim Inf	0.41	0.06	0.36	0.77	0.38	0.08	0.32	0.68
	Lim Sup	0.53	0.10	0.48	0.82	0.48	0.13	0.42	0.75
A_Az_Cull	Lim Inf	0.36	0.09	0.30	0.70	0.31	0.12	0.24	0.60
	Lim Sup	0.47	0.17	0.41	0.76	0.39	0.18	0.32	0.67
A_Az_Sueca	Lim Inf	0.35	0.09	0.28	0.69	0.29	0.12	0.22	0.59
	Lim Sup	0.45	0.16	0.39	0.76	0.37	0.19	0.30	0.66
A_Ci-AcReal	Lim Inf	0.34	0.08	0.27	0.71	0.31	0.14	0.23	0.61
	Lim Sup	0.43	0.16	0.37	0.77	0.40	0.22	0.32	0.68
A_Ci_4Publ	Lim Inf	0.31	0.16	0.21	0.67	0.28	0.22	0.16	0.56
	Lim Sup	0.40	0.27	0.31	0.74	0.35	0.34	0.24	0.64
A_Ci_CJT	Lim Inf	0.21	0.27	0.10	0.58	0.19	0.36	0.07	0.47
	Lim Sup	0.29	0.44	0.18	0.65	0.25	0.58	0.12	0.55
A_Ci_Cull	Lim Inf	0.32	0.15	0.22	0.67	0.28	0.23	0.16	0.57
	Lim Sup	0.43	0.26	0.33	0.74	0.36	0.36	0.25	0.64
A_Ci_Esc&Carc	Lim Inf	0.35	0.08	0.29	0.72	0.33	0.14	0.24	0.64
	Lim Sup	0.43	0.16	0.37	0.78	0.42	0.22	0.34	0.71
A_Ci_Sueca	Lim Inf	0.31	0.16	0.21	0.67	0.28	0.22	0.17	0.56
	Lim Sup	0.40	0.27	0.31	0.74	0.35	0.34	0.25	0.64
I_CHCofr	Lim Inf	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00
	Lim Sup	0.01	1.00	0.00	0.01	0.01	1.00	0.00	0.01
I_CHCortes	Lim Inf	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00
	Lim Sup	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00
I_CHMill	Lim Inf	0.66	0.03	0.62	0.89	0.65	0.05	0.60	0.88
	Lim Sup	0.82	0.08	0.78	0.93	0.80	0.11	0.75	0.92
I_CNCOfr	Lim Inf	0.90	0.00	0.89	0.97	0.85	0.01	0.84	0.96
	Lim Sup	1.00	0.02	0.99	0.98	0.98	0.02	0.97	0.97

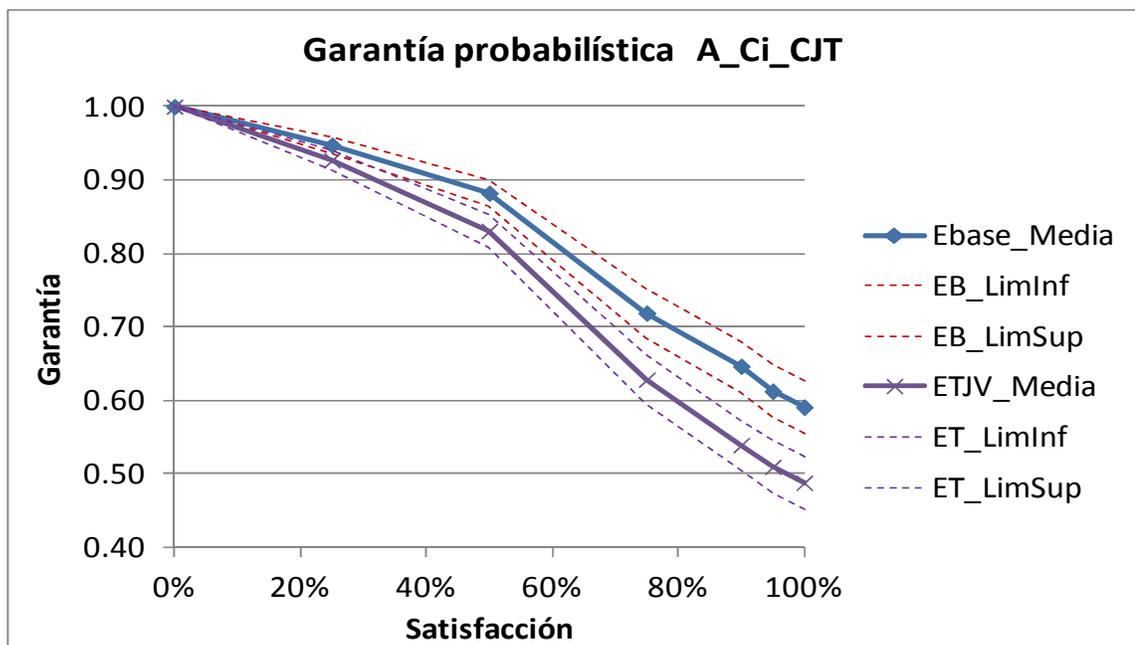
REDES BAYESIANAS PARA EL ANÁLISIS INTEGRADO DE LA GESTIÓN DE SRH.  
 APLICACIÓN A LA CUENCA DEL RÍO JÚCAR

		Escenario Base				Escenario con Trasvase			
		Crs	rCv	S	G	Crs	rCv	S	G
		0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95
RC_T1Cont	Lim Inf	1.00	0.00	1.00	1.00	1.00	0.00	1.00	0.99
	Lim Sup	1.00	0.00	1.00	1.00	1.00	0.00	1.00	1.00
RJ_T1Alar	Lim Inf	0.89	0.07	0.79	0.89	0.91	0.06	0.82	0.89
	Lim Sup	0.96	0.14	0.88	0.92	0.99	0.12	0.91	0.92
RJ_T3MO	Lim Inf	0.92	0.01	0.89	0.99	0.95	0.01	0.92	0.99
	Lim Sup	1.01	0.05	0.99	1.00	1.02	0.05	1.00	0.99
RJ_T5Mol	Lim Inf	1.00	0.00	1.00	1.00	1.00	0.00	1.00	1.00
	Lim Sup	1.00	0.00	1.00	1.00	1.00	0.00	1.00	1.00
RJ_T7Nar	Lim Inf	1.00	0.00	1.00	1.00	1.00	0.00	1.00	1.00
	Lim Sup	1.00	0.00	1.00	1.00	1.00	0.00	1.00	1.00
RJ_Tous	Lim Inf	1.00	0.00	1.00	1.00	1.00	0.00	1.00	1.00
	Lim Sup	1.00	0.00	1.00	1.00	1.00	0.00	1.00	1.00
U_CATS_Albacete	Lim Inf	1.00	0.00	1.00	1.00	1.00	0.00	1.00	1.00
	Lim Sup	1.00	0.00	1.00	1.00	1.00	0.00	1.00	1.00
U_CATS_Mbaja	Lim Inf	1.00	0.00	1.00	1.00	1.00	0.00	1.00	1.00
	Lim Sup	1.00	0.00	1.00	1.00	1.00	0.00	1.00	1.00
U_CJT_Val	Lim Inf	1.00	0.00	1.00	0.99	1.00	0.00	1.00	0.99
	Lim Sup	1.00	0.00	1.00	1.00	1.00	0.00	1.00	1.00
U_CJT_Sag	Lim Inf	1.00	0.00	1.00	0.99	1.00	0.00	1.00	0.99
	Lim Sup	1.00	0.00	1.00	1.00	1.00	0.00	1.00	1.00
MO_Sustitucion	Lim Inf	1.00	0.00	1.00	1.00	1.00	0.00	1.00	1.00
	Lim Sup	1.00	0.00	1.00	1.00	1.00	0.00	1.00	1.00
TJV	Lim Inf	0.00	0.00	0.00	0.00	0.19	0.18	0.12	0.47
	Lim Sup	0.00	0.00	0.00	0.00	0.24	0.26	0.17	0.54
MO_ZAlbSup	Lim Inf	0.17	0.69	0.02	0.31	0.15	0.70	0.01	0.26
	MO_ZAlb	0.23	0.88	0.07	0.40	0.21	0.87	0.05	0.36

Adicionalmente, se evaluó cada indicador con diferentes condiciones de satisfacción para cada una de las demandas bajo diferentes criterios de satisfacción.

En la siguiente gráfica se representan el valor medio de garantía anual probabilística (Ec. 5) de la demanda agraria CI\_CJT, para el Escenario base y con Medidas, para diferentes porcentajes de satisfacción de demanda.

**Figura 5.8 Valores medio de Garantía anual probabilística bajo diferentes criterios de satisfacción de la demanda. Evaluando escenario base y con Traspase**



A partir de los límites de confianza en la Figura 5.8 se observa que las medias del indicador tienen un 90% de posibilidad de adoptar estos valores, lo cual permite una mayor fiabilidad.

Dado esto, se observa que al implementar el Traspase el indicador disminuye, siendo más notorio en condiciones estrictas de satisfacción de demanda.

Este análisis permite inferir que para un criterio impuesto del 75% de condición aceptable a esta demanda, implementar el Traspase significa disminuir un 10% la garantía media de dicha demanda.

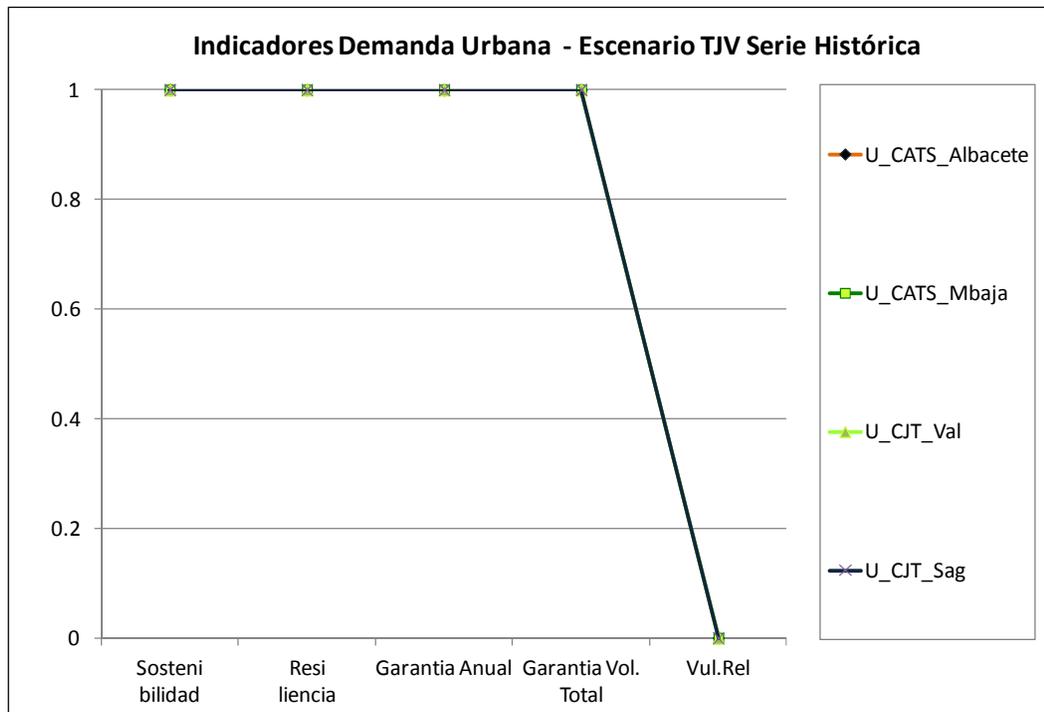
## 5.2. ANÁLISIS DEL SISTEMA CON Y SIN TRASVASE

### 5.2.1. Series Históricas

#### *Indicadores de sostenibilidad incorporando el Traspase*

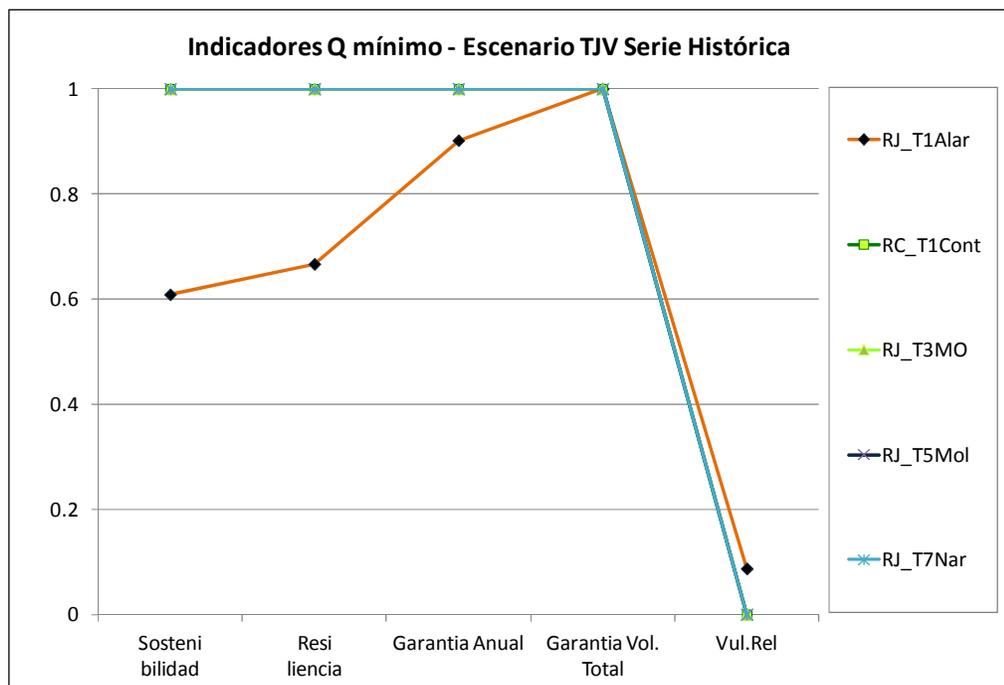
El mejor comportamiento con respecto a indicadores de sostenibilidad lo presenta el uso urbano. Manteniéndose el comportamiento del escenario base debido a que corresponden a la mayor prioridad del sistema.

**Figura 5.9** Indicadores para cálculo de sostenibilidad- Demanda Urbana en los Ríos - Escenario con TJV- Serie Histórica

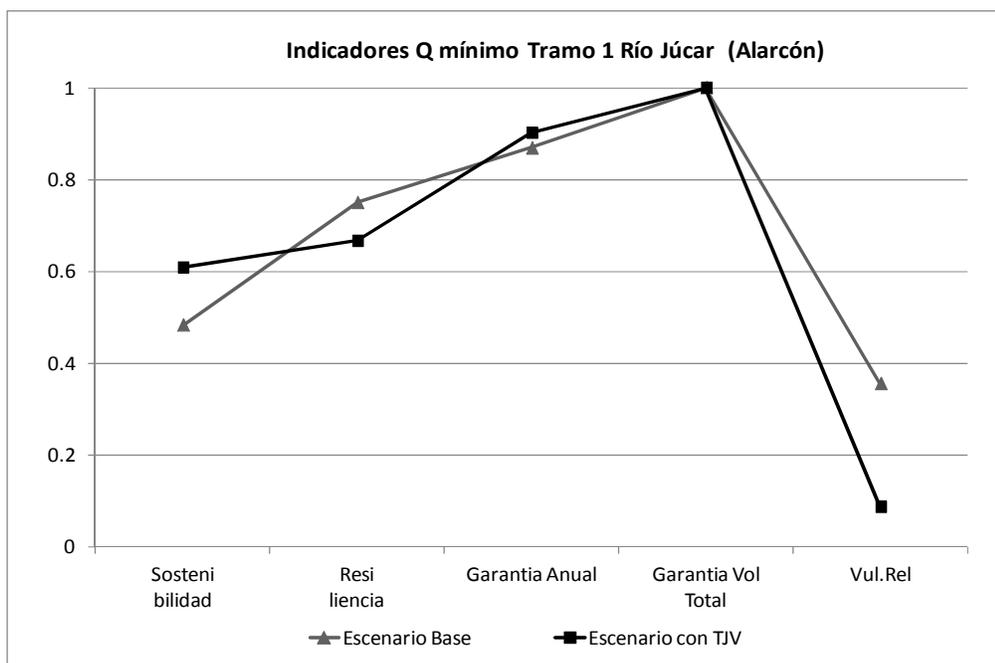


Los caudales mínimos de los ríos (Figura 5.10) en general conservan el comportamiento óptimo del escenario sin Traspase.

**Figura 5.10 Indicadores para cálculo de sostenibilidad- Q mínimo en los Ríos – Escenario con TJV- Serie Histórica**



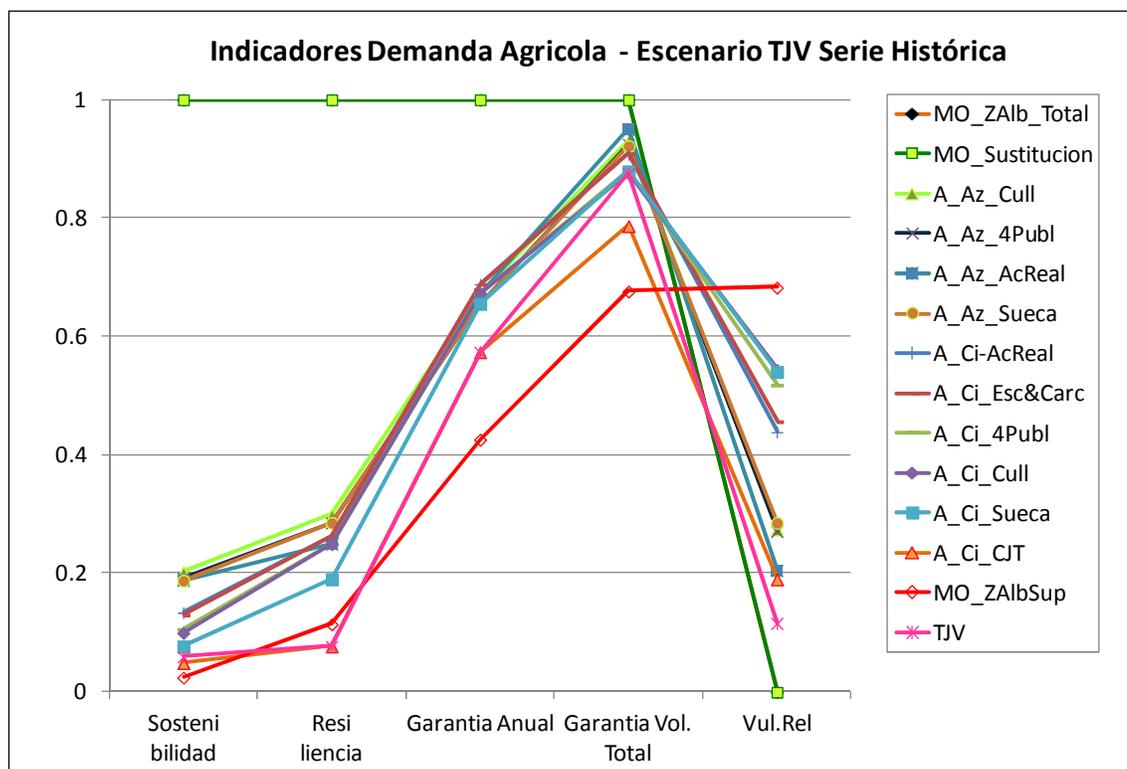
**Figura 5.11 Indicadores de comportamiento de Tramo 1 Río Júcar con y sin TJV**



Al comparar el comportamiento de los Q mínimos en los escenarios históricos con y sin trasvase, (Figura 5.11) se observa que el Tramo 1 del Río Júcar (RJ\_T1Alar) mejora en el escenario con Trasvase, lo cual se atribuye a que las sueltas del embalse Alarcón deberán ser mayores por la necesidad de suplir una demanda adicional, las cuales ayudan de forma alternativa a garantizar el caudal mínimo en este tramo específico de recursos propios escasos.

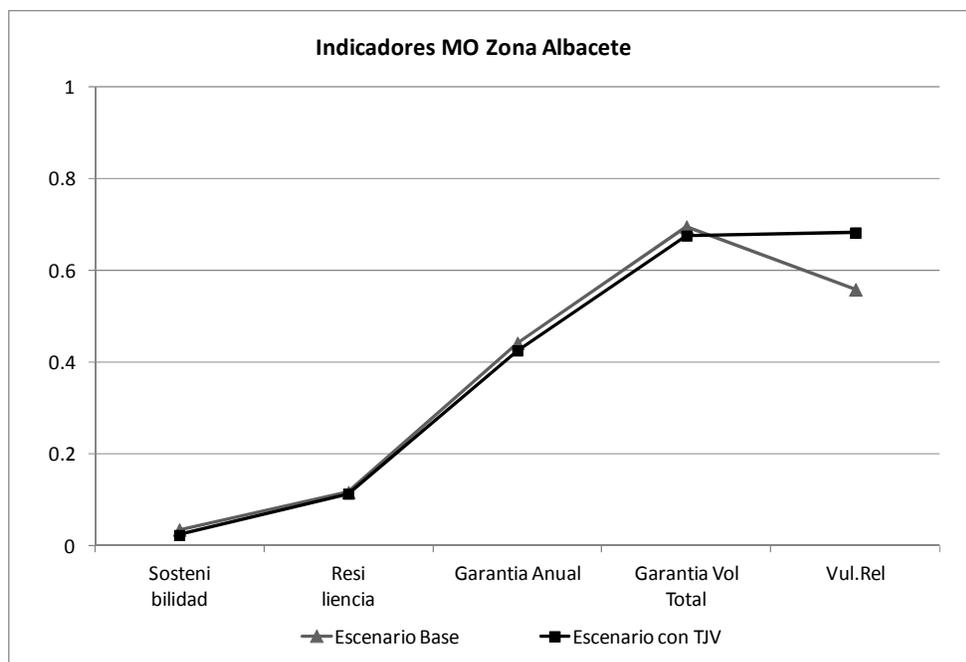
El comportamiento general de la demanda agraria (Figura 5.12) es similar al presentado en el escenario base, pero con la aplicación del Trasvase la sostenibilidad se concentra en valores cercanos a 0.1. Este segundo grupo de prioridades se ve afectada pero no significativamente.

