



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA

**Programa de Doctorado en Ingeniería del  
Agua y Medioambiental**

---

**Diseño de esquema de seguros agrícolas  
para mitigación del riesgo de sequías  
hidrológicas mediante modelos  
hidroeconómicos a escala de cuenca**

---

**Tesis Doctoral**

**Miguel Angel Valenzuela Mahecha**

Autor

**Prof. Dr. Manuel Pulido Velázquez**

**Dr. Héctor Macian Sorribes**

Directores

**Valencia, Mayo de 2023**

*Por ustedes y para ustedes:*

*“Diego, María Isabel, José Gonzalo, Luz Mery”*

# AGRADECIMIENTOS

Inicialmente agradecer a la Universidad Nacional de Colombia por haberme dado la oportunidad de asistir a Valencia a adelantar mis estudios y apoyarme en todo momento. Gracias al Ministerio de Ciencia y Tecnología de Colombia.

A mis directores. Manuel muchas gracias por todo el apoyo, colaboración y orientación, en mi estadía en la UPV he aprendido mucho y es un honor haber trabajado con usted por todo lo que representa en el campo de la gestión de los recursos hídricos. Héctor muchas gracias por ser las acertadas orientaciones para que la investigación fuera de mejor calidad y felicitaciones por el presente y el futuro profesional que tiene por delante.

A mis amigos y compañeros de oficina y estudio, Adrià, Sarita, Diana, Joffre y en especial a Eva, Najib, Iván y Jesús por compartir su amistad y hacer más agradable mi estancia en Valencia. A todo el grupo del máster de Ingeniería Hidráulica porque me hicieron pasar muy buenos y alegres momentos, llevo amigos de toda Latinoamérica que sé que siempre se va a mantener esa amistad. Adicional a Noe y Fabi, gracias por estar pendientes de mí en momentos que lo necesitaba, y un amigo que me deja Valencia para la vida, Bryan "Esperanzo", gracias por estar conmigo sobre todo este último año, por brindarme esa amistad que fue un soporte importante.

A mi mamá María Isabel y mi papá José Gonzalo les debo todo en la vida y solo tengo palabras para agradecerles lo que han hecho por mí, lo que soy es gracias a ustedes dos. Los quiero mucho.

A mi hermana y mi hermano que siempre me han apoyado y han estado ahí para lo que he necesitado. Sobrinos, sobrinas, primos (en especial Javi), primas, cuñada, cuñados, mis tías y mis tíos, todos por ser una familia tan bonita.

A Dieguito "Dídac" mi hijo hermoso que me cambió la vida desde que nació y me da una motivación para seguir siempre adelante, espero ser siempre un ejemplo para ti.

Mi tía Mery, eres el mejor ejemplo por seguir, eres esa palabra precisa en el momento necesario. Parte de lo que soy te lo debo a ti y gracias por estar a mi lado todo este tiempo.

A mis amigos del alma, Eduardo, Daniel Esteban, Danny, han sido un soporte muy importante, esa compañía a la distancia, gracias por apoyarme en todo momento, siempre estaré también para lo que ustedes necesiten.

Martha siempre quise que estuvieras orgulloso de mi y gracias por todo el amor que me diste.

Mis compañeros profesores del programa de Ingeniería Agrícola de la Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá. Gracias por su apoyo.

A todas las personas que de una u otra forma han estado apoyándome en esta experiencia y sobre todo a Dios, la virgen y el niño Jesús.....

## RESUMEN

La escasez de agua es un problema cada vez más recurrente para la agricultura de regadío en las regiones mediterráneas, siendo la sequía hidrológica uno de los problemas que afecta la disponibilidad de agua. Por lo tanto, es necesario establecer alternativas técnicas y económico-financieras que permitan a los regantes enfrentar este problema desde una visión amplia de la gestión del agua para uso agrícola a nivel de cuenca. Estas alternativas deben incluir instrumentos de planificación hidrológica, que permitan analizar el impacto de la sequía y determinar las medidas a implementar cuando el recurso hídrico disponible no sea suficiente para satisfacer las demandas de agua.

Uno de los instrumentos económicos y financieros para la gestión del riesgo agroclimático que se ha implementado con éxito y que cada día cobra más fuerza es el de los seguros agrícolas, más específicamente, el seguro indexado. Esta investigación pretende contribuir a mitigar el impacto de la escasez de agua en comunidades de regantes situadas en cuencas altamente reguladas, como el sistema de explotación del río Júcar, mediante el diseño de un nuevo esquema de seguro indexado por sequía hidrológica, basado en índices totalmente alineados con los procedimientos de gestión de la sequía a nivel de cuenca.

El proceso de diseño del seguro comprende 3 etapas. En la primera se evalúa económicamente el impacto de la sequía para establecer una indemnización unitaria, elemento base para el diseño del seguro. La segunda etapa consiste en establecer un índice por sequía hidrológica que tenga un alto grado de correlación con las pérdidas productivas y económicas en las

comunidades de regantes y reduzca los problemas de riesgo moral, selección adversa y riesgo base que se presentan en este tipo de seguros indexados. En este caso, se diseñaron y evaluaron tres índices de sequía hidrológica ( $IEE_{CHJ}$ ,  $ISH1$ ,  $ISH2$ ), siendo el indicador principal el índice de estado de escasez  $IEE_{CHJ}$  de la Unidad Territorial UTE del Júcar, establecido en el plan especial de sequía de la Demarcación Hidrográfica del Júcar PES (2018). Finalmente, en la tercera etapa se busca establecer los principales parámetros económicos del seguro: la indemnización recibida, el máximo valor indemnizable y el valor de la prima pura a pagar que se incluirán en los diferentes tipos de contrato.

El seguro es evaluado simulando su operación como si estuviera en funcionamiento. Se utilizan indicadores económicos-financieros para comparar los beneficios para la comunidad de regantes con o sin contrato. Los indicadores utilizados son la desviación estándar, el error cuadrático medio, el índice de siniestralidad y el riesgo base, los cuales están en función del margen bruto del cultivo. Para analizar la gestión del recurso hídrico en la cuenca y determinar escenarios de escasez que pueden declarar un siniestro o pago de indemnización del seguro, se utilizó un modelo de gestión de cuencas que tiene en cuenta las reglas de gestión del sistema.

Al incluir los indicadores financieros en la evaluación del seguro, se determina que la mejor opción en el diseño es tomar el  $IEE_{CHJ}=0.20$  sin franquicia deducible como disparador. Esto minimiza la semivarianza y la desviación estándar del margen bruto y permite obtener valores más altos del margen bruto mínimo en comparación con la opción de no implementar el seguro.

El seguro por sequía hidrológica contribuye a llenar el vacío existente en los planes de seguro tradicionales para cultivos bajo riego y ofrece cobertura adicional a los agricultores en condiciones de sequía y escasez de agua. Además, este diseño logra comprender la complejidad de la interacción de los subsistemas de aportaciones, demandas y reglas de operación del recurso hídrico a nivel de cuenca, siendo esta la contribución principal de esta investigación.

## RESUM

L'escassetat d'aigua és un problema cada vegada més recurrent per a l'agricultura de regadiu a les regions mediterrànies, sent la sequera hidrològica un dels problemes que afecta la disponibilitat d'aigua. Per tant, és necessari establir alternatives tècniques i economicofinanceres que permeten als regants enfrontar aquest problema des d'una visió àmplia de la gestió de l'aigua per a ús agrícola a nivell de conca. Aquestes alternatives han d'incloure instruments de planificació hidrològica, que permeten analitzar l'impacte de la sequera i determinar les mesures a implementar quan el recurs hídic disponible no siga suficient per a satisfer les demandes d'aigua.

Un dels instruments econòmics i financers per a la gestió del risc agroclimàtic que s'ha implementat amb èxit i que cada dia cobra més força és el de les assegurances agrícoles, més específicament, el segur indexat. Així, aquesta investigació pretén contribuir a mitigar l'impacte de l'escassetat d'aigua en comunitats de regants situades en conques altament regulades, com el sistema d'explotació del va riure Xúquer, mitjançant el disseny d'un nou esquema de segur indexat per sequera hidrològica, basat en índexs totalment alineats amb els procediments de gestió de la sequera a nivell de conca.

El procés de disseny del segur comprén 3 etapes. En la primera, s'avalua econòmicament l'impacte de la sequera per a establir una indemnització unitària, element base per al disseny de l'assegurança. Posteriorment, la segona etapa consisteix a establir un índex per sequera hidrològica que tinga un alt grau de correlació amb les pèrdues productives i econòmiques en les comunitats de

regants i reduísca els problemes de risc moral, selecció adversa i risc base que es presenten en aquesta mena d'assegurances indexades. En aquest cas, es van dissenyar i van avaluar tres índexs d'estat d'escassetat (IEECHJ, ISH1, ISH2), sent l'indicador principal l'índex IEECHJ de la Unitat Territorial del Xúquer UTE, establert en el pla especial de sequera de la Demarcació Hidrogràfica del Xúquer PES (2018). Finalment, en la tercera etapa es busca establir els principals paràmetres econòmics de l'assegurança: la indemnització rebuda, el màxim valor indemnitzable i el valor de la prima a pagar que s'inclouran en els diferents tipus de contracte.

El segur és avaluat simulant la seua operació com si estiguera en funcionament. S'utilitzen indicadors econòmics-financers per a comparar els beneficis per a la comunitat de regants amb o sense contracte. Els indicadors utilitzats són la desviació estàndard, l'error quadràtic mitjà, l'índex de sinistralitat i el risc base, els quals estan en funció del marge brut del cultiu. Per a analitzar la gestió del recurs hídric en la conca i determinar escenaris d'escassetat que poden declarar un sinistre o pagament d'indemnització del segur, es va utilitzar un model de gestió de conques que té en compte les regles de gestió del sistema.

En incloure els indicadors financers en l'avaluació del segur, es determina que la millor opció en el disseny és prendre el IEECHJ=0.20 sense franquícia deduïble com disparador. Això minimitza la semivariància i la desviació estàndard del marge brut i permet obtindre valors més alts del marge brut mínim en comparació amb l'opció de no implementar l'assegurança.

L'assegurança per sequera hidrològica contribueix a omplir el buit existent en els plans de segur tradicionals per a cultius sota reg

i ofereix cobertura addicional als agricultors en condicions de sequera i escassetat d'aigua. A més, aquest disseny aconsegueix comprendre la complexitat de la interacció dels subsistemes d'aportacions, demandes i regles d'operació del recurs hídric a nivell de conca, sent aquesta la contribució principal d'aquesta investigació.

## **ABSTRACT**

Water scarcity is an increasingly recurring problem for irrigated agriculture in the Mediterranean region, with hydrological droughts affecting water availability. Therefore, it is necessary to establish technical and economic-financial alternatives that allow irrigators to face this problem from a broad vision of water management for agricultural use at the basin level. These alternatives should include hydrological planning tools that allow the analysis of the effects of drought and the determination of the measures to be implemented when the available water resources cannot meet the water demand.

One of the economic and financial instruments for managing agro-climatic risks that has been successfully implemented and is gaining more strength every day is agricultural insurance, specifically indexed insurance. This research aims to contribute to the mitigation of the effects of water scarcity in irrigation communities located in highly regulated basins, such as the Júcar river exploitation system, through the design of a new insurance scheme indexed by hydrological drought, based on indices fully aligned with drought management procedures at the basin level.

The insurance design process consists of three stages. First, the impact of drought is economically evaluated to determine a unit compensation, which is the basis for the insurance design. The second stage is to establish a hydrological drought index that is highly correlated with productive and economic losses in irrigation communities and reduces moral hazard problems, adverse selection, and baseline risks problems inherent in this type of indexed insurance. In this case, three indices of scarcity status (IEECHJ, ISH1, ISH2) were designed and evaluated, the main

indicator being the IEECHJ index of the Júcar UTE Territorial Unit, established in the Special Drought Plan of the Júcar River Basin PES (2018). Finally, the third stage aims to establish the main economic parameters of the insurance: the compensation received, the maximum compensable value, and the value of the premium rate to be included in the different types of contracts.

The insurance is evaluated by simulating of its operation as if it were in process. Economic-financial indicators are used to compare the benefits to the community of irrigators with and without a contract. The indicators used are standard deviation, mean root-square loss, loss ratio, and base risk, which are based on the gross margin of the crop. The water resources simulation model that considers system management rules was used to analyze water resource management in the basin and to determine scarcity scenarios that could trigger a claim or insurance indemnity payment.

By including financial indicators in the insurance assessment, it is determined that the best option in the design is to consider as a trigger the  $IEECHJ=0.20$  without a deductible franchise, since the semi-variance and standard deviation of the gross margin are minimized, and higher values of the minimum gross margin are obtained compared to the option of not implementing insurance.

Hydrological drought insurance contributes to fill the gap in traditional insurance schemes for irrigated crops and provides additional coverage to farmers in times of drought and water scarcity. In addition, this design manages to understand the complexity of the interaction of the subsystems of contributions,

demands and operating rules of the water resource at the basin level, which is the main contribution of this research.

# ÍNDICE

Pág.

<b>AGRADECIMIENTOS.....</b>	<b>3</b>
<b>RESUMEN .....</b>	<b>5</b>
<b>RESUM .....</b>	<b>8</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>11</b>
<b>LISTA DE ABREVIATURAS .....</b>	<b>21</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>22</b>
<b>1.1. Contexto y motivación.....</b>	<b>22</b>
<b>1.2. Objetivos del estudio .....</b>	<b>27</b>
<b>1.3. Estructura del documento .....</b>	<b>28</b>
<b>2. ESTADO DEL ARTE .....</b>	<b>30</b>
<b>2.1. El seguro agrícola .....</b>	<b>30</b>
<b>2.2. Seguros por sequía hidrológica en el regadío .....</b>	<b>34</b>
2.2.1. Selección del índice de sequía hidrológica.....	34
2.2.2. Evaluación económica del impacto de la sequía en comunidades de regantes.....	35
2.2.3. Estimación de primas e indemnizaciones.....	37
2.2.4. Condiciones comerciales del seguro .....	38
<b>2.3. Herramientas para la evaluación de la efectividad del     seguro .....</b>	<b>44</b>
2.3.1. Uso de modelos de gestión de cuencas .....	44
2.3.2. Indicadores económico-financieros para la evaluación del seguro .....	45
<b>2.4. Problemas en los diseños de los seguros por sequía     hidrológica en España.....</b>	<b>47</b>

<b>3. METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO Y EVALUACIÓN DEL SEGURO POR SEQUÍA HIDROLÓGICA.....</b>	<b>49</b>
<b>3.1. Proceso 1: Diseño del seguro indexado por sequía hidrológica .....</b>	<b>51</b>
<b>3.2. Proceso 2: Evaluación del diseño del seguro indexado por sequía hidrológica.....</b>	<b>57</b>
<b>4. CASO DE ESTUDIO: SISTEMA DE EXPLOTACIÓN DEL JÚCAR.....</b>	<b>60</b>
<b>4.1. Sistema de explotación del Júcar .....</b>	<b>62</b>
4.1.1. Reglas de gestión.....	66
4.1.2. Aportaciones.....	67
<b>4.2. Comunidad de regantes de la Real Acequia de Escalona - RAE68</b>	
<b>5. INDEMNIZACIÓN UNITARIA A PARTIR DE LA EVALUACIÓN ECONÓMICA DEL VALOR DEL AGUA EN DIFERENTES ESCENARIOS DE ESCASEZ HÍDRICA.....</b>	<b>70</b>
<b>6. ÍNDICE DE SEQUÍA HIDROLÓGICA ISH.....</b>	<b>78</b>
<b>6.1. Índice de estado de escasez IEE<sub>CHJ</sub>.....</b>	<b>79</b>
<b>6.2. Índice de sequía hidrológica ISH1 .....</b>	<b>84</b>
<b>6.3. Índice de sequía hidrológica ISH2 .....</b>	<b>89</b>
<b>7. DISEÑO DEL SEGURO POR SEQUÍA HIDROLÓGICA .....</b>	<b>92</b>
<b>7.1. Diseños para cada opción de contrato e Índice de sequía hidrológica .....</b>	<b>92</b>
7.1.1. Diseño utilizando el IEE de CHJ .....	92
7.1.2. Diseño utilizando los índices ISH1 y ISH2 .....	97
<b>8. EVALUACIÓN DEL DISEÑO DEL SEGURO POR SEQUÍA HIDROLÓGICA .....</b>	<b>102</b>
<b>8.1. Simulación de funcionamiento del seguro a partir de un modelo de gestión de cuenca .....</b>	<b>102</b>

8.1.1. Descripción del sistema de gestión en la cuenca del Júcar incluido en el modelo Aquatool.....	103
8.1.2. Resultados de la simulación.....	107
<b>8.2. Implementación de los indicadores financieros para evaluar el mejor esquema de seguro .....</b>	<b>109</b>
<b>9. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES .....</b>	<b>116</b>
9.1. Discusión .....	116
9.2. Conclusiones .....	121
9.3. Líneas de investigaciones futuras.....	123
<b>GLOSARIO .....</b>	<b>125</b>
<b>REFERENCIAS.....</b>	<b>127</b>
<b>Anexo I. Divulgación de resultados .....</b>	<b>138</b>
I.I Publicaciones en revistas indexadas.....	138
I.II Congresos .....	138

# ÍNDICE DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Esquema de diseño de un seguro indexado.....	32
Figura 2. Árbol de problemas de la implementación del seguro por sequía hidrológica.....	50
Figura 3. Metodología para el diseño del seguro indexado .....	51
Figura 4. Etapa 1: Valoración del impacto de la sequía hidrológica: valor del agua/indemnización unitaria en comunidades de regantes .....	52
Figura 5. Etapa 2: Determinación del índice de sequía hidrológica ISH para el seguro indexado.....	54
Figura 6. Etapa 3: Determinación de los parámetros del seguro en diferentes tipos de contrato.....	55
Figura 7. Pérdidas económicas ocasionadas por accidentes meteorológicos en la Comunidad Valenciana (2004-2018) .....	60
Figura 8. Incidencia de los diferentes eventos meteorológicos que afectan la producción agrícola en la Comunidad Valenciana (2004-2018).....	61
Figura 9. Producción agrícola asegurada en toneladas en la comunidad valenciana (2000-2018).....	62
Figura 10. Sistemas de Explotación de la demarcación hidrográfica del Júcar .....	64
Figura 11. Unidades de Demanda Agrícola del Sistema Explotación Júcar.....	65
Figura 12. Plano área de influencia Real Acequia de Escalona (RAE) .....	69
Figura 13. Cantidad de agua suministrada en la Real Acequia de Escalona. ....	71
Figura 14. Relación del volumen de agua almacenada en el mes de abril vs agua anual suministrada a la Real Acequia de Escalona. ....	73

Figura 15. Relación entre agua aplicada y el rendimiento en el caso de cítricos (Volumen neto).....	74
Figura 16. Ubicación de los indicadores de escasez en la UTE Júcar. ....	82
Figura 17. IEE <sub>CHJ</sub> calculado (periodo 1980-2019) con las variables establecidas por la Confederación Hidrológica del Júcar. .	83
Figura 18. Representación del índice de Sequía hidrológica ISH1 modelado .....	89
Figura 19. Representación del índice de sequía hidrológica ISH2 modelado .....	90
Figura 20. Representación del índice de sequía hidrológica ISH2 para el mes de abril. ....	91
Figura 21. Modelo para estimar el agua suministrada en función del índice de sequía hidrológica IEE <sub>CHJ</sub> en la Real Acequia de Escalona. ....	93
Figura 22. Representación del máximo valor a indemnizar, disparador, y franquicia deducible en función del valor del Índice de sequía hidrológica. ....	94
Figura 23. Coeficiente de correlación y grado de significancia entre el volumen de agua almacenado en el mes de abril (Alarcón, Contreras, Tous) vs el volumen almacenado hasta 48 meses de antelación.....	97
Figura 24. Valor de la prima en % con respecto al máximo valor indemnizable para la opción de Prima variable y/o franquicia variable. ....	99
Figura 25. Valor de la prima en % con respecto al máximo valor indemnizable para la opción de Contrato de seguro anual y plurianual en función de un Pre índice. ....	100
Figura 26. Esquema conceptual simplificado del sistema de explotación del río Júcar.....	104
Figura 27. Índices de sequía hidrológica calculados para el mes de abril resultados de la simulación 1. ....	109
Figura 28. Índice de siniestralidad para diferentes valores de Índice de sequía hidrológica que actúan como disparador. ....	112

# ÍNDICE DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Clasificación de los productos de seguros en el sector agrícola.....	31
Tabla 2. Funciones de productividad del agua en agricultura de regadío usadas en el diseño de instrumentos económicos .....	36
Tabla 3. Resumen de algunos estudios relevantes en seguros por sequía hidrológica.....	39
Tabla 4. Opciones de esquemas de seguros seleccionados. ....	56
Tabla 5. Valores de demanda media anual.....	66
Tabla 6. Aportaciones intermedias en el sistema de explotación del Júcar.....	68
Tabla 7. Relación de la dotación bruta en cada uno de los estados de escasez, en función de los porcentajes de reducción y el modelo de López, N. ....	76
Tabla 8. Cálculo del valor del agua por m <sup>3</sup> teniendo en cuenta el valor de la producción en la Real Acequia de Escalona.....	77
Tabla 9. Índices de sequía hidrológica ISH propuestos para el diseño del seguro indexado.....	79
Tabla 10. Coeficientes de ponderación de los indicadores de estado de escasez (IEE) de la UTE Júcar.....	81
Tabla 11. Condiciones de entrada y salida de los escenarios de escasez en la Cuenca del Júcar.....	84
Tabla 12. Matriz de correlación variables utilizadas para el cálculo del indicador de estado de escasez (IEE) de la UTE Júcar..	86
Tabla 13. Información relativa de cada una de las variables o indicadores parciales del IEE en la UTE del Júcar a partir de la técnica BRT.....	87
Tabla 14. Valores de primas para la opción de contrato 1, del seguro por sequía hidrológica. ....	95
Tabla 15. Valores de Primas para el seguro por sequía hidrológica (opción 2), usando IEE=0.15, una franquicia deducible de 37% para 1,2, y 3 años de contrato de la póliza.....	96

Tabla 16. Valores de primas para la opción de contrato 1, del seguro por sequía hidrológica con los Índices ISH1 y ISH2 .....	99
Tabla 17. Máximo valor indemnizable y Sistema de primas del esquema de Seguro hidrológico propuesto para la Real Acequia de Escalona. Franquicia deducible del 37% para 1 y 3 años de contrato de póliza .....	101
Tabla 18. Resumen de los elementos que constituyen el sistema de gestión en la cuenca del Júcar usados en el AQUATOOL	104
Tabla 19. Índices de estado y medidas de gestión en la suma de los volúmenes almacenados .....	106
Tabla 20. Porcentajes de reducción del suministro de agua a las diferentes unidades de demanda agrícola de acuerdo con el estado de escasez.....	106
Tabla 21. Satisfacción a la demanda en la simulación del seguro en la RAE .....	108
Tabla 22. Cálculo del índice de siniestralidad para una simulación y dos valores de índice disparador, usando el Índice de la CHJ $IEE_{CHJ}$ .....	110
Tabla 23. Resumen índice de siniestralidad para un 50% de porcentaje de frecuencia acumulada con los 3 indicadores de escasez. ....	112
Tabla 24. Aplicación de los indicadores de Evaluación de la efectividad de los esquemas de seguros propuestos en la comunidad de regantes de la Real Acequia de Escalona.	113
Tabla 25. Riesgo base calculado con el IEE general extraído del informe de la CHJ y el calculado con el ISH1 y ISH2 propuestos. ....	115

# LISTA DE ABREVIATURAS

**ISH** Índice de Sequía hidrológica

**CHJ** Confederación hidrográfica del Júcar

**RAE** Comunidad de regantes Real Acequia de Escalona

**Mb**- Margen bruto.

**GWA**- Agua suministrada garantizada. Por sus siglas en inglés (Guaranteed Water allotment)-

**ID** – Comunidad de regantes

**IEE<sub>CHJ</sub>**- Índice de estado de escasez de la Confederación Hidrográfica del Júcar

**MRSL**- Pérdida del error cuadrático medio

**VNP**- Valor neto de la producción agrícola

**PES** Plan especial de sequía

**VP** Valor de la producción agrícola

**VCI** - Valor de los costes de riego

**Wa** - Agua suministrada en la comunidad de regantes. Por sus siglas en inglés (Water allotment)

**Wv** - valor o coste del agua. Por sus siglas en inglés (Water Value)

**Ws**- Déficit de agua. Por sus siglas en inglés (Water scarcity)

**γ FD** – Franquicia deducible

# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1. Contexto y motivación

La agricultura de regadío desempeña un papel importante en la producción de alimentos y, por tanto, en la seguridad alimentaria y nutricional de la población mundial (FAO, 2022; The World Bank, 2022). La necesidad de ser más productivos impone la exigencia de ser más eficientes en el uso del agua, transitando progresivamente de una agricultura tradicional de secano a una agricultura competitiva con innovaciones tecnológicas como la de regadío. Con el impacto del cambio climático, la baja o nula rentabilidad de la agricultura de secano y su vulnerabilidad frente a eventos climáticos extremos traerán consigo un aumento en la demanda por regar más tierras (Berbel & Espinosa Tasón, 2021). Por esta razón, la optimización del uso del agua en la agricultura se ha convertido en una de las grandes apuestas en el ámbito de la investigación y la gestión de las personas e instituciones involucradas en su manejo.

Entre las principales amenazas que podrían generar una crisis global se encuentran los fenómenos meteorológicos extremos, la pérdida de biodiversidad y el colapso de los ecosistemas, la crisis alimentaria e hídrica y, por último, la falta de adaptación al cambio climático (Future Earth, 2020). Estas amenazas afectan directamente al sector agrícola, ya que no solo es el sector productivo con mayor uso y demanda de recursos hídricos (Iglesias & Garrote, 2015; Alamanos et al., 2018), sino también es el más expuesto a sequías y escasez de agua. Esto hace necesario implementar esquemas de producción que permitan a los agricultores producir más alimentos

utilizando una cantidad mínima de agua. Es fundamental crear e implementar estrategias de mitigación de riesgos que permitan a los regantes hacer frente a estos problemas de forma planificada y acorde con las implicaciones técnicas y económicas que su aplicación supondría.

Existen diferentes tipos de sequía que afectan el sector productivo agrícola: a) sequía meteorológica, cuando se produce una escasez continuada de precipitaciones; b) sequía agrícola, asociada al déficit de humedad en la zona radicular para satisfacer las necesidades de un cultivo; y c) sequía hidrológica, que se refiere a la disminución en la disponibilidad de agua en un sistema de gestión durante un periodo de tiempo determinado que puede impedir satisfacer las demandas. (MITECO, 2018; Tallaksen & Van Lanen, 2004; Van Loon, 2015).

En el caso de la agricultura de regadío, el riesgo de sequía al que se enfrenta es el de sequía hidrológica, ya que su suministro de agua depende directamente del agua disponible en los embalses de regulación (Gómez-Limón & Guerrero-Baena, 2019). Esto hace necesario un análisis del agua para uso agrícola desde una visión amplia de la gestión a nivel de cuenca, con el uso de instrumentos de planificación hidrológica que incluyan planes especiales de sequía que muestren el impacto y las medidas a tomar cuando el recurso hídrico disponible no sea capaz de abastecer las demandas de agua.

Desde el punto de vista técnico y de la sostenibilidad ambiental, el manejo del riego agrícola en condiciones de escasez de agua tiene como objetivo reducir la demanda mediante el uso de variedades más tolerantes a la sequía o de sistemas de riego más

eficientes. También considera el ahorro y la conservación del agua con prácticas de cultivo para controlar el estrés hídrico, la reutilización de los flujos de retorno de escorrentía, las coberturas vegetales y la gestión del suelo para controlar la evaporación, con el fin de aumentar el rendimiento por unidad de agua utilizada (Pereira et al., 2002).

Otro aspecto a tener en cuenta en la gestión sostenible de los sistemas de recursos hídricos es la sostenibilidad financiera, en la que los factores económicos deben ser considerados en la toma de decisiones sobre el uso racional del agua. Un ejemplo de esto es que la Directiva Marco del Agua (DMA) de la Unión Europea contemple estos factores en su propuesta para lograr la sostenibilidad y gestionar la escasez de agua.

