



Annex A.C.2.7.1_4

DOCUMENTO ADJUNTO AL ESTUDIO DE
“APLICACIÓN DEL MODELO DE SIMULACIÓN DE LA GESTIÓN DEL RECURSO
AQUATOOL PARA EL ANÁLISIS DE LOS EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO
SOBRE LAS GARANTÍAS DE SUMINISTRO DE LAS DEMANDAS DE AGUA EN
NAVARRA”

Annex A.C.2.7.1_4. Documento de síntesis

Action C.2.7

Grant Agreement n°. LIFE 16 IPC/ES/000001
Towards an integrated, coherent and inclusive implementation of
Climate Change Adaptation policy in a region: Navarre

[LIFE-IP NAdapta-CC]

LIFE 2016 INTEGRATED PROJECTS CLIMATE ACTIONS

Project start date: 2017-10-02

Project end date: 2025-12-31

Coordinator:

Partners:

DISSEMINATION LEVEL		
PU	Public	☒
PP	Restricted to other programme participants (including the Commission Services)	☐
RE	Restricted to a group specified by the consortium (including Commission Services)	☐
CC	Confidential, only for members of the consortium (including Commission Services)	☐

Autoría:

 Gobierno de Navarra-Nafarroako Gobernua y Gestión Ambiental de Navarra-Nafarroako Ingurumen Kudeaketa [GAN-NIK, S.A] con la asistencia técnica del Grupo de Ingeniería de Recursos Hídricos [GIRH] de la Universidad Politécnica de Valencia [UPV]

Referencia recomendada a efectos bibliográficos:

Gobierno de Navarra- Nafarroako Gobernua; Gestión Ambiental de Navarra-Nafarroako Ingurumen Kudeaketa [GAN-NIK]; Universidad Politécnica de Valencia [2024]. Aplicación del modelo de simulación de la gestión del recurso Aquatool para el análisis de los efectos del cambio climático sobre las garantías de suministro de las demandas de agua en Navarra. DOCUMENTO DE SÍNTESIS. Acción C.2. del Proyecto LIFE-IP NAdapta-CC [LIFE 16 IPC/ES/000001] de la Unión Europea. Pamplona. Servicio de Economía Circular y Cambio Climático del Gobierno de Navarra a través de la empresa pública Gestión Ambiental de Navarra- Nafarroako Ingurumen Kudeaketa [GAN-NIK] en colaboración con la Universidad Politécnica de Valencia [UPV].

Este documento corresponde al documento A.C.2.7.1_4. no previsto inicialmente como entregable en el Proyecto LIFE-IP NAdapta-CC.

El Proyecto LIFE-IP NAdapta-CC LIFE 16 IPC/ES/000001 está ejecutado con la contribución financiera del programa LIFE de la Unión Europea

El contenido de este informe no refleja la opinión oficial de la Unión Europea. La responsabilidad de la información y los puntos de vista expresados en esta publicación recaen completamente en su autoría.

www.lifenadapta.eu

Versión 1. Abril de 2024

Table of contents

1.	INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS.....	1
2.	ANTECEDENTES. PRIMER ESTUDIO [LIFE NADAPTA,2021].....	3
2.1	Análisis de las tendencias observadas	4
2.2	Análisis de las tendencias futuras basado en las proyecciones climáticas.....	5
3.	SEGUNDO ESTUDIO [LIFE NAdapta, 2023]	7
3.1	Definición de los elementos de entrada a los modelos	8
3.2	Diseño y calibración del modelo de simulación de cuenca en situación actual.....	9
3.3	Evaluación del impacto del CC en las garantías de suministro.....	11
3.3.1	Definición de escenarios futuros de recursos hídricos y demandas de agua	11
3.3.2	Metodología empleada para el análisis de resultados.....	13
3.4	Resultados obtenidos.....	14
3.4.1	Resultados obtenidos en la simulación con los escenarios base o de referencia [calculados con los recursos hídricos históricos 1940-2015].....	14
3.4.2	Análisis de los efectos del Cambio Climático	16
4.	CONCLUSIONES	26

Tables

Tabla 2-1 Variaciones de las aportaciones en cada PI con respecto al PC.....	6
Tabla 3-1 Demanda de agua total estimada en el ámbito de estudio.	13