**Figura 5.12 Indicadores para cálculo de sostenibilidad- Demanda Agrícola - Escenario con TJV- Serie Histórica**



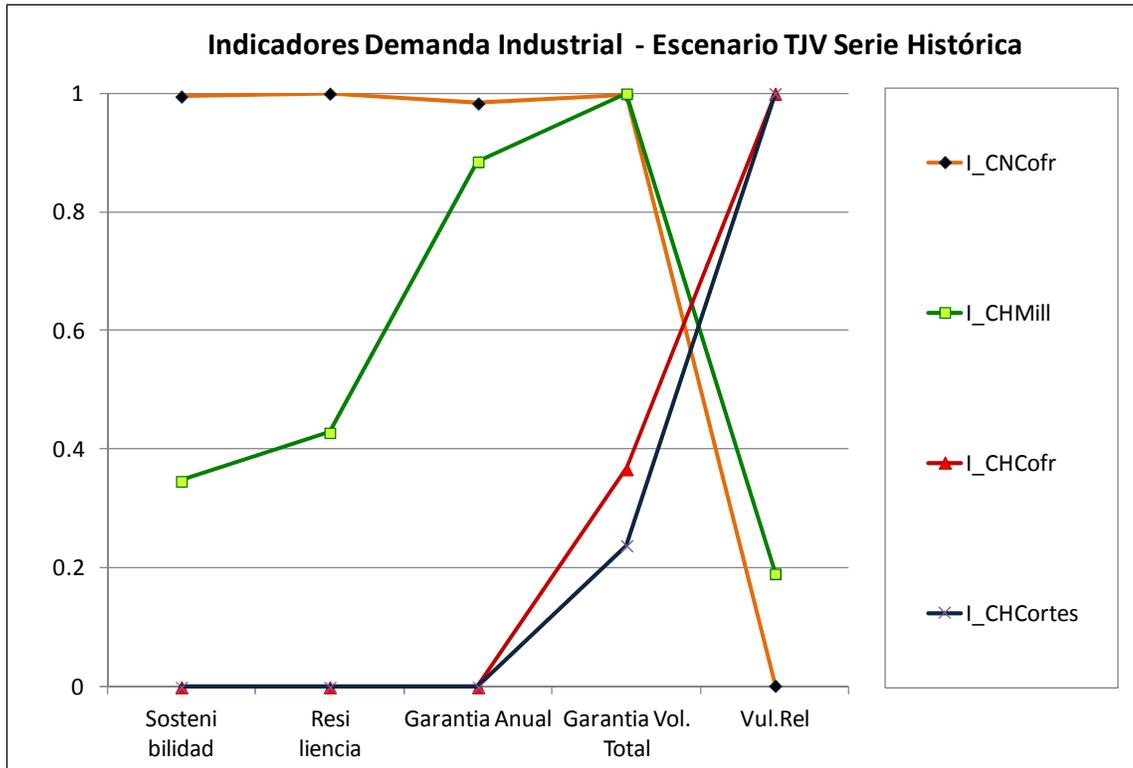
En el caso de la Zona Albacete existe un comportamiento óptimo de indicadores dado que el suministro es conjunto con bombeos y queda garantizado al 100%, pero se observa un aumento de vulnerabilidad del suministro superficial (Figura 5.13), por lo que existirá un mayor requerimiento de bombeos.

**Figura 5.13 Indicadores de comportamiento de la MO Zona Albacete Sup con y sin TJV**



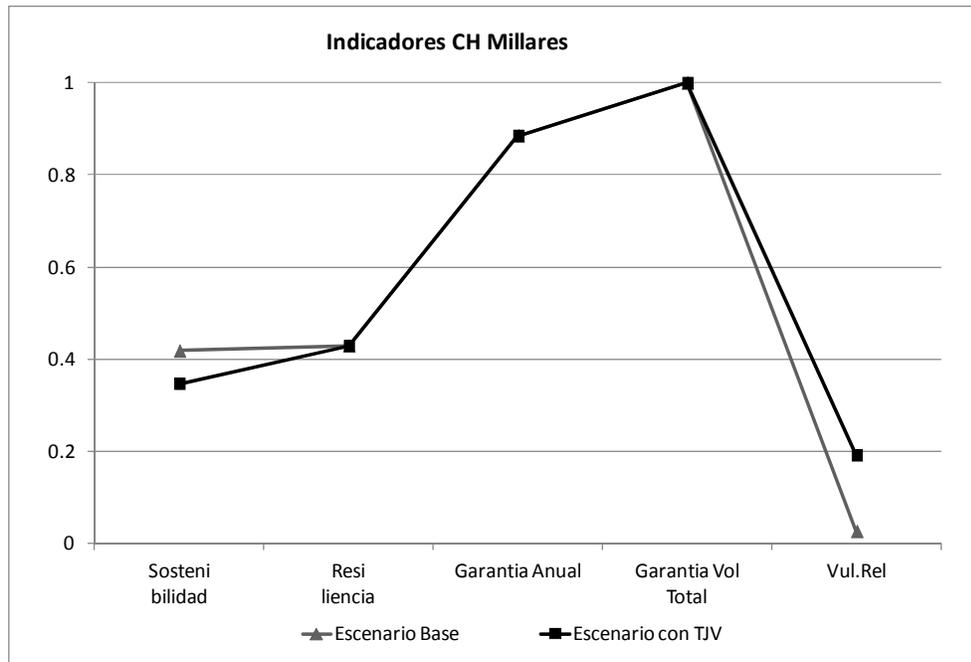
En el uso industrial (Figura 5.14).se siguen destacando los valores óptimos de sostenibilidad de la demanda de la Central Nuclear Cofrentes, debido a la alta prioridad asignada por razones de seguridad pero con una ligera disminución de garantía anual.

Figura 5.14 Indicadores para cálculo de sostenibilidad- Demanda Industrial - Escenario con TJV - Serie Histórica



Por el contrario, la sostenibilidad de la Central Hidroeléctrica Millares (Figura 5.15) disminuye su índice de sostenibilidad de 0.43 a 0.35 y se mantienen los valores bajos de las Centrales Hidroeléctricas Cortes y Cofrentes por su baja prioridad en el sistema.

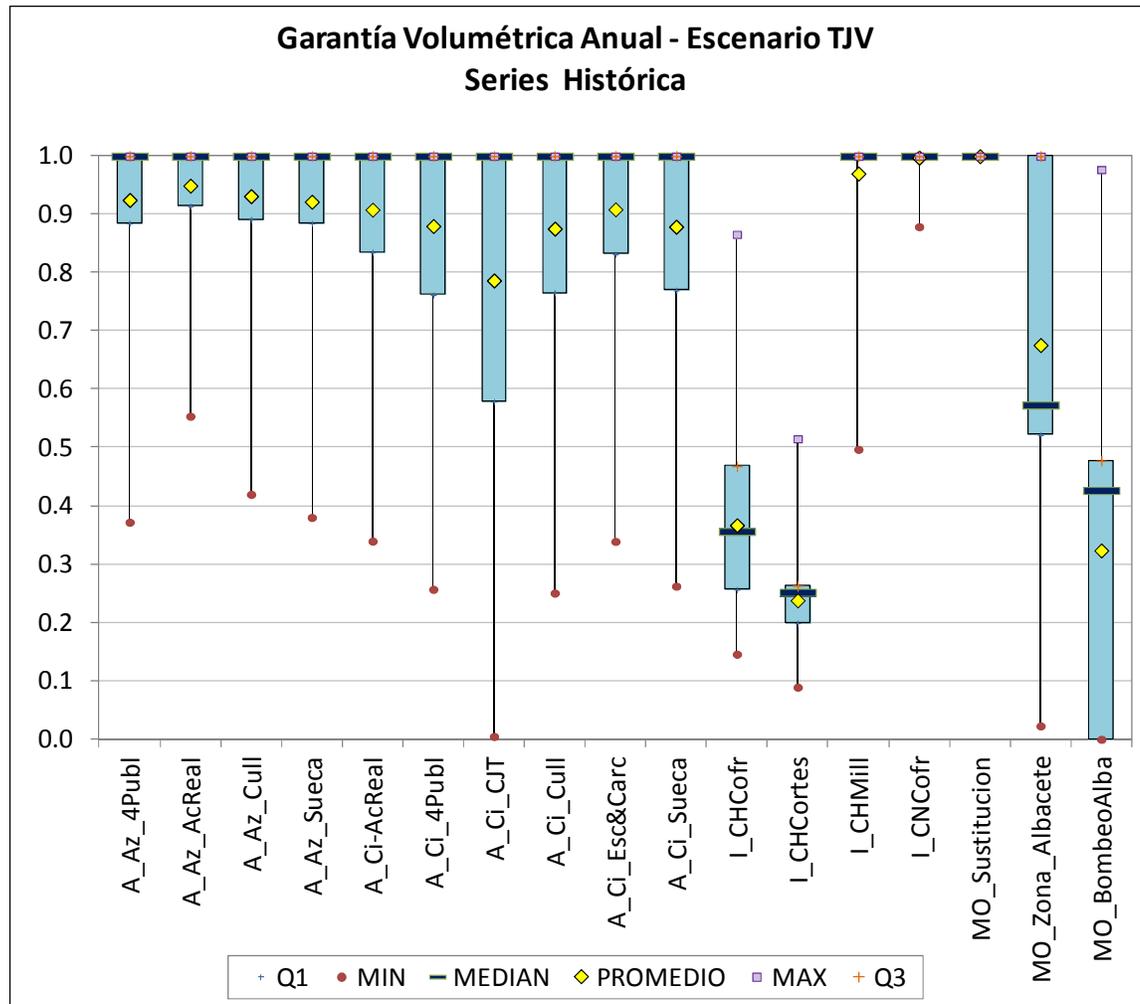
Figura 5.15 Indicadores de comportamiento de la CH Millares con y sin TJV



Garantía Volumétrica anual incorporando el Trasvase

Bajo las condiciones de serie histórica de aportaciones, (61 años), se ha simulado el escenario que incluye la demanda del Trasvase Júcar- Vinalopó desde el Azud de la Marquesa. La respuesta del sistema se representa en la siguiente figura.

Figura 5.16 Garantía Volumétrica anual – Escenario con Medidas (TJV) Serie Histórica



A partir de la gráfica se observan los elementos con comportamiento crítico:

- (Min): existen años en los cuales se cumple 0% de la demanda para el elemento Rio Alarcón tramo 1(RJT1).
- (Máx): la CH Cortes presenta un máximo de 52% de satisfacción a la demanda y la CH Cofrentes un máximo de 87%, disminuyendo un 2% con respecto al escenario base.

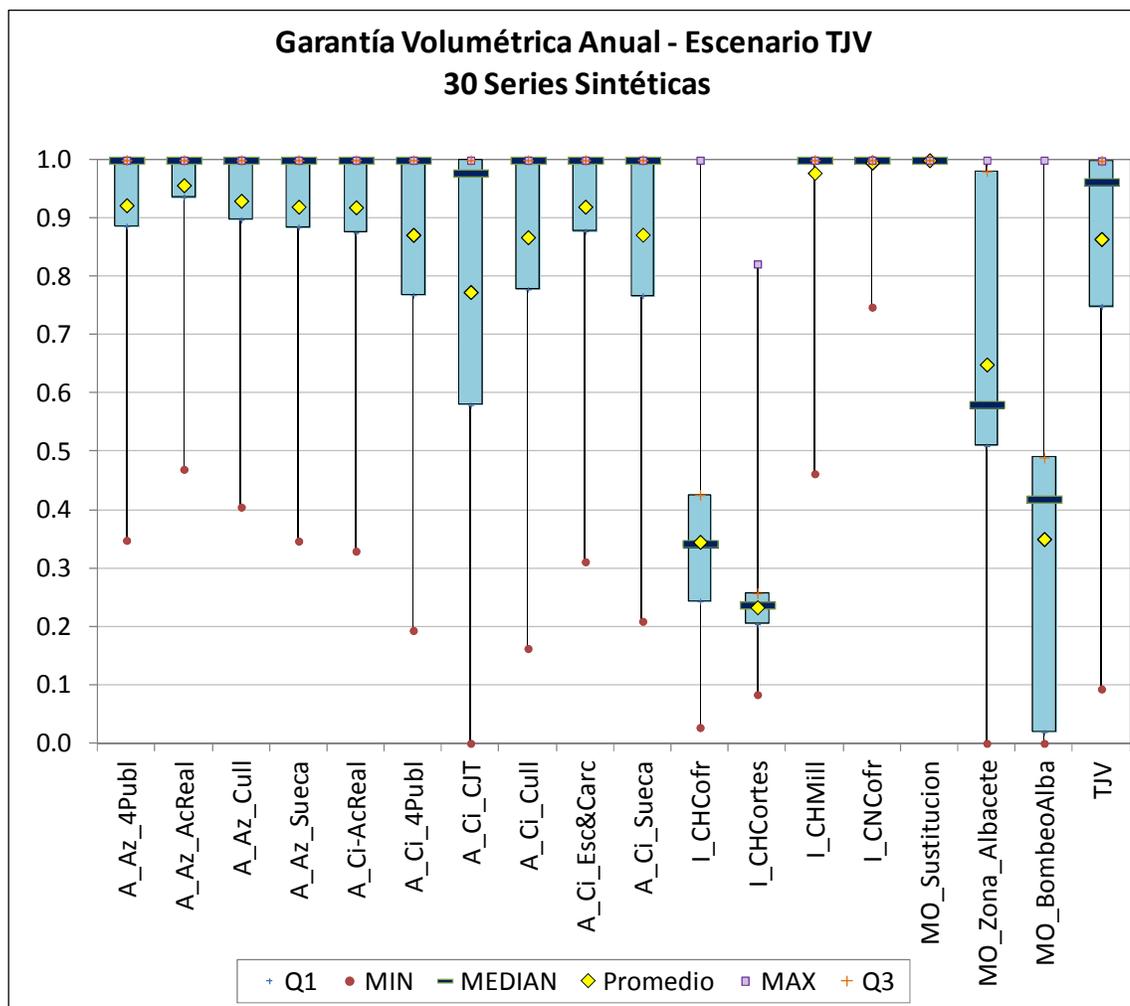
- (Q3): pese a que el máximo de CH Cofrentes es 87% de satisfacción, es un elemento crítico al presentar hasta un 75 % de los datos con valores máximos de 45% de satisfacción. El cual se mantiene en el escenario con Traslase.
- En general, analizando este indicador, no se aprecian cambios significativos en los elementos del sistema al comparar la repartición de cuartiles presentadas en la Figura 5.16 y Figura 5.5.

### **5.2.2. Series Sintéticas**

#### *Garantía Volumétrica anual incorporando el Traslase*

A partir de las 30 series sintéticas de aportaciones, se obtienen 1891 años de datos de suministros y garantías de las demandas, en este escenario se simuló el modelo incluyendo la demanda del Traslase Júcar- Vinalopó en el Azud de la Marquesa. Las respuestas del sistema del sistema se presentan en la Figura 5.17.

Figura 5.17 Garantía volumétrica anual Escenario medidas (TJV) – 30 Series Sintéticas



Análisis del Escenario Base con Series Histórica y Sintéticas

Este análisis se realizó únicamente con el indicador de garantía volumétrica anual, teniendo en cuenta que únicamente requiere el valor anual para su cálculo, por lo que las 30 series sintéticas se pueden analizar como una serie larga de 1891 datos sin importar el orden y la relación entre años.

REDES BAYESIANAS PARA EL ANÁLISIS INTEGRADO DE LA GESTIÓN DE SRH.  
 APLICACIÓN A LA CUENCA DEL RÍO JÚCAR

---

Con este indicador no se observan cambios significativos en el comportamiento del sistema y podría sugerir que el Trasvase en la toma específica del Azud de la Marquesa no significa una disminución sustancial del recurso suministrado a las demás demandas del sistema.

La mayor diferencia se observa en la demanda agrícola, como se presenta en la Tabla 5.6, pero éste cambio no es significativo teniendo en cuenta que en promedio el cambio es del 6% como máximo para el Canal Júcar Turia (por ser la de menor prioridad entre las demandas agrícolas).

**Tabla 5.6 Diferencias en Garantía Volumétrica anual. Análisis de las 30 Series Sintéticas (con TJV – sin TJV)**

	A_Az_4Publ	A_Az_AcReal	A_Az_Cull	A_Az_Sueca	A_Ci-AcReal	A_Ci_4Publ	A_Ci_CJT	A_Ci_Cull	A_Ci_Esc&Carc	A_Ci_Sueca
Q1	-0.05	-0.04	-0.04	-0.04	-0.07	-0.12	-0.05	-0.11	-0.07	-0.13
Min	-0.01	-0.01	0.01	-0.02	-0.01	-0.01	0.00	0.00	-0.01	-0.01
Median	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.02	0.00	0.00	0.00
Prom	-0.02	-0.01	-0.02	-0.02	-0.02	-0.03	-0.06	-0.04	-0.02	-0.03
Max	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

## 6. MODELO DE REDES BAYESIANAS PARA EL ANÁLISIS PROBABILÍSTICO

### 6.1. PRUEBAS DE DEPENDENCIA

En el presente apartado se realizan pruebas de dependencia temporal, analizando los coeficientes de autocorrelación  $r_1$  (lag  $k=1$ ) mediante el test de Anderson (Salas et al., 1981), con el fin de determinar la significancia de predicción de las aportaciones con un año de desfase. Igualmente se estudió la correlación entre las variables de aportación anual y volumen inicial, escogidas como variables de decisión (“padres del sistema”) por su gran influencia sobre las variables analizadas de suministro.

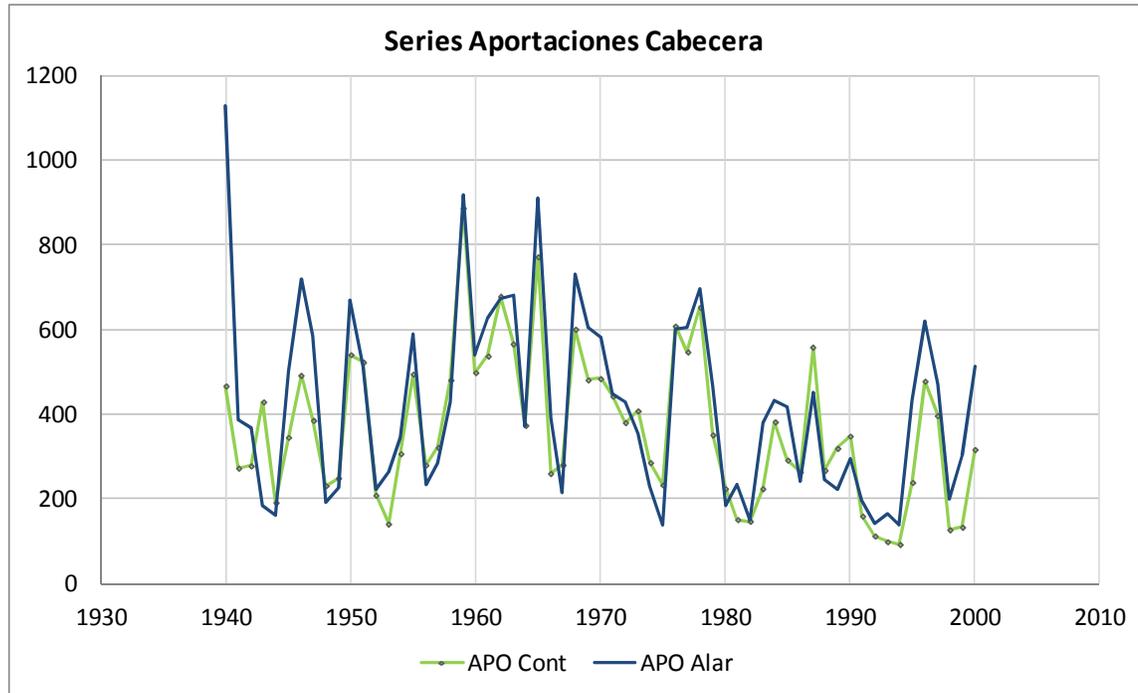
#### *Autocorrelación de la serie de aportaciones*

Las series de aportaciones anuales en cabecera (Alarcón más Contreras) presentan autocorrelación con desfase 1 por encima del test de Anderson, lo que demuestra que la aportación de un año tiene una cierta significancia de predicción sobre la aportación del siguiente año.

**Tabla 6.1 Coeficientes de autocorrelación  $r_1$  – Aportaciones de cabecera**

APO $Q_{t-1}, Q_t$	$r_1$	Lim Anderson	
Alarcón	0.298545	-0.26758	0.234251
Contreras	0.393559	-0.26758	0.234251
Alar_Cont	0.343781	-0.26758	0.234251

Figura 6.1 Series de aportaciones anuales de cabecera



Correlación entre aportaciones anuales PREVIAS ( $Q_{t-1}$ ) y volumen al inicio del año (o lo que es lo mismo,  $V$  final en septiembre  $t-1$ )

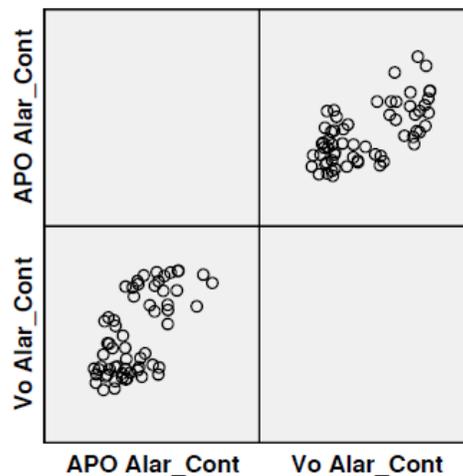
Éstas variables corresponden a las variables de decisión del modelo de redes bayesianas, son las condiciones observadas del sistema, cuyas decisiones tendrán inferencia probabilística sobre los estados de las variables dependientes (demandas). La dependencia entre ellas se determina mediante el análisis de autocorrelación.

Si la correlación es significativa, estarán unidas entre sí mediante un arco (2.2.2), indicando en el inicio la variable de decisión que tiene inferencia probabilística sobre la otra.

**Tabla 6.2 Coeficientes de autocorrelación  $r_1$  – Aportación y Volumen Inicial en cabecera**

Qt-1,Vt-1	$r_1$	Lim Anderson	
Alarcon	0.660034	-0.26758	0.234251
Contreras	0.595519	-0.26758	0.234251
Alar_Cont	0.649072	-0.26758	0.234251

**Tabla 6.3 Análisis de dependencia mediante SPSS - Aportación y Volumen Inicial en cabecera**



A partir del análisis de autocorrelación se observa que la correlación  $r_1$  entre las variables de decisión es alta, indicando que el volumen al final del año hidrológico depende de la Aportación total durante el mismo año.

## 6.2. ANÁLISIS PROBABILÍSTICO

### 6.2.1. Garantías Volumétricas

Mediante el modelo de Redes Bayesianas, diseñado con el programa Hugin Expert, se realizará un análisis probabilístico de garantías volumétricas del siguiente año, bajo condiciones de aportación anual y volumen inicial previos. Empleando así, una muestra de serie histórica de 60 datos y de la serie sintética de 1860 datos.

Las variables de decisión (padres del sistema) corresponderán a los datos previos de la serie de aportaciones de cabecera (Alarcón más Contreras) y del Volumen inicial de cabecera (Alarcón más Contreras).

Los cuatro estados de los padres del sistema corresponden a los cuartiles de cada una de las series, tal como se presenta en la Tabla 6.4.

**Tabla 6.4 Estados Variables Padres de la Red Bayesiana**

	Aportación Alar_Cont hm <sup>3</sup> /año	Volumen Alar_Cont hm <sup>3</sup>
Q1	< 500	< 370
Q2	< 700	< 600
Q3	< 1070	< 1105
Q4	> 1070	> 1105

En el modelo se establecen como variables dependientes, las variables de demanda del sistema, cuyos posibles estados serán de No satisfacción, Aceptable o Satisfactorio según los porcentajes de garantía volumétrica anual (Tabla 6.5).

**Tabla 6.5 Déficit máximo anual de suministro por tipo de demanda**

	Uso Urbano e Industrial	Agrícola y Qmin
No satisface	Menores a 90%	Menores a 75%
Aceptable	90 -95%	75 - 95%
Satisface	95 -100%	95 -100%

Se consideraron los porcentajes establecidos en el IPH (orden 2656/2008) pero por las características del manejo de datos del análisis probabilístico, donde las garantías se calculan año a año, no se tienen en cuenta déficits de años consecutivos. Por esta razón se creó un criterio restrictivo el cual se podrá establecer o dialogar con los participantes del proceso de toma de decisiones, teniendo en cuenta la normativa aplicada y el sentimiento de satisfacción de los implicados.

Los datos de aprendizaje del modelo para calcular las tablas de probabilidad de las variables hijas corresponden a la serie de garantías volumétricas anuales (Gva) para cada uno de los elementos de demandas con sus correspondientes datos previos de Aportación anual ( $Q_{t-1}$ ) y Volumen inicial ( $V_0 = V_{\text{septiembre } t-1}$ ) en cabecera.

Estos datos parten del post-proceso de la información obtenida con la simulación de los diferentes escenarios en Aquatool, cuyas series anuales de demanda se “adimensionan” mediante el indicador de Gva y se hacen corresponder con la aportación anual y volumen final en la cabecera del embalse presentados el año inmediatamente anterior para aprender de la respuesta del sistema de gestión con estas condiciones de entrada.