En el ámbito de las cuencas hidrográficas, se han estudiado instrumentos económicos de política hídrica, como los subsidios, los precios del agua, los bancos y los mercados de agua (Harou et al., 2009; López Nicolás, 2017; Mechler et al., 2017; Rey et al., 2019). La combinación de aspectos económicos, ingenieriles y ambientales de la gestión proporciona resultados más relevantes para la toma de decisiones en un entorno complejo como el de la escasez del agua (Pulido-Velazquez et al., 2014). Es por eso que el uso de modelos hidroeconómicos permite analizar los problemas de gestión del agua representando explícitamente la interacción entre los subsistemas natural (marco biofísico), económico y jurídico-institucional.

Uno de los instrumentos económicos y financieros para la gestión del riesgo agroclimático que se ha implementado con éxito y cada día toma más fuerza es el seguro agrícola, el cual pretende

ser un sistema de protección de la producción y de transferencia de riesgos, especialmente los meteorológicos, que incluyen eventos de sequía, granizadas, vientos, lluvias y heladas, entre otros (FAO, 2018).

El seguro agrícola convencional basa su indemnización en las pérdidas reales a nivel de la unidad asegurada, es decir, midiendo los daños sobre el terreno. Es un tipo de seguro muy popular y representa una parte importante de las primas agrícolas a nivel mundial (Iturrioz, 2009).

Una alternativa al seguro convencional que se ha venido consolidando en los últimos años es el seguro indexado o paramétrico, en el que la indemnización se basa en el comportamiento de un determinado índice o variable vinculada al riesgo a cubrir y el pago se realiza cuando se reportan valores por encima o por debajo de ciertos umbrales preestablecidos de la variable considerada (FAO, 2018; Cole & Xiong, 2017; Hess et al., 2016).

Los planes de seguro para las sequías se han normalizado desde hace mucho tiempo para los cultivos de secano, y su aplicación a los cultivos de regadío sigue siendo objeto de debate. Los costes generales relativamente elevados de la captura de datos actuariales, la clasificación del riesgo, la vigilancia del riesgo moral y la validación de las reclamaciones han obstaculizado el desarrollo de los mercados de los seguros agrícolas convencionales (pérdidas – indemnización). Por esta razón, el seguro indexado se promueve como una alternativa de bajo costo para los productos de seguros convencionales (Barnett et al., 2008; Mahul & Stutley, 2010; Jensen & Barrett, 2017).

En España, la herramienta del seguro agrario ha sido una solución para adaptar la actividad agraria a los riesgos climáticos cuyos efectos ponen en peligro la viabilidad económica de las explotaciones y se guarda una gran tradición en la implementación de seguros agrarios con un modelo actual que data de 1979 y que se basa en un esquema de aseguramiento mixto público privado que incluye principalmente la participación de la Entidad estatal de Seguros Agrarios ENESA y el sector asegurador privado como lo es Agrupación Española de Entidades Aseguradoras del Seguro Agrario AGROSEGUROS. En el actual sistema de seguros agrarios la inclusión específica de la sequía agrícola ha sido complicada pues como lo define (ENESA, Entidad Estatal de Seguros Agrarios et al., 2018) "no es un riesgo delimitado en el espacio y en el tiempo, como lo son el pedrisco o las heladas, y por tanto no es posible imputar las pérdidas de producción peritadas en una parcela por efecto de la sequía en un momento en concreto Combinados. En la actualidad, el seguro agrario combinado ofrece cobertura de sequía meteorológica para los principales cultivos en secano, pero la sequía hidrológica no ha podido ser garantizada por no existir una solución técnica para ello".

Es por lo que la presente investigación propone una alternativa técnica de solución al diseño de un instrumento económico-financiero como lo es un seguro indexado de sequía hidrológica basado en índices completamente alineados con los procedimientos de gestión de la sequía a nivel de cuenca, realizando un aporte a la problemática del impacto de la escasez de agua en las comunidades de regantes ubicadas en cuencas altamente reguladas. De esta manera al incluir de manera novedosa en un modelo de gestión la complejidad de la interacción

de los subsistemas de aportaciones, demandas del recurso hídrico, reglas de operación, criterios de asignación del agua y tomas de decisiones a nivel de cuenca, aplicada al diseño del seguro, permitirá tener herramientas cada vez más acertadas para una mejor validación y su posterior implementación.

## **1.2. Objetivos del estudio**

El objetivo general de esta tesis doctoral es el de desarrollar una metodología para diseñar y evaluar un esquema de seguro indexado para eventos de sequía hidrológica en comunidades de regantes, en función de la gestión que se realiza en la cuenca, como un instrumento económico de mitigación del riesgo en la producción agrícola. Para lograr este objetivo general se han establecido los siguientes objetivos parciales:

- Revisar la literatura existente con relación al diseño de seguros agrícolas, modelación hidroeconómica de sistemas de recursos hídricos, índices de sequía y escasez, curvas de demanda del recurso hídrico en cultivos.
- Evaluar el impacto económico de la sequía hidrológica en comunidades de regantes.
- Analizar diferentes índices de sequía y escasez en el diseño de un esquema de seguro por sequía hidrológica.
- Implementar modelos hidroeconómicos de gestión de cuencas como apoyo al diseño del seguro y su posterior validación.
- Simular y evaluar diferentes alternativas de diseños de seguros por sequía hidrológica.
- Proponer criterios generales de diseño del seguro, a partir de los resultados obtenidos.

### 1.3. Estructura del documento

El documento está compuesto de 9 capítulos que se describen a continuación:

Capítulo 1. Introducción: en este capítulo se describe el contexto y la motivación de esta tesis doctoral, así como los objetivos para su desarrollo.

Capítulo 2: Estado del arte: se describen los principales estudios realizados sobre los seguros agrícolas como instrumento de gestión de riesgos, los seguros indexados por sequía hidrológica y las herramientas de evaluación de la eficacia del diseño del seguro.

Capítulo 3: Metodología para el diseño y evaluación del seguro por sequía hidrológica: en este capítulo se describen los procesos implementados en la investigación a partir del análisis de la problemática en la implementación de seguros indexados.

Capítulo 4: Caso de estudio. Sistema de explotación del Júcar: en este capítulo se describe la zona de estudio, las características de la comunidad de regantes seleccionada y la problemática de la escasez de agua en la cuenca.

Capítulo 5: Resultados: Indemnización unitaria a partir de la evaluación económica del valor del agua en diferentes escenarios de escasez hídrica. En este capítulo se presentan los resultados obtenidos con la implementación de modelos hidroeconómicos, que permiten determinar el valor económico del agua en escenarios de escasez, y a partir de ahí, establecer los parámetros de diseño del esquema de seguro.

Capítulo 6: Resultados: Índice de sequía hidrológica. En este capítulo se presentan tres indicadores del estado de escasez a nivel

de cuenca, tomando como base para su cálculo las variables representativas de precipitación, niveles piezométricos, aforos y volúmenes embalsados establecidas en el plan especial de sequía de la Demarcación Hidrográfica del Júcar.

Capítulo 7: Resultados: Diseño del seguro por sequía hidrológica. en este capítulo se establecen los principales parámetros que forman parte del diseño de un seguro, que son los costes de las primas y la estimación de la indemnización a recibir, y junto con los índices se analizan tres esquemas de contratos en función del momento oportuno para la suscripción.

Capítulo 8: Resultados: Evaluación del diseño del seguro por sequía hidrológica. En este capítulo, mediante la implementación de un modelo de gestión de cuenca, se lleva a cabo una simulación de la efectividad del seguro. Para ello, se utiliza el software AQUATOOL, que es un entorno para el desarrollo de sistemas de apoyo a la decisión (SAD) para la planificación y gestión de cuencas o sistemas de recursos hídricos (Andreu et al., 1996), y que permite incluir las diferentes demandas, aportaciones y reglas de operación dentro de la Confederación Hidrográfica. Además, se evalúan indicadores económico-financieros como el índice de siniestralidad, el riesgo base y el margen bruto para seleccionar la alternativa de contrato más viable.

Capítulo 9. Conclusiones y discusión. En este capítulo se enuncian las principales conclusiones obtenidas, y se indican posibles líneas futuras de investigación.

## 2. ESTADO DEL ARTE

### 2.1. El seguro agrícola

El seguro es una forma de gestión de riesgos que funciona como protección frente a una pérdida contingente mediante la compensación de los daños causados. En este ámbito, los seguros agrícolas son considerados como una línea especial con características particulares, pues plantean dificultades para lograr una diversificación adecuada debido a la naturaleza de los riesgos a cubrir, la naturaleza de los cultivos y la problemática cuantificación de los daños (Iturrioz, 2009; Rozo, 2013; Bardají et al., 2016).

En cuanto a la gestión de los riesgos derivados de las adversidades climáticas y otros riesgos naturales, el seguro agrario es considerado el instrumento más adecuado (ENESA, 2018). Así, los países de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE), como Canadá, España y Estados Unidos, cuentan con pólizas de seguros agrícolas más desarrolladas, lo que garantiza un porcentaje más alto de agricultores y superficie con algún tipo de cobertura (Garrido & Zilberman, 2004). Existen diferentes esquemas de seguros agrícolas (Tabla 1): los convencionales, donde el pago de la indemnización se basa en las pérdidas reales a nivel de la unidad asegurada y los indexados cuyo pago se basa en una medición de un índice. Estos, a su vez, pueden clasificarse según el número de riesgos o amenazas que cubren. Otro tipo de seguros son aquellos que cubren tanto los ingresos (rendimiento y precio) como los costos de producción (Díaz-Caneja

et al., 2008; Iturrioz, 2009). Esta tipología se presenta en detalle en la siguiente tabla:

**Tabla 1. Clasificación de los productos de seguros en el sector agrícola. Fuente: Elaboración basada en (Iturrioz, 2009)**

Tipo de seguro agrícola		Indemnización por pagar
a) Seguro agrícola tradicional basado en las pérdidas reales a nivel de la unidad asegurada	1. Riesgo específico	Porcentaje de daño
	2. Múltiples riesgos	Pérdidas de rendimiento
b) Seguro agrícola basado en índices	1. Índice de superficie-rendimiento	Pérdida superficie-rendimiento
	2. Índices climáticos	Escala de pagos del índice climático
	3. Índice NDVI	Escala de pagos del índice NDVI
	4. Índice de mortalidad del ganado	Escala de pagos del índice de mortalidad
	5. Índice de incendios forestales	Foco de incendio/ escala de pago de área incendiada
c) Seguro de Ingresos de Cultivos (Rendimiento y precios).	1. Seguro de ingresos de cultivos	Pérdida de rendimiento y de precios

En los últimos años se ha extendido el uso del seguro indexado principalmente por su potencial para reducir o incluso eliminar el riesgo moral y la selección adversa, ya que el pago de las indemnizaciones se basa en un índice transparente, bien definido y no manipulable por el asegurado o el asegurador (Zhang et al., 2019). De este modo, el diseño de un seguro indexado agrícola debe incluir varios parámetros, como el tipo de riesgo a cubrir, el asegurado o beneficiario, el valor a asegurar en función de la evaluación económica del impacto o afectación por la amenaza, los

valores de la prima e indemnización y las condiciones del contrato. Entre estos, el parámetro más importante a seleccionar es el índice adecuado (Figura 1).

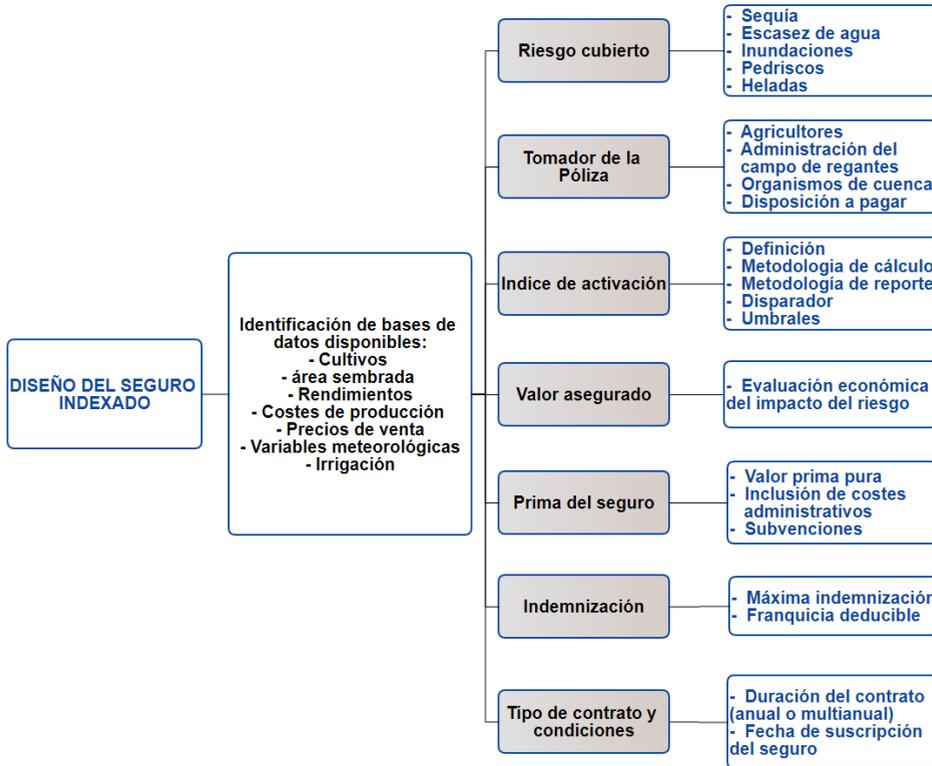


Figura 1. Esquema de diseño de un seguro indexado

Los seguros indexados basados en índices climáticos o meteorológicos deben garantizar una alta correlación del índice seleccionado con los rendimientos y con la cuantificación real de los daños en los cultivos, ya que pueden generar un alto riesgo de base y pagos insuficientes (Burke et al., 2010; Leblois & Quirion, 2013; Shirsath et al., 2019).

Para el caso concreto de los seguros indexados por sequía, en diferentes estudios se han implementado índices basados en la precipitación como el índice de precipitación acumulada CPI y el índice de precipitación estandarizada SPI (Vedenov & Barnett, 2004b; Okpara et al., 2017; Bucheli et al., 2021); otros estudios incluyen índices de evaporación ESI y evapotranspiración SPEI (Williams & Travis, 2019; Bucheli et al., 2021). La capacidad de agua disponible almacenada en el suelo y la cantidad de agua disponible para las plantas también se han utilizado como indicadores (Kellner & Musshoff, 2011).

A medida que los fenómenos meteorológicos extremos sean más frecuentes y pronunciados, los productores necesitarán tener acceso a sistemas de riesgo de desastres agroclimáticos y de alerta temprana (FAO, 2021). El seguro agrícola es una herramienta adecuada para la adaptación a los efectos de los fenómenos extremos vinculados al cambio climático (Vargas-Amelin & Pindado, 2014). Estudios que incluyen en su análisis modelos climáticos globales y regionales (GCM y RCM) y proyecciones climáticas futuras permiten inferir tendencias del comportamiento de variables como temperatura y precipitación, que tienen influencia directa en el cálculo de los índices de los seguros y la estimación de primas e indemnizaciones (Siebert, 2016; Jin & Erhardt, 2020; Hohl et al., 2021).

Cuando se considera un sistema de agua altamente regulado, en el que la disponibilidad natural de agua se ve alterada por el funcionamiento de la infraestructura hídrica, como es el caso de la agricultura de regadío, los indicadores de sequía tradicionales mencionados anteriormente pierden importancia. Así, se requieren formulaciones de índices especiales adaptados a las características

de la cuenca para reflejar los efectos de la regulación y las fluctuaciones naturales en la cuenca, como un índice que refleje la escasez de agua en la cuenca, es decir, la sequía hidrológica.

## **2.2. Seguros por sequía hidrológica en el regadío**

Los estudios con diseños de seguros indexados en comunidades de regantes tienen varios enfoques relacionados con a) la elección del índice de sequía adecuado, b) la evaluación económica del impacto de la sequía, c) la estimación de primas e indemnizaciones y d) el establecimiento de algunas condiciones comerciales para la puesta en marcha del seguro. Estos enfoques se detallarán a continuación.

### **2.2.1. Selección del índice de sequía hidrológica**

Un requisito para el buen funcionamiento del seguro indexado es la confianza de las partes en la objetividad y transparencia del índice, lo que requiere que sea independiente de la voluntad de los actores, que exista información suficiente sobre su comportamiento histórico y que tenga un alto grado de correlación con las pérdidas (Iturrioz, 2009; Roza, 2013).

En España, los estudios de seguros por sequía hidrológica han utilizado el índice de estado de escasez establecido en los planes de sequía de las diferentes confederaciones hidrográficas, que se estima a partir de los niveles de embalses, flujos superficiales y, en algunos casos, aguas subterráneas (Pérez Blanco & Gómez, 2014; Ruiz et al., 2015; Maestro et al., 2016). Otro ejemplo es el desarrollado por Gómez-Limón (2020), que utiliza como índice el

agua almacenada en los embalses a principios de mayo, medida como porcentaje de la capacidad total de almacenamiento de la red de embalses. Leiva y Skees (2008) toman como índice la acumulación del caudal de entrada en el embalse en un periodo de acumulación de 12 meses.

### **2.2.2. Evaluación económica del impacto de la sequía en comunidades de regantes**

El impacto económico directo de la escasez de agua sobre la agricultura de regadío depende del tipo de cultivo (sensibilidad a la sequía y valor económico de los cultivos), de la proporción de agua suministrada para el riego y del calendario de restricciones de extracción de agua (Salmoral et al., 2019). Los modelos econométricos explican la variación del valor de producción debido a la disponibilidad de agua para riego y a la variabilidad de las entradas de agua en cada sistema de almacenamiento (Gil et al., 2011).

La utilización de funciones de producción o curvas de demanda que relacionen el rendimiento de los cultivos con el suministro de agua ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) y el valor marginal del agua ( $\text{€}/\text{m}^3$ ), que tengan en cuenta la respuesta del cultivo en términos de variación de rendimiento y requerimientos hídricos en las diferentes etapas fenológicas, permitirá estimar el impacto de la escasez de agua sobre la producción en la agricultura irrigada (Doorenbos & Kassam, 1979; Lorite et al., 2007; Ruiz et al., 2015). En la tabla 2 se presentan funciones de productividad del agua utilizadas en el diseño de los instrumentos económicos.

**Tabla 2. Funciones de productividad del agua en agricultura de regadío usadas en el diseño de instrumentos económicos. Fuente: elaboración propia.**

Autor	Cultivo	Modelo	Variables
Quiroga et al. (2011)	Maíz	$\ln Y_t = \alpha_0 + \alpha_1 \text{Comp1\_Tech}_t + \alpha_2 \text{Irrig\_area}_t + \alpha_3 \ln \text{Irrig}_{it} + \alpha_4 \text{Pr ec}_{it} + \alpha_5 \text{T\_Max}_{it} + \alpha_6 \text{T\_Mean}_{it} + \alpha_7 \text{Fr}_{it} + \alpha_8 \text{Dro}_t + \varepsilon_t$	$Y_t$ : Rendimiento ( $t \text{ ha}^{-1}$ ) $\text{Comp1\_Tech}_t$ : Variables de manejo del cultivo $\text{Irrig\_area}_t$ : Unidad de superficie cultivada $\text{Irrig}_{it}$ : Agua aplicada ( $\text{mm mes}^{-1}$ ) $\text{Pr ec}_{it}$ : Precipitación ( $\text{mm mes}^{-1}$ ) $\text{T\_Max}_{it}$ $\text{T\_Mean}_{it}$ : Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) $\text{Fr}_{it}$ : Número de días bajo $0^{\circ}\text{C}$ $\text{Dro}_t$ : Ocurrencia de sequía
Pérez Blanco y Gómez (2014)	Varios	$Q_{r,s,p} = x_1 * \%ET_{r,s,p}^2 + x_2 * ET_{r,s,p} + x_3 (k)$	$Q_{r,s,p}$ : Rendimiento ( $\text{Kg ha}^{-1}$ ) $ET_{r,s,p}$ : Agua disponible (mm) $k$ : Constante asociada al manejo agronómico del cultivo
Ruiz et al. (2015)	Olivos	$y = -5477.8 + 30.8x - 0.01x^2$	$y$ : Rendimiento ( $\text{Kg ha}^{-1}$ ) $x$ : Cantidad de agua aplicada (mm)
López – Nicolás (2017)	Cítricos	$Y = -3E - 08 \ln^3 + 0.0003 \ln^2 - 0.0868 \ln + 21495$	$Y$ : Rendimiento ( $\text{Kg ha}^{-1}$ ) $\ln$ : Agua aplicada ( $\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$ )

Los estudios realizados ponen de manifiesto la importancia de reconocer que el rendimiento de un cultivo no solo puede depender de la cantidad de agua aplicada, sino que también necesario tener en cuenta variables agronómicas y de manejo de cultivo. Pérez Blanco & Gómez (2014) indican que la producción agronómica es nula cuando él %ET es inferior al 50%. Quiroga et al. (2011) encontraron que una disminución del 1% en el agua de riego

conduce a una reducción en el rendimiento del cultivo de más del 10%.

Tras calcular los rendimientos a partir de los modelos de productividad del agua, se calcula el valor de la producción para analizar el impacto de la sequía en los ingresos de los agricultores. También permite cuantificar el agua como un componente más de los costes de producción y, desde un punto de vista económico, diseñar instrumentos de gestión.

Un ejemplo es el desarrollado por López-Nicolas et al. (2017), en el que realizan una evaluación económica del valor de la producción en función de la oferta de agua de riego y de los precios de los cultivos. Para ello, implementaron un modelo econométrico utilizando la disponibilidad de agua y un índice de los precios de los cultivos como variables explicativas del valor de producción de la agricultura de regadío en la cuenca del río Júcar, con la siguiente ecuación (1):

$$Pv_{j,t} = a + b * SW_{j,t} + c * GW_{j,t} + d * Ip_{j,t} + u_{j,t} \quad (1)$$

Donde SW y GW representan los suministros de agua superficial y subterránea respectivamente, I es el índice de precios de cada cultivo y  $u$  representa el error del modelo.

### **2.2.3. Estimación de primas e indemnizaciones**

La estimación de las primas de seguro por sequía hidrológica implica dos pasos principales: cuantificar el riesgo asociado a las asignaciones de agua de riego recibidas por los agricultores y cuantificar el impacto de las asignaciones de agua en los ingresos de los agricultores (Ruiz et al., 2015).

Las tasas de las primas se expresan en función del valor a asegurar o como porcentaje de la indemnización máxima. En el diseño de un seguro para mejorar el uso de agua en el sistema de riego del río Mayo en el noroeste de México, Leiva & Skees (2008) establecieron valores de primas que oscilaban entre el 3.9% y el 6.9% de la indemnización máxima. En el caso de cítricos cultivados en el Distrito Agrícola de Campo de Cartagena en la cuenca del río Segura en España, Pérez Blanco y Gómez (2014) obtuvieron valores de primas del seguro que oscilaban entre el 3.7% y el 8.5% del valor de la producción. En la comunidad de regantes de Bardenas, ubicada en la cuenca del río Ebro, Maestro et al (2016) obtuvieron valores de primas entre el 0.4 y el 1.7% de la indemnización máxima.

#### **2.2.4. Condiciones comerciales del seguro**

Una opción recomendada es un contrato plurianual, suscrito por cada agricultor antes de la temporada de lluvias, con una valoración de las pérdidas en campo y no basado en un índice (Ruiz et al., 2015). Maestro et al., (2016) llevaron a cabo un panel de expertos en España al que invitaron profesionales del Ministerio de Agricultura, compañías de seguros, la agencia estatal para los seguros agrícolas – Agroseguros, y administradores de confederación hidrográfica. Se discutieron dos tipos de planes de seguro: 1) un esquema de seguro tradicional, con ajuste de pérdida en el campo, y 2) un seguro indexado. Este grupo de expertos llegó a la conclusión de que la mejor opción para asegurar los cultivos irrigados en España es un seguro colectivo indexado, contratado por la administración de la comunidad de regantes y basado en un índice de sequía hidrológica. En la Tabla 3 se presentan estudios relevantes en seguros por sequía hidrológica.

**Tabla 3. Resumen de algunos estudios relevantes en seguros por sequía hidrológica. Fuente: Elaboración propia.**

<b>Autores</b>	<b>Principales riesgos</b>	<b>Tomadores de póliza</b>	<b>Índice</b>	<b>Primas</b>	<b>Indemnizaciones - riego base</b>	<b>Condiciones del contrato</b>
(Leiva & Skees, 2008)	Riesgo por desabastecimiento de agua. Seguro de riego.	Un grupo colectivo de agricultores podría formar una cooperativa de agua para implementar el seguro	Acumulación del caudal de entrada	Los valores de las tasas de las primas oscilan entre 3.9% y 6.9%. Expresado como el porcentaje de la máxima indemnización.		El primer tipo de contrato se basa en un período de acumulación de 12 meses y un único parámetro disparador.  El segundo tipo incluye un período de acumulación de 18 meses e introduce el uso de múltiples disparadores.
(Quiroga et al., 2011)	Efectos de la gestión de sequía en la producción de maíz en la cuenca del Ebro.	Calculan la disposición a pagar de los agricultores por un seguro hipotético.	SPI para determinar si hubo o no un evento de sequía.	No encontraron un valor de prima como tal sino el análisis de la disposición a pagar por cada uno de los productores. (aversión	No analizan	No analizan

Autores	Principales riesgos	Tomadores de póliza	Índice	Primas	Indemnizaciones - riego base	Condiciones del contrato
			Cambio en la escorrentía en función de diferentes escenarios de cambio climático	al riesgo). Encontrando que en algunos escenarios los agricultores están dispuestos a pagar hasta el 17% de los rendimientos		
(Pérez Blanco & Gómez, 2014)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Sobre explotación de los acuíferos.</li> <li>- Déficit de irrigación y satisfacción de la evapotranspiración</li> </ul>	No analizan	Toman como índice de sequía (Ie) el establecido en el Plan de Manejo de Sequía para la Confederac	La prima se estima a partir de la tasa entre la indemnización esperada y el valor del rendimiento esperado en un año de referencia (año hidrológico normal). Alcanzan valores de 8.5% - 9.1% de Prima pura	No analizan	No analizan

Autores	Principales riesgos	Tomadores de póliza	Índice	Primas	Indemnizaciones - riego base	Condiciones del contrato
			<p>ión Hidrográfic a del Segura del año 2008.</p>			
<p>(Ruiz et al., 2015)</p>	<p>Sequía hidrológica. Se asegura es el valor promedio histórico de la producción.</p>	<p>Agricultores, pero la información de suministro de agua debe ser facilitada por los administradores de la comunidad de regantes.</p>	<p>Utilizan el Índice de Estado del Plan de Sequía de la Confederación hidrográfica calculado en el mes de abril. &lt;0.5 consideran</p>	<p>El porcentaje de prima es calculado de manera personalizada. De acuerdo con Agroseguro la prima pura se debe incrementar un 40% para obtener la prima comercial.</p> <p>Primas comerciales: Entre 2.66% para algodón y 5.81% para trigo. Obtienen un ponderado para el ID de 1.82%</p>	<p>No analizan</p>	<p>No es un seguro indexado, ya que se evalúan las perdidas en campo.</p> <p>Franquicia deducible del 5% del valor asegurado</p> <p>El contrato se suscribe antes de la temporada de lluvias</p> <p>Contratos multianuales</p>

Autores	Principales riesgos	Tomadores de póliza	Índice	Primas	Indemnizaciones - riego base	Condiciones del contrato
			que ya hay sequía.			
(Gómez-Limón, 2020)	Sequía hidrológica.	El análisis se realiza para tres tipos de fincas. La primera para grandes agricultores profesionales, la segunda agricultores que diversifican el riesgo y la tercera agricultores con cultivos extensivos	Agua almacenada al comienzo del octavo mes (1 de mayo) en el año hidrológico t, medida como porcentaje de la capacidad total de almacenamiento de la	Van desde 83 €/ha para las fincas tipo 2 con un deducible de 30% hasta 313 €/ha para las fincas tipo 1 con un deducible de 10%	La probabilidad de que la indemnización sea de =€/ha oscila entre 66% y 85%. La probabilidad de que la indemnización se encuentre entre 0 y 1000 €/ha va desde el 10.3% hasta 22.4% y la	Se basa en pólizas anuales con una prima anual. Se pueden incluir nuevos asegurados únicamente cuando el índice de sequía hidrológica se encuentre por encima de 0.5 (condiciones de normalidad)

Autores	Principales riesgos	Tomadores de póliza	Índice	Primas	Indemnizaciones - riego base	Condiciones del contrato
			red de embalses.		probabilidad de que la indemnización sea mayor de 1000 €/ha alcanza hasta un 11.6%	
(Maestro, et al., 2016)	Sequía hidrológica.	Contratado por la comunidad de regantes.	Almacenamiento disponible en reservorios. HDII define un nivel garantizado de asignación de agua medida en m <sup>3</sup> / ha.	Las primas oscilan entre 8% a 24% sobre el máximo indemnizable en un caso de estudio. En otro caso oscilan entre 0% a 41%. Para el contrato multianual en el escenario de alto riesgo las primas se reducen de 41 a 26% para un contrato a 3 años.	La indemnización unitaria se otorga por m <sup>3</sup> de déficit de agua por hectárea.  Máximo valor indemnizable: 752 EUR/ha	Reglas de operación deben permanecer constantes durante el período de garantía del contrato.  Contratos con primas y franquicia variables.  Contrato multianual y contrato anticipado

## **2.3. Herramientas para la evaluación de la efectividad del seguro**

La viabilidad de los esquemas de seguro diseñados y la determinación de los beneficios tanto para los agricultores como para las empresas aseguradoras se desarrollan a través de un análisis retrospectivo, que consiste en calcular la siniestralidad de los últimos años como si la cobertura hubiera estado en operación durante esos años (World Bank, 2018).