Figures

Figura 1 Ámbito de estudio: cuencas hidrográficas de Navarra.....	3
Figura 2 Localización de los embalses y principales canales considerados en la simulación.....	10
Figura 3 Resultados de garantía volumétrica en demandas agrarias por sistemas para el escenario EDA [izquierda] y para el escenario EDF [derecha]	18
Figura 4 Resultados de garantía volumétrica en demandas urbanas por sistemas para los escenarios EDA [izquierda] y EDF [derecha].....	19
Figura 5 Resultados de garantía volumétrica en demandas agrarias por sistemas para los escenarios EDF [izquierda] y EDC [derecha].	21
Figura 6 Evolución de la probabilidad de estado de las reservas en Itoiz por meses para el escenario “base” de la alternativa EDA [izquierda] y EDF [derecha].....	23
Figura 7 Evolución de la probabilidad de estado de las reservas en Itoiz por meses para el escenario con CC RCP 8.5 y 3er horizonte temporal para las alternativas EDA[izquierda] y EDF [derecha].....	23
Figura 8 Comparativa de resultados de garantía volumétrica en el Canal de Navarra para los escenarios EDA y EDF [izquierda] y para los escenarios EDF y EDC [derecha].....	25

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

El principal objetivo del proyecto LIFE-IP NAdapta-CC (2017-2025) es el desarrollo de medidas de adaptación que limiten los efectos negativos derivados del cambio climático (CC) en varias áreas estratégicas en Navarra. En el área del Agua, uno de los principales objetivos es la realización de estudios de diagnóstico que permitan evaluar el efecto del CC en el recurso hídrico disponible para la atención de las distintas demandas de agua existentes y planificadas en Navarra.

La disponibilidad del recurso hídrico depende en gran medida de su variabilidad. En este sentido, cabe señalar lo siguiente:

Los recursos hídricos totales que circulan por término medio por Navarra, si no hubiera embalses ni tomas (en régimen natural), son de aproximadamente 10.000 hm³, cifra sensiblemente superior a las demandas consuntivas, que en situación actual se estiman en cerca de 1.900 hm³ (1.700 para regadío y 200 para abastecimiento e industria). A pesar de ello, el **recurso hídrico presenta una variabilidad natural** que dificulta su aprovechamiento. En este sentido, los ríos navarros, presentan una triple variabilidad:

- **Variabilidad espacial:** hay una gran diferencia entre los ríos según la cuenca en la que se encuentren. Los recursos totales se reparten de una forma irregular con un claro gradiente Norte-Sur. En cuanto a escorrentía generada, los valores máximos se dan en las cuencas de la vertiente norte y cabeceras de los ríos pirenaicos (con valores cercanos a los 1.200-1.400 mm/año). Por el contrario, los valores mínimos de aportación específica se dan en las cuencas de los ríos Linares, Queiles y Alhama, donde se obtienen valores promedio que oscilan entre los 75 y 90 mm/año.
- **Variabilidad estacional:** los recursos que fluyen por los ríos varían mucho según la estación del año. Así, el 83 % de los recursos hídricos se generan entre los meses de noviembre a mayo, por lo que solo el 17 % restante se genera de junio a octubre, meses en la que la disponibilidad en régimen natural es menor y la demanda para el uso del agua es más elevada.
- **Variabilidad interanual:** los ríos no presentan la misma cantidad de recursos todos los años.

El **Cambio Climático (CC)** supone una grave amenaza a la variabilidad del recurso hídrico que, podría afectar de manera importante a su disponibilidad para la satisfacción de las distintas demandas de agua en Navarra.

Los estudios realizados a nivel internacional por el IPCC (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático) o a nivel nacional por el CEDEX (Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas), concluyen que como consecuencia del Cambio Climático podría producirse **un descenso de las aportaciones a lo largo del siglo XXI en España**.

Las conclusiones obtenidas en dichos estudios motivaron la realización del **presente estudio**, realizado en el marco del proyecto NAdapta, que pretende evaluar cómo afectará el CC al recurso disponible en los sistemas de explotación de Navarra. La consideración de los escenarios de CC en la gestión y planificación del agua en Navarra permitirá una mejor adaptación al mismo disminuyendo en la medida de lo posible sus efectos negativos.