### **6.2.2. Beneficio Económico**

Las funciones económicas de demanda de cada uso de representan el coste/beneficio unitario para el sistema los distintos niveles de flujo o suministro a cada elemento.

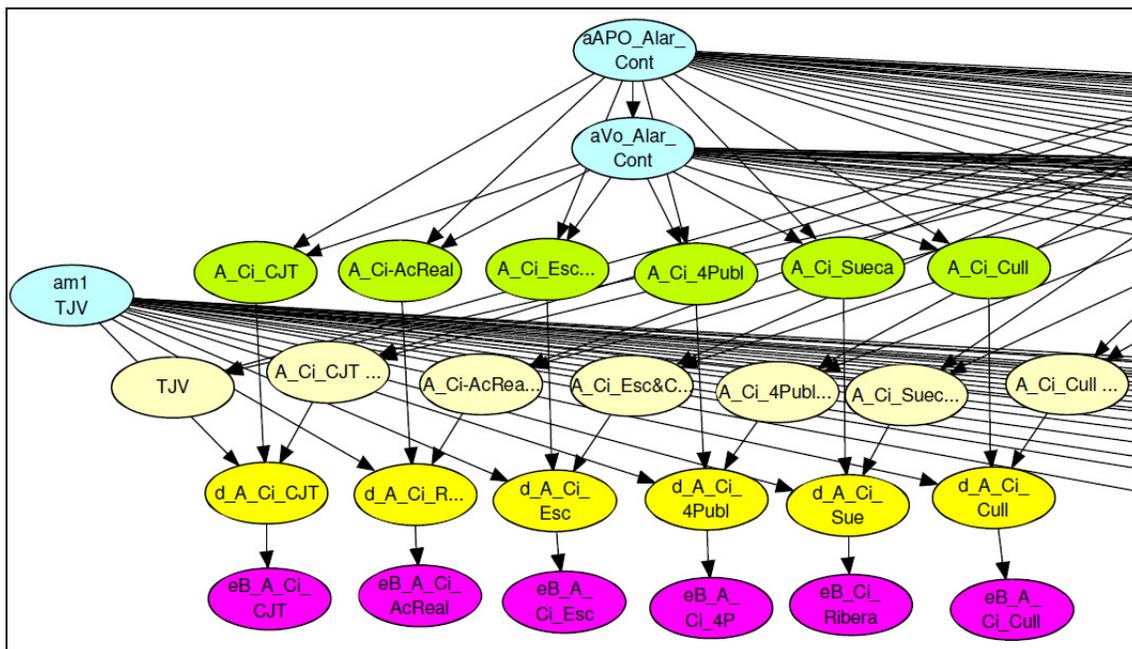
Los elementos que generan beneficio económico en el sistema se relacionaron con la función de beneficio correspondiente (~~Ec. 23~~ ~~Ec. 23~~ con los coeficientes presentados en ~~Tabla 3.11~~ ~~Tabla 3.11~~, ~~Tabla 3.12~~ ~~Tabla 3.12~~, Tabla 3.13, Tabla 3.14 y ~~Tabla 3.15~~ ~~Tabla 3.15~~), de tal forma que para un volumen de agua suministrado se obtiene el área bajo la curva de demanda hasta ese nivel de suministro, y equivale a la disposición total a pagar por esa cantidad de agua en millones de euros al año.

### 6.2.3. Comparación de resultados

El modelo de redes bayesianas generado permite disponer de un modelo de Redes orientadas a objetos con dos clases diferentes, una está destinada para analizar el escenario con serie histórica (60 datos) y la otra para analizar el escenario con series sintéticas (1860 datos).

Cada una de estas clases, presenta el análisis de selección de *escenario base* (sistema en la situación de gestión actual) y *escenario con TJV* (incorporando la medida del Trasvase Júcar-Vinalopó), bajo diferentes condiciones previas en cabecera de aportaciones anuales y volúmenes iniciales. La estructura general de las clases de la OOBN se presenta en la [Figura 6.2](#) ~~Figura 6-2~~, donde los nodos padres, o variables de decisión se presentan en azul claro.

**Figura 6.2 Estructura del modelo de Redes Bayesianas – Zoom Uso Agrario**

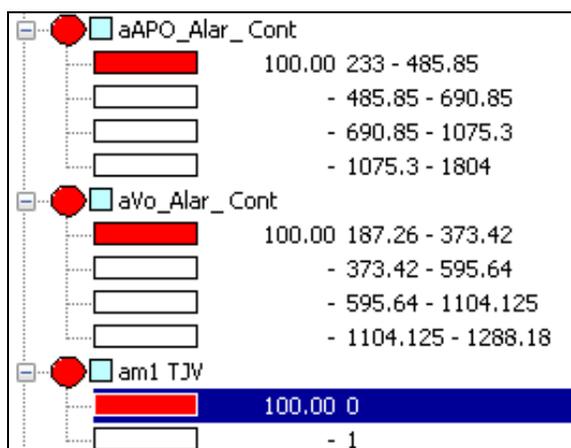


La variable m1 TJV (medida de incorporación de Trasvase), se generó como variable de decisión adicional. Es una variable booleana de decisión que permite evaluar si el sistema incluye o no la medida evaluada.

Las variables en amarillo son las variables definitivas de demanda, escogen la tabla de probabilidades correspondiente al escenario seleccionado, donde para un valor cero (0) de la variable booleana m1 TJV, correspondiente a no aplicar la medida, escoge los elementos de demanda evaluados en el escenario base (primera fila de demandas) y para un valor de m1 igual a uno (1) selecciona los datos correspondientes a el escenario con TJV (segunda fila de demandas color piel).

Una vez determinado el escenario, las variables de beneficio (violeta) evalúan la probabilidad de recibir más o menos del 50% del valor máximo que se pudiera percibir por uso. El beneficio se calcula para cada elemento de demandas, a partir de las funciones de beneficio (Ec. 23Ee. 23) planteadas en el modelo hidroeconómico (IIAMA 2006) y presentadas en el apartado 3.3.5.

**Figura 6.3 Interfaz Condiciones iniciales – Ejemplo ApoQ1- VoQ1 sin Trasvase**



En el interfaz se eligen las condiciones observadas (en rojo) de cada una de las variables de decisión. Las variables de aportación anual y volumen inicial presentan cuatro estados correspondientes a los cuartiles. En la Figura 6.3 , se muestra como ejemplo la selección de condiciones de aportaciones menores a 500 hm<sup>3</sup>/año aproximadamente (Q1 serie histórica), con volumen inicial en embalses de cabecera menores a 370 hm<sup>3</sup> aproximadamente.

### **6.3. ANÁLISIS ESCENARIO BASE CON SERIE HISTÓRICA Y 30 SERIES SINTÉTICAS**

A partir del modelo de redes bayesianas, se realizó un análisis de garantía volumétrica anual bajo diferentes condiciones previas de Aportación y Volumen inicial en cabecera.

Para el escenario base se contaba con series de 60 años, donde la serie de aportación histórica presentaba el Q1 en 500 hm<sup>3</sup>/año, el Q2 en 700 hm<sup>3</sup>/año y el Q3 en 1070 hm<sup>3</sup>/año, los cuales se establecieron como estados de decisión de la variable APO\_Alar\_Cont.

Así mismo, los volúmenes que se presentaron con la simulación del escenario base con serie histórica fueron Q1 en 370 hm<sup>3</sup>/año, el Q2 en 600 hm<sup>3</sup>/año y el Q3 en 1105 hm<sup>3</sup>/año, los cuales se establecieron como estados de decisión de la variable Vo\_Alar\_Cont.

La distribución de probabilidades y el tamaño de la muestra resultante de la combinación de los 16 escenarios posibles, tanto para la serie histórica como para la serie sintética (30) se presentan en la [Tabla 6.6](#)~~Tabla 6.6~~.

REDES BAYESIANAS PARA EL ANÁLISIS INTEGRADO DE LA GESTIÓN DE SRH.  
 APLICACIÓN A LA CUENCA DEL RÍO JÚCAR

**Tabla 6.6 Distribución de probabilidades de la serie histórica (a) y de las 30 series sintéticas (b) para diferentes condiciones de Aportación y Volumen inicial en cabecera**

(a) Serie Histórica

APO Alar Cont: (hm <sup>3</sup> /año)		
<500	Q1	0.25
<700	Q2	0.25
<1070	Q3	0.25
>1070	Q4	0.25
		1.00
<b>Muestra</b>		<b>60</b>

Vo Alar Cont (hm <sup>3</sup> )		Q1(%)	Q2(%)	Q3(%)	Q4(%)
<370	Q1	0.33	0.40	0.20	0.07
<600	Q2	0.40	0.33	0.20	0.07
<1105	Q3	0.27	0.20	0.20	0.33
>1105	Q4	0.00	0.07	0.40	0.53
		1.00	1.00	1.00	1.00
<b>Muestra</b>		<b>15</b>	<b>15</b>	<b>15</b>	<b>15</b>

APO Q1	APO Q1	APO Q1	APO Q1	APO Q2	APO Q2	APO Q2	APO Q2	APO Q3	APO Q3	APO Q3	APO Q3	APOQ4	APOQ4	APOQ4	APOQ4
Vo Q1	Vo Q2	Vo Q3	Vo Q4	Vo Q1	Vo Q2	Vo Q3	Vo Q4	Vo Q1	Vo Q2	Vo Q3	Vo Q4	Vo Q1	Vo Q2	Vo Q3	Vo Q4
5	6	3	1	6	5	3	1	4	3	3	5	0	1	6	8

(b) 30 Series Sintéticas

APO Alar Cont: (hm <sup>3</sup> /año)		
<500	Q1	0.25
<700	Q2	0.25
<1070	Q3	0.32
>1070	Q4	0.18
		1.00
<b>Muestra</b>		<b>1860</b>

Vo Alar Cont (hm <sup>3</sup> )		Q1(%)	Q2(%)	Q3(%)	Q4(%)
<370	Q1	0.38	0.39	0.24	0.02
<600	Q2	0.44	0.32	0.33	0.15
<1105	Q3	0.18	0.29	0.38	0.51
>1105	Q4	0.00	0.00	0.05	0.32
		1.00	1.00	1.00	1.00
<b>Muestra</b>		<b>463</b>	<b>462</b>	<b>591</b>	<b>344</b>

APO Q1	APO Q1	APO Q1	APO Q1	APO Q2	APO Q2	APO Q2	APO Q2	APO Q3	APO Q3	APO Q3	APO Q3	APOQ4	APOQ4	APOQ4	APOQ4
Vo Q1	Vo Q2	Vo Q3	Vo Q4	Vo Q1	Vo Q2	Vo Q3	Vo Q4	Vo Q1	Vo Q2	Vo Q3	Vo Q4	Vo Q1	Vo Q2	Vo Q3	Vo Q4
176	205	82	0	179	148	134	1	140	195	227	29	6	53	174	111

De las tablas anteriores ([Tabla 6.6](#) ~~Tabla 6.6~~ a y b) se puede observar:

- Pese a que la muestra (b) es mayor no se encontraron coincidencias de aportaciones anuales menores a 500 hm<sup>3</sup>/año con volúmenes iniciales altos mayores a 1105 hm<sup>3</sup>, por lo que se descarta como escenario de análisis.
- En la muestra (b) la significancia del valor encontrado en la condición APOQ2 - VoQ4 (aportaciones anuales entre 500 y 700 hm<sup>3</sup>/año con volúmenes iniciales altos mayores a 1105 hm<sup>3</sup>) es muy baja en una muestra mayor (1/462) comparado con (1/15), por lo tanto su probabilidad tiende a nula y no se considerará este escenario como decisivo en la toma de decisiones.
- La simulación de series permite evaluar con mayor fiabilidad las condiciones del sistema para las cuales no se tenía una experiencia con la serie histórica suficiente para permitir la toma de decisiones en dicho escenario, por ejemplo

APOQ4 – VoQ2. Adicionalmente, da peso a las decisiones que se pudieran inferir del análisis de los datos históricos

- En el análisis del sistema comparando el escenario base y el escenario con medida (TJV) tanto para el escenario histórico como para las series sintéticas permitirá evaluar la significancia de contar con una muestra mayor de datos en la toma de decisiones. Es adecuado comparar estos escenarios bajo la situación crítica del recurso hídrico (APOQ1 – VoQ1) la cual presenta aportaciones previas del sistema menores a 500 hm<sup>3</sup>/año y el volumen inicial de los embalses menor a 370 hm<sup>3</sup>.

#### **6.4. ANÁLISIS DEL SISTEMA CON Y SIN TRASVASE – PROBABILIDAD Y BENEFICIOS CON SERIE HISTÓRICA**

##### **6.4.1. Probabilidad de garantía volumétrica anual de la demanda**

A continuación se presentan los resultados del modelo ante una condición crítica de recursos hídricos previos, (APOQ1) descrita en el apartado anterior.. En la [Figura 6.4](#) ~~Figura 6.4~~ y la [Figura 6.5](#) ~~Figura 6.5~~ se presentan los porcentajes correspondientes de garantía volumétrica anual para cada estado (No satisfactorio, Aceptables y Satisfactorio). bajo la condición de aportaciones APOQ1 para diferentes estados de Vo.

REDES BAYESIANAS PARA EL ANÁLISIS INTEGRADO DE LA GESTIÓN DE SRH.  
 APLICACIÓN A LA CUENCA DEL RÍO JÚCAR

Condición de Aportación anual muy baja en cabecera (<500hm<sup>3</sup>/año) – Muestra (15)

Figura 6.4 Condición ApoQ1 - Garantía Volumétrica en el Escenario Base simulado con Serie histórica

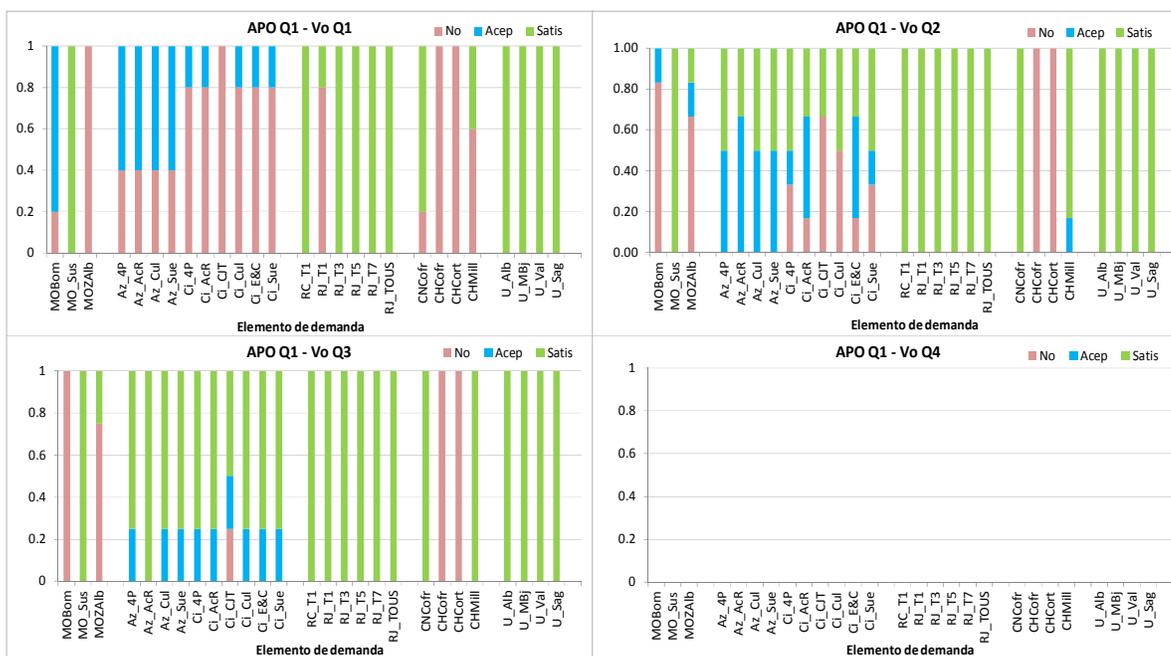
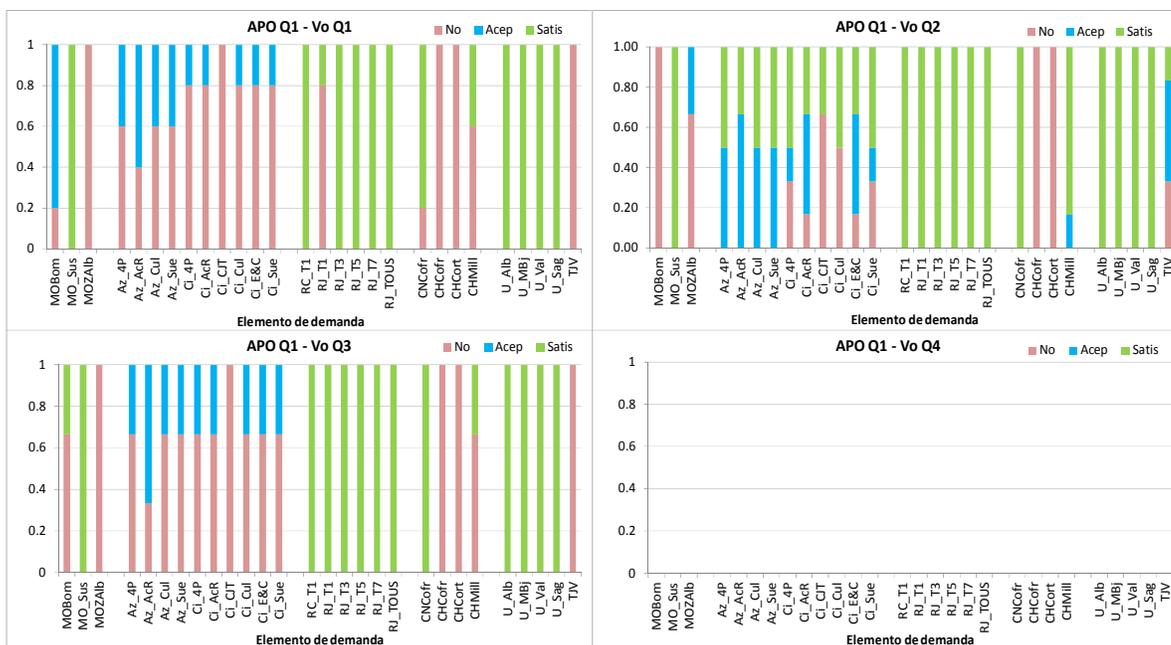


Figura 6.5 Condición ApoQ1 - Garantía Volumétrica en el Escenario con Traspase simulado con Serie histórica



**Tabla 6.7 Condición ApoQ1 – Cambios de Garantía Volumétrica para el Escenario Base simulado con Serie Histórica**

		APO Q1	APO Q1	APO Q1
		Vo Q1	Vo Q2	Vo Q3
<b>EXPERIENCE</b>		<b>5</b>	<b>6</b>	<b>3</b>
		$\Delta$		
A_Az_4Publ	No	0.20	0.00	0.67
A_Az_AcReal	No	0.00	0.00	0.33
A_Az_Cull	No	0.20	0.00	0.67
A_Az_Sueca	No	0.20	0.00	0.67
A_Ci_4Publ	No	0.00	0.00	0.67
A_Ci-AcReal	No	0.00	0.00	0.67
A_Ci_CJT	No	0.00	0.00	0.75
A_Ci_Cull	No	0.00	0.00	0.67
A_Ci_Esc&Carc	No	0.00	0.00	0.67
A_Ci_Sueca	No	0.00	0.00	0.67

Comparando la [Figura 6.4](#) y la [Figura 6.5](#), y en la Tabla 6.7, bajo la condición de Aportación menor a Q1 y Volumen Inicial menor a Q1, se observan cambios en las demandas agrícolas de arrozales de Cuatro Pueblos, Cullera y Sueca en las cuales aumenta un 20% la probabilidad de encontrarse en estado No satisfactorio. Teniendo en cuenta que la muestra correspondiente a este escenario es de 5, este cambio correspondería a que un dato cambio de estado Aceptable a No satisfactorio.

Bajo la condición Volumen Inicial menor a Q2, no se observan cambios significativos y en la condición Q3 se observa que empeoran las demandas agrícolas aumentando en un 67% la probabilidad de encontrarse en estado No Satisfactorio.

El anterior análisis probabilístico de la serie histórica se puede corroborar observando los indicadores de comportamiento del sistema, presentados en el apartado 5.2.1, donde se observó, que con la implementación del Traspase Júcar-Vinalopó, disminuye la sostenibilidad de las demandas agrarias.

Pero a pesar que en general el comportamiento medio de las demandas es acorde con los análisis de indicadores, donde los cambios fueron negativos pero no significativos, se observa que las diferencias de introducir o no el Trasvase son relativas a las condiciones iniciales de aportación anual y volumen. Lo anterior debido a que al tener más cantidad de agua inicial en cabecera mejoran los porcentajes de satisfacción, pero con la introducción de la medida del Trasvase demandas como la agrícola se ven afectadas a causa de su prioridad menor.

En el análisis probabilístico es recomendable una muestra mayor a la histórica, debido a que el cambio de un solo valor da mucho peso al cambio en porcentaje.

#### **6.4.2. Beneficios Económicos**

Los elementos que generan beneficio económico en el sistema se relacionaron con la función de beneficio correspondiente (~~Ec. 23~~ ~~Ec. 23~~ con los coeficientes presentados en ~~Tabla 3.11~~ ~~Tabla 3.11~~, ~~Tabla 3.12~~ ~~Tabla 3.12~~, Tabla 3.13, Tabla 3.14 y ~~Tabla 3.15~~ ~~Tabla 3.15~~), de tal forma que para un volumen de agua suministrado se obtiene el área bajo la curva de demanda hasta ese nivel de suministro, y equivale a la disposición total a pagar por esa cantidad de agua en millones de euros al año.

El beneficio económico se ve afectado teniendo en cuenta que al introducir el escenario de TJV, las garantías tienden a disminuir en mayor o menor porcentaje según el escenario en el que se encuentren.

Bajo la condición de Aportación menor a Q1 y Volumen Inicial menor a Q1, comparando la ~~Figura 6.4~~ ~~Figura 6.4~~ y la ~~Figura 6.5~~ ~~Figura 6.5~~, se observan cambios en las demandas agrícolas de arrozales de Cuatro Pueblos, Cullera y Sueca en las cuales aumenta un 20% la probabilidad de encontrarse en estado no

satisfactorio. Teniendo en cuenta que los beneficios máximos asociados a éstas demandas son los siguientes:

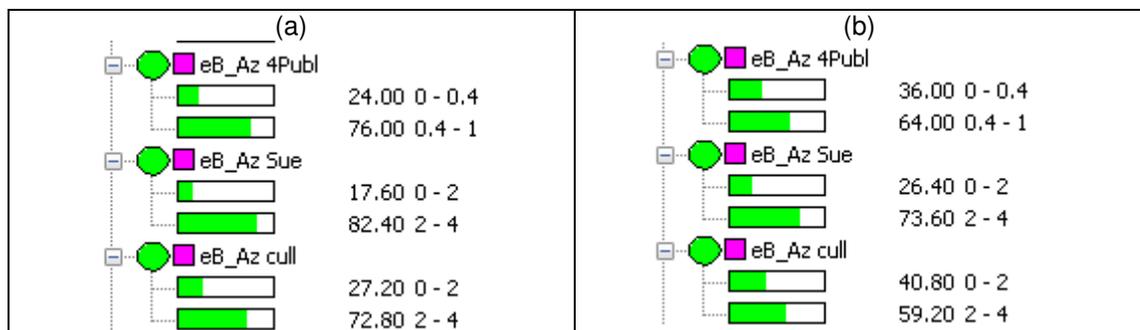
- Arrozal Cuatro Pueblos: 0.6 millones de €/año
- Arrozal Sueca: 3.8 millones de €/año
- Arrozal Cullera: 2.8 millones de €/año

Analizando los dos estados de las variables beneficio: el primero de cero al 50% del máximo beneficio y del 50% al máximo beneficio generado por cada uso.