Por tanto, la simulación de la operación de cobertura de un seguro hidrológico por sequía se basa en el análisis de la disponibilidad del agua para riego agrícola a partir de la gestión realizada dentro de la cuenca, es decir, se deriva de todo un conjunto de interacciones entre usos y demandas de agua, ya sea para abastecimiento urbano o generación de energía, y de las aportaciones y reglas de operación establecidas en condiciones normales o de escasez, lo que hace complejo su análisis y requiere el uso de modelos de gestión de cuencas. Además, el uso de indicadores económico-financieros permite evaluar la efectividad del seguro y los beneficios tanto para los aseguradores como para los beneficiarios.

### **2.3.1. Uso de modelos de gestión de cuencas**

Los SAD son herramientas técnicas cuyo objetivo es proporcionar información válida y suficiente a los responsables de la gestión integral del recurso hídrico (Georgakakos, 2007). El uso de SAD ha tomado un papel importante en el desarrollo de planes

hidrológicos de cuenca y planes especiales de sequía y mitigación (Andreu et al., 2013).

Un SAD utilizado con mucha frecuencia en la planificación hidrológica en España es AQUATOOL (Andreu et al., 1996), que consiste en una interfaz o entorno de trabajo para el desarrollo y análisis de sistemas de ayuda a la decisión en la planificación y gestión de cuencas hidrográficas. Se compone de varios módulos: el módulo SIMGES, para la simulación de la gestión de cuencas incluyendo utilización conjunta; el módulo OPTIGES, para la optimización de la gestión de cuencas; el módulo GESCAL, para la simulación de la calidad de agua a escala de cuencas; y el módulo SIMRISK, para la simulación múltiple de la gestión de sistemas y el cálculo de riesgos en la gestión (Solera et al., 2015).

### **2.3.2. Indicadores económico-financieros para la evaluación del seguro**

El método más utilizado para evaluar la efectividad del seguro es la varianza mínima o el riesgo a la disminución de los ingresos con o sin contrato de seguro. La desviación estándar típica mide las desviaciones por encima y por debajo de la media, es decir, los riesgos al alza y a la baja (Abdi et al., 2022).

Otra forma de evaluar los esquemas de seguro se basa en la desviación estándar de los valores del margen bruto de cada uno de los cultivos de la comunidad de regantes con y sin contrato de seguro. La desviación típica se define como la raíz cuadrada de la distancia de cada margen bruto con respecto a la media. En general, la compensación entre el valor esperado y la desviación estándar está determinada por un coeficiente de aversión al riesgo individual (Kellner & Musshoff, 2011; Maestro, 2016). La pérdida del error

cuadrático medio (MRSLS por sus siglas en inglés) se calcula en un intento de observar en qué medida se minimiza el riesgo a la baja. Por lo tanto, si el MRSLS se reduce con el seguro, entonces el contrato es eficiente a ese nivel de contrato (Adeyinka et al., 2013).

El indicador más utilizado para evaluar el desempeño de las compañías aseguradoras o reaseguradoras es el índice de siniestralidad (FAO, 2018). Este índice permite determinar si el precio fijado para los distintos tipos de seguros es correcto; es decir, si realmente permite solventar los siniestros que han afectado a las pólizas emitidas durante un período dado.

Es deseable que este indicador sea inferior a 1 y relativamente estable para conseguir un resultado equilibrado a largo plazo (FAO, 2018). Si el índice es inferior a 1, significa que la prima recaudada es superior a las indemnizaciones pagadas y, por lo tanto, la aseguradora obtiene beneficios; si es 1, significa un equilibrio, ya que las indemnizaciones pagadas son iguales a la prima, y si es superior a 1, significa que la aseguradora tuvo pérdidas en ese período, ya que las indemnizaciones pagadas fueron mayores que las primas recaudadas (Adeyinka et al., 2013).

Un problema particular de los seguros indexados es el riesgo base, que refleja la relación imperfecta entre las indemnizaciones pagadas por una póliza indexada y las pérdidas reales sufridas por el asegurado. El riesgo base es el resultado directo de la reducción de los requisitos de datos y supervisión para los seguros indexados y da lugar a pérdidas no indemnizadas y pagos de indemnización injustificados. Para minimizar el riesgo base, el índice utilizado debe estar altamente correlacionado con el riesgo asegurado (Roth & McCord, 2008; Jensen & Barrett, 2017).

Es decir, para evaluar y minimizar el riesgo base es necesario comparar las pérdidas experimentadas por los clientes y los pagos de indemnización desencadenados por un índice prospectivo (Jensen & Barrett, 2017).

## **2.4. Problemas en los diseños de los seguros por sequía hidrológica en España**

Se identifican dos problemas principales relacionados con la cobertura de seguros para riesgos de sequía hidrológica en la agricultura de regadío: (a) las decisiones institucionales sobre la disponibilidad de agua son muy provisionales, y (b) el coste del seguro es generalmente más alto que la alternativa de las captaciones ilegales. El segundo problema varía de un caso a otro en función de la disponibilidad de agua subterránea, y el primero puede considerarse la razón principal por la que todavía existen tan pocos productos de seguros contra la sequía para la agricultura de regadío (Ruiz et al., 2015).

Entre otros problemas que limitan el desarrollo del seguro por sequía hidrológica en comunidades de regantes se destacan el riesgo moral, la selección adversa y el carácter sistémico de la sequía hidrológica, que hace que el riesgo de fallo de garantía de suministro de agua afecte a un gran número de agricultores de una misma cuenca, comprometiendo la capacidad de las compañías aseguradoras para pagar todas las indemnizaciones, condición de viabilidad para las aseguradoras. Otros factores son la posibilidad de que los propios asegurados influyan en la probabilidad de siniestros (dotaciones inferiores a los derechos concesionales) y la existencia de diferentes fuentes de suministro de agua de riego (Gómez-Limón & Guerrero-Baena, 2019).

La existencia de un "interés asegurable" y los esfuerzos por evitar la "selección adversa" en el momento de la emisión y los problemas de "riesgo moral" después de la emisión del producto son importantes para una cobertura de seguro eficaz y el desarrollo del mercado de seguros (IAIS, 2018).

Otra cuestión importante es el riesgo base. La preocupación es cuando ocurre un evento adverso y el índice no se activa, por lo que no se realiza ningún pago (IAIS, 2018). Idealmente, la pérdida de base y la ganancia de base deberían ser similares para que el sistema de seguros no favorezca ni al agricultor ni a la compañía de seguros (Maestro et al., 2016).

### **3. METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO Y EVALUACIÓN DEL SEGURO POR SEQUÍA HIDROLÓGICA**

La metodología se basa en un análisis de la situación actual de la implementación de seguros en comunidades de regantes. Para ello se realiza una revisión bibliográfica, comunicación con administradores de la gestión en la cuenca, administradores de comunidades de regantes, entrevistas con responsables de la gestión de los seguros en España y visitas de campo. La información recopilada se sintetiza en un árbol de problemas en la implementación del seguro por sequía hidrológica en España, que refleja las principales causas y efectos que no permiten su adecuado desarrollo (Figura 2).

En la implementación del seguro por sequía hidrológica, el riesgo moral y la selección adversa siguen siendo algunos de los problemas principales para tener en cuenta, así como la validez de un índice que asocie la gestión realizada en la cuenca y refleje las pérdidas económicas por eventos de sequía, que a su vez inciden en que el riesgo base sea más frecuente. Por lo tanto, la metodología descrita a continuación permite el diseño de un seguro indexado por sequía hidrológica que busque alternativas para la solución de los problemas identificados, obteniendo así herramientas para que los actores del seguro, tomadores, beneficiarios y empresas aseguradoras puedan tomar decisiones más ajustadas a la realidad para la implementación del seguro.

### Capítulo 3. Metodología para el diseño y evaluación del seguro por sequía hidrológica



Figura 2. Árbol de problemas de la implementación del seguro por sequía hidrológica. Se relacionan las causas y los efectos que generan. Fuente: Elaboración propia con base en (Gómez-Limón & Guerrero-Baena, 2019)

### Capítulo 3. Metodología para el diseño y evaluación del seguro por sequía hidrológica

La Figura 3 muestra la metodología para llegar a la implementación del seguro indexado por sequía hidrológica. Este se compone de dos procesos principales: a) diseño del seguro y b) evaluación del seguro.

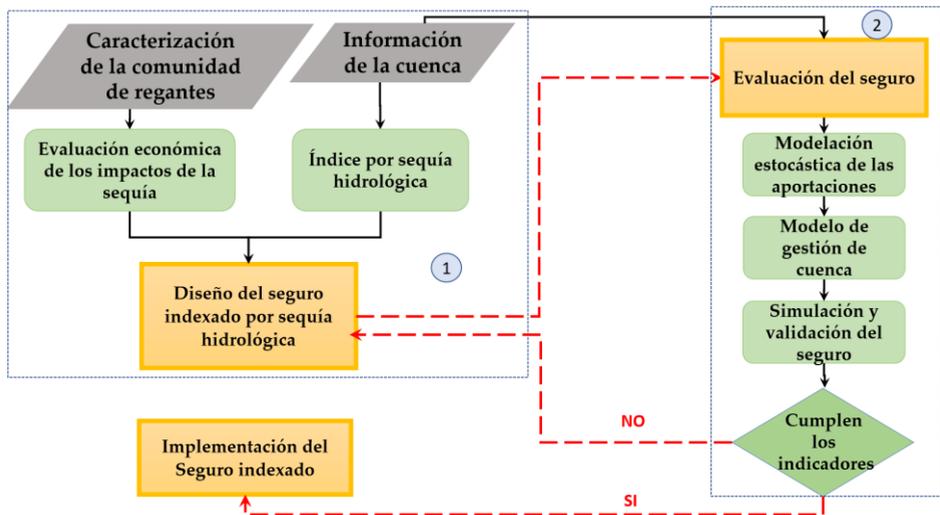


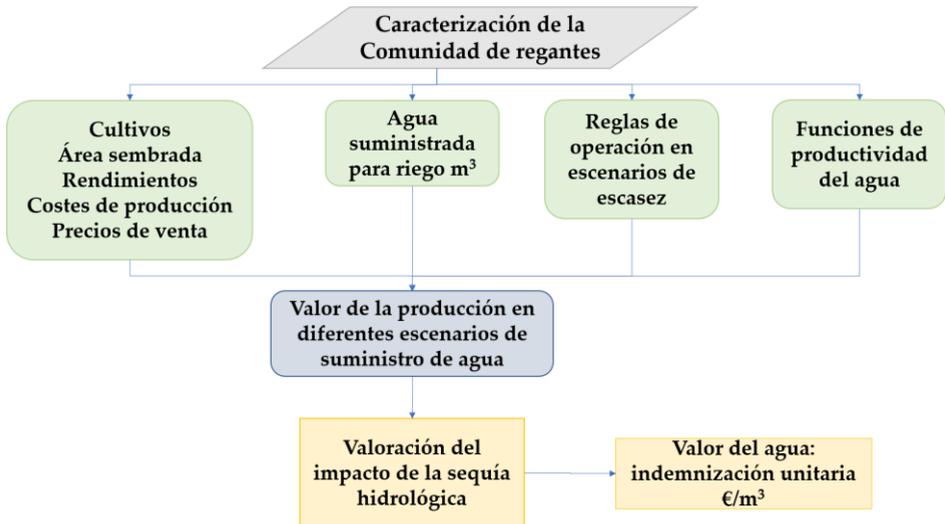
Figura 3. Metodología para el diseño del seguro indexado

#### 3.1. Proceso 1: Diseño del seguro indexado por sequía hidrológica

El proceso de diseño del seguro comprende 3 etapas; la primera es la estimación de la indemnización unitaria que es el valor del agua en función de la productividad alcanzada con la disminución del suministro del agua debido a la escasez hídrica. La Figura 4 muestra los pasos, empezando por una caracterización de la comunidad de regantes con información histórica sobre los cultivos (área sembrada, producción, rendimientos, costes de producción e ingresos) junto con el histórico del agua suministrada a la comunidad de regantes. Esto, combinado con las reglas de

**Capítulo 3. Metodología para el diseño y evaluación del seguro por sequía hidrológica**

operación en escenarios de escasez y las funciones de productividad del agua para cada cultivo, permite una evaluación económica del impacto de la sequía en los cultivos irrigados.



**Figura 4. Etapa 1: Valoración del impacto de la sequía hidrológica: valor del agua/indemnización unitaria en comunidades de regantes**

Para estimar la indemnización del esquema de seguro que percibirá el agricultor en función del agua finalmente recibida, partimos del valor neto de la producción agrícola ( $VNP_i$ ), que se obtiene a partir del valor de la producción en € o €/ha para cada año de análisis, en función del área sembrada ( $S_{ic}$ ), rendimiento ( $Y_c$ ) y precios ( $P_c$ ) para cada cultivo (Lopez-Nicolas et al., 2017; Maestro et al., 2016) menos los costes de riego en cada uno de los escenarios y cultivos analizados (VCI).

$$VP_i = \sum_{c=1}^{c=C} S_{ic} * Y_c * P_c \quad (2)$$

### **Capítulo 3. Metodología para el diseño y evaluación del seguro por sequía hidrológica**

---

$$VCI_i = \sum_{c=1}^{c=C} S_{ic} * VCI_{ic} \quad (3)$$

$$VNP_i = VP_i - VCI_i \quad (4)$$

Para calcular el valor de la producción, se determinaron los años en los que se declararía el estado de emergencia y se estimó el valor del agua ( $W_{vi}$ ) comparándolo con el agua suministrada en un escenario de normalidad en el que se garantiza la totalidad de la asignación de agua, mediante la siguiente expresión:

$$wv_i = wv_i(wa_i) = \frac{VNP_t - VNP_i}{GWA - wa_i} \quad (5)$$

$$wv_t = wv_t(wa_t) \quad (6)$$

Donde  $W_{a_i}$  es el agua suministrada,  $W_{vi}$  es el valor del agua del escenario  $i$ , y  $VNP_t$  es el valor neto de la producción agrícola en el escenario con asignación total garantizada de agua (GWA).

La segunda etapa en el proceso de diseño consiste en establecer un índice por sequía hidrológica que reúna las principales características ya descritas para un seguro indexado, especialmente que tenga un alto grado de correlación con las pérdidas productivas y económicas en las comunidades de regantes. Incluye información general de la cuenca con las variables que definen una posible escasez hídrica en el sistema, tales como almacenamiento, aportaciones, precipitación y cuya combinación y ponderación permiten el cálculo del índice de sequía hidrológica (Figura 5).

### Capítulo 3. Metodología para el diseño y evaluación del seguro por sequía hidrológica



**Figura 5. Etapa 2: Determinación del índice de sequía hidrológica ISH para el seguro indexado.**

La tercera etapa del diseño busca establecer los principales parámetros económicos del seguro: la indemnización recibida (€/ha), el máximo valor indemnizable (€) y el valor de la prima pura a pagar (€) para ser incluidos en diferentes tipos de contrato (Figura 6). En el desarrollo de esta etapa se tuvieron en cuenta ecuaciones descritas a continuación:

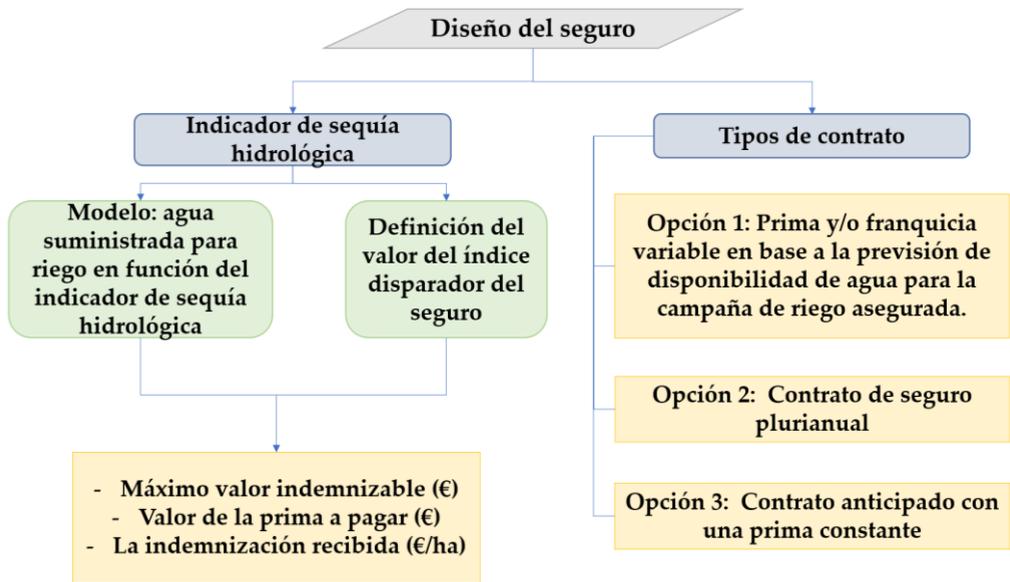
Una vez definido el Índice de sequía hidrológica en la etapa 2, se relaciona con el histórico de los suministros de agua en la comunidad de regantes ( $Wa_t$ ), para un periodo de análisis de 2005-2019, obteniendo el siguiente modelo:

$$Wa_t = f(ISH_t) \quad (7)$$

Ya definido el modelo es posible calcular la escasez de agua en la comunidad de regantes ( $Ws_t$ ) medida en  $m^3/ha$ , que es igual a la diferencia entre el agua garantizada (GWA) y el agua suministrada en el año t:

$$Ws_t = \max(GWA - Wa_t, 0) \quad (8)$$

**Capítulo 3. Metodología para el diseño y evaluación del seguro por sequía hidrológica**



**Figura 6. Etapa 3: Determinación de los parámetros del seguro en diferentes tipos de contrato.**

La indemnización recibida (€/ha) en un año  $t$  se obtiene multiplicando  $Ws_t$  por una indemnización unitaria definida en la etapa 1, que es igual al valor del agua ( $Wv$ ) en €/m<sup>3</sup>. La franquicia deducible ( $\gamma$ ) es la mínima cantidad de pérdida que puede producirse antes de que se aplique la cobertura del seguro. (International Risk Management Institute, Inc. (IRMI), 2019; Maestro et al., 2016).

$$f(x) = \begin{cases} 0, & \text{if } wa_t \geq (1 - \gamma) * GWA \\ ws_t * wv_t & \text{if } wa_t < (1 - \gamma) * GWA \end{cases} \quad (9)$$

Es decir que la indemnización se encuentra en función del umbral del índice de sequía hidrológica definido (*trigger*):

$$(1 - \gamma) * GWA = f(ISH = Umbral) \quad (10)$$

### Capítulo 3. Metodología para el diseño y evaluación del seguro por sequía hidrológica

La responsabilidad o el máximo valor indemnizable del esquema de seguros en €/ha se determina a partir de la siguiente expresión:

$$\text{Máximo valor indemnizable} = GWA * wv_t \quad (11)$$

Por último, se calcula el valor de la prima en función de la indemnización esperada, siendo  $t$  el año en el que es necesario pagar indemnización y  $T$  el número de años de análisis.

$$\text{Prima} = E(\text{Ind}_t) = \frac{1}{T} * \sum_{t=1}^{t=T} \text{Ind}_t \quad (12)$$

Estos parámetros económicos identificados se han implementado en tres opciones de contrato descritas en la Tabla 4.

**Tabla 4. Opciones de esquemas de seguros seleccionados.**

Opción de contrato	Descripción
Opción 1: Prima variable y/o franquicia variable en base a la previsión de disponibilidad de agua para la campaña de riego asegurada.	Compra del seguro con las condiciones de escasez presentadas al inicio de la temporada de riego (mes de abril), en función de dos franquicias (Estado de escasez de alerta y emergencia)
Opción 2: Contrato de seguro anual o plurianual	Se usa un índice previo a la temporada de riego, donde la prima se adapta al riesgo real asumido en el momento de la compra del seguro en virtud de una política de un año o de una política plurianual. El período de compra de pólizas se establece en el mes de octubre, previo a la temporada de riego.
Opción 3: Contrato anticipado con una prima constante	Vendiendo un contrato anticipado a una prima constante, antes de que pueda predecirse la sequía. Este busca el momento adecuado en el cual se pueda suscribir el contrato.

### **3.2. Proceso 2: Evaluación del diseño del seguro indexado por sequía hidrológica**

La evaluación del seguro se basa en la simulación como si el seguro estuviera en funcionamiento y se utilizan indicadores económico-financieros para comparar los beneficios para la comunidad de regantes con o sin contrato.

Inicialmente se debe analizar la gestión del recurso hídrico en la cuenca y estimar la posible declaración de siniestralidad o no, cuando el índice de sequía hidrológica declara un estado de escasez. Para este análisis se recomienda implementar sistemas de apoyo a la decisión (SAD) para planificación y gestión de sistemas de recursos hídricos. La simulación del funcionamiento del sistema debe incluir también las unidades de demanda (agrícolas, urbanas, industriales y caudales ecológicos), así como todas las normas y regulaciones que existen dentro de la gestión de los recursos hídricos en la cuenca.

Finalmente se determina cual es la mejor opción de seguro hidrológico para ser implementado en la comunidad de regantes. Esta selección se realiza con una validación de la sostenibilidad técnica y financiera del seguro propuesto comparando los diferentes índices de sequía hidrológica establecidos y los indicadores financieros en las diferentes opciones de seguro. A continuación, se describen algunos indicadores económico-financieros utilizados para la evaluación del seguro:

***a. Desviación estándar y pérdida del error cuadrático medio  
MRSL del Margen bruto***

El margen bruto para la comunidad de regantes se calcula teniendo en cuenta el margen bruto de cada cultivo, incluida el área

### **Capítulo 3. Metodología para el diseño y evaluación del seguro por sequía hidrológica**

---

sembrada, la prima a pagar de acuerdo con el esquema de seguro y la indemnización recibida en caso de siniestro. Las ecuaciones 13 y 14 muestran el cálculo del margen bruto:

$$MB_c = (Y_c * P_c) - [(dc_c + e_c + I_c) * Y_c] \quad (13)$$

$$MB_{IDT} = \left( \sum_{c=1}^C S_{tc} * MB_c \right) + (Ind_t - Premium) \quad (14)$$

Donde  $MB_c$  es el margen bruto por cultivo y  $MB_{IDT}$  el margen bruto total para la comunidad de regantes.  $Y_c$  y  $P_c$  son los rendimientos y los precios pagados al agricultor respectivamente,  $d_c$ ,  $e_c$  y  $I_c$  son los costes directos, costes de equipos y costes de mano de obra respectivamente.

El MRSL resulta adecuada en este contexto porque minimizar la semivarianza, en lugar de la varianza completa, es relevante, ya que los agricultores están interesados principalmente en manejar sus pérdidas a la baja. Se trata de una función simple de la semivarianza (es decir, las pérdidas) con respecto a la tendencia del margen bruto sin seguro (Adeyinka, Krishnamurti, et al., 2013; Kusuma et al., 2018; Maestro, 2016; Vedenov & Barnett, 2004a). Para su cálculo, en primer lugar, se determinan los ingresos sin el esquema de seguro ( $R_t$ ) mediante la siguiente expresión:

$$R_t = pY_t, \quad t = 1, \dots, T \quad (15)$$

Posteriormente se calculan los ingresos con el valor de la prima y la posible indemnización ( $R'_t$ )

$$R'_t = pY_t + Ind_t - Premium, \quad t = 1, \dots, T \quad (16)$$

Finalmente, las expresiones para determinar el MRSL con y sin contrato de seguro son:

$$RMSL_{sin\ seguro} = \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{t=1}^T [\max(p\bar{Y} - R_t, 0)]^2} \quad (17)$$

$$RMSL_{con\ seguro} = \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{t=1}^T [\max(p\bar{Y} - R'_t, 0)]^2} \quad (18)$$

**b. Índice de siniestralidad**

La fórmula utilizada para medir el índice de siniestralidad es la siguiente:

$$Indice\ de\ siniestralidad = \frac{\sum Siniestros\ ocurridos}{\sum Primas\ devengadas} \quad (19)$$

**c. Riesgo base**

El riesgo base se calcula a partir de la diferencia esperada entre la indemnización recibida a través del seguro ( $Ind_t$ ) y las pérdidas reales calculadas directamente con los suministros históricos de agua ( $L_t$ ) (Maestro, 2016). El riesgo base puede desglosarse en pérdida de base ( $bl$ ), que corresponde a las pérdidas probables del agricultor debidas al seguro indexado, y ganancia de base ( $bg$ ), que corresponde a las ganancias probables del agricultor debidas al seguro indexado. El riesgo de base ( $bl$ ) y ( $bg$ ) puede expresarse como porcentaje de la indemnización máxima (Zeng, 2000; Maestro et al., 2016).