El **primer trabajo** efectuado en esta línea [LIFE NAdapta,2021], consistió en la evaluación de la variación del recurso hídrico en régimen natural como consecuencia del Cambio Climático. Con este fin se llevó a cabo la estimación de distintos escenarios de recursos hídricos a futuro a partir de un conjunto de proyecciones climáticas procedentes del Quinto informe de evaluación del IPCC. El análisis de resultados permitió concluir que, si bien existen algunas proyecciones que dan lugar a un cierto aumento de recursos en el periodo 2010-2040, en promedio, todos los escenarios auguran **una disminución en los recursos hídricos** a lo largo del siglo XXI. Las principales conclusiones de este estudio fueron publicadas en el Portal Web de NAdapta: [<https://lifenadapta.navarra.es/es/accion-c2.7>].

El estudio citado ha constituido el punto de partida del **segundo trabajo** que se resume en el presente informe, cuyo objetivo principal consiste en evaluar la repercusión que una posible disminución en el recurso hídrico puede tener **sobre el grado de garantía con el que se suministran las demandas de agua** para distintos planes de desarrollo a futuro en Navarra.

El trabajo se ha realizado para todos los sistemas de aprovechamiento de Navarra: cuenca del Ega, Arga, Aragón, Alhama y Queiles, eje del Ebro, Odrón y Linares y cuencas de la vertiente cantábrica. En la Figura 1 se muestra la extensión de las cuencas hidrográficas de los ríos que se han modelizado, junto con la divisoria de aguas que separa las dos grandes vertientes en Navarra [la cuenca del Ebro y la Norte o Cantábrica]. Como se puede apreciar en dicha figura, prácticamente la totalidad de las cuencas son intercomunitarias, es decir, su superficie se distribuye entre varias comunidades autónomas.