Por ejemplo en el caso de los arrozales de Cullera, la disminución de la garantía de las demandas se refleja en que la probabilidad de conseguir entre 2 y 4 millones de eur/año para disminuye de un 73% a 59% en el escenario con Traspase y bajo condiciones APO1Q1.

Éste tipo de análisis se puede realizar para cada una de las variables de demanda que tienen beneficio asociado, bajo cada una de las condiciones iniciales observadas al principio de año de gestión.

**Figura 6.6 Valores de probabilidad Beneficio Máximo Serie Histórica-- Ejemplo Demanda agrícola de Ribera Baja bajo condiciones ApoQ1- VoQ1 sin Traspase (a) y con Traspase (b)**



## 6.5. ANÁLISIS EL SISTEMA CON Y SIN TRASVASE – 30 SERIES SINTÉTICAS

### 6.5.1. Probabilidad de garantía volumétrica anual de la demanda

Con el fin de generar un modelo de análisis probabilístico que proporcione mayor confiabilidad en el análisis de resultados, se recurre a un mayor número de simulaciones del sistema, a partir de los datos de las 30 series sintéticas. De esta forma, establecer si este comportamiento de las demandas es realmente sensible a cambios impuestos por las variables de decisión.

En la Figura 6.7, Figura 6.8 y Tabla 6.8 se presentan los resultados del modelo ante una condición crítica de recursos hídricos previos, (APOQ1) para diferentes estados de Vo. Se presentan los porcentajes correspondientes de garantía volumétrica anual para cada estado (No satisfactorio, Aceptables y Satisfactorio).

**Tabla 6.8 Condición ApoQ1 – Cambios de Garantía Volumétrica para el Escenario Base simulado con Serie Sintética**

		APO Q1	APO Q1	APO Q1
		Vo Q1	Vo Q2	Vo Q3
<b>EXPERIENCE</b>		<b>176</b>	<b>205</b>	<b>82</b>
		$\Delta$		
A_Az_4Publ	Satis	-0.05	-0.21	-0.10
A_Az_AcReal	Satis	-0.02	-0.15	-0.07
A_Az_Cull	Satis	-0.05	-0.20	-0.10
A_Az_Sueca	Satis	-0.05	-0.20	-0.10
A_Ci_4Publ	Satis	-0.06	-0.20	-0.16
A_Ci-AcReal	Satis	-0.02	-0.19	-0.12
A_Ci_CJT	Satis	-0.02	-0.17	-0.18
A_Ci_Cull	Satis	-0.06	-0.19	-0.12
A_Ci_Esc&Carc	Satis	-0.02	-0.15	-0.10
A_Ci_Sueca	Satis	-0.06	-0.19	-0.17
RJ_T1Alar	Satis	0.10	-0.06	0.00

REDES BAYESIANAS PARA EL ANÁLISIS INTEGRADO DE LA GESTIÓN DE SRH.  
 APLICACIÓN A LA CUENCA DEL RÍO JÚCAR

Condición de Aportación anual muy baja en cabecera (<500hm<sup>3</sup>/año) – Muestra (463)  
 Figura 6.7 Condición ApoQ1 - Garantía Volumétrica en el Escenario Base simulado con Serie Sintética

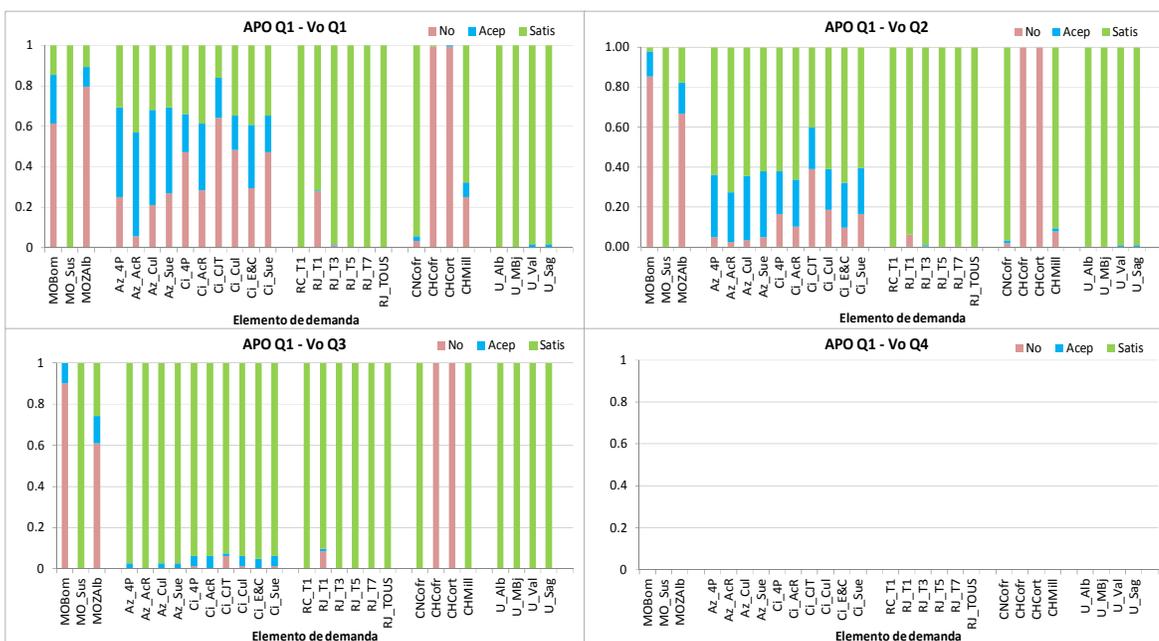
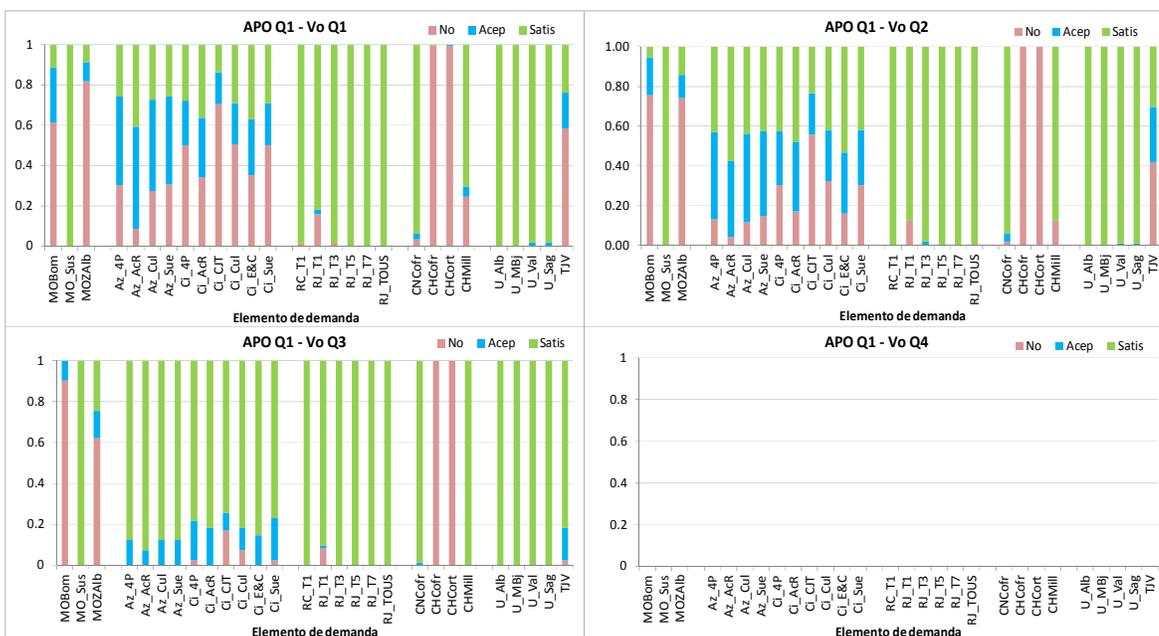


Figura 6.8 Condición ApoQ1 - Garantía Volumétrica en el Escenario con TJV simulado con Serie Sintética



Comparando Figura 6.7 y Figura 6.8, y observando los datos de la Tabla 6.8 Tabla 6.8, bajo la condición de Aportación menor a Q1 y Volumen Inicial menor a Q1, solo se observa que en el Tramo 1 del Río Júcar el estado satisfactorio aumenta un 10%, que es acorde con los resultados de la comparación de los indicadores (Figura 5.2 y Figura 5.10). Lo anterior se atribuye a que las sueltas del embalse Alarcón deberán ser mayores por la necesidad de suplir una demanda adicional, las cuales ayudan de forma alternativa a garantizar el caudal mínimo en este tramo específico de recursos propios escasos.

Bajo la condición Volumen Inicial menor a Q2, al tener más cantidad de agua inicial en cabecera mejoran los porcentajes de satisfacción, pero al introducir la medida del Trasvase demandas como la agrícola de Cítricos del CJT (A\_Ci\_CJT) pasa de tener un 40% de No satisfacción a un 60%, por ser la demanda agrícola de menor prioridad.

En la condición Q3 se observa que los porcentajes de satisfacción de las demandas agrícolas disminuyen del orden de un 20% en general con respecto a la situación sin Trasvase.

Se observa que los cambios en los porcentajes de satisfacción por implementar el Trasvase Júcar Vinalopó en el Azud la Marquesa según las condiciones iniciales hidrológicas y de volumen inicial en cabecera pueden llegar a ser significativas.

### **6.5.2. Beneficios Económicos**

Como se explicó anteriormente, los elementos que generan beneficio económico en el sistema se relacionaron con la función de beneficio correspondiente (Ec. 23~~Ec. 23~~ con los coeficientes presentados en Tabla 3.11~~Tabla 3.11~~, Tabla 3.12~~Tabla 3.12~~, Tabla 3.13, Tabla 3.14 y Tabla 3.15~~Tabla 3.15~~), de tal forma que

para un volumen de agua suministrado se obtiene el área bajo la curva de demanda hasta ese nivel de suministro, y equivale a la disposición total a pagar por esa cantidad de agua en millones de euros al año.

El beneficio económico se ve afectado teniendo en cuenta que al introducir el escenario de TJV, las garantías tienden a disminuir en mayor o menor porcentaje según el escenario en el que se encuentren.

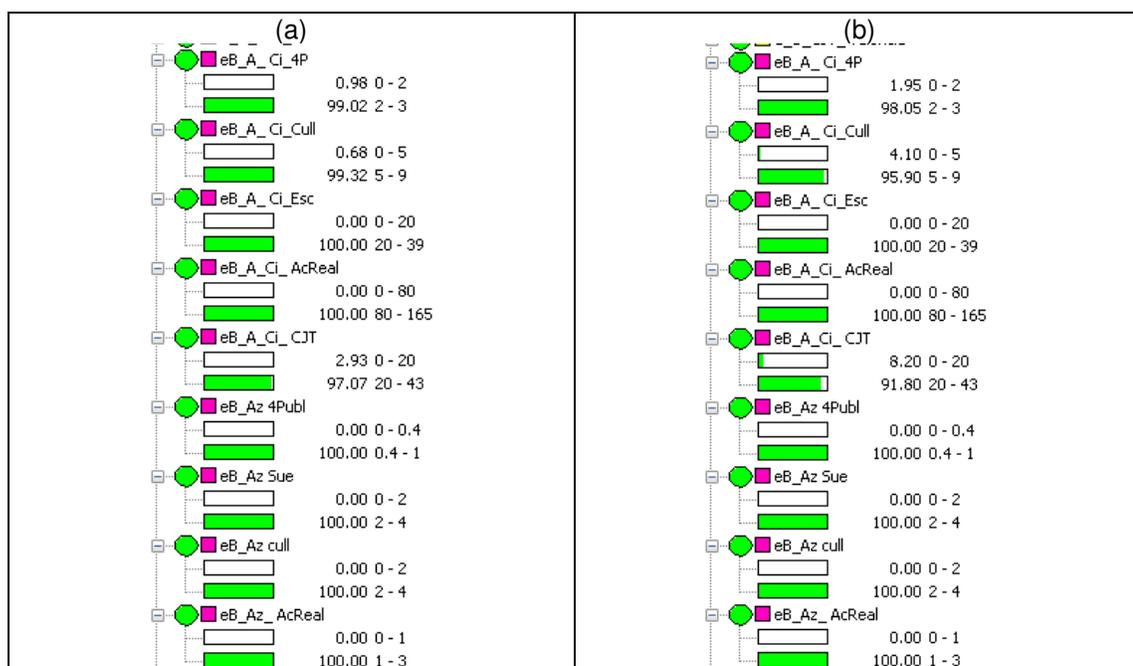
Bajo la condición de Aportación menor a Q1 y Volumen Inicial menor a Q3, donde se observaron los cambios más significativos en las demandas agrícolas en las cuales disminuye en un 20% aproximadamente la probabilidad de encontrarse en estado Satisfactorio. Teniendo en cuenta que los beneficios máximos asociados a estas demandas son los siguientes:

- Arrozal AcReal 2.9 millones de €/año
- Arrozal Cuatro Pueblos: 0.6 millones de €/año
- Arrozal Sueca: 3.8 millones de €/año
- Arrozal Cullera: 2.8 millones de €/año
- Cítricos Escalona & Carcagente 37.9 millones de €/año
- Cítricos CJT 42.8 millones de €/año
- Cítricos Acequia Real 162.2 millones de €/año
- Cítricos Cuatro Pueblos 2.7 millones de €/año
- Cítricos Sueca 17.2 millones de €/año
- Cítricos Cullera 8.9 millones de €/año

Analizando los dos estados de las variables beneficio: el primero de cero al 50% del máximo beneficio y del 50% al máximo beneficio generado por cada uso. Se observa que aunque el cambio de satisfacción de demanda es significativo en el escenario APOQ1- Vo3, no se observa un cambio importante en el porcentaje de estados de beneficio percibido. Teniendo este tipo de condiciones se requeriría más detalle en el estado de beneficio para observar cuánto dinero se dejaría de percibir ya que por ejemplo el rango de los cítricos de la Acequia Real es de 80 millones de eur/año.

Éste tipo de análisis se puede realizar para cada una de las variables de demanda que tienen beneficio asociado, bajo cada una de las condiciones iniciales observadas al principio de año de gestión.

**Figura 6.9 Valores de probabilidad Beneficio Máximo Serie Sintética-- Ejemplo Demanda agrícola bajo condiciones ApoQ1- VoQ3 sin Trasvase (a) y con Trasvase (b)**



## 7. SÍNTESIS Y CONCLUSIONES

Combinando el modelo de simulación de Aquatool con las redes bayesianas se obtiene un modelo integrado de apoyo a la toma de decisiones donde es posible evaluar el comportamiento de un sistema dado, ante unas variables de decisión acordadas.

Su importancia radica en que aprovecha la experiencia y exactitud de modelación de procesos de gestión a escala de cuenca desarrolladas para el programa Aquatool, con el análisis de los resultados mediante una interfaz interactiva y de fácil manejo en procesos de toma de decisiones, donde cambiando los estados de variables de decisión se presentan los posibles cambios que repercuten a las demás variables, sin dejar de lado la incertidumbre asociada a estos procesos.

El análisis de las series sintéticas simuladas en Aquatool y el posterior procesamiento probabilístico de la información resultante, permitió observar el sistema condicionado a estados iniciales del año de gestión, ya sean hidrológicos o de medidas.

De esta forma se le entrega al gestor los datos y gráficas de las cuatro condiciones posibles de aportaciones anuales del año previo, una vez seleccionado el rango en el que se encuentra, selecciona el rango de volumen inicial en los embalses de cabecera del año de gestión.

A partir de las condiciones observadas para el año en cuestión, se conocerán las probabilidades de satisfacción de la demanda en el año próximo según análisis de serie histórica o bien mediante series sintéticas.

Adicionalmente, si en la toma de decisiones se plantea la incorporación de una medida, el gestor podrá tomar decisiones basadas en las diferencias probabilísticas resultantes de la introducción o no de dichas medidas y en el cambio del comportamiento de sus indicadores.

A estos análisis se puede incorporar para la toma de decisiones la evaluación del beneficio económico, dado que para un volumen de agua suministrado se obtiene el área bajo la curva de demanda hasta ese nivel de suministro, obteniéndose así la disposición total a pagar por esa cantidad de agua. Éste tipo de análisis se puede realizar para cada una de las variables de demanda que tienen un beneficio económico asociado, y obtener así los cambios que generan cada una de las condiciones iniciales impuestas.

El presente estudio permitió analizar el sistema bajo un escenario de medidas planteado en el Esquema de Temas Importantes del Río Júcar, el cual consistían en la incorporación del Traspase Júcar Vinalopó en el Azud de la Marquesa. Mediante el uso de redes bayesianas, se representó, de forma general, las posibles respuestas del sistema vinculando temas de interés político, científico, social y ambiental.

Los indicadores generales del sistema mostraban cambios desfavorables con la aplicación de la medida pero estos no eran significativos. Luego de realizar la simulación de las series sintéticas en Aquatool y del posterior procesamiento probabilístico de la información resultante, fue posible observar la significancia de la incorporación de la medida según la condición hidrológica del año previo y el volumen de los embalses de cabecera al iniciar el año de gestión.

El análisis probabilístico de los indicadores obtenidos a partir de la simulación de las series sintéticas, permite obtener un valor medio del comportamiento del

sistema. La fortaleza de este análisis es el conocimiento de la seguridad con la cual se afirma que el valor medio de estos indicadores se aproxima al verdadero valor de la media poblacional. Lo cual es posible a partir de la formulación de intervalos de confianza.

Es importante resaltar que, adicional a las estrategias de planificación y gestión del recurso, para lograr estos objetivos es necesario fomentar la utilización racional del agua donde aún se requiere gran concentración de esfuerzos en la mejora de las redes y de técnicas de depuración, en los sistemas de ahorro, en la concienciación pública, en la planificación urbanística y territorial, y en la búsqueda de sistemas que reduzcan la elevada dependencia energética.

#### *Líneas Futuras*

- Los métodos propuestos, facilitadores de toma de decisiones, permitirán analizar los resultados de los procesos de participación pública a los cuales son sometidos los documentos de gestión que se desarrollan bajo el marco de los Planes Hidrológicos de Cuenca.
- Incorporar mediante el uso de Redes Bayesianas Orientadas a Objetos (OOBNs), elementos del sistema que requieran mayor detalle, para lograr un mejor análisis integral. Por ejemplo la OOBN estudiada en el proyecto MERIT para la Mancha Oriental (Bromley et.al. 2005)
- Generación de una herramienta que vincule la información de simulación con un modelo de redes bayesianas y permita la representación gráfica de los resultados.

## 8. REFERENCIAS

- Ajami, N. K., G. M. Hornberger, and D. L. Sunding (2008), *Sustainable water resource management under hydrological uncertainty*, *Water Resour. Res.*, 44, W11406, doi:10.1029/2007WR006736
- Ames DP, Neilson BT, Stevens DK, Lall U (2005) Using Bayesian networks to model watershed management decisions: an East Canyon Creek case study. *J Hydroinform* 7:267–282.
- Andreu, J., J. Capilla y J. Ferrer, 1992. Modelo SIMGES de Simulación de la Gestión de Recursos Hídricos incluyendo utilización conjunta. Manual del Usuario. Servicio Publ. Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, Spain.
- Andreu, J., J. Capilla y E. Sanchís, 1996. AQUATOOL, a generalized decision support system for water-resources planning and management, *Journal of Hydrology*, 177, 269-291.
- Box, G. and G. M. Jenkins (1970). *Time-Series Analysis, Forecasting and control*. San Francisco, California: Holden-Day.
- Box, G., G. M. Jenkins, and G. Reinsel (1976). *Time Series Analysis: Forecasting and Control*. San Francisco, California: Holden-Day. Revisión de la version de 1970.
- Bromley J (2005) MERIT Project Guidelines. Guidelines for the use of Bayesian Networks as a participatory tool for Water Resources Management. A MERIT report. Centre for Ecology and Hydrology, Wallingford, UK, 118 pp
- Bromley J, Jackson NA, Clymer OJ, Giacomello AM, Jensen FV (2005) The use of Hugin to develop Bayesian networks as an aid to integrated water resource planning. *Environ Model Softw* 20:231– 242

- Cain J (2001) Planning improvements in natural resources management. Guidelines for using Bayesian networks to support the planning and management of development programmes in the water sector and beyond. Centre for Ecology and Hydrology, Wallingford, UK. 136 pp
- Cain J, Batchelor C, Waughray D (1999) Belief networks: a framework for the participatory development of natural resource management strategies. *Environ Dev Sustain* 1:123–133
- Cain J, Jinapala K, Makin IW, Somaratha BR, Ariyaratna BR, Perera LR (2003) Participatory decision support for agricultural management. A case study from Sri Lanka. *Agr Syst* 76:457– 482
- Carmona, G, Varela-Ortega C., Bromley, J (2011). The Use of Participatory Object-Oriented Bayesian Networks and Agro-Economic Models for Groundwater Management in Spain. *Water Resour Manage* (2011) 25:1509–1524 DOI 10.1007/s11269-010-9757-y
- CHJ (2007) Estudio general sobre la Demarcación Hidrográfica del Júcar. Programa A.G.U.A.
- Dem.CHJ2009a Metodología y resultados de la estimación de demandas. Documento técnico de referencia para la redacción del Plan hidrológico de cuenca. Valencia.
- Espinoza, C. A., Segura, M\_2010\_ *Predicción a corto plazo de la demanda de agua urbana en áreas densamente pobladas*, Tesis Doctoral, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Valencia.
- ETI.CHJ2009a Esquema provisional de Temas Importantes en materia de gestión de las aguas en la DHJ. Valencia, 2009.

- Fowler, H. J., C. G. Kilsby, and P. E. O'Connell (2003), Modeling the impacts of climatic change and variability on the reliability, resilience, and vulnerability of a water resource system, *Water Resour. Res.*, 39(8), 1222, doi:10.1029/2002WR001778.
- Hashimoto, T., J. R. Stedinger, and D. P. Loucks (1982), Reliability, resiliency and vulnerability criteria for water resource system performance evaluation, *Water Resour. Res.*, 18(1), 14 – 20, doi:10.1029/WR018i001p00014.
- IIAMA Instituto de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente (2006), “Desarrollo y aplicación de metodologías y herramientas en la cuenca piloto del río Júcar para los análisis económicos requeridos en la Directiva Marco Europea del Agua”. Universidad Politécnica de Valencia y EPTISA, Servicios de Ingeniería S.A.
- Landscape Logic (2009), Technical Report No. 9: A beginners guide to Bayesian network modeling for integrated catchment management. Australian Government
- Loucks, D. P. (1997), Quantifying trends in system sustainability, *Hydrol.Sci. J.*, 42(4), 513– 530.
- Loucks, D. P. (2005), Concepts in Probability, Statistics and Stochastic Modelling. Water Resources Systems Planning And Management – ISBN 92-3-103998-9 – © UNESCO
- Lynam T, de Jong W, Sheil D, Kusumanto T, Evans K (2007), A review of tools for incorporating community knowledge, preferences, and values into decision making in natural resources management. *Ecol Soc* 12:5
- Molina JL, García-Aróstegui JL, Benavente JR, Varela-Ortega C, de la Hera A, López-Geta JA (2009) Aquifers overexploitation in SE Spain: a proposal for the integrated analysis of water management. *Water Resour Manag* 23(13):2737–2760.