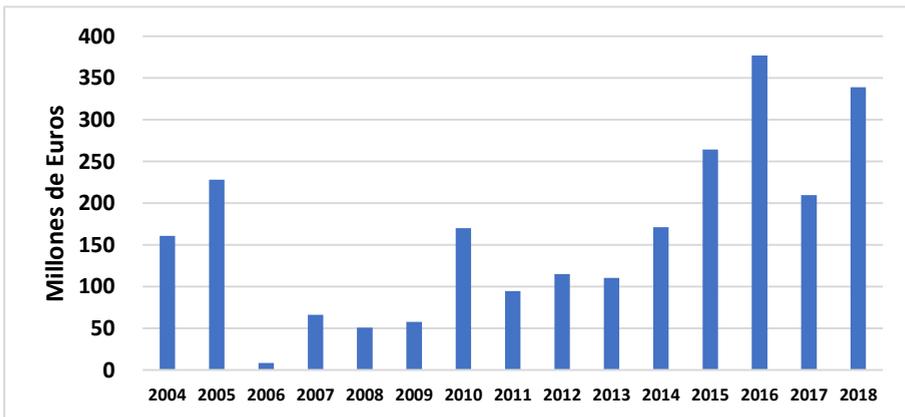
$$bl(\text{€/ha}) = \frac{1}{k} * \sum_{t=1}^{t=k} [Ind_t - L_t] \quad \forall_t | (Ind_t - L_t) < 0$$

$$bg(\text{€/ha}) = \frac{1}{k} * \sum_{t=1}^{t=k} [Ind_t - L_t] \quad \forall_t | (Ind_t - L_t) > 0$$

(20)

## 4. CASO DE ESTUDIO: SISTEMA DE EXPLOTACIÓN DEL JÚCAR.

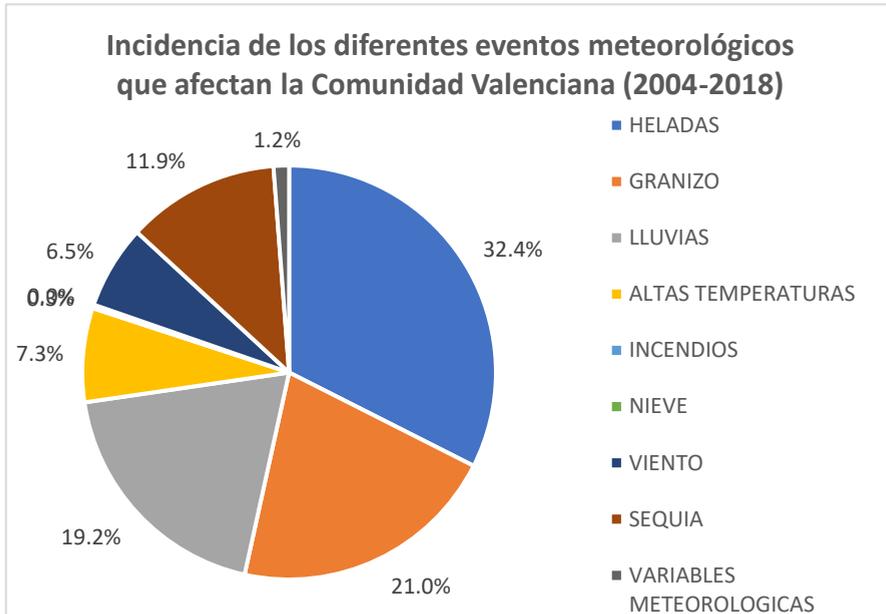
El problema de la escasez de agua es cada vez más frecuente en la agricultura de regadío en las regiones climáticas mediterráneas. En los informes del sector agrario Valenciano, elaborados por La Conselleria de Agricultura, Desarrollo Rural, Emergencia Climática y Transición Ecológica, se presentan estadísticas relativas a los seguros agrarios y a las pérdidas económicas por eventos meteorológicos. Las pérdidas económicas ocasionadas por diferentes eventos meteorológicos en los cultivos de la Comunidad Valenciana en los últimos años han pasado de 95 millones de euros en 2011, a alcanzar valores de casi 380 millones en 2016 (Generalitat Valenciana, 2020) (Figura 7).



**Figura 7. Pérdidas económicas ocasionadas por accidentes meteorológicos en la Comunidad Valenciana (2004-2018). Elaboración propia con información de (Generalitat Valenciana, 2020).**

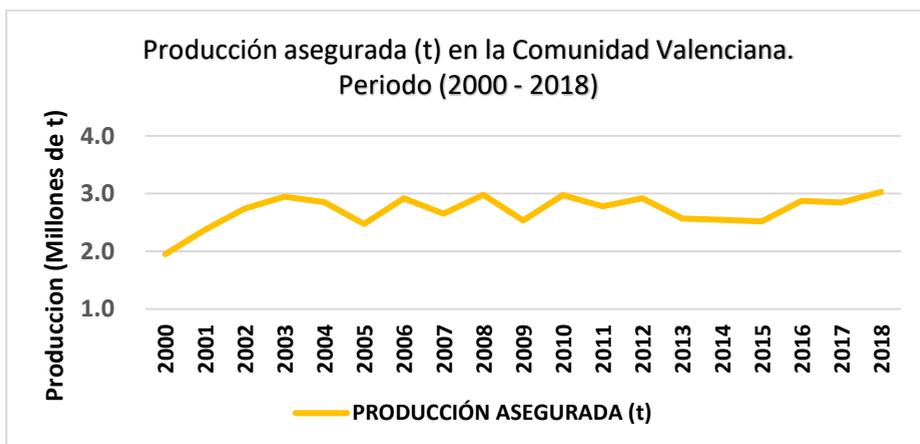
Cada evento meteorológico afecta en diferente medida los cultivos en la región, donde en el caso de la Comunidad Valenciana el evento meteorológico que más afecta los cultivos es el granizo

con un 32.4%. El impacto de los eventos de sequía se sitúa en torno al 12% (Figura 8).



**Figura 8. Incidenca de los diferentes eventos meteorológicos que afectan la producción agrícola en la Comunidad Valenciana (2004-2018). Elaboración propia con información de (Generalitat Valenciana, 2020).**

Como consecuencia, los agricultores han recurrido a los seguros convencionales para asegurar la producción de diversos cultivos, con una producción asegurada que oscila entre 2.5 y 3.0 millones de toneladas en los últimos 15 años, según informes de la Conselleria de Agricultura, Desarrollo Rural, Emergencia Climática y Transición Ecológica (Figura 9).



**Figura 9. Producción agrícola asegurada en toneladas en la comunidad valenciana (2000-2018). Fuente: Elaboración propia con información de (Generalitat Valenciana, 2020).**

La agricultura de la comunidad Valenciana depende del manejo que se le da al recurso hídrico en la Demarcación Hidrográfica del Júcar, y de aquí se ha seleccionado una comunidad de regantes en el sistema de explotación del Júcar como caso de estudio para implementar un esquema de seguro por sequía hidrológica.

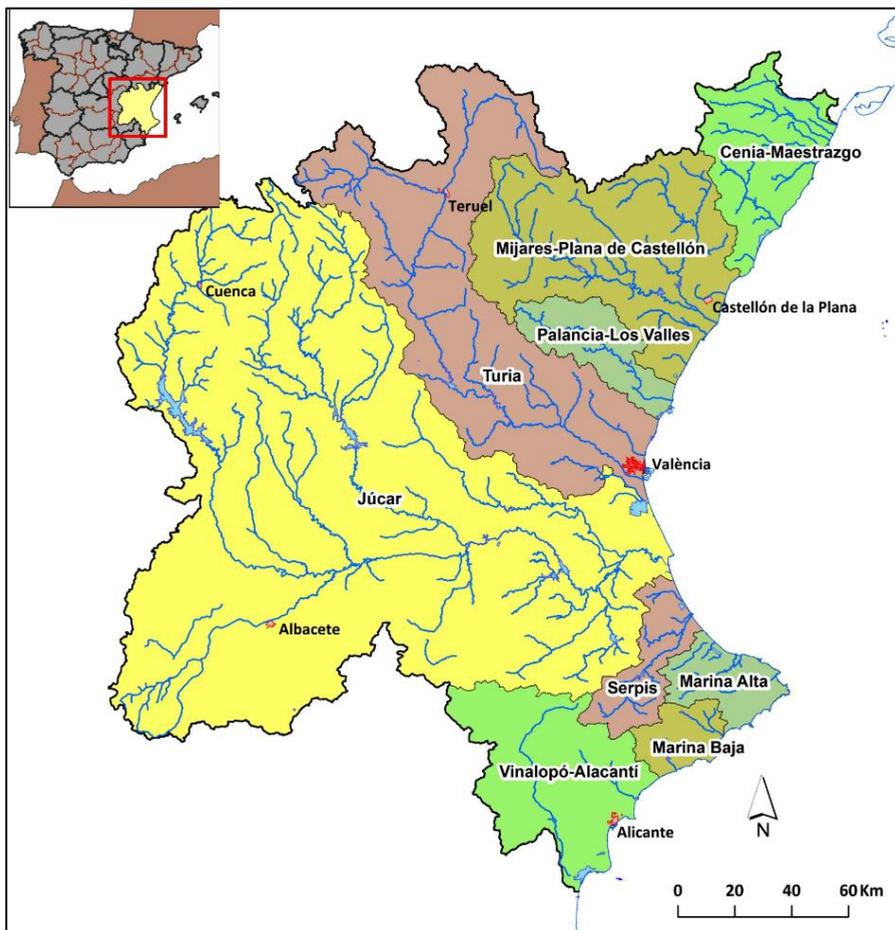
#### **4.1. Sistema de explotación del Júcar**

La Demarcación Hidrográfica del Júcar (DHJ) está conformada por 9 sistemas de explotación, como se muestra en la Figura 10, siendo el más importante el sistema de explotación del Júcar con un área de 22261 Km<sup>2</sup>.

El sistema de explotación Júcar comprende la cuenca del río Júcar y sus principales afluentes: los ríos Cabriel y Magro por la margen izquierda y los ríos Sellent y Albaida por la margen derecha. Los principales embalses del sistema son Alarcón, Contreras, Cortes, La Muela, Naranjero, Escalona, Tous, Forata, y Bellús. En este sistema

se han definido 143 masas de agua superficial con una longitud de unos 2900 km y 41 masas de agua subterránea integradas total o parcialmente (CHJ - Confederación Hidrográfica del Júcar, 2015).

Esta zona tiene un clima mediterráneo con veranos cálidos y secos e inviernos suaves. El uso del suelo predominante en el ámbito territorial de la demarcación es el de bosque y zonas seminaturales, que ocupan algo más del 50% del territorio, seguido de las zonas agrícolas de secano, que ocupan el 36% del territorio, y las zonas agrícolas de regadío con un 10%, siendo éstos los usos predominantes en las áreas costeras y en la región de la Mancha. Las zonas urbanas e industriales cubren un 3% del territorio y, por último, una pequeña parte, que apenas alcanza el 1%, está cubierta por humedales y zonas acuáticas (CHJ - Confederación Hidrográfica del Júcar, 2016).

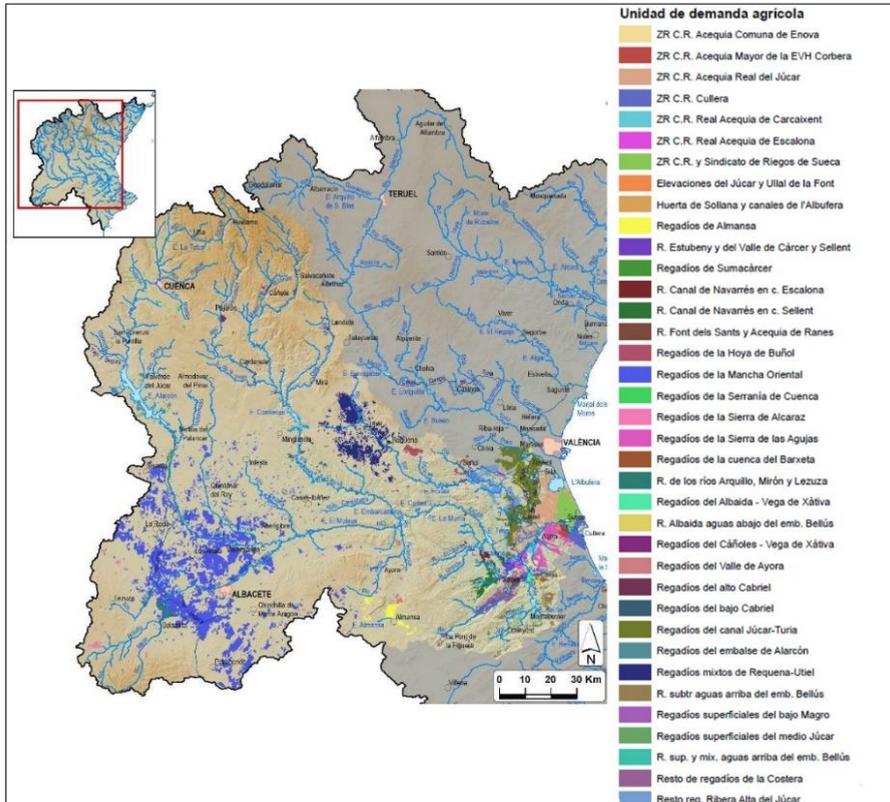


**Figura 10. Sistemas de Explotación de la demarcación hidrográfica del Júcar.**  
**Fuente: (CHJ - Confederación Hidrográfica del Júcar, 2015)**

En cuanto a las unidades de demanda agrícola –UDA- (Figura 11), se identifican 37, siendo las principales zonas de regadío los riegos tradicionales de la Ribera del Júcar en la provincia de Valencia (RTRJ), los riegos de la Mancha Oriental (RMO) y los riegos del canal Júcar-Turía (RCJT). La demanda del sector agrícola en el sistema de explotación del Júcar alcanza hasta el 90% (1350 Hm<sup>3</sup>) del total del

## Capítulo 4. Caso de estudio: Cuenca del Júcar

sistema, seguida de la demanda urbana con 92.9 Hm<sup>3</sup> (CHJ - Confederación Hidrográfica del Júcar, 2018) .



**Figura 11. Unidades de Demanda Agrícola del Sistema Explotación Júcar. Fuente: (CHJ - Confederación Hidrográfica del Júcar, 2015)**

La única demanda industrial incluida en el modelo de simulación del sistema de explotación Júcar es la correspondiente a la central nuclear de Cofrentes (Tabla 5).

**Tabla 5. Valores de demanda media anual.**

<b>Tipo</b>	<b>Unidad</b>	<b>Demanda (Hm<sup>3</sup>/año)</b>
Urbana	Albacete	16.9
Industrial	C.N. Cofrentes	20.2
Agrícola	Sustitución Mancha	24.0
Agrícola	Ac Real y Antella	214.1
Agrícola	Escalona	25.4
Agrícola	Carcagente	12.9
Agrícola	Sueca	141.7
Agrícola	Cuatro Pueblos	18.8
Agrícola	Canal J-T	94.3
Agrícola	Zona Albacete - Mancha Oriental	336.7
Urbana	Valencia	106.6
Agrícola	Cullera	62.8
Urbana	Sagunto	7.7

#### **4.1.1. Reglas de gestión**

El sistema cuenta con unas normas de explotación que se encuentran alineadas con el Plan Especial de Sequía PES (2018). Entre ellas se destacan las siguientes:

- a. La gestión de los recursos superficiales se basará en los volúmenes almacenados en los embalses de Alarcón, Conteras, Tous y Bellús, además de las aportaciones y el estado cuantitativo de las masas de agua subterránea;

- b. Priorizar las sueltas de los embalses del tramo bajo (Tous y Bellús) sobre los de la cuenca alta (Alarcón y Contreras);
- c. La gestión del sistema aplicará diferentes restricciones, así como el uso de recursos extraordinarios, en función de la fase en que se encuentre el sistema;
- d. Las normas deberán respetar la preferencia de los abastecimientos urbanos y tener en cuenta las distintas asignaciones en función de su prioridad; y
- e. Cumplir el Convenio sobre el embalse de Alarcón, firmado el 23 de julio de 2001, ente el Ministerio de Medio Ambiente y la Unidad Sindical de Usuarios del Júcar, así como el Plan Anual de Explotación de la Masa de Agua Subterránea de la Mancha Oriental, y lo establecido en el vigente Plan Especial de Alerta y Eventual Sequía de la Demarcación Hidrográfica del Júcar.

#### **4.1.2. Aportaciones**

Alarcón y Contreras representan las aportaciones en los tramos de cabecera aguas arriba de los embalses de Alarcón y Contreras. Las aportaciones de Madrigueras y Molinar representan las aportaciones en el tramo comprendido entre Alarcón y Molinar. La aportación de Sueca representa las aportaciones de los ríos Sellent y Verde, los tramos finales de los ríos Magro y Albaida, así como las aportaciones de la propia subcuenca del río Júcar, aguas abajo del embalse de Tous. Respecto a las aportaciones de los ríos Albaida y Magro (Bellús y Forata), se ha optado por estimar únicamente su incidencia en la aportación en régimen alterado en el tramo bajo del Júcar. La Tabla 6 muestra los valores medios de aportación anual.

**Tabla 6. Aportaciones intermedias en el sistema de explotación del Júcar.**

<b>Código</b>	<b>Descripción</b>	<b>Hm<sup>3</sup>/año</b>
Alarcón	Embalse de Alarcón	287.5
Molinar	Embalse del Molinar	47.1
Contreras	Embalse de Contreras	253.3
Tous	Embalse de Tous	168.1
Bellús	Embalse de Bellús	34.7
Forata	Embalse de Forata	9.5
Sueca	Aportación en el azud de Sueca sin el río Magro ni el Albaida hasta Bellús	242.9
Madriqueras	Madriqueras	192.8

## **4.2. Comunidad de regantes de la Real Acequia de Escalona - RAE**

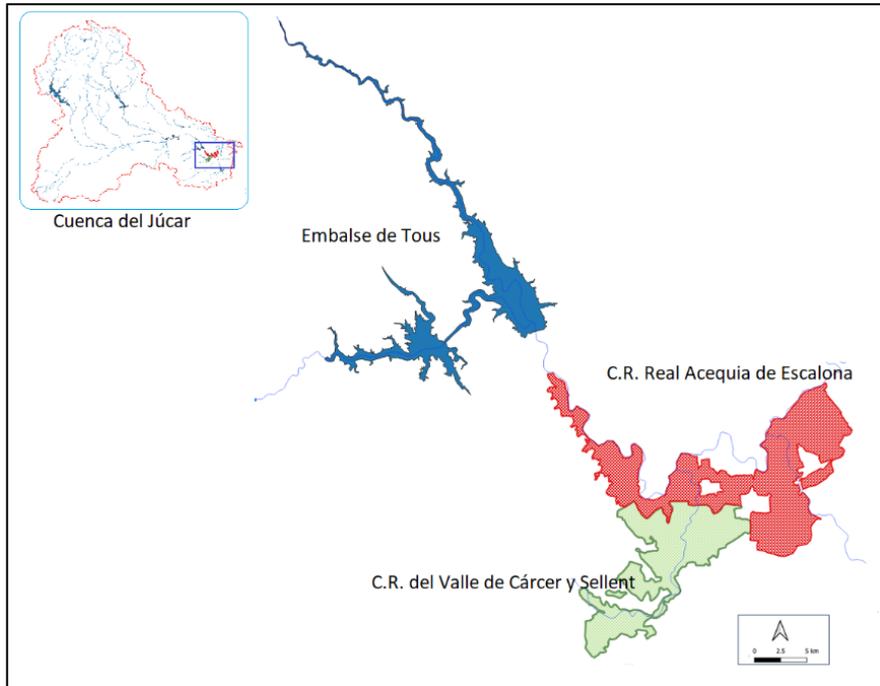
El diseño y evaluación del seguro por sequía hidrológica se realizó en la comunidad de regantes de la Real Acequia de Escalona, ubicada en la cuenca del Júcar. La conducción del agua se realiza a través de un canal de riego (o acequia) de 23 km que trae agua del río Júcar desde la presa situada en el término municipal de Tous, aguas abajo del embalse de Tous, hasta el término de Villanueva de Castellón. La Real Acequia de Escalona riega un total de 2700 ha en los términos municipales de Sumacárcer, Cárcer, Cotes, Alcántera, Beneixida y Castelló de la Ribera (Vva Castellón), de las cuales unas 1900 ha pertenecen a la Comunidad de Regantes de Escalona<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> Tomado de: <https://sequiaescalona.org/quienes-somos>

#### **Capítulo 4. Caso de estudio: Cuenca del Júcar**

Son 4 las comunidades de regantes que reciben agua de la acequia (Figura 12): C.R. Real Acequia de Escalona (66.07%), C.R. Sumacárcer (12.69%), C.R. del Valle de Cárcer y Sellent (12.58%) y C.R. La Defensa del Derecho al Riego de las Tierras del Valle de Cárcer (8.66%).



**Figura 12. Plano área de influencia Real Acequia de Escalona (RAE)**

Alrededor del 90% del área se encuentra sembrada con cítricos. Otros cultivos importantes son las hortalizas y otros frutales. Las comunidades de regantes en la RAE tienen características particulares cuyo análisis puede ser muy útil para el diseño de seguros; por ejemplo, estas comunidades tienen el derecho a gestionar y distribuir el agua que se les asigna, así como un estatuto jurídico que les confiere la gestión económica del agua en la zona.

## **5. INDEMNIZACIÓN UNITARIA A PARTIR DE LA EVALUACIÓN ECONÓMICA DEL VALOR DEL AGUA EN ESCENARIOS DE ESCASEZ HÍDRICA**

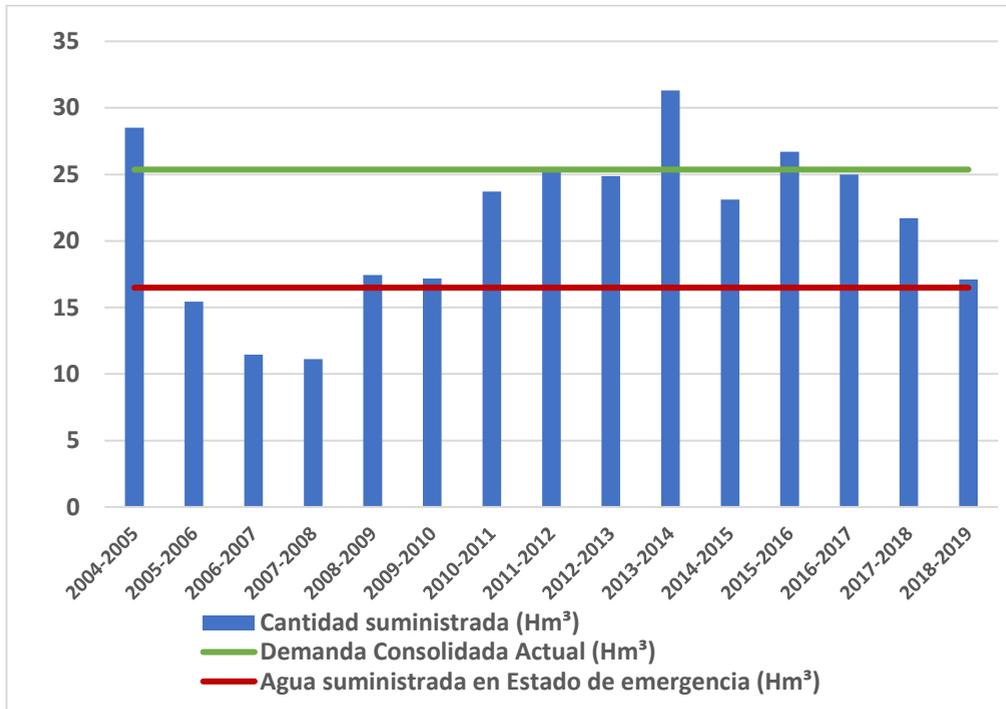
Cada Unidad de Demanda Agrícola – UDA tiene establecidas, dentro del Plan Hidrológico de la Cuenca, unas asignaciones mensuales de agua calculadas a partir de la demanda bruta teórica de los cultivos y las áreas sembradas. Estas asignaciones también se basan en la concesión histórica.

El análisis inicia con la comparación del agua suministrada a la UDA desde el periodo 2004-2005 hasta la actualidad con la demanda consolidada, para identificar los años de escasez hídrica. La Real Acequia de Escalona tiene una demanda bruta de 25.36 Hm<sup>3</sup>/año establecida en el Plan Hidrológico del Júcar. Con la información de las descargas o cantidad histórica de agua suministrada a la Real Acequia de Escalona<sup>2</sup> (Figura 13), se ha comprobado que en 9 de los 15 años analizados, el volumen de agua suministrado ha sido inferior a la demanda bruta teórica establecida para la acequia, lo que podría deberse no solo a periodos de escasez hídrica, sino también a decisiones tomadas por los planificadores de la CHJ, o al proceso de modernización de regadíos, que implica una mayor eficiencia de aplicación, reduciendo el volumen bruto suministrado.

---

<sup>2</sup> Tomada del Sistema de Información del agua de la Confederación Hidrográfica del Júcar SIA. [Descarga de Datos y Cartografía \(chj.es\)](http://chj.es)

**Capítulo 5. Resultados: Indemnización unitaria a partir de la evaluación económica del valor del agua en escenarios de escasez hídrica**



**Figura 13. Cantidad de agua suministrada en la Real Acequia de Escalona.**  
Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de (Confederación Hidrográfica del Júcar, 2020).

Igualmente, se realizó una comparación con el volumen teórico de agua que se suministraría a la comunidad de regantes en caso de estado de emergencia por sequía, establecido en el Plan Especial de Sequía PES 2018. Este indica que, en un periodo de emergencia por escasez hídrica, el volumen de agua suministrado en las comunidades de regantes se reduciría hasta en un 35%; es decir, para la comunidad de regantes de Escalona en tiempos de emergencia se suministraría alrededor de 16.5 Hm<sup>3</sup>/año. Esto significa que, en 3 de esos 9 años de déficit, se entregó agua por debajo de la cantidad establecida en el plan.

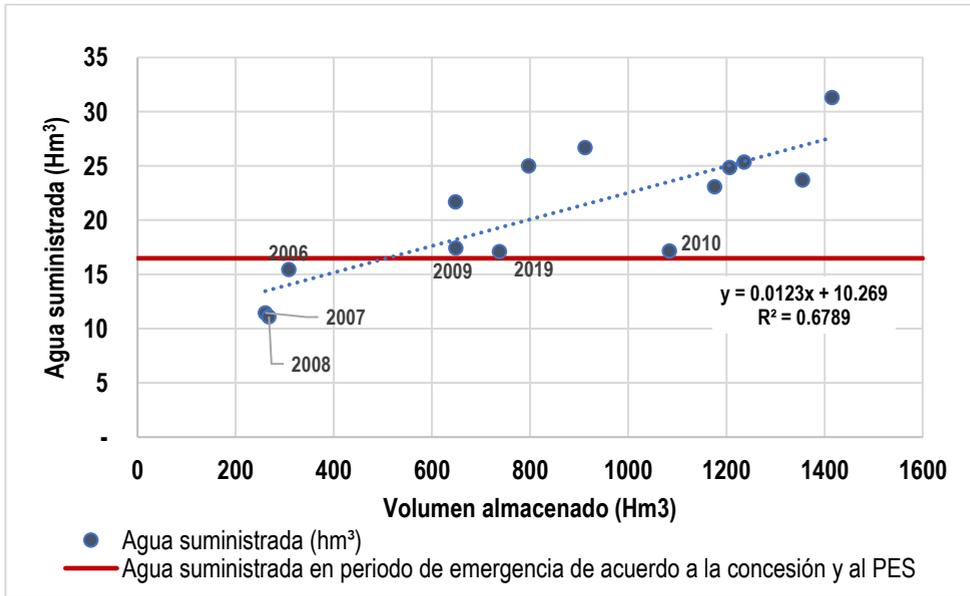
## ***Capítulo 5. Resultados: Indemnización unitaria a partir de la evaluación económica del valor del agua en escenarios de escasez hídrica***

---

Otro análisis que permite identificar los motivos por los que se suministra menos agua de la requerida a la UDA está relacionado con el almacenamiento en los principales embalses que abastecen las comunidades de regantes de la CHJ durante el periodo en el que empieza la temporada de riego.

La Figura 14 muestra la relación entre el volumen almacenado a finales de abril en los tres principales embalses que regulan el abastecimiento de agua en la cuenca del Júcar y el agua suministrada cada año a la UDA de Escalona. La línea roja representa de nuevo el agua mínima garantizada en épocas de escasez, que es de 16.5 Hm<sup>3</sup>. Se observa la relación directa entre el agua almacenada y el agua suministrada para riego. Además, en el periodo de análisis 2006-2019 al menos en 3 años se ha suministrado agua por debajo de lo establecido para periodos de escasez (2006-2008), reflejando una sequía hidrológica. Se puede observar, además que, en los años 2009 y 2019, a pesar de contar con un mayor volumen en los embalses, la cantidad de agua suministrada también ha sido cercana al estado de escasez de emergencia, generando un impacto económico en la comunidad de regantes. En el año 2010, se entregó un bajo volumen de agua a la comunidad de regantes de Escalona, a pesar de contar con una alta capacidad en los embalses, lo que podría deberse a decisiones institucionales y de gestión en la cuenca.