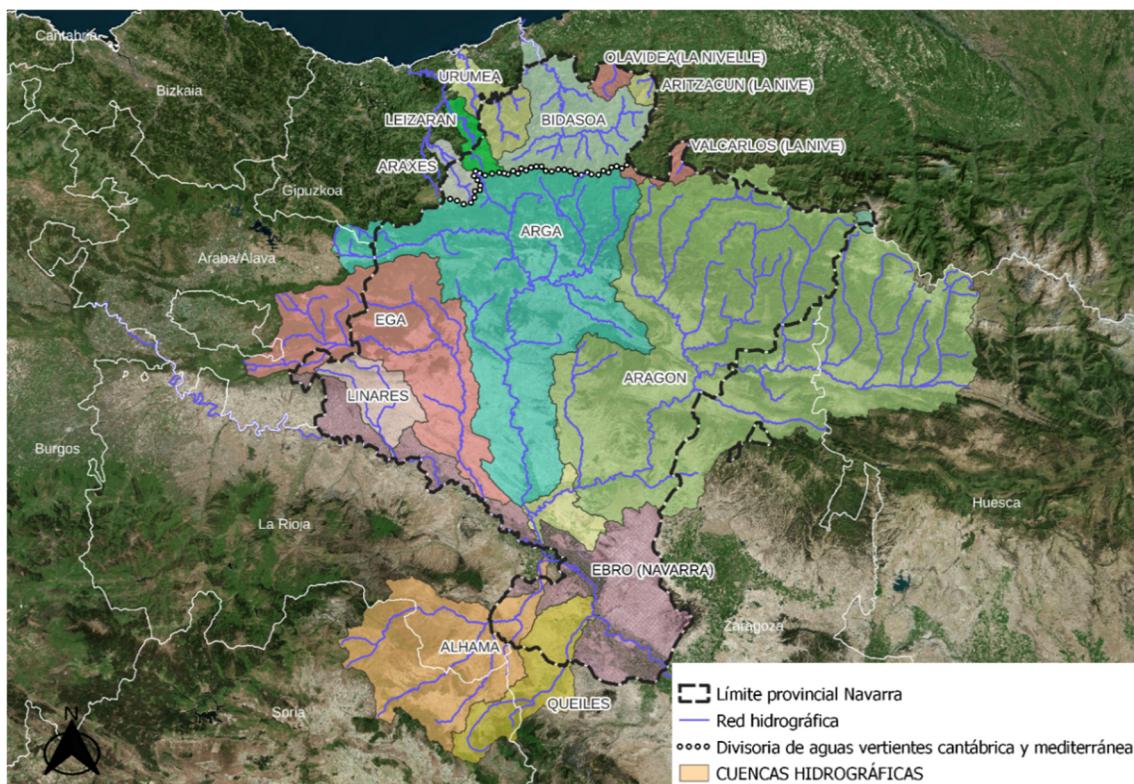


Figura 1 Ámbito de estudio: cuencas hidrográficas de Navarra

2. ANTECEDENTES. PRIMER ESTUDIO [LIFE NADAPTA,2021]

En este apartado se presentan los principales resultados y conclusiones del primer estudio realizado en el marco del Proyecto [LIFE NAdapta,2021] ya que constituye el punto de partida del trabajo que se resume en el presente documento de síntesis.

El principal objetivo del estudio consistió en evaluar la **variación de los recursos hídricos** en régimen natural como consecuencia de **los efectos del Cambio Climático**.

El estudio se realizó en 3 fases:

1. En la primera fase se analizaron las variables climáticas y las aportaciones históricas del Banco de Datos Hidrológico de Gobierno de Navarra [BDH] a lo largo del periodo 1940-2015.
2. En la segunda fase se realizó la selección de nueve modelos de cambio climático y la valoración de la información climática proporcionada por los modelos que se emplearán para la evaluación del impacto a lo largo del siglo XXI.

3. En la tercera fase se evaluó el impacto del cambio climático en los recursos hídricos en régimen natural a lo largo del siglo XXI.

2.1 Análisis de las tendencias observadas

En esta primera fase se realizó el análisis de las variables climáticas y de las aportaciones disponibles en el Banco de Datos Hidrológico de Gobierno de Navarra (BDH). En dicho estudio se obtuvo la **tendencia** de la precipitación, de la temperatura y de las aportaciones en el **periodo histórico comprendido entre 1940 y 2015**, para de esta forma poder tener una adecuada base comparativa que poder utilizar en el proceso de selección de los modelos climáticos, la cual se llevó a cabo en la segunda fase del estudio.

El estudio se realizó considerando 3 periodos de tiempo: 1940-2015 [periodo completo], 1954-2015 [periodo coincidente con el estudio de AEMET¹] y 1970-2015 [periodo más reciente].

Muy resumidamente, el estudio concluye:

-  Los resultados obtenidos en el análisis de las **temperaturas** presentan significancia estadística, por lo que se puede decir con certeza que se está produciendo **un aumento de la temperatura media** en Navarra. Conforme avanzamos a lo largo del siglo, este aumento es más acusado y más evidente. En resumen, se han obtenido los siguientes resultados:
 - Entre 1940-2015, una tendencia positiva de +0,07°C/decenio
 - En el periodo 1954-2015, una tendencia positiva de +0,15°C/decenio
 - Entre 1970-2015, una tendencia positiva de +0,30 °C/decenio.
-  Si bien se observa un descenso de las **precipitaciones** en Navarra, los resultados obtenidos no presentan significancia estadística, por lo que deben tomarse con suma cautela. Teniendo esto último en consideración, se puede apreciar, una tendencia negativa en la precipitación con un decrecimiento medio de 0,47 %/decenio para el periodo 1970-2015.
-  En cuanto a las **aportaciones** en régimen natural, al igual que ocurre para el caso de la precipitación, la serie analizada muestra una tendencia decreciente, aunque no estadísticamente significativa, por lo que los resultados obtenidos están sujetos a importantes incertidumbres. Así, para el periodo más completo [1940-2015] la tendencia media es -0,2%/decenio, mientras que para el periodo más corto y actual [1970-2015] la tendencia es de -3,5%/decenio. Las cuencas de la vertiente cantábrica, **Bidasoa y Urumea**, son las únicas que presentan una tendencia negativa estadísticamente significativa a partir de los años 50, con una disminución del recurso de entre el 4 y 5 %/decenio para el periodo 1970-2015.