- Molina JL, Farmani R, Bromley, J (2011), *Aquifers Management through Evolutionary Bayesian Networks: The Altiplano Case Study (SE Spain)*. *Water Resour Manage* DOI 10.1007/s11269-011-9893-z
- Ochoa, J.C. (2002): “Modelo Estocástico de redes neuronales para la síntesis de caudales aplicados a la gestión probabilística de sequías”. Tesis doctoral dirigida por: D. Joaquín Andreu Álvarez y D. Rafael García Bartual. Presentada en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos Canales y Puertos de la Universidad Politécnica de Valencia.
- Salas, J. D., Delleur, J. W., Yevjevich, V., and Lane, W. L. \_1980\_. *Applied modeling of hydrologic time series*, Water Resources Publications, Littleton, Colo.
- Salas, J. D., Markus, M., and Tokar, A. S. \_2000\_. “Streamflow forecasting based on artificial neural networks.” *Artificial neural networks in hydrology*, R. S. Govindaraju and A. Ramachandra Rao, eds., Kluwer Academic, Dordrecht, 23–51
- Sánchez, S. T., Andreu, J., and Solera, A. \_2001\_. *Gestión de recursos hídricos con decisiones basadas en estimación del riesgo*, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia España.
- UPV (2002): “*Modelo de análisis de series hidrológicas*”, MASHWIN. Manual de usuario. Departamento de Ingeniería hidráulica y medio ambiente, Universidad Politécnica de Valencia

## 9. ANEXOS

**TABLA DE CONTENIDO - ANEXOS**

<b>1. ANEXO A: ANÁLISIS PROBABILÍSTICO .....</b>	<b>2</b>
1.1. DATOS - ESCENARIO BASE – SERIE HISTÓRICA.....	3
1.2. DATOS - ESCENARIO BASE – 15 SERIES SINTÉTICAS.....	4
1.3. DATOS - ESCENARIO BASE – 30 SERIES SINTÉTICAS.....	5
1.4. DATOS - ESCENARIO MEDIDAS (TJV) – SERIE HISTÓRICA .....	6
1.5. DATOS - ESCENARIO MEDIDAS (TJV) – 30 SERIES SINTÉTICAS .....	7
1.6. GRÁFICAS - ESCENARIO BASE - SERIE HISTÓRICA (Muestra:60) .....	8
1.7. GRÁFICAS - ESCENARIO BASE – 15 SERIES SINTÉTICAS (Muestra: 900).....	12
1.8. GRÁFICAS - ESCENARIO BASE – 30 SERIES SINTÉTICAS (Muestra: 1860).....	16
1.9. GRÁFICAS - ESCENARIO MEDIDAS (TJV) – SERIE HISTÓRICA (Muestra: 60).....	20
1.10. GRÁFICAS - ESCENARIO MEDIDAS (TJV) – 30 SERIES SINTÉTICAS (Muestra: 1860).....	24
<b>2. ANEXO B: MODELO DE RED BAYESIANA PARA COMPARACIÓN DE ESCENARIOS Y EVALUACIÓN DE SATISFACCIÓN DE GARANTÍAS VOLUMÉTRICAS Y BENEFICIOS ECONÓMICOS RELACIONADOS .....</b>	<b>28</b>

## **1. ANEXO A: ANÁLISIS PROBABILÍSTICO**



REDES BAYESIANAS PARA EL ANÁLISIS INTEGRADO DE LA GESTIÓN DE SRH.  
 APLICACIÓN A LA CUENCA DEL RÍO JÚCAR

ANEXO A : ANÁLISIS PROBABILÍSTICO

1.2. DATOS - ESCENARIO BASE – 15 SERIES SINTÉTICAS

APO Alar Cont: (hm3/año)		
<500	Q1	0.24
<700	Q2	0.27
<1070	Q3	0.33
>1070	Q4	0.17
		1.00
<b>Muestra</b>	<b>900</b>	

Vo Alar Cont (hm3)					
<370	Q1	0.44	0.37	0.25	0.01
<600	Q2	0.36	0.32	0.33	0.13
<1105	Q3	0.20	0.31	0.37	0.53
>1105	Q4	0.00	0.00	0.06	0.33
		1.00	1.00	1.00	1.00
<b>Muestra</b>	<b>212</b>	<b>244</b>	<b>295</b>	<b>149</b>	

EXPERIENCE	APO Q1	APO Q1	APO Q1	APO Q1	APO Q2	APO Q2	APO Q2	APO Q2	APO Q3	APO Q3	APO Q3	APO Q3	APO Q4	APO Q4	APO Q4	APO Q4
	Vo Q1	Vo Q2	Vo Q3	Vo Q4	Vo Q1	Vo Q2	Vo Q3	Vo Q4	Vo Q1	Vo Q2	Vo Q3	Vo Q4	Vo Q1	Vo Q2	Vo Q3	Vo Q4
	93	77	42	0	91	77	75	1	73	96	108	18	1	20	79	49

MO BombeoAlba	No	0.63	0.83	0.93		0.60	0.86	0.92	1.00	0.73	0.90	0.97	1.00	0.00	0.95	1.00	1.00
MO BombeoAlba	Acep	0.22	0.14	0.07		0.27	0.13	0.04	0.00	0.16	0.09	0.02	0.00	1.00	0.05	0.00	0.00
MO BombeoAlba	Satis	0.15	0.03	0.00		0.12	0.01	0.04	0.00	0.11	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
MO Sustitucion	No	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
MO Sustitucion	Acep	0.00	0.00	0.00		0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
MO Sustitucion	Satis	1.00	1.00	1.00		1.00	0.99	1.00	1.00	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
MO Zona Albacete	No	0.80	0.64	0.64		0.87	0.64	0.44	0.00	0.82	0.56	0.31	0.00	1.00	0.60	0.20	0.00
MO Zona Albacete	Acep	0.13	0.14	0.12		0.05	0.16	0.13	0.00	0.11	0.13	0.10	0.00	0.00	0.25	0.18	0.02
MO Zona Albacete	Satis	0.08	0.22	0.24		0.08	0.21	0.43	1.00	0.07	0.31	0.59	1.00	0.00	0.15	0.62	0.98

A Az 4Publ	No	0.22	0.05	0.00		0.23	0.01	0.00	0.00	0.16	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
A Az 4Publ	Acep	0.44	0.27	0.02		0.45	0.27	0.01	0.00	0.42	0.22	0.00	0.00	1.00	0.36	0.00	0.00
A Az 4Publ	Satis	0.34	0.68	0.98		0.32	0.71	0.99	1.00	0.41	0.76	1.00	1.00	0.00	0.70	1.00	1.00
A Az AcReal	No	0.04	0.04	0.00		0.05	0.00	0.00	0.00	0.05	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
A Az AcReal	Acep	0.53	0.25	0.00		0.52	0.19	0.01	0.00	0.41	0.16	0.00	0.00	1.00	0.15	0.00	0.00
A Az AcReal	Satis	0.43	0.71	1.00		0.43	0.81	0.99	1.00	0.53	0.83	1.00	1.00	0.00	0.85	1.00	1.00
A Az Cull	No	0.20	0.04	0.00		0.21	0.01	0.00	0.00	0.12	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
A Az Cull	Acep	0.45	0.29	0.02		0.46	0.27	0.01	0.00	0.47	0.22	0.00	0.00	1.00	0.30	0.00	0.00
A Az Cull	Satis	0.34	0.68	0.98		0.33	0.71	0.99	1.00	0.41	0.76	1.00	1.00	0.00	0.70	1.00	1.00
A Az Sueca	No	0.23	0.04	0.00		0.23	0.00	0.00	0.00	0.16	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
A Az Sueca	Acep	0.43	0.34	0.02		0.47	0.30	0.01	0.00	0.44	0.24	0.00	0.00	1.00	0.35	0.00	0.00
A Az Sueca	Satis	0.34	0.62	0.98		0.30	0.70	0.99	1.00	0.40	0.74	1.00	1.00	0.00	0.65	1.00	1.00
A Ci 4Publ	No	0.46	0.18	0.00		0.44	0.14	0.00	0.00	0.32	0.11	0.00	0.00	1.00	0.05	0.00	0.00
A Ci 4Publ	Acep	0.16	0.22	0.07		0.25	0.19	0.04	0.00	0.32	0.19	0.03	0.00	0.00	0.30	0.05	0.00
A Ci 4Publ	Satis	0.38	0.60	0.93		0.31	0.66	0.96	1.00	0.37	0.70	0.97	1.00	0.00	0.65	0.95	1.00
A Ci-AcReal	No	0.28	0.10	0.00		0.23	0.04	0.00	0.00	0.21	0.09	0.00	0.00	1.00	0.05	0.00	0.00
A Ci-AcReal	Acep	0.28	0.22	0.07		0.37	0.23	0.04	0.00	0.36	0.11	0.00	0.00	0.00	0.30	0.04	0.00
A Ci-AcReal	Satis	0.44	0.68	0.93		0.40	0.73	0.96	1.00	0.44	0.79	1.00	1.00	0.00	0.65	0.96	1.00
A Ci CJT	No	0.66	0.39	0.07		0.64	0.29	0.03	0.00	0.62	0.25	0.01	0.00	1.00	0.40	0.04	0.00
A Ci CJT	Acep	0.16	0.16	0.02		0.20	0.17	0.01	0.00	0.18	0.19	0.03	0.00	0.00	0.05	0.03	0.00
A Ci CJT	Satis	0.18	0.45	0.90		0.16	0.55	0.96	1.00	0.21	0.56	0.96	1.00	0.00	0.55	0.94	1.00
A Ci Cull	No	0.46	0.19	0.00		0.44	0.14	0.00	0.00	0.36	0.11	0.00	0.00	1.00	0.10	0.00	0.00
A Ci Cull	Acep	0.16	0.23	0.07		0.25	0.21	0.04	0.00	0.26	0.17	0.02	0.00	0.00	0.25	0.04	0.00
A Ci Cull	Satis	0.38	0.57	0.93		0.31	0.65	0.96	1.00	0.38	0.72	0.98	1.00	0.00	0.65	0.96	1.00
A Ci Esc&Carc	No	0.30	0.09	0.00		0.23	0.04	0.00	0.00	0.21	0.09	0.00	0.00	1.00	0.05	0.00	0.00
A Ci Esc&Carc	Acep	0.28	0.25	0.05		0.37	0.21	0.01	0.00	0.33	0.09	0.00	0.00	0.00	0.30	0.04	0.00
A Ci Esc&Carc	Satis	0.42	0.66	0.95		0.40	0.75	0.99	1.00	0.47	0.81	1.00	1.00	0.00	0.65	0.96	1.00
A Ci Sueca	No	0.46	0.18	0.00		0.44	0.14	0.01	0.00	0.33	0.11	0.00	0.00	1.00	0.05	0.00	0.00
A Ci Sueca	Acep	0.16	0.25	0.07		0.25	0.19	0.03	0.00	0.30	0.19	0.03	0.00	0.00	0.30	0.05	0.00
A Ci Sueca	Satis	0.38	0.57	0.93		0.31	0.66	0.96	1.00	0.37	0.70	0.97	1.00	0.00	0.65	0.95	1.00

RC T1	No	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
RC T1	Acep	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
RC T1	Satis	1.00	1.00	1.00		1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
RJ T1Alar	No	0.29	0.06	0.07		0.23	0.05	0.08	0.00	0.14	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
RJ T1Alar	Acep	0.00	0.00	0.00		0.04	0.03	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
RJ T1Alar	Satis	0.71	0.94	0.93		0.73	0.92	0.92	1.00	0.85	0.97	0.98	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
RJ T3	No	0.02	0.00	0.00		0.02	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
RJ T3	Acep	0.01	0.01	0.00		0.02	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
RJ T3	Satis	0.97	0.99	1.00		0.96	1.00	1.00	1.00	0.96	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
RJ T5	No	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
RJ T5	Acep	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
RJ T5	Satis	1.00	1.00	1.00		1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
RJ T7	No	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
RJ T7	Acep	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
RJ T7	Satis	1.00	1.00	1.00		1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
RJ TOUS	No	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
RJ TOUS	Acep	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
RJ TOUS	Satis	1.00	1.00	1.00		1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

I CNCofr	No	0.03	0.01	0.00		0.02	0.01	0.00	0.00	0.03	0.01	0.00	0.00	0.00	0.05	0.00	0.00
I CNCofr	Acep	0.01	0.03	0.00		0.10	0.00	0.00	0.00	0.04	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
I CNCofr	Satis	0.96	0.96	1.00		0.88	0.99	1.00	1.00	0.93	0.98	1.00	1.00	1.00	0.95	1.00	1.00
I CHCofr	No	1.00															





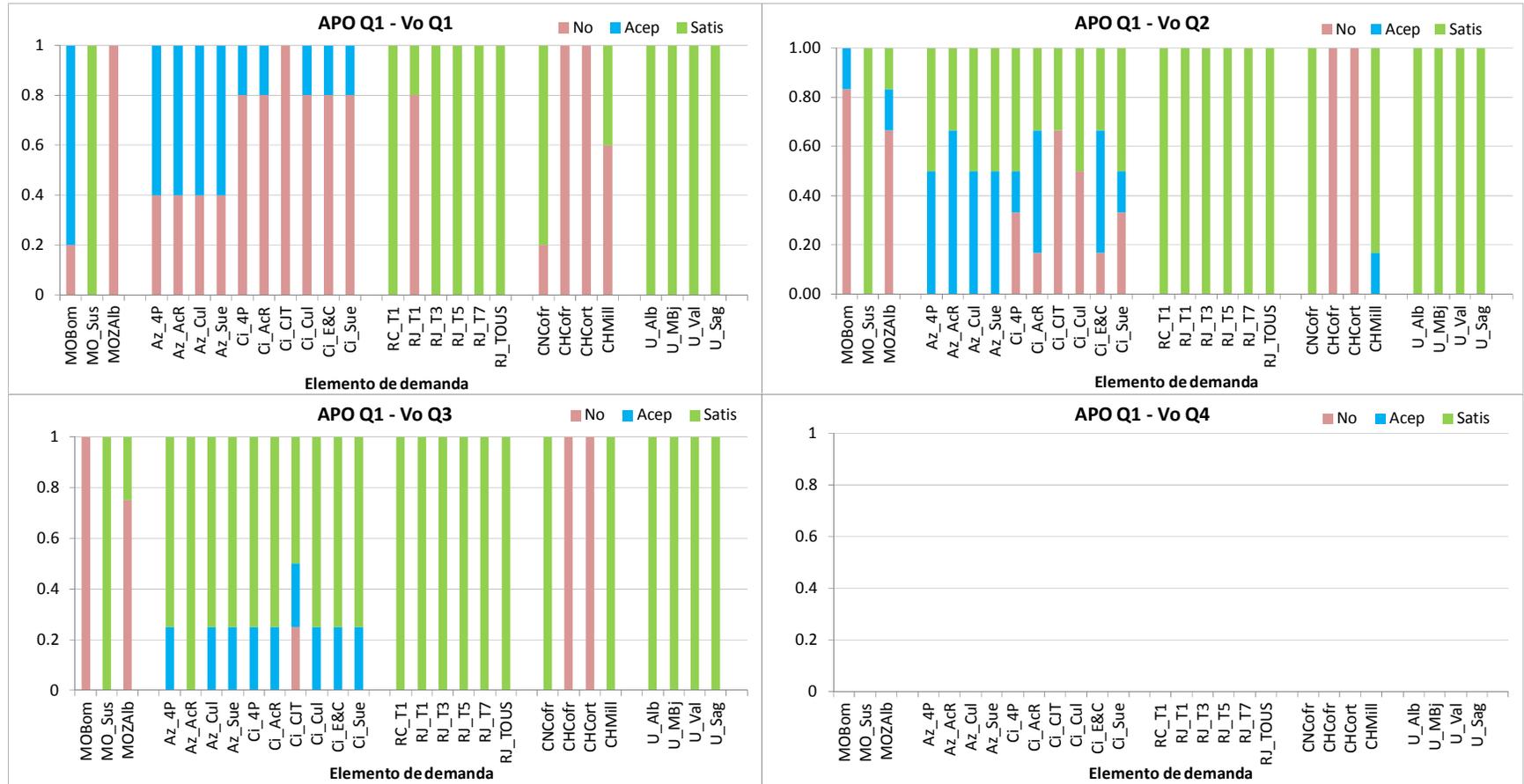


**ANEXO C : ANÁLISIS PROBABILÍSTICO**

**1.6. GRÁFICAS - ESCENARIO BASE - SERIE HISTÓRICA (Muestra:60)**

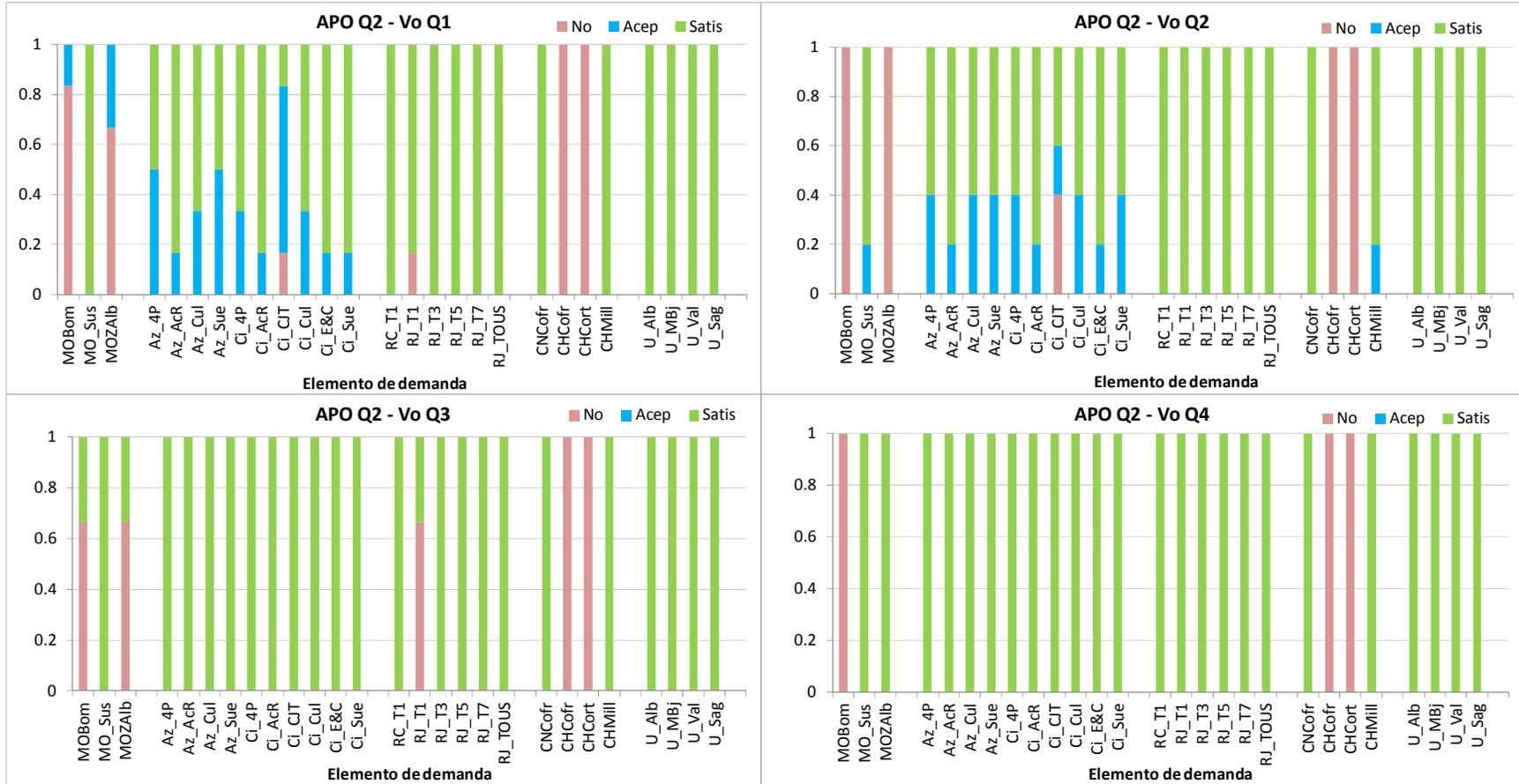
APO Q1	APO Q1	APO Q1	APO Q1	APO Q2	APO Q2	APO Q2	APO Q2	APO Q3	APO Q3	APO Q3	APO Q3	APO Q4	APO Q4	APO Q4	APO Q4
Vo Q1	Vo Q2	Vo Q3	Vo Q4	Vo Q1	Vo Q2	Vo Q3	Vo Q4	Vo Q1	Vo Q2	Vo Q3	Vo Q4	Vo Q1	Vo Q2	Vo Q3	Vo Q4
5	6	3	1	6	5	3	1	4	3	3	5	0	1	6	8