**Capítulo 5. Resultados: Indemnización unitaria a partir de la evaluación económica del valor del agua en escenarios de escasez hídrica**



**Figura 14. Relación del volumen de agua almacenada en el mes de abril vs agua anual suministrada a la Real Acequia de Escalona.**

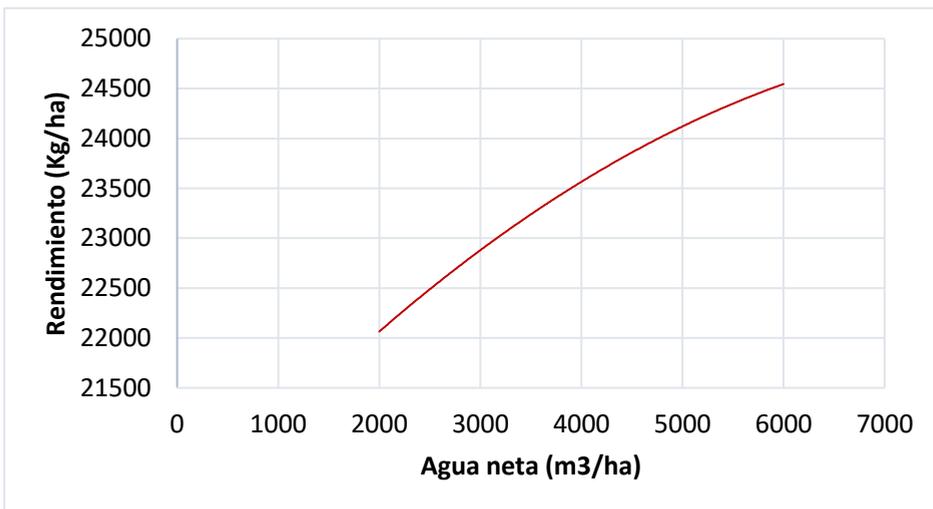
Una vez identificados los periodos de escasez hídrica, el siguiente paso es determinar el impacto económico de la sequía en la comunidad de regantes.

Para cuantificar este impacto económico, lo primero es tener en cuenta las medidas de gestión establecidas en el Plan Especial de Sequía de la Demarcación Hidrográfica del Júcar, que reducen el suministro de agua en la acequia hasta un 35% cuando se alcanza el estado de emergencia (CHJ - Confederación Hidrográfica del Júcar, 2018). Lo segundo es analizar el impacto en el rendimiento de los cultivos cuando se reduce el agua aplicada. Para ello, se tiene en cuenta el trabajo adelantado por López-Nicolas et al. (2017), quienes realizaron una simulación del cambio en el rendimiento de cítricos asociado a la disponibilidad del recurso hídrico en la CHJ

***Capítulo 5. Resultados: Indemnización unitaria a partir de la evaluación económica del valor del agua en escenarios de escasez hídrica***

(riego deficitario), obteniendo una relación entre el rendimiento y el riego neto aplicado. Para ello, López-Nicolas et al. (2017) toman como base la ecuación de respuesta del cultivo en términos de variación de rendimiento y requerimientos hídricos en diferentes etapas fenológicas establecida por (Doorenbos & Kassam, 1979), y a partir de ella desarrollaron un modelo de optimización en GAMS cuya función objetivo es maximizar el rendimiento para diferentes valores de riego deficitario.

De esta manera, se obtiene una nube de puntos (Figura 15) del rendimiento con el agua de riego que permite establecer la relación matemática entre ambas variables.



**Figura 15. Relación entre agua aplicada y el rendimiento en el caso de cítricos (Volumen neto).Fuente: (López Nicolás, 2017)**

***Capítulo 5. Resultados: Indemnización unitaria a partir de la evaluación económica del valor del agua en escenarios de escasez hídrica***

---

La ecuación (21) es la obtenida por López-Nicolas et al. (2017), donde  $Y$  es el rendimiento del cultivo de cítricos expresado en Kg/ha y  $In$  es la lámina neta de riego aplicada al cultivo en  $m^3/ha$ .

$$Y \left( \frac{Kg}{ha} \right) = -0.00000003In^3 + 0.0003In^2 - 0.0868In + 21495 \quad (21)$$

En la (Tabla 7) se muestra el rendimiento del cultivo de cítricos obtenido para cada uno de los estados de escasez. Aquí se puede observar que para la Acequia de Escalona se establece una demanda neta en condiciones normales de  $4107 m^3/ha$ -año, por lo que una reducción del 35% en el agua neta aplicada reduce el rendimiento en unos  $1290 Kg/ha$  (equivalente al 5.3%), valor cercano al reportado por (Castel & Buj, 1990; Vélez et al., 2012) en naranjo "Salustiana", quienes encontraron que el déficit hídrico durante la fase de floración y cuajado del fruto ocasiona un aumento de la caída de flores y frutos pequeños, condicionando el número de frutos y reduciendo los volúmenes de producción. También hallaron que con aportes del 90% y 60% de las necesidades de riego, la producción disminuyó en un 5% y un 15%, respectivamente.

**Capítulo 5. Resultados: Indemnización unitaria a partir de la evaluación económica del valor del agua en escenarios de escasez hídrica**

---

**Tabla 7. Relación de la dotación bruta en cada uno de los estados de escasez, en función de los porcentajes de reducción y el modelo de López, N 2017.**

Porcentajes de reducción	Normalidad	Prealerta	Alerta	Emergencia
	0	15%	25%	35%
Agua suministrada (Hm <sup>3</sup> /año)	25.4	21.6	19.0	16.5
Dotación neta (m <sup>3</sup> /ha. año) Cítricos	4107	3491	3080	2670
Rendimiento con modelo (Agua neta) (Kg/ha)	24121	23572	23198	22831
Dotación Bruta (m <sup>3</sup> /ha. año) Cítricos	6246	5309	4684	4060

Para estimar el valor del agua debido a la escasez en €/m<sup>3</sup> de agua, se han utilizado: registros históricos de producción, área sembrada, rendimientos, precios de venta y costes de producción desde 2006 hasta 2019 en la Comunidad Valenciana (Anexo 1). Teniendo en cuenta que existen varias fuentes de información, se decidió trabajar con la información presentada en los informes del sector agrario valenciano (Generalitat Valenciana, 2020).

A partir de las medidas establecidas en el PES de hasta un 35% de reducción del suministro de agua en la Real Acequia Escalona (Confederación Hidrográfica del Júcar, 2018), y de que las compañías aseguradoras actúan en función de un único disparador o trigger, se decidió analizar dos escenarios en función del índice de estado de escasez en la cuenca: uno de normalidad cuando el  $IEE_{CHJ} > 0.50$  y el segundo en estado de emergencia cuando  $IEE_{CHJ} < 0.15$ .

***Capítulo 5. Resultados: Indemnización unitaria a partir de la evaluación económica del valor del agua en escenarios de escasez hídrica***

La Tabla 8 muestra el valor del agua expresado en €/m<sup>3</sup> para el estado de emergencia, donde se encuentra un valor de 0.09 €/m<sup>3</sup>. Este valor de 0.09 €/m<sup>3</sup> se establece como el valor de indemnización unitaria a recibir independientemente de la asignación de agua suministrada y refleja el valor unitario de lo que el agricultor pierde económicamente en su producción cuando deja de recibir agua para riego debido a un escenario de escasez hídrica.

**Tabla 8. Cálculo del valor del agua por Hm<sup>3</sup> teniendo en cuenta el valor de la producción en la Real Acequia de Escalona.**

Escenario	IEE	Wa (Hm <sup>3</sup> )	VP (M€) (Total)	VCI (M€) (total)	VNPi (M€)	VNPi (€/ha)	Wvi (€/m <sup>3</sup> )
Normalidad	0.66	16.7	14.4	0.78	13.62	5102	
Emergencia	0.12	10.8	13.6	0.51	13.10	4916	0.09

## **6. ÍNDICE DE SEQUÍA HIDROLÓGICA ISH**

Definir un índice que garantice una alta correlación con la cuantificación real de los daños en los cultivos, y que esté completamente alineado con los procedimientos de gestión de la sequía a nivel de cuenca es el propósito de este capítulo. Es por eso que se calculan tres indicadores de sequía hidrológica a nivel de cuenca, tomando como base para su cálculo las variables representativas de precipitación, niveles piezométricos, aforos y volúmenes embalsados, los cuales serán utilizados para los diferentes esquemas de diseño del seguro.

Para el diseño del esquema de seguro por sequía hidrológica se propuso utilizar como indicador principal el Índice de Estado de Escasez – IEE - de la Unidad Territorial UTE del Júcar, establecido en el Plan Especial de Sequía de la Demarcación Hidrográfica del Júcar (PES 2018), ya que reúne varias de las características esenciales para formar parte del seguro indexado y además recoge las reglas de operación o restricciones propuestas cuando se declara el estado de alerta o emergencia en la cuenca.

Además, se definieron y evaluaron los índices de sequía hidrológica  $I_{SH1}$  y  $I_{SH2}$ , lo que permitió establecer comparaciones entre ellos para determinar la importancia de seleccionar el índice adecuado para reducir los problemas de riesgo moral, selección adversa y riesgo base que surgen en este tipo de seguros indexados. La Tabla 9 muestra las tres alternativas con sus variables y modelo correspondiente.

**Tabla 9. Índices de sequía hidrológica ISH propuestos para el diseño del seguro indexado.**

Índices	VARIABLES	Modelo
<b>IEE CHJ</b>	10 variables representativas (precipitación (1), niveles piezométricos (3), aforos (4), y volúmenes embalsados (2))	$IEE = \frac{1}{2} \left[ 1 + \frac{V_i - V_{med}}{V_{p95} - V_{med}} \right] - Si \quad V_i \geq V_{med}$ $IEE = \frac{1}{2} \left[ \frac{V_i - V_{p5}}{2(V_{med} - V_{p5})} \right] - Si \quad V_i < V_{med}$
<b>ISH1</b>	Aforos	Utilizando análisis de correlaciones y técnicas de inteligencia artificial (Boosted Regression Trees BRT), se seleccionan las variables más representativas que permitan modelar el Índice.
<b>ISH2</b>	Almacenamiento de los embalses que regulan la cuenca, Aforos entrada y salidas de los embalses, evaporación.	$ISH2_{t(aux)} = \text{Volumen}_{\text{Octubre } t-1} + \sum_{m=\text{noviembre } t-1}^{m=\text{abril } t} \text{Entradas}_m$ $- \sum_{m=\text{octubre } t-1}^{m=\text{abril } t} \text{Salidas}_m - \sum_{m=\text{octubre } t-1}^{m=\text{abril } t} \text{Evaporación}$

### 6.1. Índice de estado de escasez IEE<sub>CHJ</sub>

De acuerdo con el Plan Especial de Sequía (CHJ - Confederación Hidrográfica del Júcar, 2018) el indicador de escasez se estableció en función de 10 variables representativas organizadas en 4 categorías: precipitación (1), niveles piezométricos (3), aforos (4), y volúmenes embalsados (2). Para su cálculo se procede a la estacionalización de todas las variables con el fin de filtrar la componente estacional y evitar que el cálculo del indicador en un

mes determinado esté condicionado por si ese mes es habitualmente lluvioso o seco.

El índice se obtiene a partir del reescalado de las variables seleccionadas, cuyo fin es homogeneizar en un valor numérico adimensional capaz de cuantificar la situación actual respecto a la proximidad o gravedad de una escasez, y permitir la comparación de los distintos indicadores. La definición de la expresión del índice de estado es la siguiente:

$$IEE = \frac{1}{2} \left[ 1 + \frac{V_i - V_{med}}{V_{p95} - V_{med}} \right] - Si \quad V_i \geq V_{med} \quad (22)$$

$$IEE = \frac{1}{2} \left[ 1 + \frac{V_i - V_{med}}{V_{p95} - V_{med}} \right] - Si \quad V_i \geq V_{med} \quad (23)$$

Donde  $V_i$  es el valor de la variable estacionalizada en el mes  $i$  de seguimiento y  $V_{med}$ ,  $V_{p95}$  y  $V_{p5}$  son los valores medios, percentil 95 y percentil 5 de la serie de referencia, que en este caso va de 1980 a 2012, permitiendo obtener el índice de estado de cada variable. El rango de valores del índice de estado va de 0 a 1 y permite clasificar la situación de escasez en cuatro niveles: normalidad ( $IEE > 0.50$ ), prealerta ( $0.50 > IEE > 0.30$ ), alerta ( $0.50 > IEE > 0.30$ ) y emergencia ( $IEE < 0.15$ ). Los estados de prealerta y alerta indican una escasez de moderada a grave, mientras que el estado de emergencia indica una escasez grave.

Finalmente, y siguiendo el criterio de que cada UTE tenga establecido un único indicador, se combinan y ponderan las diferentes variables utilizadas en una misma unidad territorial. Este índice permite analizar cuándo y con qué frecuencia se produce la escasez de agua en la cuenca y el impacto que tiene sobre una comunidad de regantes.

## Capítulo 6. Resultados: Índice de sequía hidrológica

**Tabla 10. Coeficientes de ponderación de los indicadores de estado de escasez (IEE) de la UTE Júcar. Fuente: (CHJ - Confederación Hidrográfica del Júcar, 2018)**

UTE 5 - JÚCAR				
No	Código	Nombre indicador	Descripción de la variable escogida	Coef. En la UTE
1	EA03	Estación foronómica 08032 Cuenca	Promedio de las aportaciones en los últimos tres meses	0.23
2	EA04	Estación foronómica 08090 Pajaroncillo	Promedio de las aportaciones en los últimos tres meses	0.2
3	PZ11	Piezómetro 08.24.005 Utiel	Medida piezométrica representativa del mes	0.03
4	EA05	Estación foronómica 08138 Balazote	Promedio de las aportaciones en los últimos tres meses	0.03
5	EA06	Estaciones foronómicas 08144 y 08036	$\Delta$ (promedio de las aportaciones en últimos tres meses)	0.03
6	PZ12	Piezómetro 08.29.053 Cenizate	Medida piezométrica representativa del mes	0.03
7	VE06	Volumen en Forata	Volumen embalsado a principio de mes	0.03
8	PL03	Pluviómetros Embalse de Tous	Precipitación acumulada de los 12 meses anteriores	0.03
9	VE07	Volumen en Alarcón, Contreras y Tous	Volumen conjunto embalsado a principio de mes	0.36
10	PZ13	Piezómetro 08.28.007 Montesa	Medida piezométrica representativa del mes	0.03

## Capítulo 6. Resultados: Índice de sequía hidrológica

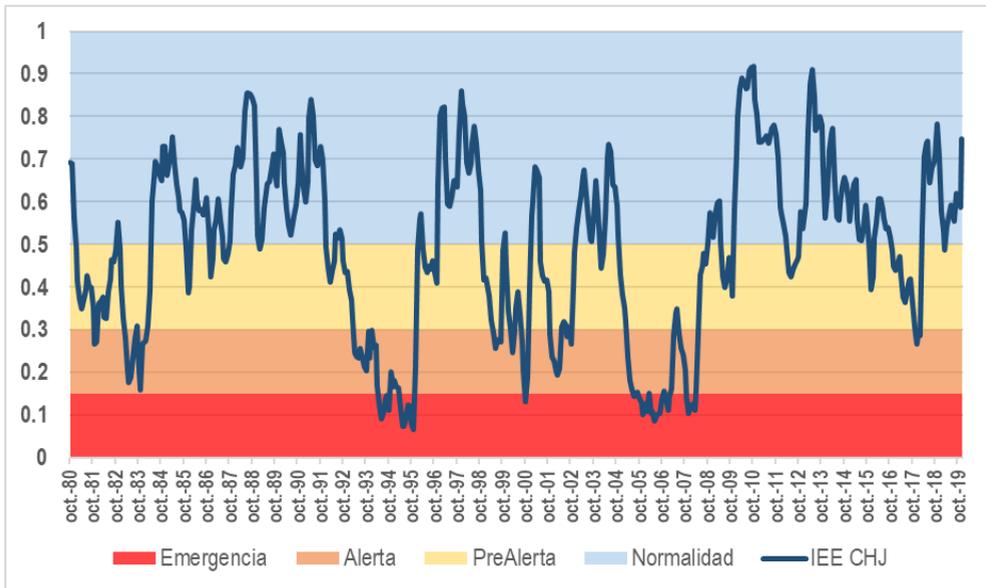
La Tabla 10 muestra la lista de variables consideradas y la Figura 16 la ubicación de las estaciones de medición.



**Figura 16. Ubicación de los indicadores de escasez en la UTE Júcar. Tomado (CHJ - Confederación Hidrográfica del Júcar, 2018).**

La Figura 17 muestra el IEE calculado (periodo 1980-2019) con las variables establecidas por la Confederación Hidrológica del Júcar y la categoría de escasez. Según reportes del PES (2018), los IEE reflejan todos los periodos de sequía identificados: la sequía de 1982/83 hasta 1985/86, seguida de un periodo claramente húmedo entre 1987/88 y 1990/91; la sequía de 1991/92-1994/95, con

algunos años más lluviosos a continuación, pero no tanto como el periodo húmedo anterior, lo que provocó que los años 1997/98 - 2000/01, sin ser especialmente secos, dieran como resultado valores incluso de emergencia en el IEE; de nuevo años lluviosos, aunque no en exceso, seguidos de la sequía de 2004/05 a 2007/08, que sin ser la de menores precipitaciones, fue una de las más severas en el sistema Júcar (como se puede comprobar a partir de la serie de valores en emergencia en el IEE) y a principios del año 2018 se identifica una sequía.



**Figura 17. IEE<sub>CHJ</sub> calculado (periodo 1980-2019) con las variables establecidas por la Confederación Hidrológica del Júcar.**

Del mismo modo, la declaración del estado de escasez hídrica en la CHJ no depende de un único valor en un índice, existen unas condiciones establecidas en el PES (2018), que se resumen en la Tabla 11. Por ejemplo, para declarar el estado de emergencia, el IEE debe estar por debajo de 0.15 durante al menos 2 meses

consecutivos, y para salir del estado de emergencia, el IEE debe estar entre 0.30 a 0.50 durante al menos 2 meses consecutivos, o 6 (seis) meses consecutivos con valores entre 0.15 y 0.30.

**Tabla 11. Condiciones de entrada y salida de los escenarios de escasez en la Cuenca del Júcar. Fuente: (CHJ - Confederación Hidrográfica del Júcar, 2018).**

	Valores del Índice de Estado de Escasez			
	Entradas a los escenarios		Salidas de los escenarios	
	Durante	Condición	Condición	Escenario de Salida
Normalidad	-	$\geq 0.50$	-	
Prealerta	3 meses consecutivos	0.5 - 0.3	3 meses consecutivos con $le \geq 0.50$	Normalidad
Alerta	2 meses consecutivos	0.3 - 0.15	2 meses consecutivos con $le \geq 0.50$ 6 meses consecutivos con $le [0.5-0.3]$	Prealerta
Emergencia	2 meses consecutivos	$< 0.15$	2 meses consecutivos con $le [0.5-0.3]$ 6 meses consecutivos con $le [0.3-0.15]$	Alerta

## 6.2. Índice de sequía hidrológica ISH1

En el caso del ISH1 se toman como base las variables monitoreadas en la cuenca y se seleccionan las variables más influyentes y aquellas que, por su propia naturaleza, no pueden ser manipuladas, para garantizar su fiabilidad y evitar el riesgo moral que puede suponer este esquema de seguro. En primer lugar, se utiliza una matriz de correlación para explicar cómo se relacionan cada una de las variables entre sí y con el valor del Índice de sequía; en segundo lugar, se utilizan técnicas de inteligencia artificial como *Boosted Regression Trees* (BRT) para seleccionar las variables más representativas que permitan reproducir el ISH. La metodología BRT es un tipo de técnica iterativa que intenta minimizar los errores introduciendo nuevos modelos basados en los errores de

iteraciones anteriores. En particular, se utiliza con bastante éxito en el campo de los problemas de clasificación. Entre los distintos métodos que utilizan *boosting*, los más comunes son *AdaBoost*, *gradient boosting* y *stochastic gradient boosting*. Estos métodos utilizan diferentes modelos que se agregan, el resultado es un modelo final con una capacidad predictiva superior a la de los modelos utilizados individualmente (Campillo et al., 2015; Chambers & Dinsmore, 2015).

BRT crea múltiples copias de los datos de la muestra mediante la técnica *bootstrap*, de modo que ajusta un árbol de decisión distinto para cada copia y, a continuación, desarrolla un único modelo de predicción mediante la combinación de todos estos árboles. Los árboles se crean secuencialmente y, en cada iteración del algoritmo, el peso de las observaciones se ajusta según la capacidad predictiva de la muestra. En *stochastic gradient boosting*, la construcción de cada árbol de decisión depende en gran medida de los árboles previos que ya se hayan construido (Hastie et al., 2009; Campillo et al., 2015). Todos los modelos se han construido mediante la aplicación informática R.

La Tabla 12 muestra que las variables con mayor correlación con el IEE corresponden a los aforos realizados en las estaciones foronómicas (Cuenca, Pajaroncillo, Balazote) y a la suma del volumen embalsado en Contreras, Alarcón y Tous.

**Capítulo 6. Resultados: Índice de sequía hidrológica**

**Tabla 12. Matriz de correlación variables utilizadas para el cálculo del indicador de estado de escasez (IEE) de la UTE Júcar. Fuente: Elaboración propia**

	Cuenca	Forata	Montesa	Balazote	Cenizate	Utiel	08036-08144	Pajaroncillo	Vol ACT	Pluv Tous	IEE
Cuenca	1.00	0.14	0.14	0.47	-0.03	0.37	0.14	0.90	0.34	0.13	0.56
Forata	0.14	1.00	0.51	0.12	0.40	0.25	0.03	0.30	0.29	0.45	0.39
Montesa	0.14	0.51	1.00	0.25	0.51	0.14	0.25	0.17	0.18	0.15	0.20
Balazote	0.47	0.12	0.25	1.00	-0.09	0.22	0.08	0.49	0.65	0.13	0.51
Cenizate	-0.03	0.40	0.51	-0.09	1.00	0.18	0.37	-0.03	0.06	-0.05	0.15
Utiel	0.37	0.25	0.14	0.22	0.18	1.00	0.30	0.41	0.18	0.18	0.36
08036 - 08144	0.14	0.03	0.25	0.08	0.37	0.30	1.00	0.16	0.14	-0.06	0.25
Pajaroncillo	0.90	0.30	0.17	0.49	-0.03	0.41	0.16	1.00	0.42	0.29	0.66
Vol ACT	0.34	0.29	0.18	0.65	0.06	0.18	0.14	0.42	1.00	0.20	0.76
Pluv Tous	0.13	0.45	0.15	0.13	-0.05	0.18	-0.06	0.29	0.20	1.00	0.40
IEE	0.56	0.39	0.20	0.51	0.15	0.36	0.25	0.66	0.76	0.40	1.00

## Capítulo 6. Resultados: Índice de sequía hidrológica

---

A partir de la técnica de BRT, las variables que generan más información relativa para el cálculo del Índice de Sequía son los volúmenes en los embalses y la estación foronómica de Pajaroncillo (Tabla 13).

**Tabla 13. Información relativa de cada una de las variables o indicadores parciales del IEE en la UTE del Júcar a partir de la técnica BRT**

Estaciones	Información relativa de cada variable (%)
Volumen en Alarcón, Contreras y Tous	46.78
Estación foronómica 08090 Pajaroncillo	24.83
Pluviómetros Embalse de Tous	4.75
Volumen en Forata	4.42
Estación foronómica 08032 Cuenca	3.76
Estación foronómica 08138 Balazote	3.45
Piezómetro 08.29.053 Cenizate	3.33
Piezómetro 08.28.007 Montesa	3.25
Estaciones foronómicas 08144 y 08036	3.02
Piezómetro 08.24.005 Utiel	2.41

Cruzando la información de la matriz de correlaciones y la técnica BRT, se propone calcular el índice de sequía hidrológica ISH1 a partir de las aportaciones de agua a cada uno de los embalses de Alarcón y Contreras y la influencia del recurso hídrico en la Mancha Oriental, es decir, las aportaciones medidas en las siguientes estaciones:

- EA03.- Estación foronómica 08032 Cuenca (aguas arriba del embalse de Alarcón)

## **Capítulo 6. Resultados: Índice de sequía hidrológica**

---

- EA04.- Estación foronómica 08090 Pajaroncillo (aguas arriba del embalse de contreras)
- EA05.- Estación foronómica 08138 Balazote (aforo caudal río Arquillo en la Mancha Oriental)

Con esos caudales se siguió la metodología establecida en el Plan Especial de Sequía de la CHJ para calcular el índice específico de cada variable y se estableció un modelo para obtener el índice general en la cuenca del Júcar, alcanzándose un coeficiente de determinación  $r^2=0.86$  al comparar con los valores establecidos con el  $IEE_{CHJ}$ . La expresión final obtenida es la siguiente:

$$ISH1 = 0.131IEE_{Cuenca} + 0.385IEE_{Pajaroncillo} + 0.281IEE_{Balazote} + 0.050 \quad (24)$$

Estas variables coinciden con las establecidas por la CHJ (CHJ, 2015), que indica que para el modelo conceptual en la cuenca del Júcar, los indicadores foronómicas en Cuenca, Pajaroncillo y Balazote, y la pluviometría en el embalse de Tous, son independientes de la gestión. En la Figura 18 se presenta el ISH1 modelado y comparado con el índice establecido por la CHJ.

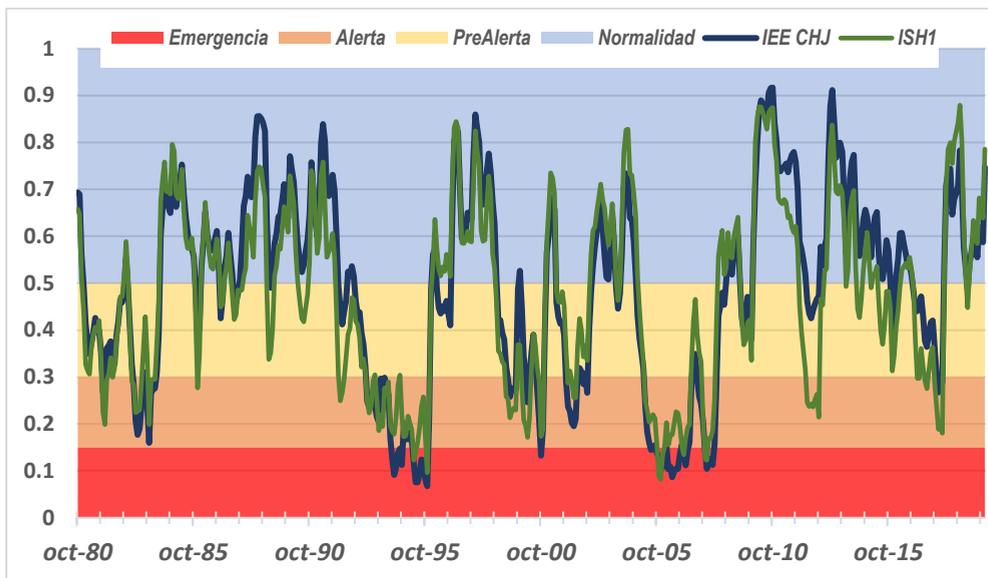


Figura 18. Representación del índice de Sequía hidrológica ISH1 modelado

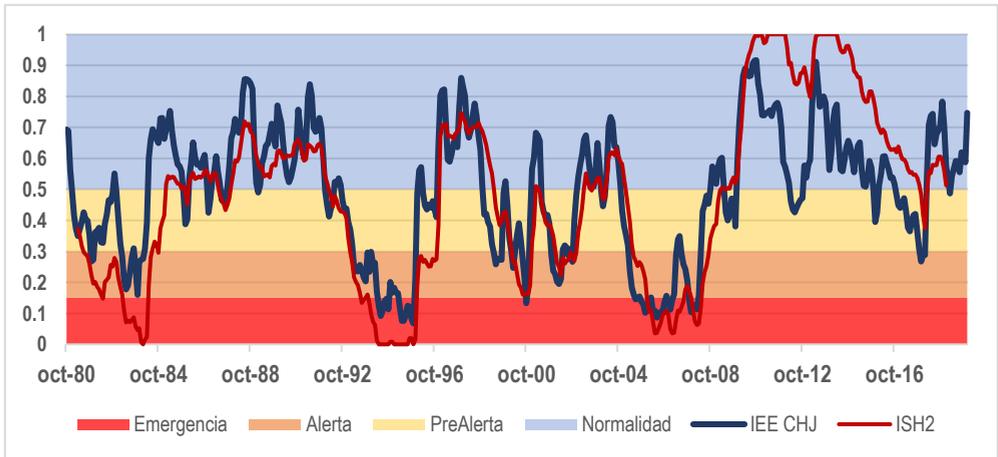
### 6.3. Índice de sequía hidrológica ISH2

El segundo índice incluye el almacenamiento de los 3 principales embalses que regulan la cuenca. Este índice se calcula a finales de abril de cada año, antes del inicio de la temporada de riego. Para calcular este índice, se toma el volumen almacenado en octubre del año anterior y se suman las aportaciones acumuladas de noviembre a abril, restando las salidas y la evaporación durante los meses de octubre a abril (Ecuación 25).