¹ Fuente: Oria, P. [2017]: Evolución de los indicadores climáticos en Navarra. Delegación Territorial de AEMET en Navarra

-  Del análisis de los resultados referentes a las **sequías severas**, cabe destacar que en términos generales se aprecia un número de sequías relativamente uniforme a lo largo del tiempo y que está relacionado con la existencia de periodos secos y húmedos, pero no se aprecia una tendencia clara en la variación de las sequías a lo largo del periodo 1940-2015.

2.2 Análisis de las tendencias futuras basado en las proyecciones climáticas

Conocer los efectos del cambio climático en la Comunidad Foral de Navarra requiere estudiar la evolución futura de las principales variables climáticas. Para ello, se seleccionaron **un conjunto de 9 proyecciones regionalizadas a partir de los modelos climáticos** utilizados en el Quinto Informe de Evaluación del IPCC que disponen de datos de precipitación y temperatura a lo largo de un periodo de control histórico (1970-2000) y un horizonte futuro (2010-2100) y para dos escenarios de emisión de gases de efecto invernadero o trayectorias de concentración representativas (RCP de sus siglas en inglés), y que se resumen en:

-  **RCP 4.5:** corresponde a un escenario que contempla medidas de mitigación modestas que llevan a un incremento en las emisiones de gases de efecto invernadero, que alcanzan su punto máximo alrededor de 2040 para luego disminuir y que llevaría a un aumento de la temperatura media del planeta de 2,5°C respecto a los niveles preindustriales para 2100.
-  **RCP 8.5:** escenario de emisiones en que estas continúan aumentando durante todo el siglo XXI ya que no se aplican políticas de mitigación. Supone el peor de los escenarios del IPCC y llevaría a un aumento de la temperatura media del planeta de 5°C respecto a los niveles preindustriales para 2100.

Para **conocer el impacto del cambio climático** en los recursos hídricos, es necesario estimar previamente los caudales o las aportaciones que se espera que se generen en las distintas cuencas hidrográficas de Navarra a partir de las precipitaciones y temperaturas previstas por los modelos de cambio climático a lo largo del siglo XXI. Así, empleando como datos de entrada dichas series climáticas, se ha procedido a efectuar la simulación hidrológica con el mismo modelo aplicado para el estudio de recursos históricos, lo que ha permitido obtener **9 series de aportaciones a nivel diario entre los años 1970 y 2100 para cada escenario de emisión (RCP4.5 y RCP8.5)**.

En lo referente a la variación de las **aportaciones**, el estudio concluyó que, de acuerdo con la disminución de la precipitación y aumento de la temperatura esperados, se prevé **una tendencia decreciente** estadísticamente significativa de las aportaciones a lo largo del periodo 2010-2100, tanto más acusada cuanto más avancemos en el siglo y cuanto menor sea el esfuerzo global de mitigación del Cambio Climático [escenario RCP8.5]. Este decrecimiento se ve potenciado respecto a las variaciones obtenidas en la precipitación, debido a la combinación con el efecto del aumento de la temperatura [que tiene relación directa con el aumento de ETP] y otros procesos que intervienen en el ciclo hidrológico.

Finalmente, el estudio se completó evaluando el impacto del CC en los recursos hídricos para 3 periodos futuros de 30 años: 2010-2040, 2040-2070 y 2070-2100, estimando los **cambios o % de variación** medios del conjunto de las series de aportaciones para cada periodo futuro de impacto [PI] con respecto al periodo de control [PC]: 1970-2000, en una serie de puntos estratégicos en relación a los recursos hídricos. **Estos coeficientes son los que se han empleado para la definición de los escenarios hidrológicos futuros empleados en el Segundo estudio realizado en NAdapta.**

Si bien el análisis se ha realizado a nivel de subcuenca, se muestran a modo de resumen, los resultados promediados a nivel de demarcación hidrográfica en la siguiente tabla. En la misma se indica el **valor promedio del conjunto de las 9 proyecciones** [Med], valor máximo [Mx] y mínimo [Mn] de las mismas para cada horizonte temporal y escenario de emisiones en ambas demarcaciones hidrográficas.

Tabla 2-1 Variaciones de las aportaciones en cada PI con respecto al PC.