**EB-SH -Condición de Aportación anual muy baja en cabecera (<500 hm<sup>3</sup>/año) – Tamaño Muestra (15)**



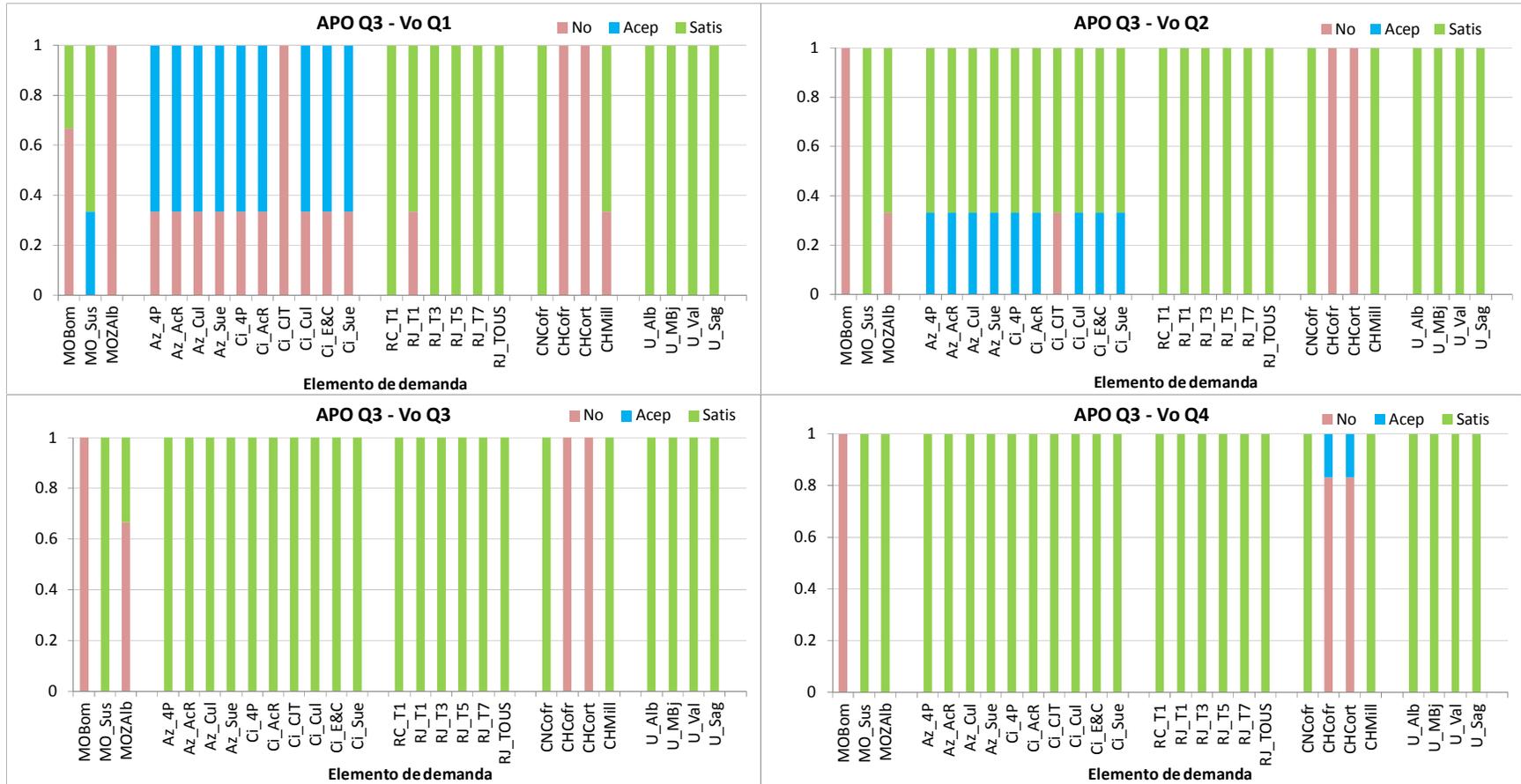
**ANEXO C : ANÁLISIS PROBABILÍSTICO**

**EB-SH Condición de Aportación anual baja en cabecera (<700hm<sup>3</sup>/año) – Tamaño Muestra (15)**



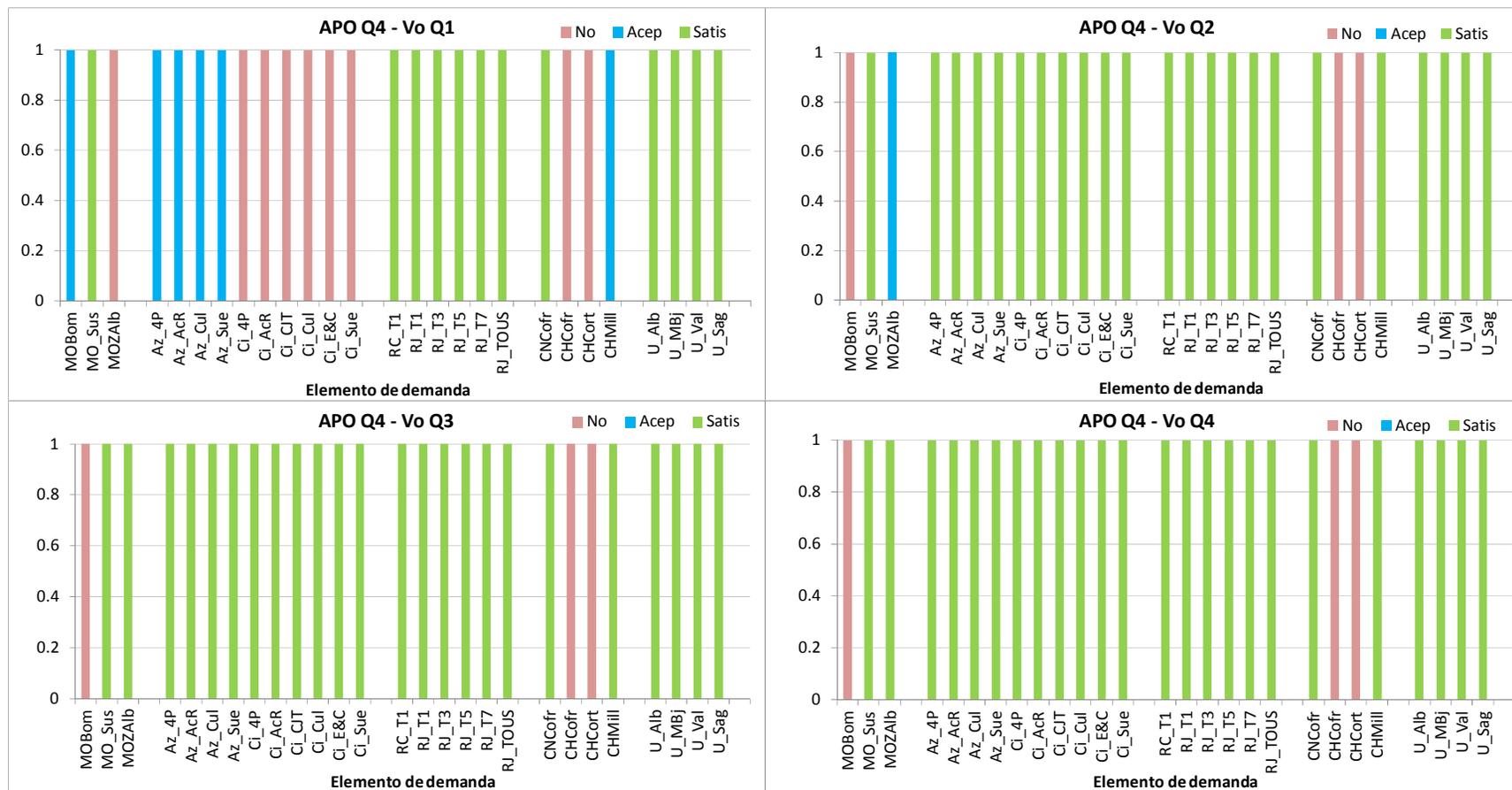
**ANEXO C : ANÁLISIS PROBABILÍSTICO**

**EB-SH Condición de Aportación anual media en cabecera (<1070 hm<sup>3</sup>/año) – Tamaño Muestra (15)**



**ANEXO C : ANÁLISIS PROBABILÍSTICO**

**EB-SH Condición de Aportación anual alta en cabecera (>1070 hm<sup>3</sup>/año) – Tamaño Muestra (15)**

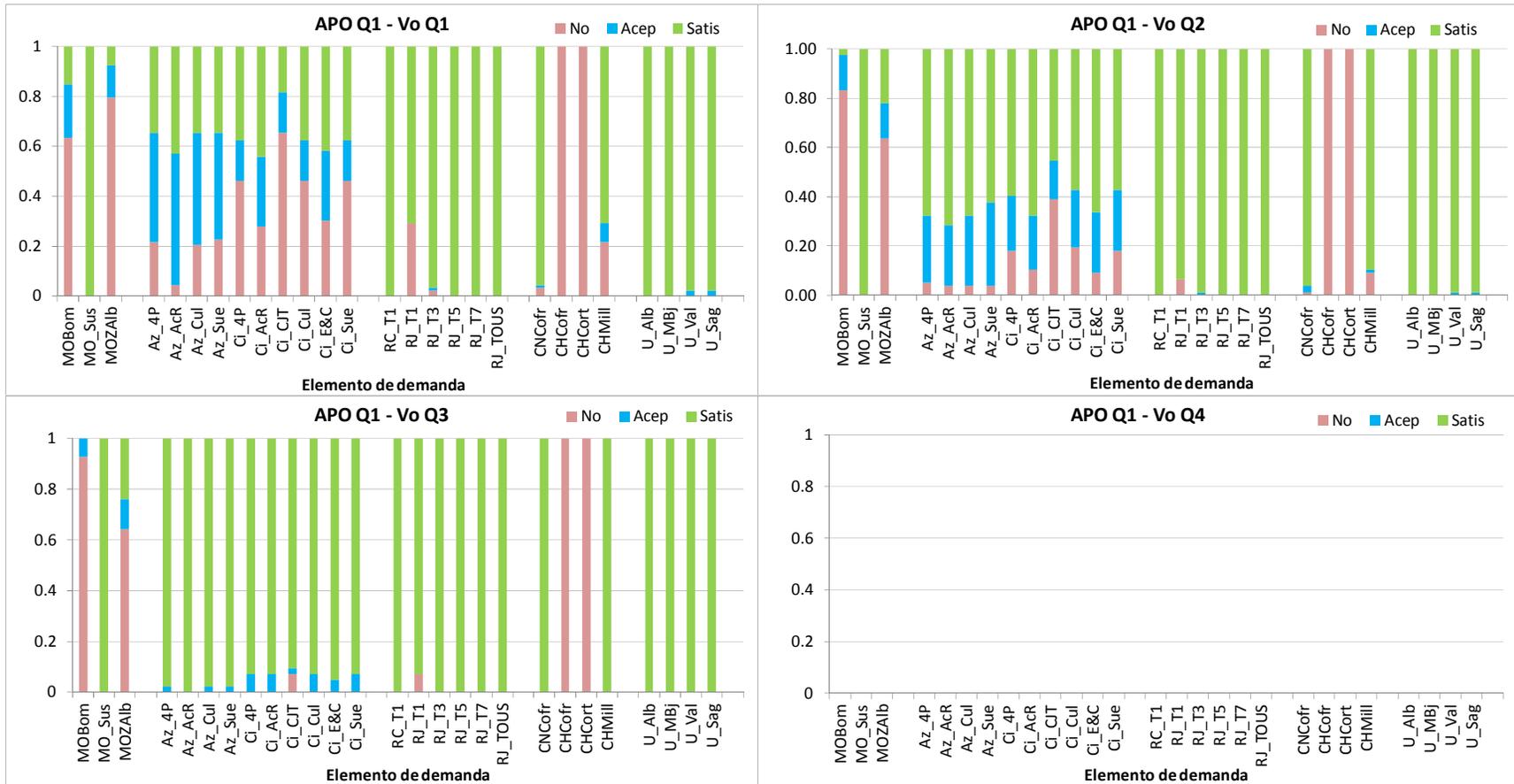


**ANEXO C : ANÁLISIS PROBABILÍSTICO**

**1.7. GRÁFICAS - ESCENARIO BASE – 15 SERIES SINTÉTICAS (Muestra: 900)**

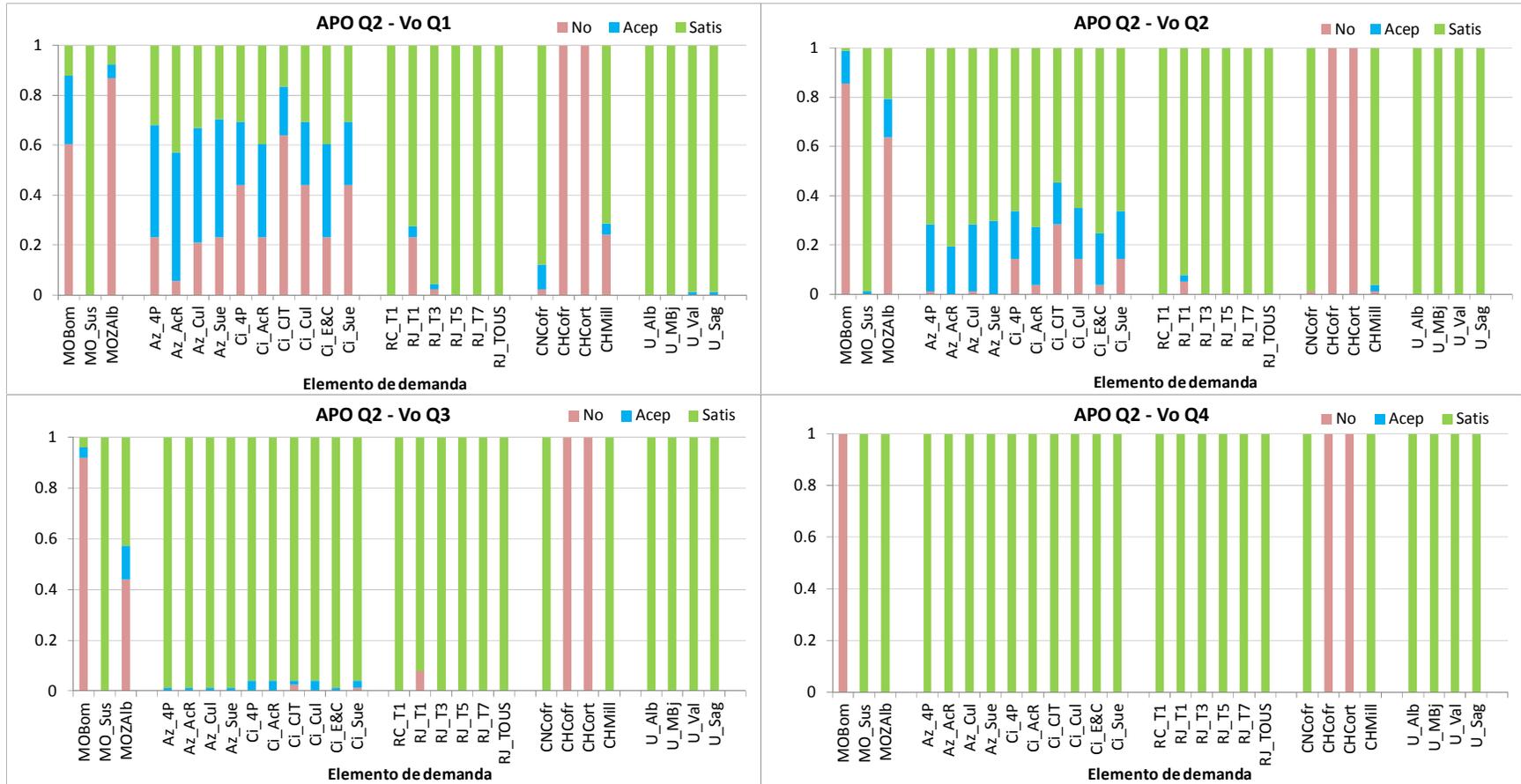
APO Q1	APO Q1	APO Q1	APO Q1	APO Q2	APO Q2	APO Q2	APO Q2	APO Q3	APO Q3	APO Q3	APO Q3	APO Q4	APO Q4	APO Q4	APO Q4
Vo Q1	Vo Q2	Vo Q3	Vo Q4	Vo Q1	Vo Q2	Vo Q3	Vo Q4	Vo Q1	Vo Q2	Vo Q3	Vo Q4	Vo Q1	Vo Q2	Vo Q3	Vo Q4
93	77	42	0	91	77	75	1	73	96	108	18	1	20	79	49