Este ISH2 es similar al propuesto por Gómez-Limón (2020), en el que utiliza las mismas variables de aportaciones, almacenamiento y salidas, pero estimadas como porcentaje de la capacidad de almacenamiento de la red de embalses.

$$\begin{aligned}
 &ISH2_{t(aux)} \\
 &= -Volumen_{octubre\ t-1} + \sum_{m=octubre\ t-1}^{m=abril\ t} Aportaciones_m \\
 &- \sum_{m=octubre\ t-1}^{m=abril\ t} Salidas_m - \sum_{m=octubre\ t-1}^{m=abril\ t} Evaporación
 \end{aligned} \tag{25}$$

En la Figura 19 se presenta el ISH2 modelado y comparado con el índice establecido por la CHJ. La importancia de este índice ISH2 es que permite incluir el factor de operación y almacenamiento de los embalses que regulan el uso del agua para la agricultura, siendo un poco más cercano a la operación actual del agua en la cuenca.



**Figura 19. Representación del índice de sequía hidrológica ISH2 modelado**

La Figura 20 relaciona el índice modelado con el IEE institucional general para el mes de abril, mes en el que se debe decidir si el agua que se va a suministrar es suficiente para la temporada de riego en las comunidades de regantes, y alcanza un coeficiente de determinación  $r^2=0.72$ .

## Capítulo 6. Resultados: Índice de sequía hidrológica

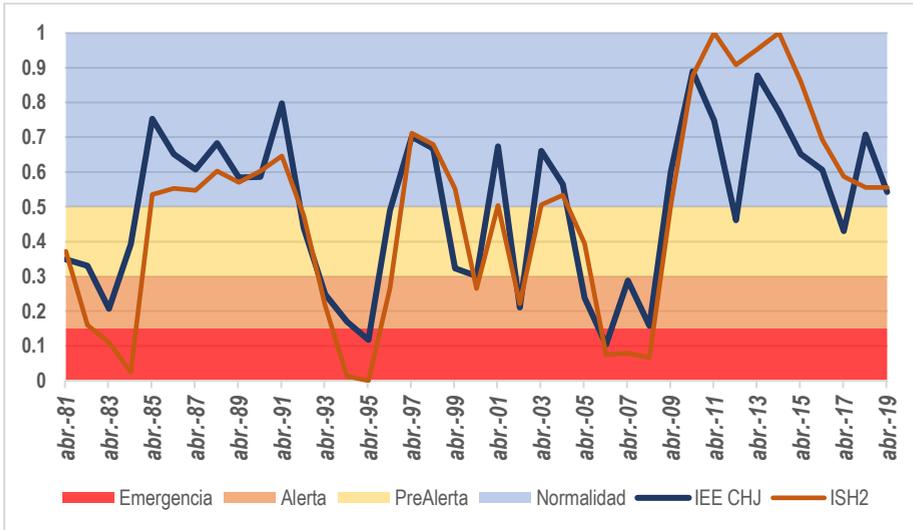


Figura 20. Representación del índice de sequía hidrológica ISH2 para el mes de abril.

## **7. DISEÑO DEL SEGURO POR SEQUÍA HIDROLÓGICA**

Definida la indemnización unitaria y estimados diferentes opciones de indicadores de sequía hidrológica en la cuenca, cada uno de estos se incluyen en diferentes esquemas de contratos de seguro en función del momento oportuno para la suscripción y se establecen los principales parámetros que forman parte del diseño de un seguro, que son los costes de las primas y la estimación de la indemnización a recibir.

### **7.1. Diseños para cada opción de contrato e Índice de sequía hidrológica**

#### **7.1.1. Diseño utilizando el IEE de CHJ**

El modelo utilizado para estimar el volumen de agua suministrado se obtiene a partir del índice  $IEE_{CHJ}$  calculado en abril (ecuación 26), es decir, antes de la temporada de riego en el RAE, teniendo en cuenta el suministro de agua histórico a la comunidad de regantes ( $W_{at}$ ). El modelo obtenido es el eje central del diseño del seguro, encontrándose una alta correlación entre las variables (Figura 21).

$$W_{at} = 28.77 * IEE_{CHJ}^{0.423} \quad R^2 = 0.75 \quad (26)$$

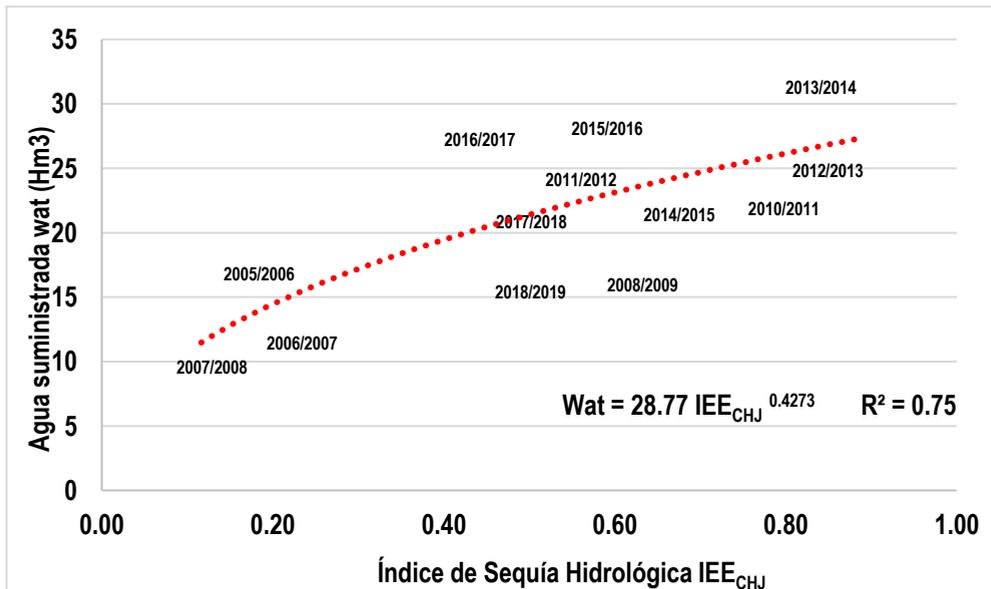


Figura 21. Modelo para estimar el agua suministrada en función del índice de sequía hidrológica IEE<sub>CHJ</sub> en la Real Acequia de Escalona.

Como ya se ha mencionado, el valor de indemnización unitaria se fijó en 0.09 €/m<sup>3</sup>, lo que, teniendo en cuenta que históricamente se habían garantizado 7789 m<sup>3</sup>/ha de agua en la comunidad de regantes, da un valor máximo a indemnizar de 701 €/ha (Figura 22).

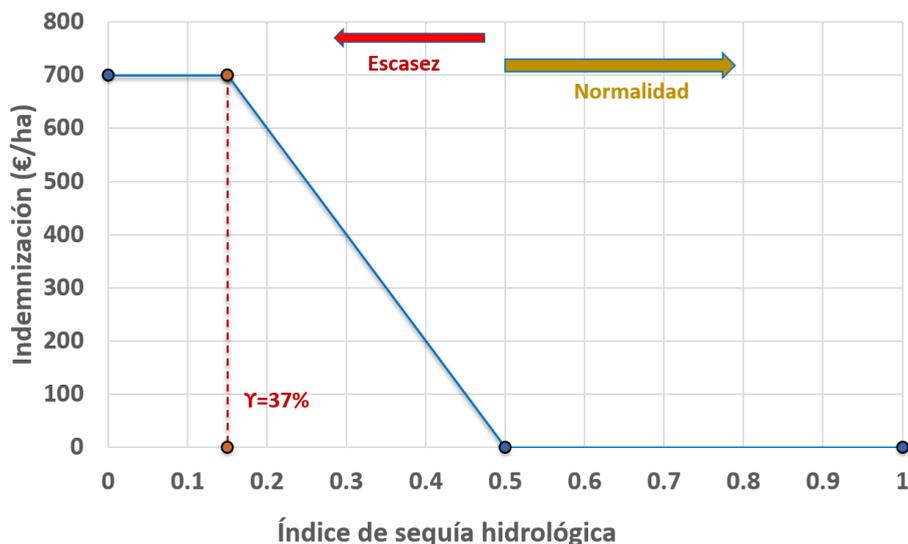


Figura 22. Representación del máximo valor a indemnizar, disparador, y franquicia deducible en función del valor del índice de sequía hidrológica.

**Opción de contrato 1: Prima variable y/o franquicia variable según previsión de disponibilidad de agua para la campaña de riego asegurada.**

La prima pura se calcula (ecuación 12) para 4 umbrales del  $IEE_{CHJ}$  que actúan como disparadores del seguro. Se utilizan los  $IEE_{CHJ}$  establecidos en el PES:  $IEE_{CHJ} = 0.50$  para indicar que ya entra a un escenario de escasez;  $IEE_{CHJ} = 0.30$ , que corresponde al escenario de alerta; e  $IEE_{CHJ} = 0.15$ , que corresponde al escenario de emergencia; además se usó un índice disparador intermedio de  $IEE_{CHJ} = 0.20$ . A partir de estos cuatro índices disparadores se establecen cuatro porcentajes de franquicia deducible (0%, 19%, 31% y 37%). La Tabla 14 muestra los valores de las primas para cada disparador con diferentes franquicias deducibles. Se constata una diferencia significativa en los valores de las primas. Los resultados cobran sentido al entender que,

dado que es muy probable que el disparador de 0.5 se active, genere que el valor de la prima para este disparador sea más alto.

**Tabla 14. Valores de primas para la opción de contrato 1, del seguro por sequía hidrológica.**

<b>IEE<sub>CHJ</sub> Disparador Franquicia deducible</b>	<b>0.50 γ=0</b>	<b>0.30 γ=19%</b>	<b>0.20 γ=31%</b>	<b>0.15 γ=37%</b>	<b>0.30 γ=0</b>	<b>0.20 γ=0</b>	<b>0.15 γ=0</b>
Prima (€/ha)	293	170	171	158	127	60	30
% del Máximo valor indemnizable	41.8	24.2	24.4	22.5	18.2	8.6	4.3

### **Opción 2: Pre índice. Contrato de seguro anual y plurianual**

El período de compra de pólizas se establece en octubre, coincidiendo con el inicio de la temporada de cosecha. Esto quiere decir que el valor de prima a pagar al momento de la suscripción del contrato depende del estado de escasez reflejado por el índice IEE<sub>CHJ</sub>, pero la declaración de siniestro se realiza en el mes de abril siguiente, antes de la temporada de riego. El índice de pretemporada elegido es el índice de estado de sequía hidrológica medido en octubre para las tres condiciones de escasez que actúan como disparadores: normalidad IEE<sub>CHJ</sub> =0.50, alerta IEE<sub>CHJ</sub> =0.30 y emergencia IEE<sub>CHJ</sub> =0.15. En la Tabla 15 se muestran los valores de primas para un disparador IEE<sub>CHJ</sub> =0.15 con una franquicia deducible del 37% para pólizas de 1, 2 y 3 años. Puede observarse que el valor de las primas varía bastante en función del escenario de escasez de pretemporada y el índice seleccionado.

## Capítulo 7. Diseño del seguro por sequía hidrológica

Considerando, por ejemplo, el estado de emergencia, el valor de la prima para 1 año de contrato oscila entre 292 y 947 €/ha/año, lo que corresponde al 41.65 y 135.09% del máximo valor de compensación. Del mismo modo, la Tabla 15 muestra que otra forma de reducir la tasa de prima en los años en que se alcanza un estado de emergencia es contratar una póliza multianual en función del escenario o estado de escasez que tenga lugar en el momento de suscribir la póliza. En el caso de un contrato de tres años, las primas pueden oscilar entre 268 y 871 €/ha (38.23% y 124.25% del máximo valor de compensación). Este último valor es tan alto que no resulta viable su implementación.

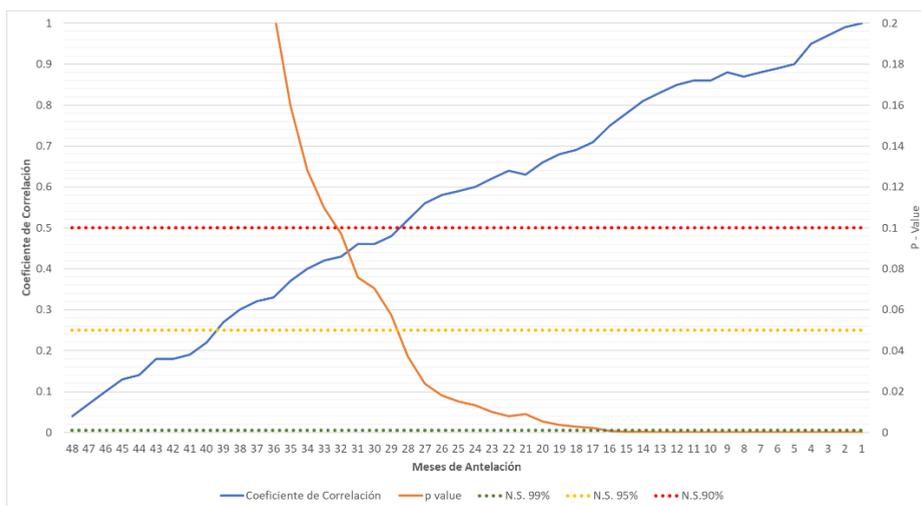
**Tabla 15. Valores de Primas para el seguro por sequía hidrológica (opción 2), usando IEE=0.15, una franquicia deducible de 37% para 1,2, y 3 años de contrato de la póliza.**

Índice de sequía hidrológica de pretemporada IEE <sub>CHJ</sub>	Prima pura 1 año de contrato		Prima pura 2 años de contrato		Prima pura 3 años de contrato	
	€/ha/año	% Máx. indem	€/ha/año	% Máx. indem	€/ha/año	% Máx. indem
	Normalidad	292	41.7	243	34.7	268
Prealerta - alerta	542	77.3	451	77.3	498	71.0
Emergencia	947	135.1	788	112.4	871	124.2

### **Opción 3: Contrato anticipado con una prima constante (early bird)**

Otro análisis indica que la escasez de agua puede preverse al comienzo de la temporada de cultivo. La Figura 23 muestra el coeficiente de correlación entre el volumen de agua almacenada en abril en los embalses de Alarcón, Contreras y Tous y el volumen

almacenado en los mismos embalses 48 meses antes. La correlación deja de ser significativa (es decir, el sistema pierde memoria) 32 meses antes del inicio de la temporada de riego (abril), con un grado de significancia por debajo del 90%. Con un grado de significancia del 99%, las asignaciones de agua no se pueden prever con 16 meses de antelación.



**Figura 23. Coeficiente de correlación y grado de significancia entre el volumen de agua almacenado en el mes de abril (Alarcón, Contreras, Tous) vs el volumen almacenado hasta 48 meses de antelación.**

Por lo tanto, para garantizar un grado razonable de significación en la correlación, se recomienda que este tipo de contratos multianuales tengan una duración de al menos dos años.

### 7.1.2. Diseño utilizando los índices ISH1 y ISH2

El procedimiento de diseño es igual al descrito previamente para el Índice de Estado de Escasez de la CHJ. Los modelos obtenidos para estimar el volumen de agua suministrada a partir de los índices de

sequía hidrológica ISH1 y ISH2 calculados el 1 de abril se presentan en las ecuaciones 27 y 28:

$$W_{at} = 32.34 * ISH1^{0.467} \quad R^2 = 0.55 \quad (27)$$

$$W_{at} = 24.32 * ISH2^{0.16} \quad R^2 = 0.76 \quad (28)$$

Estos modelos se utilizan para estimar los valores de las primas, considerando los mismos disparadores y franquicias deducibles.

### **Opción 1: Prima variable y/o franquicia variable**

La Tabla 16 recoge los resultados obtenidos de prima variable y/o franquicia variable en función de la previsión de disponibilidad de agua para la campaña de riego asegurada para los índices ISH1 e ISH2. La Figura 24 permite comparar los diferentes valores de prima obtenidos utilizando los tres índices de sequía hidrológica, donde en casi todos los casos los valores de primas son superiores con el índice ISH1. Se pueden observar las diferencias entre los disparadores y las franquicias deducibles. Los valores tienden a disminuir escalonadamente con los índices del la CHJ y el índice ISH2.

Tabla 16. Valores de primas para la opción de contrato 1, del seguro por sequía hidrológica con los índices ISH1 y ISH2

	ISH1 – ISH2 Disparador Franquicia deducible	0.50 $\gamma=0$	0.30 $\gamma=19\%$	0.20 $\gamma=31\%$	0.15 $\gamma=37\%$	0.30 $\gamma=0$	0.20 $\gamma=0$	0.15 $\gamma=0$
ISH1	Prima (€/ha)	293	257	257	198	205	117	30
	% del máximo valor indemnizable	41.8	36.7	36.7	28.2	29.2	16.69	4.3
ISH2	Prima (€/ha)	234	176	176	15	176	117	88
	% del máximo valor indemnizable	33.4	25.1	25.1	21.5	25.1	16.7	12.5

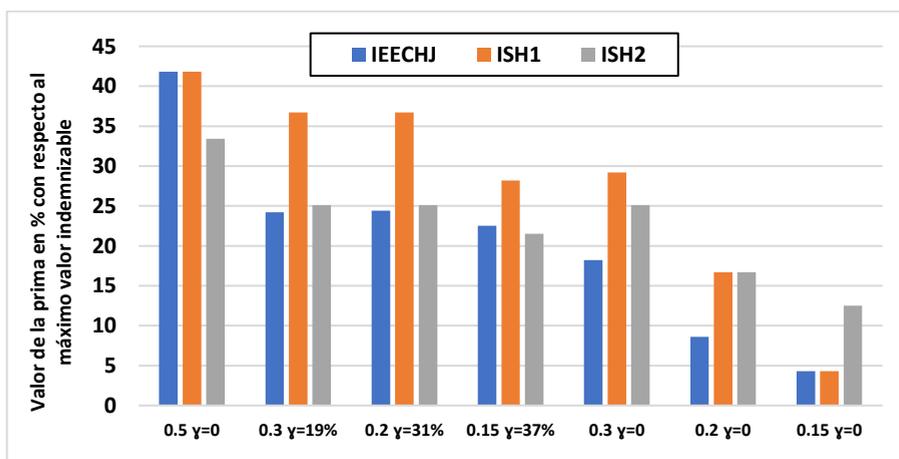


Figura 24. Valor de la prima en % con respecto al máximo valor indemnizable para la opción de Prima variable y/o franquicia variable.

### Opción 2: Pre índice. Contrato de seguro anual y plurianual

La Tabla 17 y la Figura 25 muestran los valores de las primas obtenidos utilizando los tres índices de sequía hidrológica con un índice de pretemporada y con contratos anuales y plurianuales. Es claro que si el índice previo a la temporada de riego (medido en octubre del año anterior) refleja un estado de emergencia, es muy probable que la campaña de riego se vea afectada por la sequía y que el seguro se dispare, suponiendo unos costos muy elevados que no son viables ni para el agricultor ni para las empresas aseguradoras, ya que el valor de la prima supera el 100% del máximo valor indemnizable.

En casi todos los casos, los valores de las primas son más elevados con el índice ISH1. Hay diferencias entre los disparadores y las franquicias deducibles. Los valores tienden a descender escalonadamente con los índices de la CHJ y el índice ISH2.

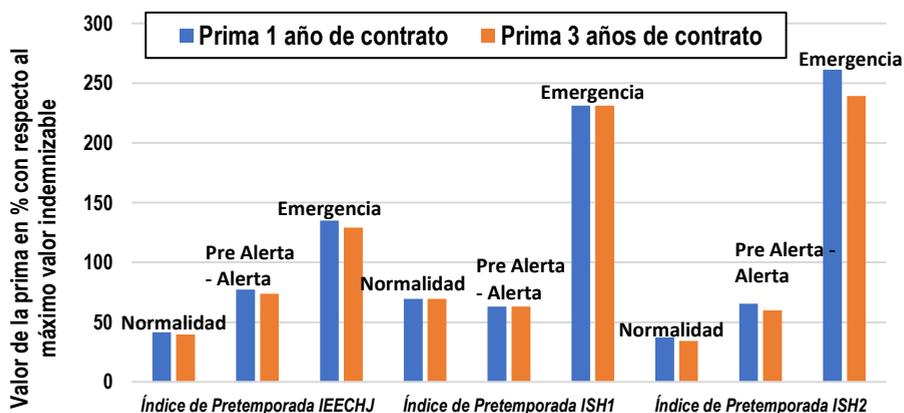


Figura 25. Valor de la prima en % con respecto al máximo valor indemnizable para la opción de Contrato de seguro anual y plurianual en función de un Pre índice.

**Capítulo 7. Diseño del seguro por sequía hidrológica**

**Tabla 17. Máximo valor indemnizable y Sistema de primas del esquema de Seguro hidrológico propuesto para la Real Acequia de Escalona. Franquicia deducible del 37% para 1 y 3 años de contrato de póliza**

Tipo de contrato		Prima 1 año de contrato		Prima 3 años de contrato	
		€/ha/año	% máx. Indem.	€/ha/año	% máx. Indem.
Índice de pretemporada <b>IEE<sub>CHJ</sub></b>	Normalidad	292	41.6	268	39.8
	Prealerta - Alerta	542	77.3	498	73.9
	Emergencia	947	135.1	871	129.2
Índice de pretemporada <b>ISH1</b>	Normalidad	487	69.5	487	69.5
	Prealerta - Alerta	442	63.0	442	63.0
	Emergencia	1621	231.2	1620	231.2
Índice de pretemporada <b>ISH2</b>	Normalidad	262	37.4	240	34.2
	Prealerta - Alerta	458	65.3	420	59.9
	Emergencia	1831	261.2	1678	239.4

## **8. EVALUACIÓN DEL DISEÑO DEL SEGURO POR SEQUÍA HIDROLÓGICA**

Mediante la implementación de un modelo de gestión del recurso hídrico a nivel de cuenca, se lleva a cabo una simulación de la efectividad del seguro. En este caso de estudio se utiliza el software AQUATOOL, que es un entorno para el desarrollo de sistemas de apoyo a la decisión (SAD) para la planificación y gestión de cuencas o sistemas de recursos hídricos (Andreu et al., 1996), y que permite incluir las diferentes demandas, aportaciones y reglas de operación dentro de la cuenca. Esta simulación del sistema para diferentes años genera la información necesaria para calcular el índice de sequía hidrológica y con esto simular el seguro, es decir, establecer si se activaría o no el seguro para diferentes índices disparadores. Posteriormente se utilizan indicadores económico-financieros como el índice de siniestralidad, el riesgo base y el margen bruto para evaluar el seguro y seleccionar la alternativa de contrato más viable.

### **8.1. Simulación de funcionamiento del seguro a partir de un modelo de gestión de cuenca**

La simulación comienza con el desarrollo de un modelo estocástico autorregresivo de series temporales para predecir las aportaciones y su interacción con los cambios en el almacenamiento de los principales reservorios. Esta simulación se ha realizado utilizando el software AQUATOOL.

AQUATOOL consta de varios módulos, pero para este estudio se utilizaron los módulos MASHWIN y SIMGES. El módulo de análisis

de series hidrológicas MASHWIN es un modelo de análisis estocástico mensual para el estudio de series temporales de aportaciones pertenecientes a un sistema hidráulico. El modelo MASHWIN combina una modelación autorregresiva y de media móvil ARMA multivariada con una desagregación espacial mensual por el modelo condensado de Lane. Por otra parte, SIMGES es un modelo general para simular la gestión de cuencas o sistemas complejos de recursos hidráulicos, donde existen elementos de regulación o almacenamiento tanto superficiales como subterráneos, de captación, de transporte, de utilización y/o consumo, y de dispositivos de recarga artificial. (Solera et al., 2015).

### **8.1.1. Descripción del sistema de gestión en la cuenca del Júcar incluido en el modelo Aquatool**

El software AQUATOOL permite incluir las diferentes demandas, aportaciones y reglas de operación dentro de la CHJ. La Figura 26 muestra el esquema simplificado implementado en Aquatool y la Tabla 18 un resumen de los elementos que constituyen el sistema de gestión en la cuenca del Júcar.

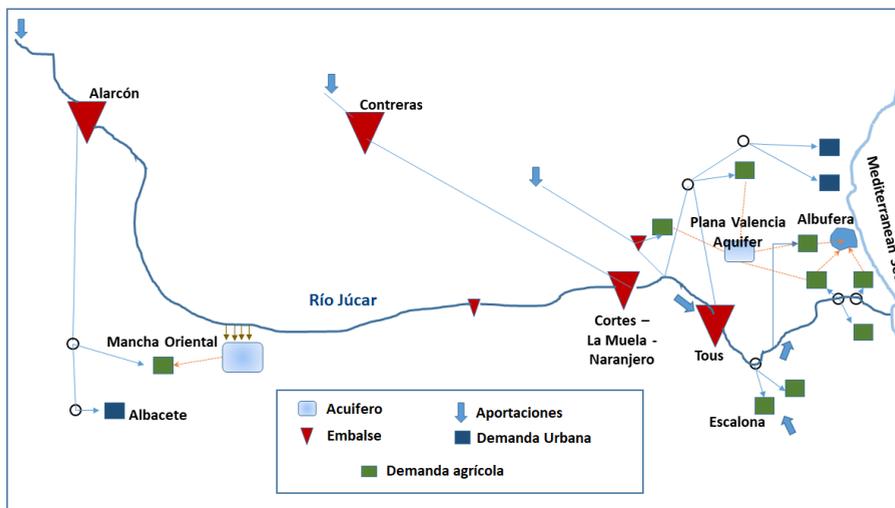


Figura 26. Esquema conceptual simplificado del sistema de explotación del río Júcar. Fuente: Adaptado de (Andreu et al., 2013; Confederación Hidrográfica del Júcar, 2015)

Tabla 18. Resumen de los elementos que constituyen el sistema de gestión en la cuenca del Júcar usados en el AQUATOOL

Elemento	Número
N. Nudos Sistema Físico:	43
N. De Embalses:	7
N. Tramos río Tipo 1	37
N. Tramos río Tipo 2	4
N. Tramos río Tipo 3	5
N. Aportaciones Intermedias:	8
N. Demandas Consuntivas:	16
N. Demandas No Consuntivas:	3
N. Acuíferos:	6
N. Bombes Adicionales:	1

## **Capítulo 8. Evaluación del diseño del seguro por sequía hidrológica**

---

N. Retornos:	4
N. Grupos Isoprioritarios	9
N. Indicadores de Restricción:	7

Definido el esquema, Inicialmente es necesario generar unas series de aportaciones para incorporarlas al modelo de gestión y poder realizar simulaciones de gestión de la cuenca. Se utilizó el módulo MASHWIN de Aquatool para generar 100 series sintéticas de aportaciones anuales de las variables enumeradas en la Tabla 6. A continuación, cada una de las series de aportaciones se ingresa al modelo SIMGES de Aquatool, donde previamente se han registrado las demandas, las reglas de operación y los criterios de garantía. Además de tener las aportaciones, la simulación permite calcular los volúmenes en los embalses y genera la información necesaria para calcular los índices de sequía hidrológica.

La simulación del sistema tiene en cuenta la prioridad de cada unidad de demanda definida en el plan hidrológico. El modelo se ha calibrado de forma que, en el uso de aguas superficiales, las demandas urbanas tienen prioridad sobre las agrarias, y dentro de estas últimas, los riegos tradicionales tienen mayor prioridad que los riegos mixtos.

El aspecto más importante relacionado con la implementación del seguro por sequía hidrológica es la inclusión de los estados de escasez (normalidad, prealerta, alerta y emergencia) en la gestión que se realiza en la cuenca. Al establecer un estado de escasez en los volúmenes de los embalses, es posible aplicar diferentes estrategias de gestión para minimizar los déficits.

## **Capítulo 8. Evaluación del diseño del seguro por sequía hidrológica**

**Tabla 19. Índices de estado y medidas de gestión en la suma de los volúmenes almacenados**

Volumen almacenado (Hm <sup>3</sup> )	Estado	Consideraciones
>570	Normalidad	Asignación completa a las demandas
Entre 420 y 570	Prealerta	El nivel de atención a todas las demandas agrícolas se restringe en un 4 %
Entre 360 y 420	Alerta	Los abastecimientos urbanos siguen recibiendo su suministro normal mientras que todas las demandas agrícolas sufren reducciones en su suministro total en un 7 %.
Entre 300 y 360	Emergencia	Los abastecimientos urbanos seguirían recibiendo su suministro normal, y el nivel de atención a todas las demandas agrícolas se restringe un 10%.

El consolidado de las medidas a implementar de acuerdo con el PES se presenta en la Tabla 20.

**Tabla 20. Porcentajes de reducción del suministro de agua a las diferentes unidades de demanda agrícola de acuerdo con el estado de escasez.**

Unidad de demanda	Origen	Porcentajes de reducción			
		Normalidad	Prealerta	Alerta	Emergencia
<b>Abastecimientos</b>	<b>Superficial</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	<b>0-5%</b>	<b>0-10%</b>
Regadíos tradicionales integrados en la USUJ	Superficial	0%	5-15%	15-25%	25-35%
Resto de regadíos que usan recursos superficiales	Superficial	0%	En función de la disponibilidad de recursos alternativos		

## Capítulo 8. Evaluación del diseño del seguro por sequía hidrológica

Regadíos de la masa de agua subterránea de la Mancha Oriental	Superficial	0%	10-20%	55-65%	80-100%
Regadíos del Canal Júcar-Turia	Superficial	0%	10-20%	30-40%	45-55%
Transferencias al Vinalopó-Alacantí y Marina Baja	Superficial	0%	Según normas de explotación del sistema Júcar de conformidad con el PHJ		

### 8.1.2. Resultados de la simulación

Se realizaron dos tipos de análisis: 1) verificación del cumplimiento a la demanda en la comunidad de regantes, y 2) cálculo de los índices de sequía hidrológica para simular la implementación del seguro.

- **Satisfacción de la demanda agrícola a partir de los criterios definidos en la instrucción de la planificación hidrológica del Júcar**

En AQUATOOL se utiliza el criterio de UTAH-DWR para evaluar la satisfacción alcanzada en la distribución de los recursos hídricos en función de las demandas existentes, los cuales son los criterios recomendados e incluidos en la instrucción de la planificación hidrológica del Júcar (CHJ, 2015). Para ello se establecen unos porcentajes de déficit admisibles y se considera incumplimiento cuando se da alguna de las siguientes circunstancias: el déficit en un año supera el 50% de la demanda, el déficit en dos años consecutivos supera el 75% de la demanda, y el déficit en diez años consecutivos supera el 100% de la demanda.

**Tabla 21. Satisfacción a la demanda en la simulación del seguro en la RAE**

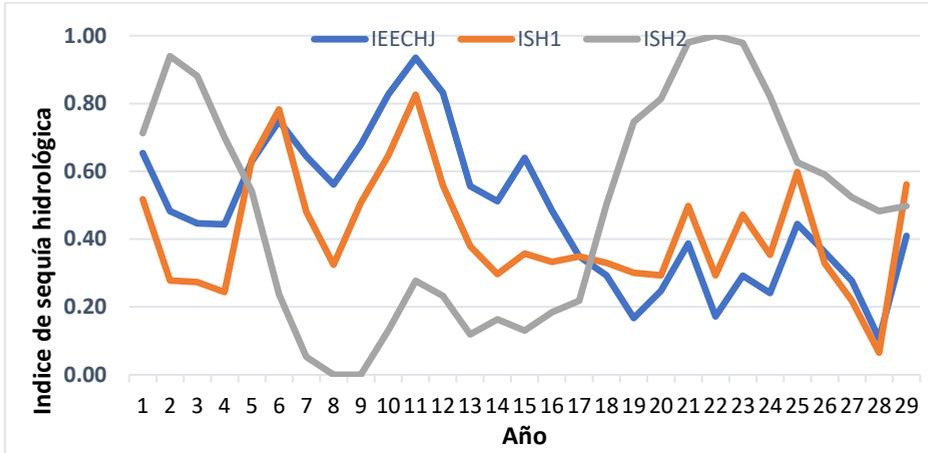
	<b>Máximo déficit 1 año (%)</b>	<b>Máximo déficit 2 años (%)</b>	<b>Máximo déficit 10 años (%)</b>
Media	31.53	46.42	89.32
Máximo	74.39	121.44	306.88
Mínimo	0.10	0.18	0.89

En el caso de la satisfacción de la demanda en la RAE, se observa que el valor medio del porcentaje de incumplimientos de la demanda en la comunidad de regantes de Escalona en un año es del 31.53%, y que se alcanzó un valor máximo de 74.39% (Tabla 21). De igual manera al realizar las simulaciones, se encontró que en el 25% de estas no se satisfizo la demanda, lo que pone de manifiesto la importancia de implementar instrumentos para mitigar la escasez hídrica, como el seguro propuesto.

- **Índices de sequía hidrológica**

Siguiendo la metodología de cálculo presentada en el capítulo 6, y con la información de las simulaciones realizadas en Aquatool, se calcularon los índices de sequía hidrológica para el mes de abril, momento en que se declararía una posible activación del seguro. En la Figura 27 se presentan los resultados para 1 simulación. Se evidencia que el índice de la CHJ y el ISH1 tienen un comportamiento similar.

Figura 27. Índices de sequía hidrológica calculados para el mes de abril resultados de la simulación 1.



## 8.2. Implementación de los indicadores financieros para evaluar el mejor esquema de seguro

Una vez incorporadas las simulaciones de aportaciones al modelo y calculado el índice de sequía hidrológica, la Tabla 22 muestra un ejemplo de cálculo de las indemnizaciones y del índice de siniestralidad para dos valores de índice disparador y tomando como referencia las primas ya calculadas, simuladas como si el seguro hubiera estado en vigor durante 28 años. Aquí, se obtiene el índice de siniestralidad con un valor de 1.2, similar en ambos casos, lo que significa que la aseguradora ha incurrido en pérdidas durante el período en que las indemnizaciones pagadas son superiores a las primas recaudadas. Este proceso se repite con 100 simulaciones.

**Capítulo 8. Evaluación del diseño del seguro por sequía hidrológica**

**Tabla 22. Cálculo del índice de siniestralidad para una simulación y dos valores de índice disparador, usando el Índice de la CHJ IEE<sub>CHJ</sub>.**

Área: 2673 ha				Disparador ISH = 0.50 Valor prima: 293 €/ha			Disparador ISH = 0.20 Valor prima: 60 €/ha		
Año	IEE CHJ	Wa m <sup>3</sup> /ha Modelo	Wdt m <sup>3</sup> /ha Modelo	Ind €/ha	Siniestros ocurridos M€	Primas devengadas M€	Ind €/ha	Siniestros ocurridos M€	Primas devengadas M€
0	0.65	8976.11	0	0	0.00	0.78	0	0	0.16
1	0.48	7880.63	0	0	0.00	0.78	0	0	0.16
2	0.45	7627.77	163.19	701	1.87	0.78	0	0	0.16
3	0.44	7606.05	184.9	701	1.87	0.78	0	0	0.16
4	0.63	8830.47	0	0	0.00	0.78	0	0	0.16
5	0.75	9511.18	0	0	0.00	0.78	0	0	0.16
6	0.64	8920.44	0	0	0.00	0.78	0	0	0.16
7	0.56	8404.66	0	0	0.00	0.78	0	0	0.16
8	0.68	9118.64	0	0	0.00	0.78	0	0	0.16
9	0.83	9925.81	0	0	0.00	0.78	0	0	0.16
10	0.94	10457.53	0	0	0.00	0.78	0	0	0.16
11	0.83	9946.17	0	0	0.00	0.78	0	0	0.16
12	0.56	8374.32	0	0	0.00	0.78	0	0	0.16
13	0.51	8086.23	0	0	0.00	0.78	0	0	0.16
14	0.64	8892.22	0	0	0.00	0.78	0	0	0.16
15	0.48	7897.81	0	0	0.00	0.78	0	0	0.16
16	0.35	6862.49	928.47	701	1.87	0.78	0	0	0.16
17	0.29	6372.68	1418.28	701	1.87	0.78	0	0	0.16
18	0.17	5013.98	2776.98	701	1.87	0.78	701	1.87	0.16
19	0.25	5924.68	1866.28	701	1.87	0.78	0	0	0.16
20	0.39	7171.74	619.22	701	1.87	0.78	0	0	0.16

## **Capítulo 8. Evaluación del diseño del seguro por sequía hidrológica**

21	0.17	5074.6	2716.35	701	1.87	0.78	701	1.87	0.16
22	0.29	6364.75	1426.21	701	1.87	0.78	0	0	0.16
23	0.24	5860.11	1930.85	701	1.87	0.78	0	0	0.16
24	0.44	7611.22	179.74	701	1.87	0.78	0	0	0.16
25	0.36	6977.21	813.75	701	1.87	0.78	0	0	0.16
26	0.28	6221.74	1569.22	701	1.87	0.78	0	0	0.16
27	0.11	4134	3656.96	701	1.87	0.78	701	1.87	0.16
28	0.41	7347.28	443.68	701	1.87	0.78	0	0	0.16
<b>Total</b>					<b>28.11</b>	<b>22.71</b>		<b>5.62</b>	<b>4.65</b>
<b>Índice de siniestralidad</b>					<b>1.24</b>			<b>1.21</b>	

Después de realizar todas las simulaciones, en la Figura 28 se compara el porcentaje de frecuencia acumulada del índice de siniestralidad para todas las opciones de seguro con diferentes índices disparadores y franquicias deducibles. La figura muestra que un disparador de  $ISH=0.50$  favorece al agricultor y las indemnizaciones se pagan sin que se haya presentado una pérdida real. De la misma manera las opciones con franquicia deducible de 19%, 31% y 37% obtienen un valor medio del índice de siniestralidad de 1.05, 1.07 y 1.1 respectivamente, es decir que para las compañías aseguradoras las mejores opciones se dan con disparadores en estado de emergencia y alerta y sin franquicias deducibles.

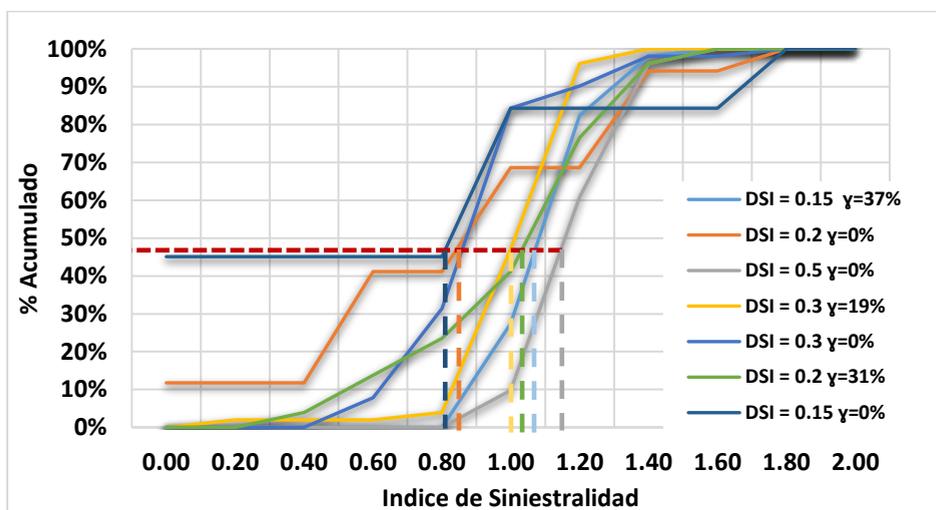


Figura 28. Índice de siniestralidad para diferentes valores de Índice de sequía hidrológica que actúan como disparador.

El mismo análisis se realizó para los indicadores ISH1 e ISH2 y cuya comparación se presenta en la Tabla 23.

Tabla 23. Resumen índice de siniestralidad para un 50% de porcentaje de frecuencia acumulada con los 3 indicadores de escasez.

	0.50 $\gamma=0$	0.30 $\gamma=19\%$	0.20 $\gamma=31\%$	0.15 $\gamma=37\%$	0.30 $\gamma=0$	0.20 $\gamma=0$	0.15 $\gamma=0$
IEE <sub>CHJ</sub>	1.16	1.01	1.05	1.08	0.87	0.86	0.83
ISH1	1.01	1.18	1.35	0.75	0.87	0.61	1.36
ISH2	1.10	1.13	1.52	1.35	1.19	1.17	1.12

Con el fin de establecer la efectividad del esquema de Seguro propuesto, en la Tabla 24 se presenta la comparación de las diferentes opciones, para un periodo de análisis entre 2006 y 2018, a través de los

## **Capítulo 8. Evaluación del diseño del seguro por sequía hidrológica**

parámetros de la desviación estándar del margen bruto, el MRSL y el margen bruto mínimo con y sin el contrato de seguro, además considerando primas adicionales de 10%, 20% y 37% que pueden representar posibles costes administrativos.

**Tabla 24. Aplicación de los indicadores de Evaluación de la efectividad de los esquemas de seguros propuestos en la comunidad de regantes de la Real Acequia de Escalona.**

<b>Esquema de seguro</b>	<b>Prima adicional</b>	<b>Desviación Standard Margen Bruto (€/ha)</b>	<b>Mínimo Margen Bruto (€/ha)</b>	<b>MRSL (€/ha)</b>	<b>Riesgo base (pérdida) (%)</b>	<b>Riesgo Base (ganancia) (%)</b>
Sin seguro		567.9	1193.1	84.1		
$\gamma=37\%$ IEE=0.15	0%	551.5	1156.6	96.1	3.85	12.55
	10%	551.5	1140.8	103.2		
	37%	551.5	1098.1	122.7		
$\gamma=19\%$ IEE = 0.30	0%	550.8	1144.6	101.5	3.85	12.84
	10%	550.8	1127.6	109.2		
	37%	550.8	1081.7	130.3		
$\gamma=0\%$ IEE=0.50	0%	597.3	1021.6	158.3	2.71	25.96
	10%	597.3	992.3	172.4		
	37%	597.3	913.2	211.9		
$\gamma=0\%$ IEE=0.30	0%	550.8	1187.1	82.6	3.85	12.84
	10%	550.8	1174.3	88.2		
	37%	550.8	1139.9	103.6		
$\gamma=0\%$ IEE=0.15	0%	626.6	1163.1	99.2	9.13	3.85
	10%	626.6	1160.1	100.7		
	37%	626.6	1152.0	104.9		
$\gamma=0\%$	0%	550.8	1254.6	54.9	3.85	12.84

## **Capítulo 8. Evaluación del diseño del seguro por sequía hidrológica**

IEE=0.20	10%	550.8	1248.6	57.2		
	37%	550.8	1232.4	63.5		
$\gamma=31\%$ IEE=0.20	0%	550.8	1143.6	102.0	3.85	12.84
	10%	550.8	1126.5	109.7		
	37%	550.8	1080.3	130.9		

### **- Desviación estándar y error cuadrático medio MRSL del Margen bruto**

La selección de la alternativa de diseño se basa en minimizar la semi varianza (MRSL) y la desviación estándar de los márgenes brutos y maximizar el margen bruto mínimo. Teniendo en cuenta los tres criterios expresados anteriormente y los resultados presentados en la Tabla 23, se seleccionaría el esquema de seguro con un índice de sequía hidrológica IEE=0.20 y franquicia deducible de  $\gamma=0\%$ . Aunque no cumple todas las condiciones, otra opción que se aproxima es el valor del índice IEE=0.30 sin franquicia deducible  $\gamma=0\%$ .

### **- Riesgo base**

Idealmente, la pérdida de base y la ganancia de base deberían ser similares, por lo que el sistema de seguros no favorece ni al agricultor ni a la compañía de seguros (Maestro et al., 2016). Para el estudio, se calcula el riesgo base desglosándola en pérdida de base y ganancia de base comparando las indemnizaciones del régimen de seguro basadas en los índices de sequía, con las indemnizaciones potenciales calculadas a partir de registros históricos del agua suministrada para el período 2006-2018. En este esquema de seguro propuesto, la ganancia de base es siempre mayor que la pérdida de base, lo que significa que

## Capítulo 8. Evaluación del diseño del seguro por sequía hidrológica

el plan de seguro está subestimando las asignaciones de agua en el período, e implica que el agricultor asegurado recibiría más de la compensación esperada, lo que no favorece a la compañía de seguros. Sin embargo, hay un caso en el que la compañía de seguros se beneficiaría enormemente. Cuando se alcanza un IEE de 0.15 y el  $\gamma$  es 0%, el valor de la pérdida de base es de 9.13%, lo que significa que a pesar de sufrir pérdidas económicas en estas circunstancias el agricultor que asumió el seguro no recibiría ninguna compensación de la compañía de seguros (Tabla 24).

**Tabla 25. Riesgo base calculado con el IEE general extraído del informe de la CHJ y el calculado con el ISH1 y ISH2 propuestos.**

IEE Disparador	IEE <sub>CHJ</sub>		ISH1		ISH2	
	Riesgo base (pérdida) (%)	Riesgo Base (ganancia) (%)	Riesgo base (pérdida) (%)	Riesgo Base (ganancia) (%)	Riesgo base (pérdida) (%)	Riesgo Base (ganancia) (%)
IEE = 0.15	3.85	12.55	3.85	19.97	3.85	12.84
IEE = 0.30	3.85	12.84	3.85	26.11	3.85	12.84
IEE = 0.50	3.80	12.96	3.80	27.32	3.80	12.96
IEE = 0.20	3.85	12.84	6.13	24.39	6.13	15.12

Se evidencia en la Tabla 25 que en el caso del Índice de la Confederación con cualquiera de los disparadores el riesgo base es similar y favorece al agricultor y sus resultados guardan relación con el índice ISH2. Sin embargo, con el índice ISH1 se sigue presentando una ganancia de riesgo base, pero en este caso el porcentaje es más alto.

## **9. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES**

### **9.1. Discusión**

Una novedad clave del enfoque propuesto para el diseño de seguros indexados de sequía hidrológica es el uso de un modelo de gestión de los recursos hídricos, que permite la evaluación del seguro teniendo en cuenta las características de todo el sistema y la variación de las aportaciones y las demandas. Esta mejora es importante para evaluar los esquemas de seguros indexados por sequía hidrológica, ya que la exposición a los fenómenos de sequía de cada demanda agrícola particular dependerá de las normas de funcionamiento del sistema de recursos hídricos y de la variabilidad de los recursos y las demandas a lo largo del tiempo y el espacio. Utilizando modelos estocásticos fue posible generar una amplia gama de series sintéticas de aportaciones que sirven de entrada al modelo de gestión y así calcular el índice del estado de sequía hidrológica y los suministros para diferentes escenarios.

A diferencia del caso de la agricultura de secano, los suministros de agua a las demandas de riego dependen de la disponibilidad de agua en el sistema. Incluso en una situación de sequía meteorológica, podría haber suficiente almacenamiento de agua para hacerle frente sin restricciones, pero también podría presentarse un déficit en el almacenamiento de agua sin que se presenten eventos de sequía meteorológica. Este es un desafío para el desarrollo de seguros hidrológicos.

La idoneidad de la metodología sugerida requiere una fuerte correlación entre el índice de estado de sequía y el suministro de

agua al riego. Una correlación débil entre las variables mencionadas afectaría negativamente el riesgo de base, los valores de las primas y los resultados de la indemnización de siniestros y, en consecuencia, la aplicabilidad del seguro. En el caso de estudio se encontraron correlaciones altas con el índice de estado de escasez de la Confederación del Júcar  $IEE_{CHJ}$  y con el ISH2.

La comparación entre tener o no seguro se evaluó integrando indicadores financieros desde la perspectiva del agricultor y las compañías de seguros. La selección de la alternativa de diseño se basa en minimizar la semivarianza (RMSL) y la desviación estándar del margen bruto y maximizar el margen bruto mínimo. En el análisis de riesgo base de la actual propuesta de seguro, la ganancia de riesgo de base es en la mayoría de los casos mayor que la pérdida. Esto implica que el agricultor asegurado recibiría más de la compensación esperada, lo que no favorece a la compañía de seguros. El análisis del riesgo de base y del índice de siniestralidad debe tener un equilibrio entre los beneficios para las compañías de seguros y para los agricultores y esto se logró analizando diferentes índices disparadores.

En el caso de estudio, la Real Acequia de Escalona tiene una demanda neta en condiciones normales de  $4107 \text{ m}^3/\text{ha-año}$ . Una reducción del 35% del agua neta establecida en el PES (2018) cuando se presente un estado de emergencia de escasez hídrica, reduciría el rendimiento en  $1290 \text{ Kg/ha}$ , que representa un 5.3% de la producción. Esta reducción de rendimiento, expresada en términos económicos como valor del agua, alcanza un valor de  $0.09 \text{ €/m}^3$ , que se establece como el valor de indemnización unitaria a pagar por el seguro. Maestro et al. (2016) obtuvieron una indemnización unitaria de  $0.115 \text{ €/m}^3$ , así como Lorite et al. (2012)

obtuvo valores en un estudio en una cuenca de la provincia de Córdoba de trigo 0.054 €/m<sup>3</sup>, girasol 0.092 €/m<sup>3</sup> y maíz 0.15 €/m<sup>3</sup>. Lo que muestra que el valor obtenido de 0.09 €/m<sup>3</sup> se encuentra cercano a valores reportados por la literatura. Como referencia, la Comisión Permanente de Sequías de la Confederación hidrográfica del Júcar aprobó en el 2006 una reducción obligatoria del 45% del agua demandada en unos usos agrícolas menos prioritarios en el tramo medio del río Júcar, entregando una compensación económica frente a la pérdida de beneficio de los agricultores de 0.19 €/m<sup>3</sup> (Confederación Hidrográfica del Júcar, 2013).

Los índices de sequía hidrológica estudiados permiten analizar cuándo y con qué frecuencia se produce la escasez de agua en la cuenca. Por ejemplo, para calcular el índice ISH1 se seleccionaron las variables más influyentes en la cuenca y aquellas que, por su naturaleza, no pueden ser manipuladas, garantizando así su fiabilidad y reduciendo el riesgo moral que puede suponer este esquema de seguro, aunque se debe mejorar su correlación con el suministro de agua. El índice ISH2 incluye el almacenamiento de los embalses que regulan el uso del agua para la agricultura, lo que se acerca un poco más a la gestión actual del agua en la cuenca. Este índice ISH2 alcanzó una alta correlación con los suministros de agua en la comunidad de regantes y lo convierte en una buena opción de ser seleccionado como índice representativo de la sequía en el diseño del seguro.

En el análisis del esquema de seguros basado en un "pre-índice" (un índice basado en los valores al comienzo del año hidrológico), las primas para los agricultores son elevadas. Por ejemplo, si se declarara un escenario de alerta o emergencia en octubre, antes de la temporada de riego (abril-septiembre), es muy probable que

toda la temporada de riego se viera afectada por la escasez de agua, generando que las compañías de seguros no consideraran rentable ofrecer este tipo de seguros, por lo que, con base en los resultados obtenidos en este estudio, se propone ofrecer contratos plurianuales con una vigencia mínima de tres años.

El índice de siniestralidad permitió analizar cuál es el índice de sequía hidrológica que al ser incluido en el diseño del seguro puede favorecer más al agricultor o a las aseguradoras. En este sentido índices bajos de 0.15 y 0.20 sin franquicia deducible favorecen a las aseguradoras, ya que su probabilidad de ocurrencia es baja. Un índice alto como es el de 0.50 favorecería de manera significativa a los agricultores, ya que el seguro se dispararía con mayor frecuencia, pero no sería atractivo como negocio para las empresas aseguradoras. Es decir, que el equilibrio recomendado se encuentra con valores de índice de 0.20 y 0.30 con franquicia deducible, cuyos índices representan una transición entre el estado de alerta a emergencia por escasez hídrica en la cuenca.

El seguro por sequía hidrológica se convierte en una alternativa de mitigación del impacto de la sequía y escasez hídrica para los cultivos bajo riego, la cual para ser aplicable a otras comunidades de regantes y su implementación factible se deben tener en cuenta los siguientes aspectos: a) el sistema de indicadores de escasez hídrica debe estar integrado a la planificación de los recursos hídricos de la cuenca; b) las reglas de operación y las tasas de disminución establecidas en los planes de sequía no deben cambiar durante la vigencia del contrato del seguro; c) los tomadores de las pólizas de seguro deben ser las administraciones de cada comunidad de regantes y no cada usuario del recurso hídrico, de esta manera se garantiza una mejor gestión administrativa (Gómez-

Limón & Guerrero-Baena, 2019; Maestro, Garrido, et al., 2016); d) debe implementarse en las comunidades de regantes que cuentan con solo una sola fuente de agua (superficial); e) se asume que la escasez de agua es evaluada como la principal causa de la disminución de la producción, entendiendo que existen otros factores que inciden, como la variedad del cultivo, la etapa fenológica en la que se presenta la escasez, las propiedades químicas y físicas de los suelos, la nutrición, las altas temperaturas, entre otros.

Los resultados de la aplicación al caso de estudio muestran que este tipo de seguro indexado por sequía hidrológica es una alternativa viable para los agricultores, ya que los valores de primas no son altos y podría buscarse un subsidio que apoye su pago. El principal problema que podría conllevar su implementación es el carácter sistémico de la sequía hidrológica, es decir, que si esta se llega a presentar se presenta en toda la cuenca y el valor a indemnizar sería alto por parte de la aseguradora. Pero aplicando la recomendación de umbrales disparadores de índices de sequía oficiales entre 0.20 y 0.30, junto con esquemas de contratos plurianuales se puede dar una mayor confianza en la implementación.

Finalmente, los seguros agrícolas tradicionales son contratos que aseguran los costes de producción, la plantación, las instalaciones o una combinación de estos. Sin embargo, en el caso de la agricultura de regadío no se incluyen los efectos de la sequía o la escasez de agua. En este estudio, el seguro de sequía cubre el valor del impacto económico generado por la reducción del suministro de agua durante la campaña de riego, con el agua como capital asegurable. Esta propuesta se convierte en una alternativa de

seguro complementaria para la agricultura de regadío con valores de prima razonables para los agricultores y acordes con los beneficios que puede proporcionar, llenando el vacío existente en los planes de seguro tradicionales para cultivos bajo riego. Además, al implementar opciones de contratos plurianuales, esta puede convertirse en una opción de negocio viable para las compañías aseguradoras. En otras palabras, la mejor opción es que el agricultor pueda estar cubierto por dos esquemas de seguros: el tradicional, que asegura otros riesgos de producción, y el propuesto para la sequía hidrológica.

## **9.2. Conclusiones**

En esta tesis doctoral se ha diseñado y evaluado un seguro indexado por sequía hidrológica como instrumento económico para la mitigación del riesgo en la producción agrícola. La metodología propuesta evalúa los planes de seguro de sequía hidrológica para la agricultura de regadío teniendo en cuenta la escasez de agua a nivel de cuenca y una valoración económica de los efectos de la sequía. Este enfoque incluye indicadores financieros para evaluar la viabilidad del plan de seguros para las compañías de seguros y los beneficiarios, a partir de la simulación del seguro dentro del funcionamiento del sistema de gestión del recurso hídrico a nivel de cuenca, lo que constituye la principal contribución de la investigación.

En cuanto al diseño y selección del índice de sequía hidrológica de los tres índices evaluados en el caso de estudio, el  $IEE_{CHJ}$  es el más recomendado, ya que reúne las características esenciales para un seguro indexado: se reporta de manera periódica y oficialmente,

tiene una alta correlación con el suministro de agua en la comunidad de regantes y las variables utilizadas para su cálculo son adecuadas e identifican la ocurrencia de sequías hidrológicas en la cuenca.