**EB-15SS Condición de Aportación anual muy baja en cabecera (<500hm<sup>3</sup>/año)– Tamaño Muestra(212)**



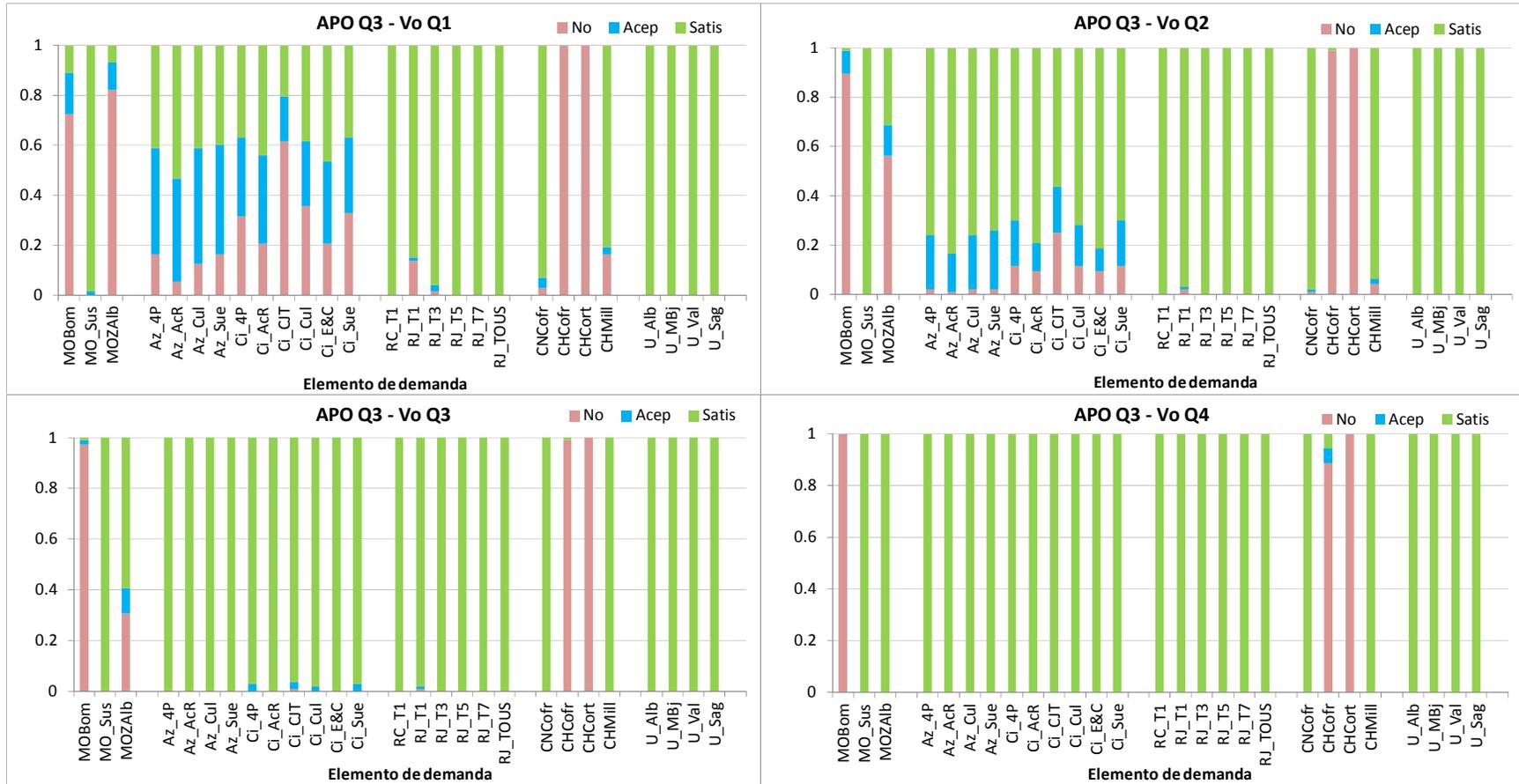
**ANEXO C : ANÁLISIS PROBABILÍSTICO**

**EB-15SS Condición de Aportación anual baja en cabecera (<700 hm<sup>3</sup>/año) – Tamaño Muestra (244)**



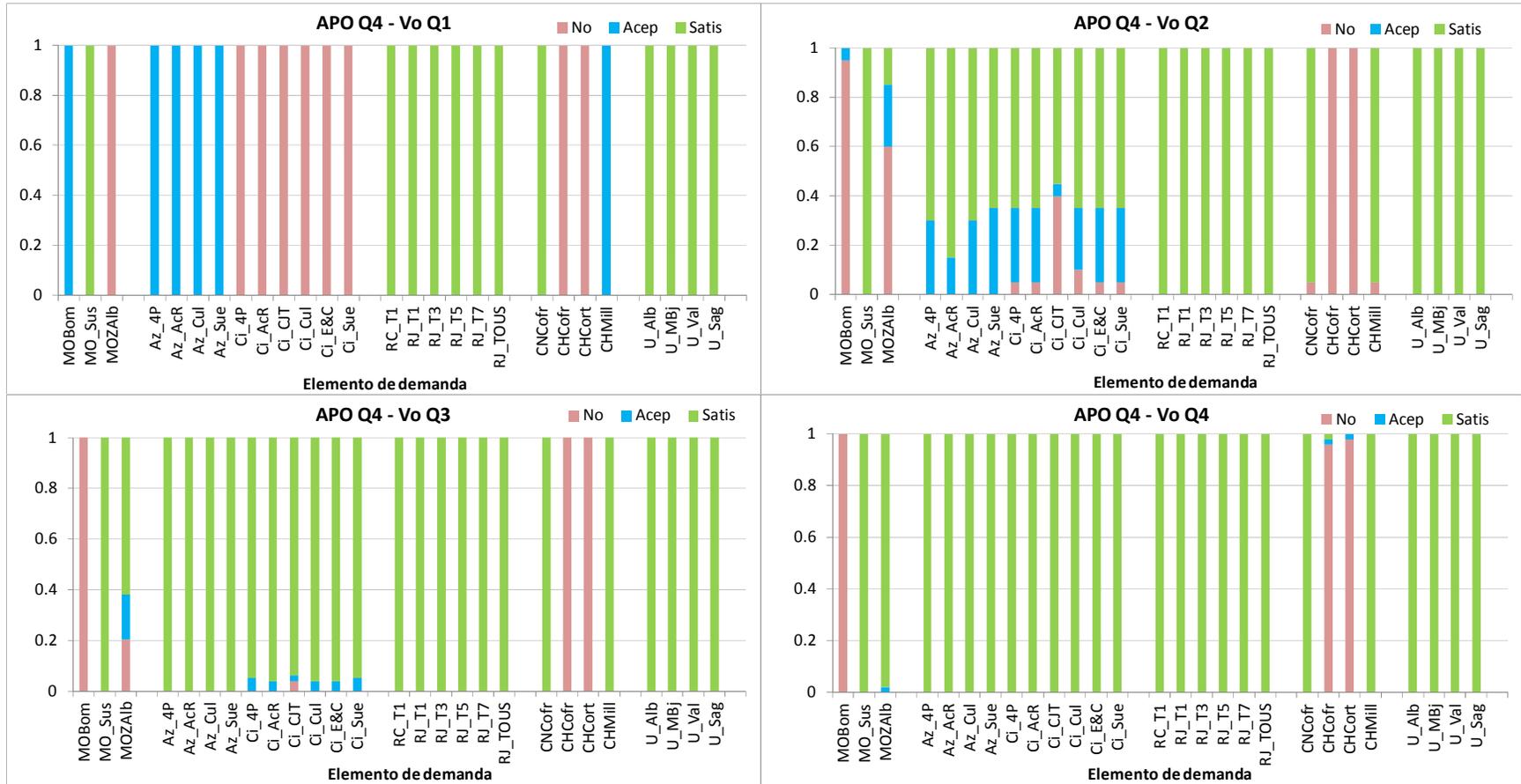
**ANEXO C : ANÁLISIS PROBABILÍSTICO**

**EB-15SS Condición de Aportación anual media en cabecera (<1070 hm<sup>3</sup>/año) – Tamaño Muestra (295)**



**ANEXO C : ANÁLISIS PROBABILÍSTICO**

**EB-15SS Condición de Aportación anual alta en cabecera (>1070 hm<sup>3</sup>/año) – Tamaño Muestra (149)**

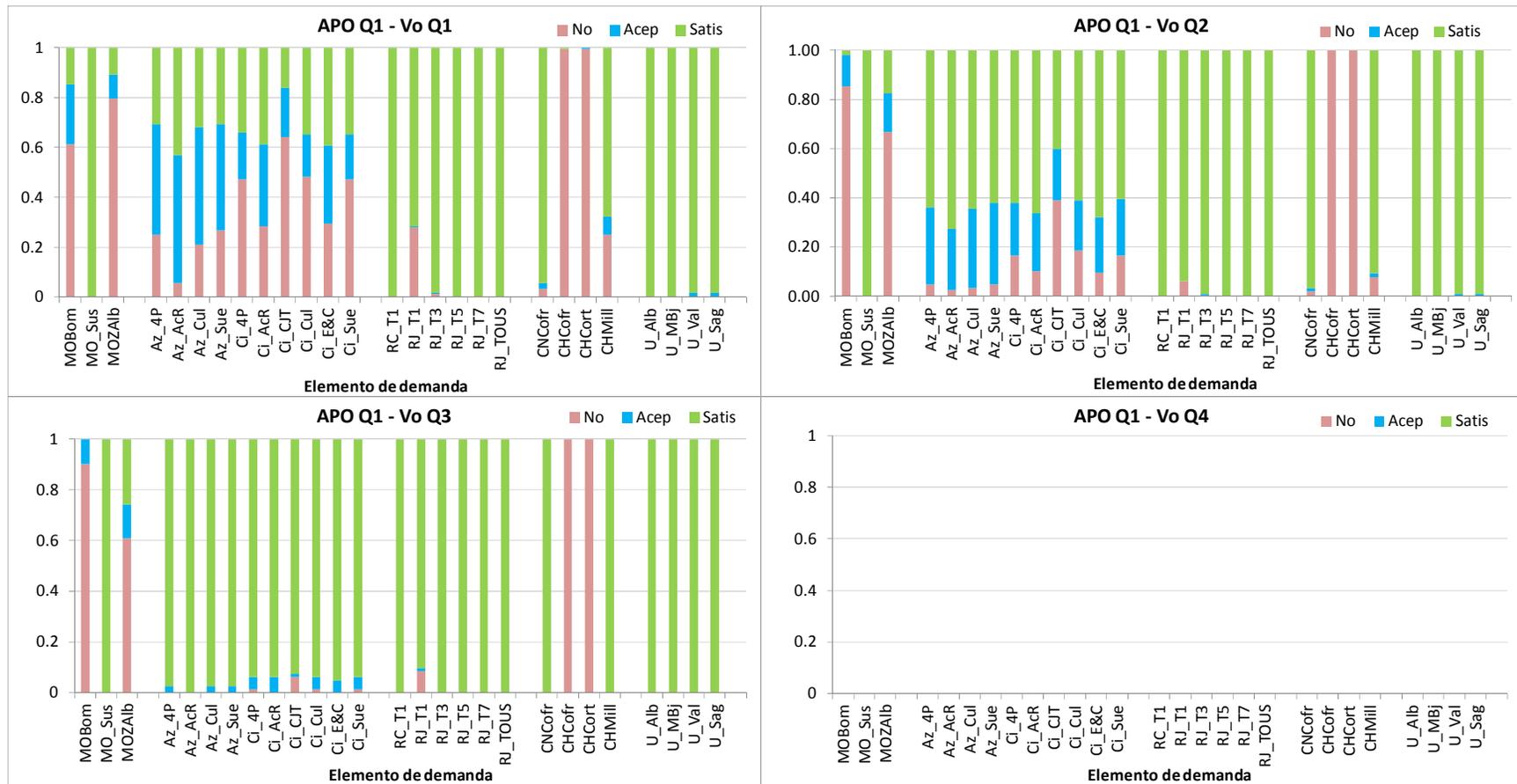


ANEXO C : ANÁLISIS PROBABILÍSTICO

1.8. GRÁFICAS - ESCENARIO BASE – 30 SERIES SINTÉTICAS (Muestra: 1860)

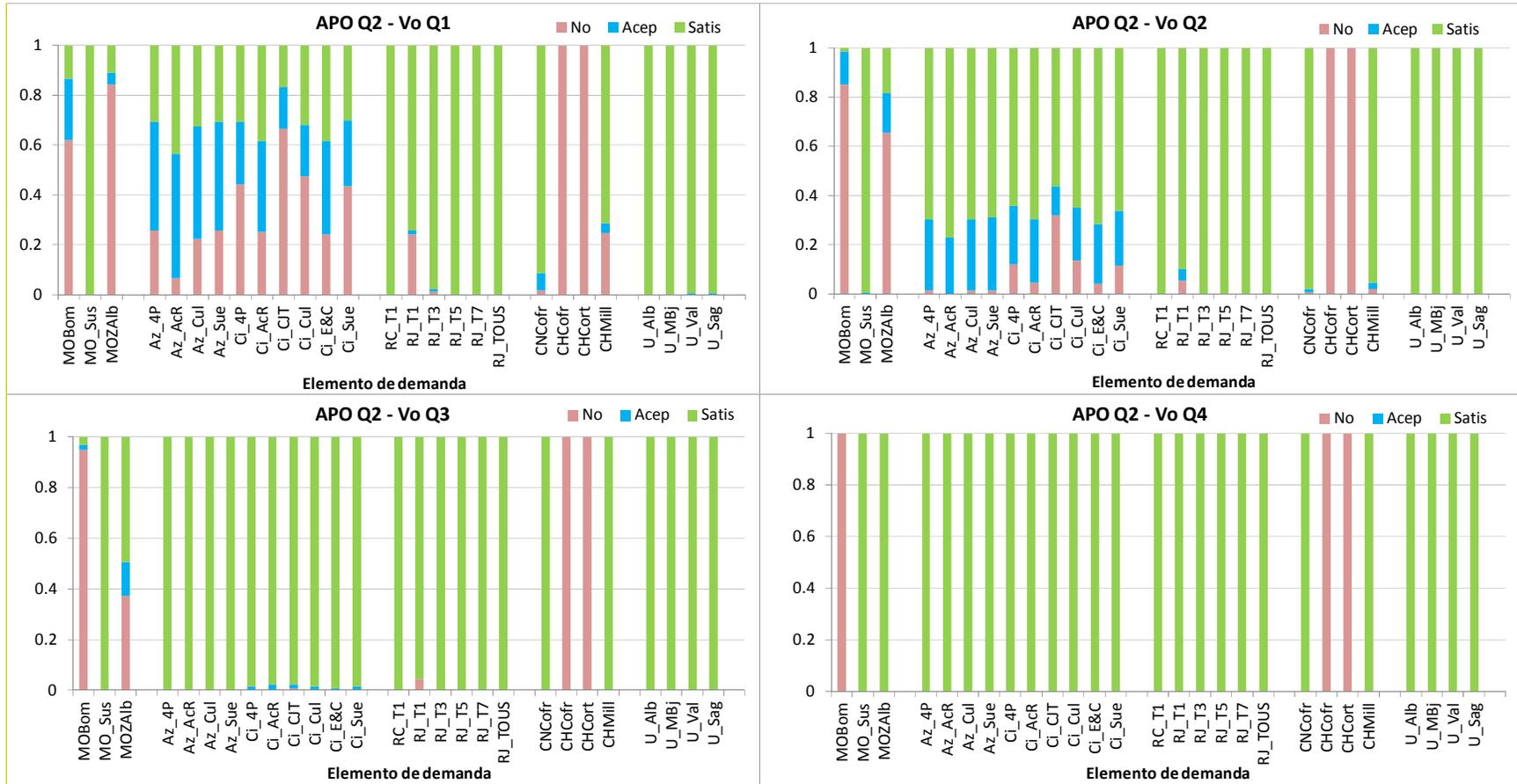
APO Q1	APO Q1	APO Q1	APO Q1	APO Q2	APO Q2	APO Q2	APO Q2	APO Q3	APO Q3	APO Q3	APO Q3	APO Q4	APO Q4	APO Q4	APO Q4
Vo Q1	Vo Q2	Vo Q3	Vo Q4	Vo Q1	Vo Q2	Vo Q3	Vo Q4	Vo Q1	Vo Q2	Vo Q3	Vo Q4	Vo Q1	Vo Q2	Vo Q3	Vo Q4
176	205	82	0	179	148	134	1	140	195	227	29	6	53	174	111

EB-30SS Condición de Aportación anual muy baja en cabecera (<500hm<sup>3</sup>/año)– Tamaño Muestra(463)



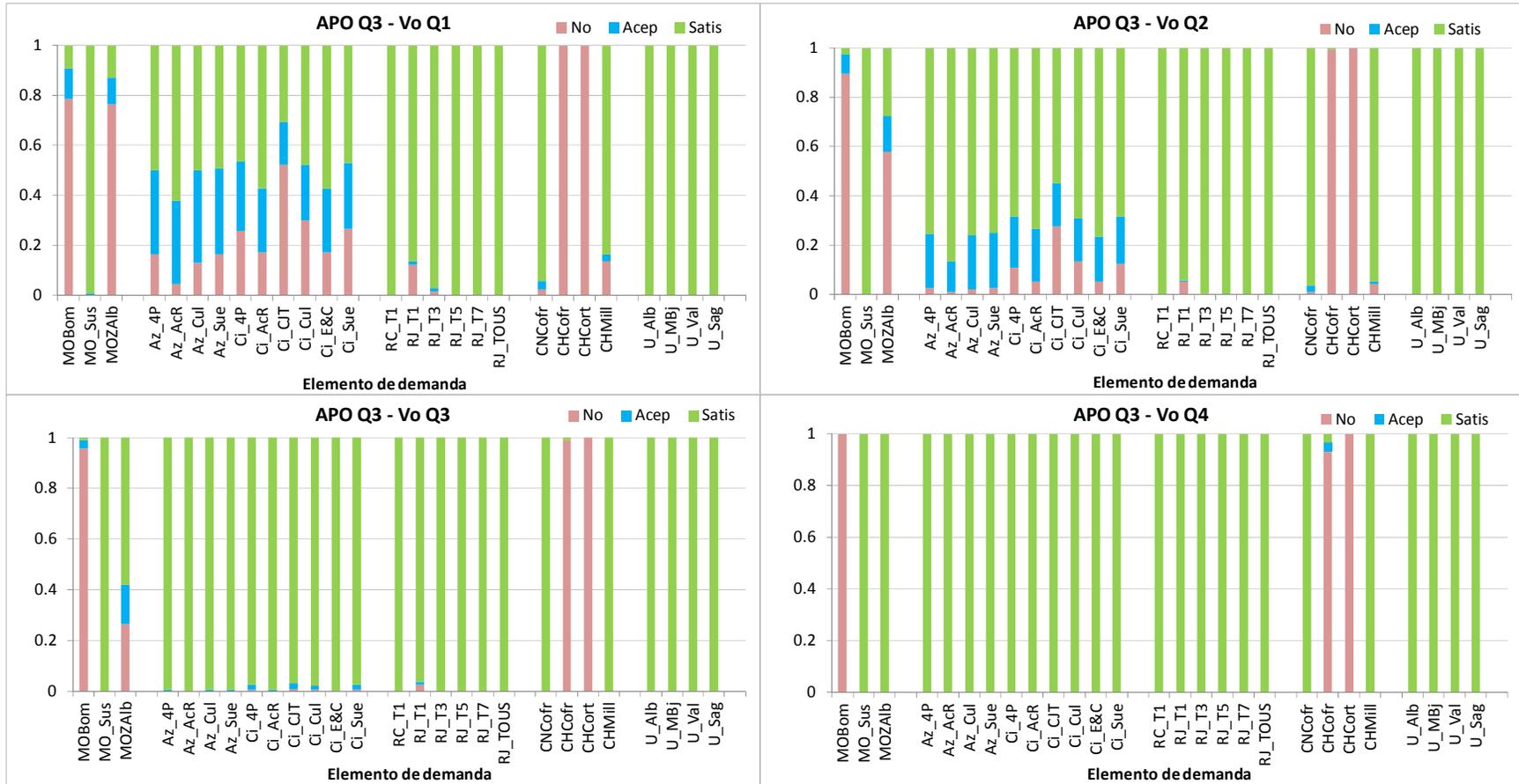
**ANEXO C : ANÁLISIS PROBABILÍSTICO**

**EB-30SS Condición de Aportación anual baja en cabecera (<700 hm<sup>3</sup>/año) – Tamaño Muestra (462)**



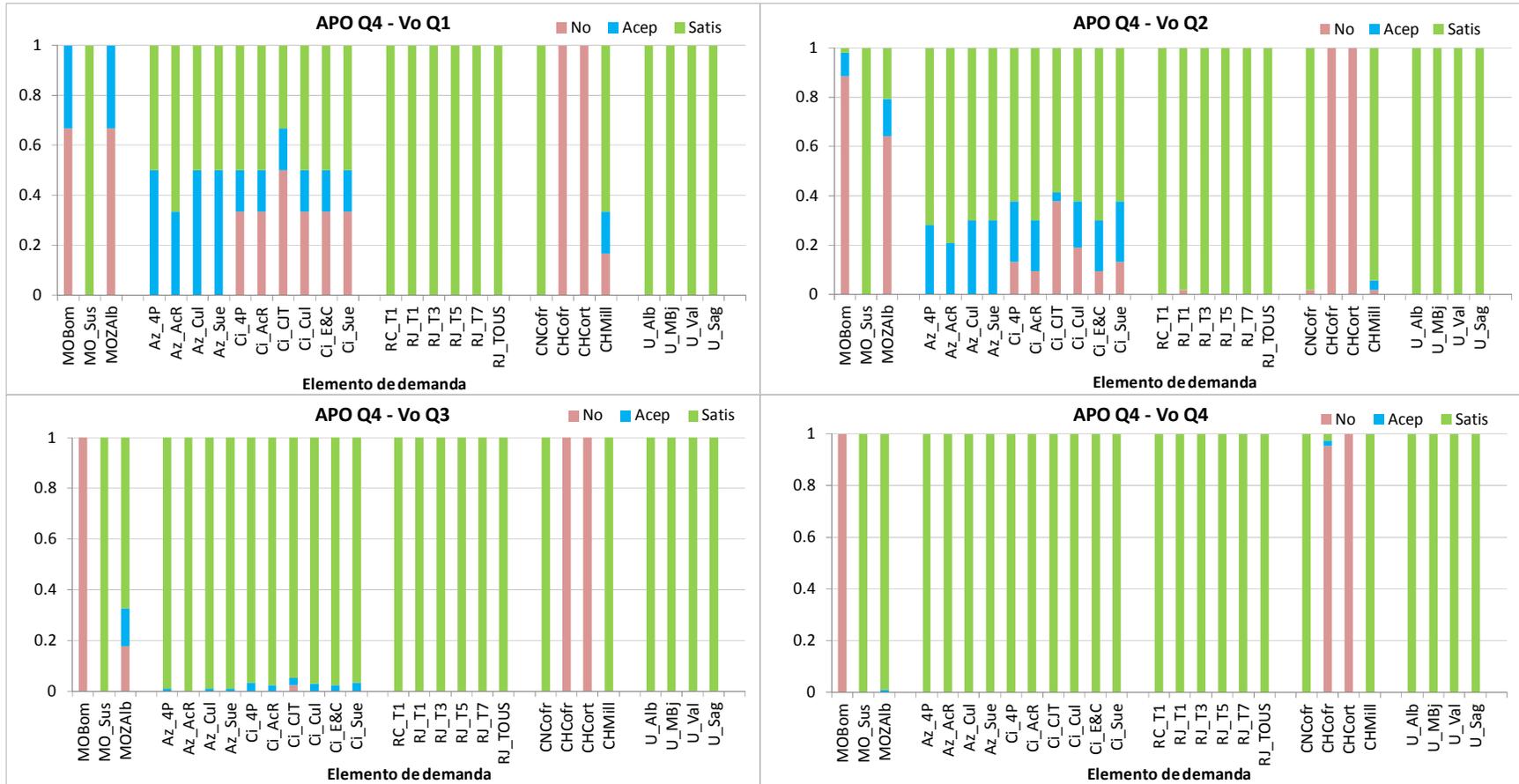
**ANEXO C : ANÁLISIS PROBABILÍSTICO**

**EB-30SS Condición de Aportación anual media en cabecera (<1070 hm<sup>3</sup>/año) – Tamaño Muestra (591)**



**ANEXO C : ANÁLISIS PROBABILÍSTICO**

**EB-30SS Condición de Aportación anual alta en cabecera (>1070 hm<sup>3</sup>/año) – Tamaño Muestra (344)**

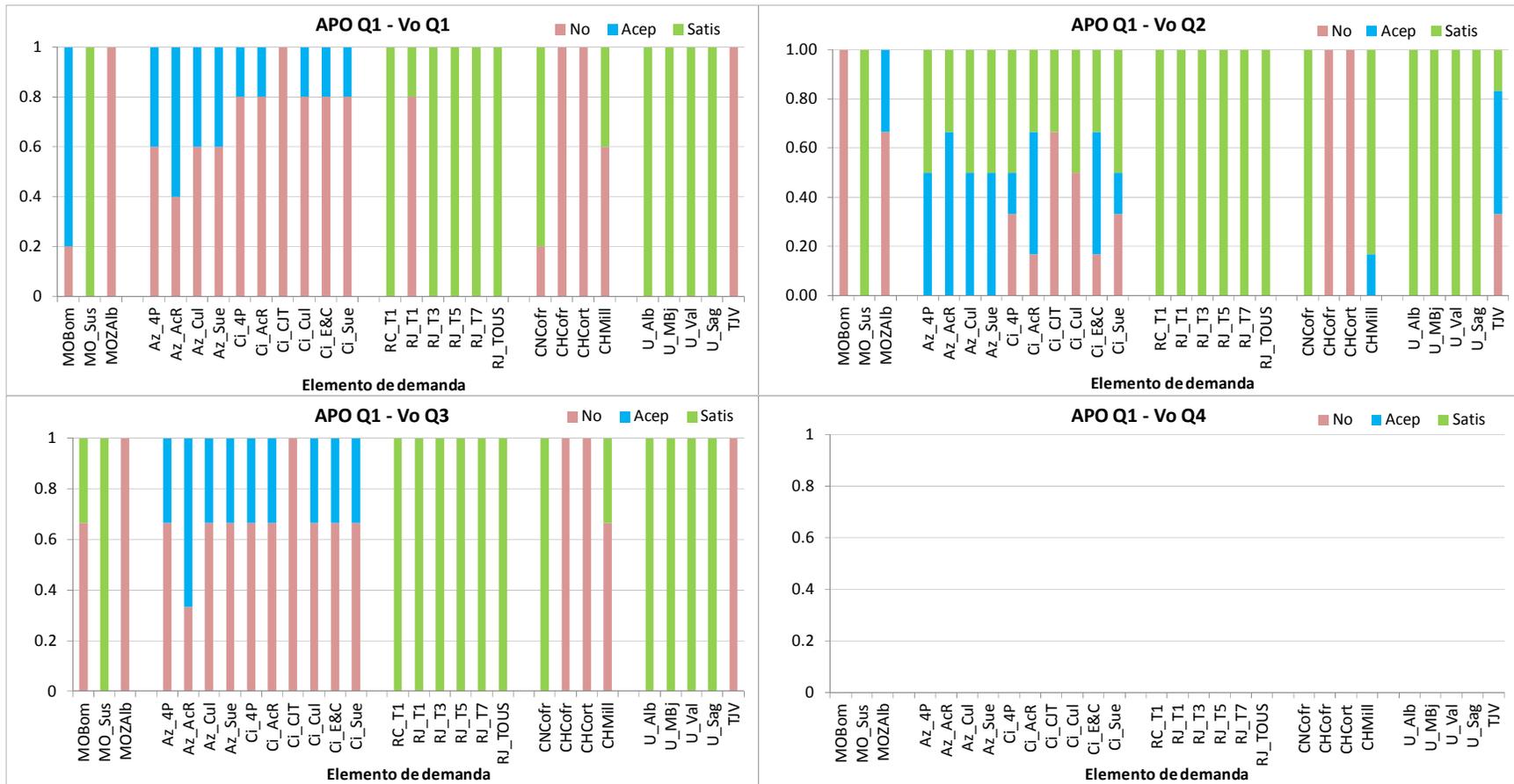


ANEXO C : ANÁLISIS PROBABILÍSTICO

1.9. GRÁFICAS - ESCENARIO MEDIDAS (TJV) – SERIE HISTÓRICA (Muestra: 60)

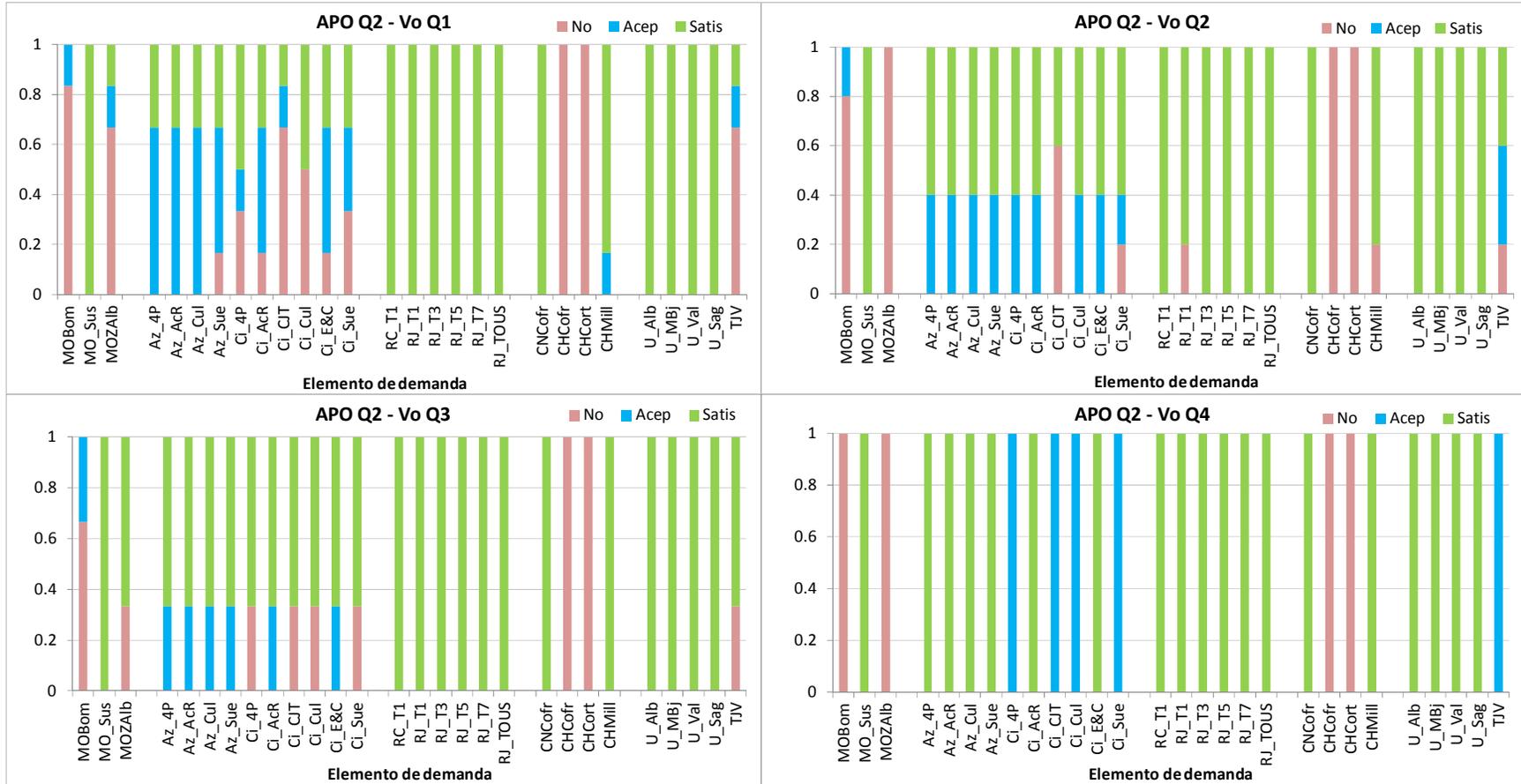
APO Q1	APO Q1	APO Q1	APO Q1	APO Q2	APO Q2	APO Q2	APO Q2	APO Q3	APO Q3	APO Q3	APO Q3	APO Q4	APO Q4	APO Q4	APO Q4
Vo Q1	Vo Q2	Vo Q3	Vo Q4	Vo Q1	Vo Q2	Vo Q3	Vo Q4	Vo Q1	Vo Q2	Vo Q3	Vo Q4	Vo Q1	Vo Q2	Vo Q3	Vo Q4
5	6	3	1	6	5	3	1	4	3	3	5	0	1	6	8

ETJV-SH Condición de Aportación anual muy baja en cabecera (<500hm<sup>3</sup>/año) – Tamaño Muestra (15)



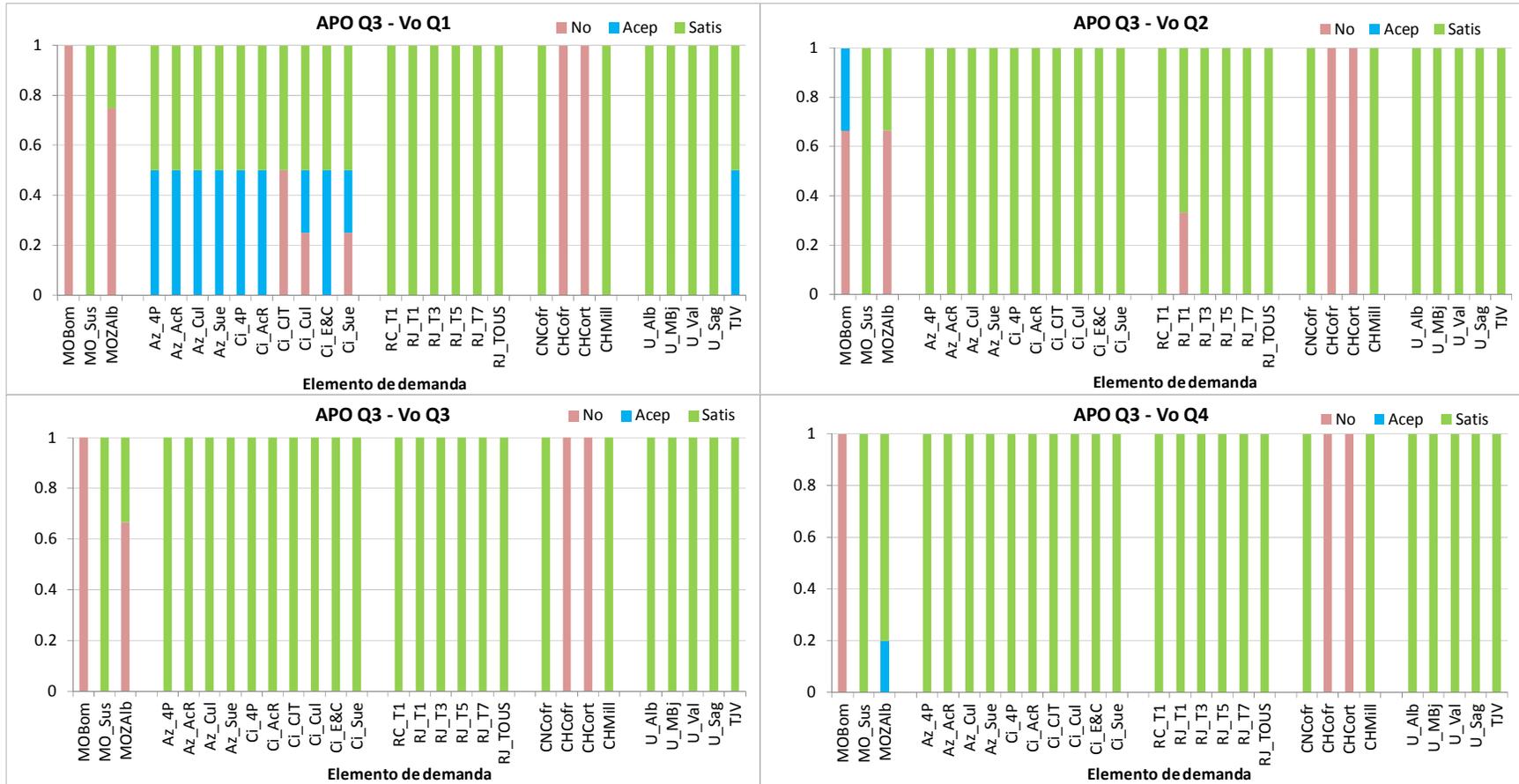
**ANEXO C : ANÁLISIS PROBABILÍSTICO**

**ETJV-SH Condición de Aportación anual baja en cabecera (<700 hm<sup>3</sup>/año) – Tamaño Muestra (15)**



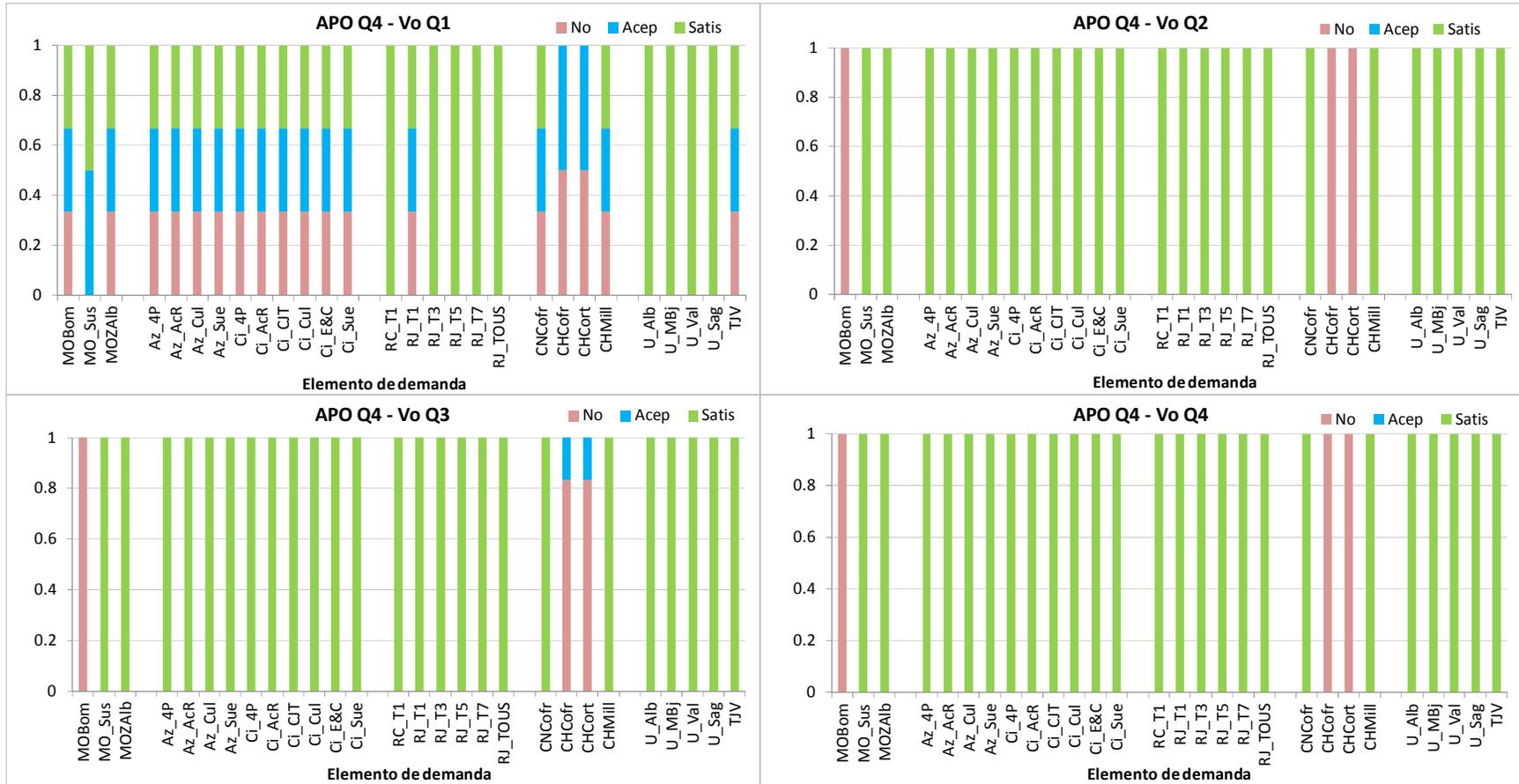
**ANEXO C : ANÁLISIS PROBABILÍSTICO**

**ETJV-SH Condición de Aportación anual media en cabecera (<1070 hm<sup>3</sup>/año) – Tamaño Muestra (15)**



**ANEXO C : ANÁLISIS PROBABILÍSTICO**

**ETJV-SH Condición de Aportación anual alta en cabecera (>1070 hm<sup>3</sup>/año) – Tamaño Muestra (15)**

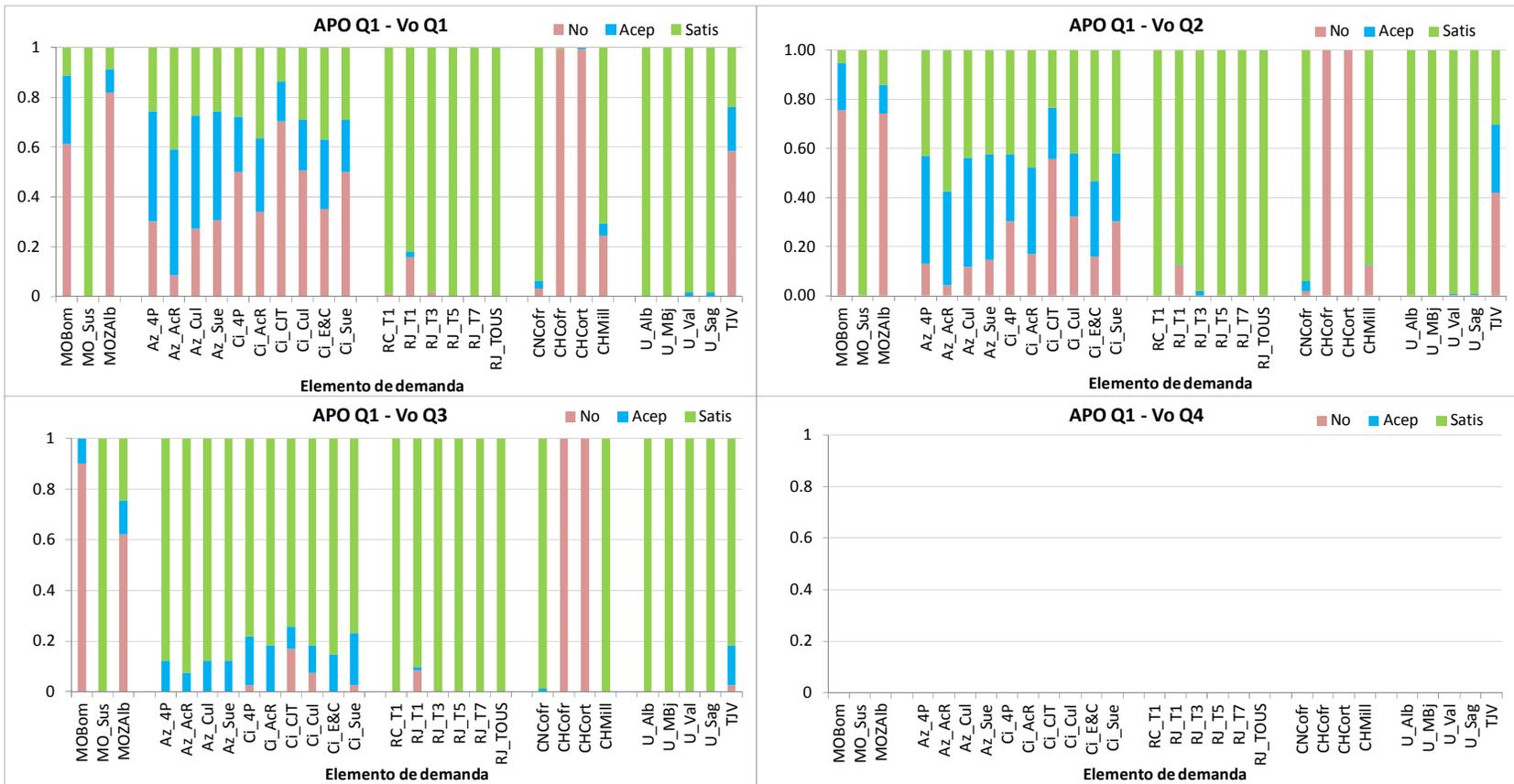


ANEXO C : ANÁLISIS PROBABILÍSTICO

1.10. GRÁFICAS - ESCENARIO MEDIDAS (TJV) – 30 SERIES SINTÉTICAS (Muestra: 1860)

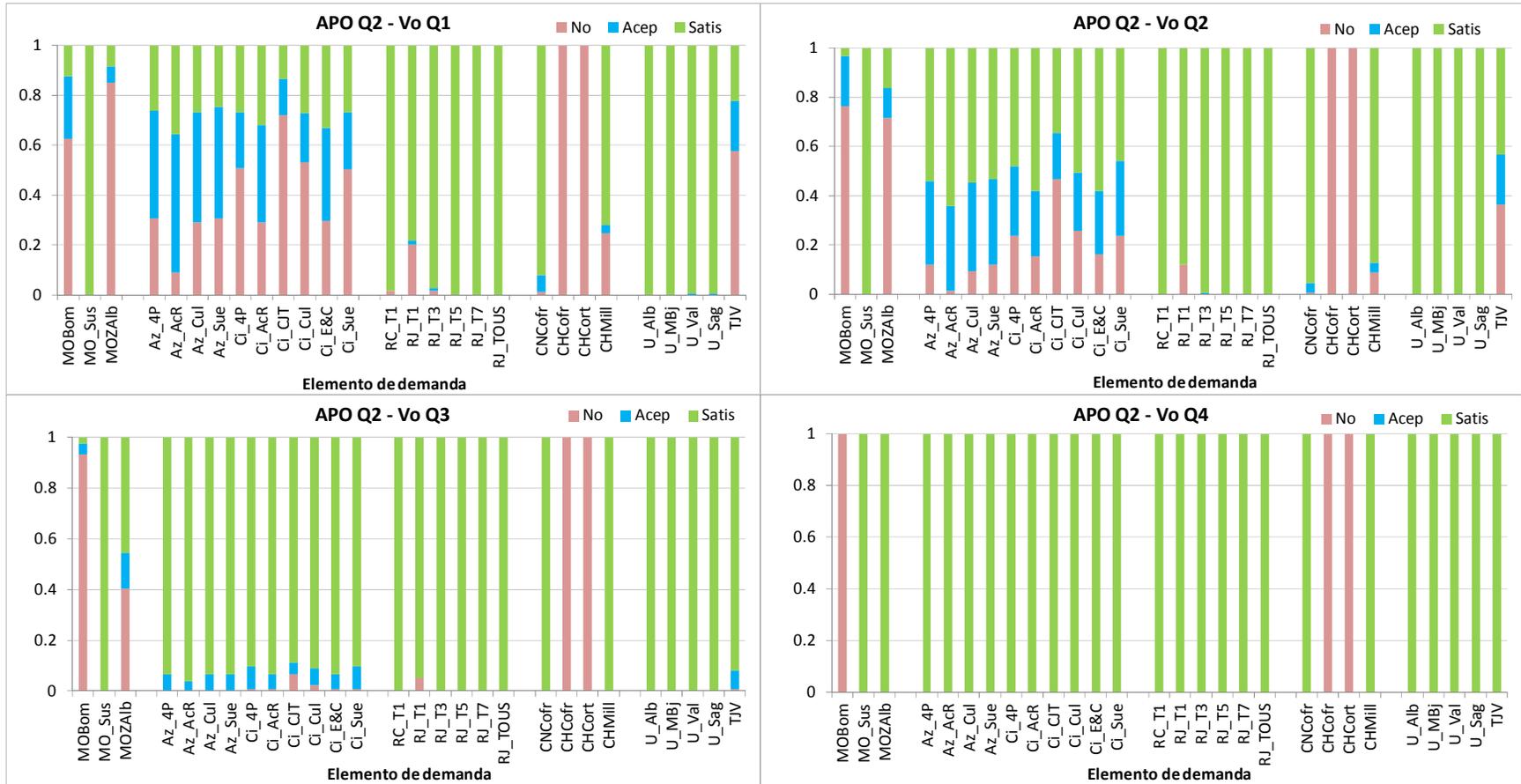
APO Q1	APO Q1	APO Q1	APO Q1	APO Q2	APO Q2	APO Q2	APO Q2	APO Q3	APO Q3	APO Q3	APO Q3	APO Q4	APO Q4	APO Q4	APO Q4
Vo Q1	Vo Q2	Vo Q3	Vo Q4	Vo Q1	Vo Q2	Vo Q3	Vo Q4	Vo Q1	Vo Q2	Vo Q3	Vo Q4	Vo Q1	Vo Q2	Vo Q3	Vo Q4
176	205	82	0	179	148	134	1	140	195	227	29	6	53	174	111

ETJV-30SS Condición de Aportación anual muy baja en cabecera (<500hm<sup>3</sup>/año)– Tamaño Muestra(463)



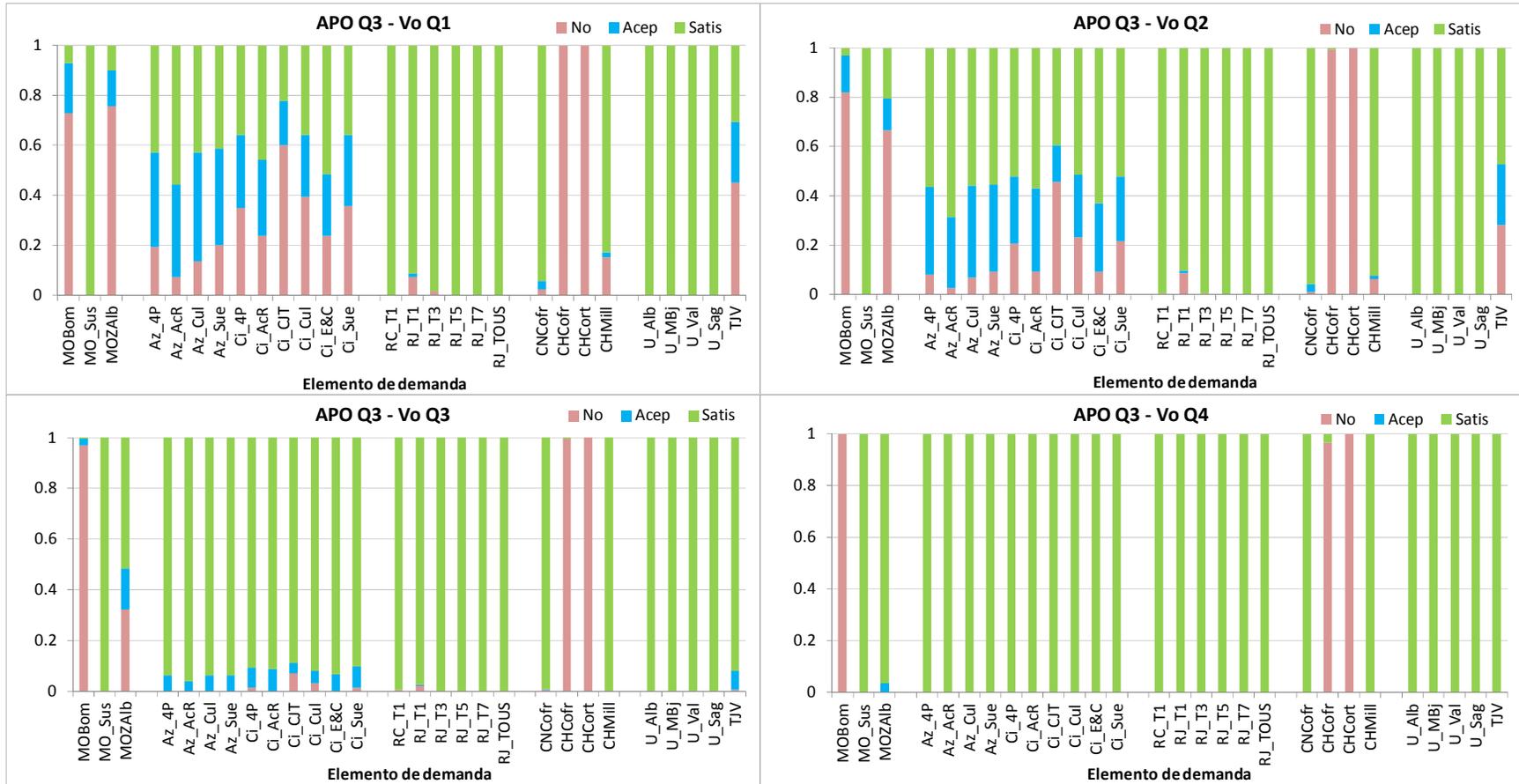
**ANEXO C : ANÁLISIS PROBABILÍSTICO**

**ETJV-30SS Condición de Aportación anual baja en cabecera (<700 hm<sup>3</sup>/año) – Tamaño Muestra (462)**



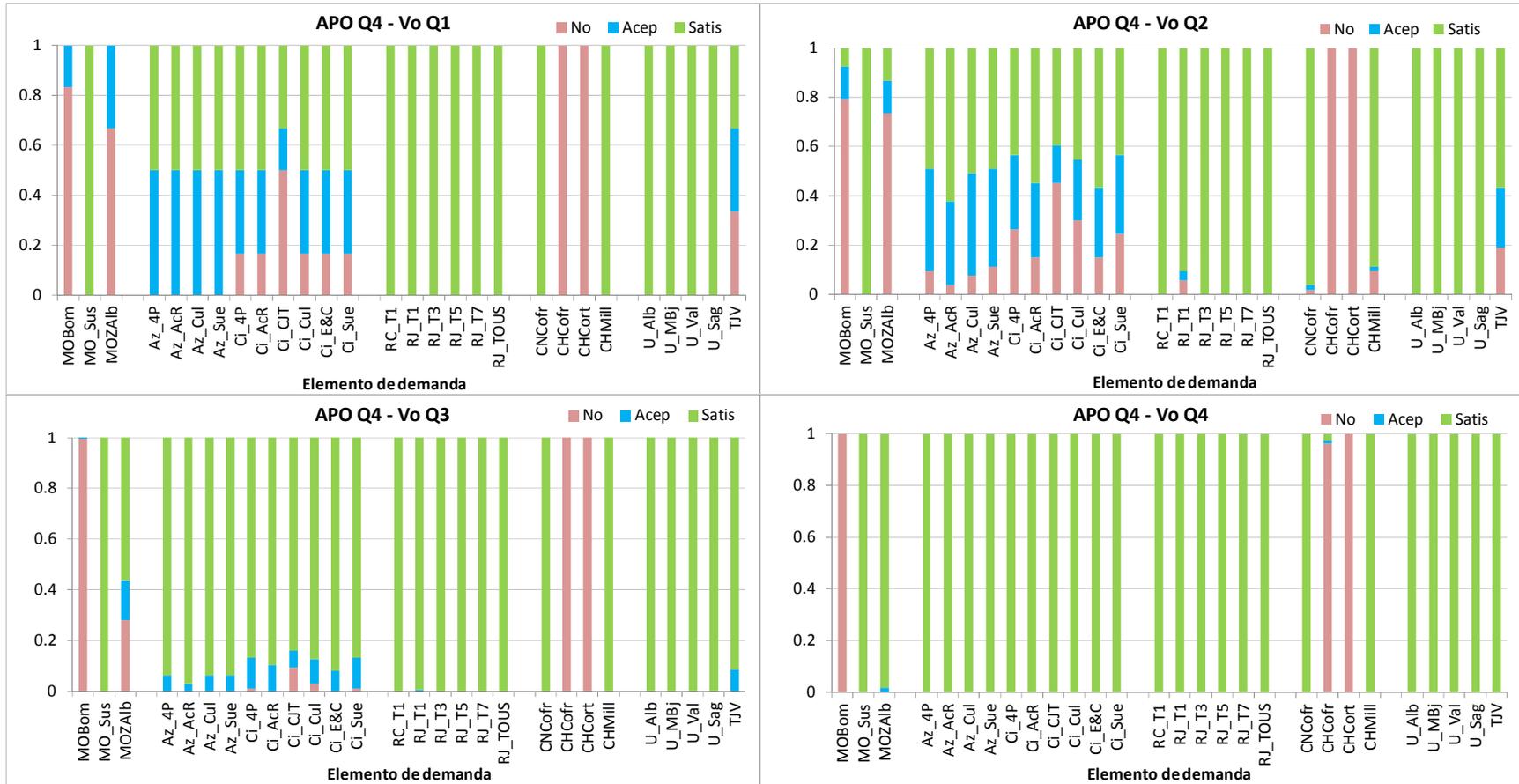
**ANEXO C : ANÁLISIS PROBABILÍSTICO**

**ETJV-30SS Condición de Aportación anual media en cabecera (<1070 hm<sup>3</sup>/año) – Tamaño Muestra (591)**



**ANEXO C : ANÁLISIS PROBABILÍSTICO**

**ETJV-30SS Condición de Aportación anual alta en cabecera (>1070 hm<sup>3</sup>/año) – Tamaño Muestra (344)**



**2. ANEXO B: MODELO DE RED BAYESIANA PARA COMPARACIÓN DE ESCENARIOS Y EVALUACIÓN DE SATISFACCIÓN DE GARANTÍAS VOLUMÉTRICAS Y BENEFICIOS ECONÓMICOS RELACIONADOS**



ANEXO B : DISEÑO DE RED BAYESIANA