Se encontró que la mejor opción en el diseño es un contrato anticipado multianual combinado con un esquema en el que se considere como índice disparador el  $IEE_{CHJ}=0.20$  sin franquicia deducible, ya que minimiza la semivarianza y la desviación estándar del margen bruto y se logran valores más altos del mínimo margen bruto al compararse con la opción de no implementar el seguro.

Para diseñar, evaluar e implementar este tipo de seguro por sequía hidrológica es indispensable la inclusión de un modelo de gestión de cuenca, ya que esto garantiza la correcta valoración del índice y su relación con los suministros de agua a los regantes. Además, junto con las condiciones de contrato recomendadas, primas, disparadores y franquicias deducibles, se reduce la incidencia de los problemas tradicionales de riesgo moral y selección adversa en los seguros indexados.

Los indicadores financieros de riesgo base e índice de siniestralidad muestran que es posible alcanzar un equilibrio de beneficios tanto para los agricultores, como para las aseguradoras, lo que lo hace una oportunidad de alternativa de mitigación ante los problemas de sequía para los primeros y una oportunidad de negocio rentable para los segundos.

Los resultados obtenidos en el caso de estudio muestran al seguro por sequía hidrológica como una alternativa económico-financiera importante para que los agricultores enfrenten los problemas cada vez más frecuentes y severos de eventos climáticos

extremos. Además, que es posible implementarse en otras comunidades de regantes porque su análisis está realizado con base en el manejo del recurso hídrico a escala de cuenca. Al tener en España una planificación hidrológica en cada confederación hidrográfica basada en modelos de gestión y que existan criterios de gestión de las sequías orientados y plasmados en planes especiales permitirá que la metodología llevada a cabo para el diseño del seguro se pueda adaptar a cada caso en particular con un alto nivel de confiabilidad.

### **9.3. Líneas de investigaciones futuras**

En cuanto a estudios futuros se recomiendan los siguientes:

Estimar el impacto económico de la escasez de agua en la agricultura es difícil debido a la variabilidad de los factores que la afectan, como los precios, la calidad y la demanda de productos. Como investigación futura, este estudio puede complementarse con una estimación del impacto del análisis de la sequía en los ingresos y los costes de producción. Por ejemplo, la escasez de agua puede reducir la calidad del producto, reduciendo así su precio.

El nivel de adopción del seguro propuesto también debe estudiarse desde una perspectiva socioeconómica, teniendo en cuenta su viabilidad y aspectos como la disposición a pagar del agricultor y la inclusión de posibles subsidios por parte de la administración regional, nacional o europea. Así mismo puede realizarse un diseño del negocio desde la perspectiva de la aseguradora.

También se recomienda analizar los efectos a medio y largo plazo de la escasez de agua en los cultivos, ya que esta puede

afectar la producción cercana, pero también puede afectar fisiológicamente a la planta. En el caso de cultivos permanentes (frutales) su afectación puede trasladarse a producciones de años posteriores.

Finalmente, este estudio puede complementarse mejorando la correlación entre los índices de sequía hidrológica y los suministros de agua e impactos económicos sobre la producción. Esto se puede lograr optimizando el número y la relevancia de las variables utilizadas por cada confederación para calcular el índice de escasez utilizando algoritmos de aprendizaje automático y técnicas de extracción de datos (Zaniolo et al. 2018).

## **GLOSARIO**

**Seguro Indexado:** Seguro que indemniza a los agricultores con base en el comportamiento de un indicador (índice) indirectamente relacionado con las pérdidas en el campo.

**Riesgo Moral:** Posibilidad de que el agricultor no aplique las prácticas agrícolas adecuadas por el hecho de haber contratado un seguro o no realice las acciones requeridas para la posible recuperación del bien afectado. En una situación de riesgo moral, una parte que entra en el acuerdo proporciona información engañosa o cambia su comportamiento después de que el acuerdo se ha hecho porque creen que no enfrentarán ninguna consecuencia por sus acciones.

**Selección adversa:** Los agricultores que más interés manifiestan por estar asegurados son quienes han experimentado pérdidas con mayor frecuencia y de mayor intensidad. Esto implica que son clientes susceptibles para sufrir más pérdidas que el promedio, aspecto que tendría que ser compensado por la contratación de seguros por parte de aquellos agricultores que registren menores pérdidas que el promedio o bien aumentar el costo de las primas de modo de atender esta circunstancia.

**Indemnización unitaria:** Compensación económica por pérdidas en el rendimiento esperado o daño de los cultivos.

**Prima:** Monto a pagar por el agricultor para contar con la cobertura de un seguro. La prima representa el valor del riesgo transferido e incluye los costes asociados a la administración, comercialización, prima del contrato de reaseguro y los beneficios

esperados por la empresa aseguradora. El pago de la prima es la transferencia de este riesgo del asegurado al asegurador, quien asume una determinada responsabilidad.

**Máximo valor indemnizable:** Es el nivel de protección del seguro indexado y corresponde al máximo valor indemnizable del esquema de seguros en €/ha.

**Disparador:** Se considera como el umbral o valor del Índice de Sequía por el cual se toma la determinación de indemnizar al asegurado

**Franquicia deducible:** Porcentaje de las pérdidas provocadas por un siniestro que el asegurado debe asumir, la que debe estar claramente estipulada en la póliza

**Riesgo base:** Dado que en los seguros indexados no se requiere realizar la verificación de daños a nivel de campo, existe la posibilidad de que ocurran desvíos entre lo que marca el índice seleccionado y lo que sucede en los predios de los productores. Es decir, puede ocurrir que se indemnice a una persona aun cuando no haya sufrido pérdidas agrícolas o bien no se pague en situaciones que sí corresponde.

## REFERENCIAS

- Abdi, M. J., Raffar, N., Zulkafli, Z., Nurulhuda, K., Rehan, B. M., Muharam, F. M., Khosim, N. A., & Tangang, F. (2022). Index-based insurance and hydroclimatic risk management in agriculture: A systematic review of index selection and yield-index modelling methods. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 67, 102653. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2021.102653>
- Adeyinka, A. A., Krishnamurti, C., Maraseni, T., & Chantarat, S. (2013, mayo 21). Viability of Weather Index Insurance in Managing Drought Risk in Australia. *Actuaries Institute*, 38. <http://www.actuaries.asn.au/>
- Adeyinka, A. A., Krishnamurti, C., Maraseni, T., & Chantarat, S. (2013). Viability of Weather Index Insurance in Managing Drought Risk in Australia. *Institute of Actuaries of Australia*.
- Alamanos, A., Mylopoulos, N., Loukas, A., & Gaitanaros, D. (2018). An Integrated Multicriteria Analysis Tool for Evaluating Water Resource Management Strategies. *Water*, 10(12), 1795. <https://doi.org/10.3390/w10121795>
- Andreu, J., Capilla, J., & Sanchís, E. (1996). AQUATOOL, a generalized decision-support system for water-resources planning and operational management. *Journal of Hydrology*, 177(3-4), 269-291. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(95\)02963-X](https://doi.org/10.1016/0022-1694(95)02963-X)
- Andreu, J., Ferrer-Polo, J., Pérez, M. A., Solera, A., & Paredes-Arquiola, J. (2013). Drought Planning and Management in the Júcar River Basin, Spain. En K. Schwabe, J. Albiac, J. D. Connor, R. M. Hassan, & L. Meza González (Eds.), *Drought in Arid and Semi-Arid Regions* (pp. 237-249). Springer

## Referencias

- Netherlands. [https://doi.org/10.1007/978-94-007-6636-5\\_13](https://doi.org/10.1007/978-94-007-6636-5_13)
- Bardají, I., Escribano, S., Garrido, A., & CEIGRAM - Universidad Politécnica de Madrid. (2016). *Principios básicos de seguros agrarios*. Cajamar Caja Rural.
- Barnett, B. J., Barrett, C. B., & Skees, J. R. (2008). Poverty Traps and Index-Based Risk Transfer Products. *World Development*, 36(10), 1766-1785. <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2007.10.016>
- Berbel, J., & Espinosa Tasón, J. (2021). La gestión del regadío ante la escasez del agua: El caso de España. En *INUNDACIONES Y SEQUÍAS. Análisis Multidisciplinar para Mitigar el Impacto de los Fenómenos Climáticos Extremos* (pp. 411-416). Joaquín Melgarejo, Ma Inmaculada López-Ortiz, Patricia Fernández-Aracil. <http://hdl.handle.net/10317/10392>
- Bucheli, J., Dalhaus, T., & Finger, R. (2021). The optimal drought index for designing weather index insurance. *European Review of Agricultural Economics*, 48(3), 573-597. <https://doi.org/10.1093/erae/jbaa014>
- Burke, M., De Janvri, A., & Quintero, J. (2010). Index-based insurance 5-10. CEQA, University.
- Campillo, J. P., Ibáñez, P. C., & Vargas, J. M. (2015). La Predicción Del Fracaso Empresarial Mediante Modelos Basados En La Técnica BOOSTED REGRESSION TREES (BRT). 24.
- Castel, J. R., & Buj, A. (1990). Response of Salustiana oranges to high frequency deficit irrigation. *Irrigation Science*, 11(2). <https://doi.org/10.1007/BF00188448>
- Chambers, M., & Dinsmore, T. W. (2015). *Advanced analytics methodologies: Driving business value with analytics*. Pearson Education.
- CHJ. (2015). *Plan hidrológico de la Demarcación Hidrográfica del Júcar 2016 – 2021*. Documento divulgativo. Confederación

## Referencias

- Hidrográfica del Júcar. <https://www.chj.es/es-es/ciudadano/libros/Paginas/Secciones.aspx>
- CHJ - Confederación Hidrográfica del Júcar. (2015). Plan hidrológico de la Demarcación Hidrográfica del Júcar 2016 – 2021. Documento divulgativo. Confederación Hidrográfica del Júcar. <https://www.chj.es/es-es/ciudadano/libros/Paginas/Secciones.aspx>
- CHJ - Confederación Hidrográfica del Júcar. (2016). Memorias de actuación 2016. <https://www.chj.es/es-es/Organismo/Memoriasdeactuaciones/Documents/Memoria%202016/05%20Ambito%20territorial%202016.pdf>
- CHJ - Confederación Hidrográfica del Júcar. (2018). Plan Especial De Sequía. Demarcación Hidrográfica Del Júcar. <https://www.chj.es/es-es/medioambiente/gestionsequia/Paginas/PlanEspecialdeAlertayEventualSequia.aspx>
- Cole, S. A., & Xiong, W. (2017). Agricultural Insurance and Economic Development. *Annual Review of Economics*, 9(1), 235-262. <https://doi.org/10.1146/annurev-economics-080315-015225>
- Confederación Hidrográfica del Júcar. (2015). Plan Hidrográfico de la demarcación hidrográfica del Júcar. Ciclo de planificación hidrológica 2015—2021. Anejo VI. Sistemas de explotación y balances. (p. 582). Confederación Hidrográfica del Júcar. [https://www.chj.es/Descargas/ProyectosOPH/Consulta%20publica/PHC-2015-2021/PHJ1521\\_Anejo06\\_SE-Balances\\_151126.pdf](https://www.chj.es/Descargas/ProyectosOPH/Consulta%20publica/PHC-2015-2021/PHJ1521_Anejo06_SE-Balances_151126.pdf)
- Confederación Hidrográfica del Júcar. (2020). SIA JÚCAR. Sistema de Información del agua de la Confederación Hidrográfica del Júcar. SIA JÚCAR. Sistema de Información del agua de la Confederación Hidrográfica del Júcar. <https://aps.chj.es/down/html/descargas.html>

## Referencias

- Díaz-Caneja, B., Giulia, C., Javier, F., & Pinilla, G. (2008). Agricultural Insurance Schemes. JRC Scientific and Technical Reports, JRC 45927. <http://ipsc.jrc.ec.europa.eu/>
- Doorenbos, J., & Kassam, A. H. (1979). Yield response to water (Food and Agriculture Organization of the United Nations). FAO.
- ENESA. (2018). 40 años del sistema Español de seguros agrarios (Entidad Estatal de Seguros Agrarios. O.A. (ENESA).Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación.). Catálogo de Publicaciones de la Administración General del Estado. <http://publicacionesoficiales.boe.es>
- ENESA, Entidad Estatal de Seguros Agrarios, Ollero Lara, Vergara, C., Isabel, S., & Cimas, P. (2018, noviembre 26). Las sequías en España. La respuesta del sistema español de seguros agrarios combinado a un desafío recurrente. Congreso Nacional del Medio Ambiente, Conama 2018, Madrid. [http://www.conama2018.conama.org/web/generico.php?id\\_paginas=&lang=es&menu=438&id=289&op=view&tipo=C](http://www.conama2018.conama.org/web/generico.php?id_paginas=&lang=es&menu=438&id=289&op=view&tipo=C)
- FAO. (2018). Seguros agrícolas para la agricultura familiar en América Latina y el Caribe—Lineamientos para su desarrollo e implementación (Vila, F.). <http://www.fao.org/publication/es>
- FAO. (2021). El estado mundial de la agricultura y la alimentación 2021. FAO. <https://doi.org/10.4060/cb4476es>
- FAO. (2022). La labor de la FAO en el agua [Organización de las Naciones unidas para la alimentación y la agricultura]. Agua. <https://www.fao.org/water/es/>
- Future Earth. (2020). Our Future on Earth 2020.
- Garrido, A., & Zilberman, D. (2004). Revisiting the demand of agricultural insurance: The case of Spain. Research in Agricultural and Applied Economics. <https://ageconsearch.umn.edu/>

## Referencias

- Generalitat Valenciana. (2020). Informe del Sector Agrario Valenciano 2019 (Informes del Sector Agrario Valenciano) [Anual]. Conselleria de Agricultura, Desarrollo Rural, Emergencia Climática y Transición Ecológica. <http://agroambient.gva.es/es/informes-del-sector-agrario-valenciano>
- Georgakakos, A. P. (2007). Decision support systems for integrated water resources management with an application to the Nile basin. En *Topics on System Analysis and Integrated Water Resources Management* (pp. 99-116). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-008044967-8/50005-1>
- Gil, M., Garrido, A., & Gómez-Ramos, A. (2011). Economic analysis of drought risk: An application for irrigated agriculture in Spain. *Agricultural Water Management*, 98(5), 823-833. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2010.12.008>
- Gómez-Limón, J. A., & Guerrero-Baena, M. D. (2019). Diseño de un seguro indexado para la cobertura del riesgo de sequía hidrológica en la agricultura de regadío. *Agua y Territorio*, 13, 79-92. <https://doi.org/10.17561/at.13.4057>
- Gómez-Limón, J. A. (2020). Hydrological drought insurance for irrigated agriculture in southern Spain. *Agricultural Water Management*, 240, 106271.
- Harou, J. J., Pulido-Velazquez, M., Rosenberg, D. E., Medellín-Azuara, J., Lund, J. R., & Howitt, R. E. (2009). Hydro-economic models: Concepts, design, applications, and future prospects. *Journal of Hydrology*, 375(3-4), 627-643. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.06.037>
- Hastie, T., Tibshirani, R., & Friedman, J. (2009). *The Elements of Statistical Learning* (Second Edition). Springer Series in Statistics. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.08.001>.
- Hess, U., Hazell, P., & Kuhn, S. (2016). Innovations and emerging trends in agricultural insurance. Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH.

## Referencias

- Hohl, R., Jiang, Z., Tue Vu, M., Vijayaraghavan, S., & Liang, S.-Y. (2021). Using a regional climate model to develop index-based drought insurance for sovereign disaster risk transfer. *Agricultural Finance Review*, 81(1), 151-168. <https://doi.org/10.1108/AFR-02-2020-0020>
- IAIS. (2018). Issues paper on index based insurances, particularly in inclusive insurance markets. International Association of Insurance Supervisors. [www.iaisweb.org](http://www.iaisweb.org)
- Iglesias, A., & Garrote, L. (2015). Adaptation strategies for agricultural water management under climate change in Europe. *Agricultural Water Management*, 155, 113-124. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.03.014>
- International Risk Management Institute, Inc. (IRMI). (2019). Glossary of Insurance & Risk Management Terms. Glossary of Insurance & Risk Management Terms. <http://www.irmi.com/online/insurance-glossary/default.aspx>.
- Iturrioz, R. (2009). Agricultural Insurance. The International Bank for Reconstruction and Development/The World Bank. [www.worldbank.org/nbfi](http://www.worldbank.org/nbfi)
- Jensen, N., & Barrett, C. (2017). Agricultural Index Insurance for Development. *Applied Economic Perspectives and Policy*, 39(2), 199-219. <https://doi.org/10.1093/aep/ppw022>
- Jin, Z., & Erhardt, R. J. (2020). Incorporating Climate Change Projections into Risk Measures of Index-Based Insurance. *North American Actuarial Journal*, 24(4), 611-625. <https://doi.org/10.1080/10920277.2019.1690525>
- Kellner, U., & Musshoff, O. (2011). Precipitation or water capacity indices? An analysis of the benefits of alternative underlyings for index insurance. *Agricultural Systems*, 104(8), 645-653. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2011.06.007>
- Kusuma, A., Jackson, B., & Noy, I. (2018). A viable and cost-effective weather index insurance for rice in Indonesia. The Geneva

## Referencias

- Risk and Insurance Review, 43(2), 186-218.  
<https://doi.org/10.1057/s10713-018-0033-z>
- Leblois, A., & Quirion, P. (2013). Agricultural insurances based on meteorological indices: Realizations, methods and research challenges: Agricultural insurances based on meteorological indices: a survey. *Meteorological Applications*, 20(1), 1-9.  
<https://doi.org/10.1002/met.303>
- Leiva, A. J., & Skees, J. R. (2008). Using Irrigation Insurance to Improve Water Usage of the Rio Mayo Irrigation System in Northwestern Mexico. *World Development*, 36(12), 2663-2678. <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2007.12.004>
- López Nicolás, A. F. L. (2017). Métodos y herramientas para diseño y evaluación de instrumentos económicos para la gestión a escala de cuenca [Doctoral dissertation, Universitat Politècnica de València].  
<https://riunet.upv.es/handle/10251/91143>
- Lopez-Nicolas, A., Pulido-Velazquez, M., & Macian-Sorribes, H. (2017). Economic risk assessment of drought impacts on irrigated agriculture. *Journal of Hydrology*, 550, 580-589.  
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.05.004>
- Lorite, I. J., Mateos, L., Orgaz, F., & Fereres, E. (2007). Assessing deficit irrigation strategies at the level of an irrigation district. *Agricultural Water Management*, 91(1-3), 51-60.  
<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2007.04.005>
- Maestro, T. (2016). Hydrological Drought Index Insurance for Irrigated Agriculture [PhD Thesis, Universidad Politécnica de Madrid]. <https://doi.org/10.20868/UPM.thesis.43595>
- Maestro, T., Barnett, B. J., Coble, K. H., Garrido, A., & Bielza, M. (2016). Drought Index Insurance for the Central Valley Project in California. *Applied Economic Perspectives and Policy*, 38(3), 521-545.  
<https://doi.org/10.1093/aep/38.3.521>

## Referencias

- Maestro, T., Bielza, M., & Garrido, A. (2016). Hydrological drought index insurance for irrigation districts in Spain. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 14(3), e0105. <https://doi.org/10.5424/sjar/2016143-8981>
- Maestro, T., Garrido, A., & Bielza, M. (2016). Hydrological drought index insurance for irrigation districts in Spain. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 14(3), e0105. <https://doi.org/10.5424/sjar/2016143-8981>
- Mahul, O., & Stutley, C. J. (2010). Government Support to Agricultural Insurance: Challenges and Options for Developing Countries. The World Bank. <https://doi.org/10.1596/978-0-8213-8217-2>
- Mechler, R., Pulido-Velazquez, M., Koehler, M., Jenkins, K., Surminski, S., Williges, K., Botzen, W., Cremades, R., Dransfeld, B., Hudson, P., Lopez-Nicolas, A., Lorant, A., Manez, M., & Michaelowa, A. (2017). Economic instruments. <https://doi.org/10.5167/UZH-143603>
- MITECO, (2018). Tipos de sequía. Observatorio Nacional de la Sequía. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. <https://www.miteco.gob.es/es/agua/temas/observatorio-nacional-de-la-sequia/>
- Okpara, J. N., Afiesimama, E. A., Anuforom, A. C., Owino, A., & Ogunjobi, K. O. (2017). The applicability of Standardized Precipitation Index: Drought characterization for early warning system and weather index insurance in West Africa. *Natural Hazards*, 89(2), 555-583. <https://doi.org/10.1007/s11069-017-2980-6>
- Pereira, L. S., Oweis, T., & Zairi, A. (2002). Irrigation management under water scarcity. *Agricultural Water Management*, 57(3), 175-206. [https://doi.org/10.1016/S0378-3774\(02\)00075-6](https://doi.org/10.1016/S0378-3774(02)00075-6)
- Pérez Blanco, C. D., & Gómez, C. M. (2014). Insuring water: A practical risk management option in water-scarce and

## Referencias

- drought-prone regions? *Water Policy*, 16(2), 244-263.  
<https://doi.org/10.2166/wp.2013.131>
- Pulido-Velazquez, M., Cabrera Marcet, E., & Garrido Colmenero, A. (2014). Economía del agua y gestión de recursos hídricos. *Ingeniería del agua*, 18(1), 95.  
<https://doi.org/10.4995/ia.2014.3160>
- Quiroga, S., Garrote, L., Fernandez-Haddad, Z., & Iglesias, A. (2011). Valuing drought information for irrigation farmers: Potential development of a hydrological risk insurance in Spain. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 9(4), 1059.  
<https://doi.org/10.5424/sjar/20110904-063-11>
- Rey, D., Pérez-Blanco, C. D., Escrivá-Bou, A., Girard, C., & Veldkamp, T. I. E. (2019). Role of economic instruments in water allocation reform: Lessons from Europe. *International Journal of Water Resources Development*, 35(2), 206-239.  
<https://doi.org/10.1080/07900627.2017.1422702>
- Roth, J., & McCord, M. (2008). *Agricultural Microinsurance. Global Practices and Prospects* (Berold, R). The MicroInsurance Centre, LLC.
- Rozo, A. F. L. (2013). El seguro agrícola en Colombia [Reflexiones comparadas sobre su desarrollo a partir de experiencias internacionales]. Fasecolda.
- Ruiz, J., Bielza, M., Garrido, A., & Iglesias, A. (2015). Dealing with drought in irrigated agriculture through insurance schemes: An application to an irrigation district in Southern Spain. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 13(4), e0106.  
<https://doi.org/10.5424/sjar/2015134-6941>
- Salmoral, G., Rey, D., Rudd, A., Margon, P., & Holman, I. (2019). A Probabilistic Risk Assessment of the National Economic Impacts of Regulatory Drought Management on Irrigated Agriculture. *Earth's Future*, 7(2), 178-196.  
<https://doi.org/10.1029/2018EF001092>

## Referencias

- Shirsath, P., Vyas, S., Aggarwal, P., & Rao, K. N. (2019). Designing weather index insurance of crops for the increased satisfaction of farmers, industry and the government. *Climate Risk Management*, 25, 100189. <https://doi.org/10.1016/j.crm.2019.100189>
- Siebert, A. (2016). Analysis of the future potential of index insurance in the West African Sahel using CMIP5 GCM results. *Climatic Change*, 134(1-2), 15-28. <https://doi.org/10.1007/s10584-015-1508-x>
- Solera, A., Paredes-Arquiola, J., & Andreu, J. (2015). AQUATOOL. Manual de Usuario. Versión 1.0. <https://aquatool.webs.upv.es/files/manuales/aquatool/ManualAquaToolPlus.pdf>
- Tallaksen, L. M., & Van Lanen, H. A. (2004). Hydrological drought. Processes and estimation methods for streamflow and groundwater (Tallaksen, L and Van Lanen, H.A.J.). Elsevier.
- The World Bank. (2022). El agua en la agricultura. Entendiendo la pobreza. <https://www.bancomundial.org/es/topic/water-in-agriculture#1>
- Van Loon, A. F. (2015). Hydrological drought explained. *WIREs Water*, 2(4), 359-392. <https://doi.org/10.1002/wat2.1085>
- Vargas-Amelin, E., & Pindado, P. (2014). The challenge of climate change in Spain: Water resources, agriculture and land. *Journal of Hydrology*, 518, 243-249. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.11.035>
- Vedenov, & Barnett, B. J. (2004a). Efficiency of Weather Derivatives as Primary Crop Insurance Instruments. *Journal of Agricultural and Resource Economics*, 29(3), 18.
- Vedenov, D., & Barnett, B. J. (2004b). Efficiency of Weather Derivatives as Primary Crop Insurance Instruments. *Journal of Agricultural and Resource Economics*, 29, 387-403.

## Referencias

- Vélez, J. E., Álvarez-Herrera, J. G., & Alvarado-Sanabria, O. H. (2012). El Estrés Hídrico en Cítricos (Citrus spp.): Una revisión. *Orinoquia*, 16(2), 32. <https://doi.org/10.22579/20112629.245>
- Williams, T. M., & Travis, W. R. (2019). Evaluating Alternative Drought Indicators in a Weather Index Insurance Instrument. *Weather, Climate, and Society*, 11(3), 629-649. <https://doi.org/10.1175/WCAS-D-18-0107.1>
- World Bank. (2018). Seguro Agropecuario Catastrófico en Colombia. Anexo "As If" (p. 12). World Bank Group.
- Zaniolo, M., Giuliani, M., Castelletti, A. F., & Pulido-Velazquez, M. (2018). Automatic design of basin-specific drought indexes for highly regulated water systems. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(4), 2409-2424.
- Zeng, L. (2000). On the Basis Risk of Industry Loss Warranties. *The Journal of Risk Finance*, 1(4), 27-32. <https://doi.org/10.1108/eb043452>
- Zhang, J., Tan, K. S., & Weng, C. (2019). INDEX INSURANCE DESIGN. *ASTIN Bulletin*, 49(2), 491-523. <https://doi.org/10.1017/asb.2019.5>

## Anexo I. Divulgación de resultados

### I.I Publicaciones en revistas indexadas

- **Artículos científicos en relación directa con la tesis:**

**VALENZUELA-MAHECHA, M.A.;** PULIDO-VELAZQUEZ, M.; MACIAN-SORRIBES, H. Hydrological Drought-Indexed Insurance for Irrigated Agriculture in a Highly Regulated System. *Agronomy* 2022, 12, 2170. <https://doi.org/10.3390/agronomy12092170>.

- **Artículos científicos en relación indirecta con la tesis:**

Martínez-Tunarroza, J.L.; **VALENZUELA-MAHECHA, M.A.;** Rodríguez-Vásquez, A.F.; García-Navarrete, O.L. Methodological Design to Determine Water Resource Management Indicators in Irrigation Districts. *Agronomy* 2022, 12, 1407. <https://doi.org/10.3390/agronomy12061407>

### I.II Congresos

**VALENZUELA-MAHECHA, M.A.;** PULIDO-VELAZQUEZ, M.; MACIAN-SORRIBES. *Hydrological drought index insurance in irrigated agriculture in a highly regulated system: an economic instrument for risk mitigation for the Jucar River Basin*. En: Annual General Assembly, EGU22. Viena, Austria. 23 al 27 de mayo de 2022. Ponente.

**VALENZUELA, M.** *Diseño de un esquema de seguro indexado por sequía hidrológica en campos de regantes desde un enfoque hidroeconómico*. En: X Simposio Conacyt becarios en Europa. 07 al 09 de diciembre de 2021. Ponente (virtual).

## **Anexos**

MARTINEZ, J. **VALENZUELA, M.** RODRÍGUEZ, A. GARCIA, O. *Diseño Metodológico para la determinación de indicadores de gestión del recurso hídrico en distritos de irrigación.* En: XI Congreso Ibérico de Agro ingeniería. España. 11 al 12 de noviembre de 2021. Ponente.

**VALENZUELA, M.** *Agroclimatología y gestión de riesgos. Estrategia para el desarrollo productivo.* En: 1er Seminario Internacional "La Ingeniería Agrícola en el marco del desarrollo sostenible". Universidad de Sucre. 14 de diciembre a 16 de diciembre de 2020. Ponencia principal.  
<https://fb.watch/hABXTfCqwQ/>