Descripción	Período	Variación aportaciones [%] RCP4.5			Variación aportaciones [%] RCP 8.5		
		Min.	Med.	Max.	Min.	Med.	Max.
Vertiente cantábrica	2010-2040	-14,2	-2,0	15,2	-15,8	-6,7	8,4
	2040-2070	-20,6	-14,8	-9,8	-28,0	-16,4	-7,3
	2070-2100	-23,1	-15,8	-5,9	-44,1	-33,1	-20,4
Vertiente mediterránea	2010-2040	-22,1	-4,5	13,7	-16,3	-9,3	5,1
	2040-2070	-26,4	-19,0	-11,2	-35,1	-22,0	-6,0
	2070-2100	-32,8	-20,2	-12,4	-54,3	-40,8	-27,1

En esta tabla puede apreciarse cómo existen proyecciones que indican un cierto aumento de recursos [véase periodo 2010-2040] a pesar de que, en promedio, todos los escenarios auguran una **disminución en los recursos disponibles**. También puede apreciarse cómo el escenario RCP8.5 supone mayores disminuciones en los recursos naturales. Y los periodos más lejanos indican una mayor disminución en los recursos promedio, a la vez que también presentan un mayor rango de variabilidad.

Analizando más en detalle los resultados obtenidos, se aprecia cómo, en el periodo futuro más cercano- entre 2040 y 2070- se estiman reducciones de las aportaciones de entre el 15 y el 20 %. Teniendo en cuenta que por Navarra circulan aproximadamente 10000 hm³, los recursos hídricos futuros estimados para este horizonte podrían reducirse a unos 8000 hm³. La situación más desfavorable sería la correspondiente al tercer horizonte temporal del escenario de emisiones RCP8.5, donde podría darse una disminución promedio del recurso del 40 % según el conjunto de escenarios analizados.

Por otro lado, se ha analizado la evolución de las **sequías meteorológicas** durante el periodo 1970 a 2100 considerando la media del conjunto de los nueve modelos estudiados y los dos escenarios de emisión. En ambos escenarios se aprecia un **aumento considerable de las sequías**, ya sea en su

número o duración, a medida que avanza el siglo XXI. En el escenario RCP 8.5 la situación se ve agudizada, ya que si bien, el número de sequías producida resulta menor que en el escenario RCP 4.5, aumenta notablemente su duración, permaneciendo prácticamente durante todo el período en sequía. En consecuencia, se aprecia un cambio drástico de las condiciones de precipitación a partir de 2049 en este escenario.

Finalmente, hay que señalar que los resultados obtenidos en este estudio están en consonancia con los obtenidos en otros estudios realizados en el ámbito nacional, como es el Estudio de evaluación del impacto del cambio climático en los recursos hídricos y sequías en España elaborado por el Centro de Estudios Hidrográficos del Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX) en 2017.

3. SEGUNDO ESTUDIO [LIFE NAdapta, 2023]

En esta sección se describen brevemente los trabajos realizados para la evaluación del efecto del CC en las **garantías de suministro de las distintas demandas de agua** en Navarra. El estudio se ha llevado a cabo mediante el **modelo SIMGES** de simulación de la Gestión de Recursos, integrado en el Sistema de Soporte a la Decisión para planificación hidrológica Aquatool [SSD AQUATOOL] y desarrollado por el Grupo Aquatool del Instituto de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente de la Universidad Politécnica de Valencia [UPV].

Un modelo es una representación matemática del problema real que se desea estudiar, y que incluye aquellos parámetros de mayor relevancia en el mismo. En este caso se trata de un modelo que permite reproducir la gestión que se realizaría del agua en las cuencas consideradas bajo diferentes escenarios de recursos y demandas.

El modelo nos ofrece como resultados unos índices que nos permiten conocer de forma sencilla la situación de los ríos en lo relativo a:

- La satisfacción de la demanda: para saber en qué grado el sistema es capaz o no de atender todas las demandas de agua que se le solicitan.
- El grado de garantía de la demanda: para conocer con qué grado de seguridad el sistema puede soportar en el tiempo [verano, sequías] aquellas demandas de agua que le son requeridas.

El estudio se ha elaborado en colaboración entre Gobierno de Navarra a través de su empresa pública Gestión Ambiental de Navarra [GAN] y la UPV, mediante la ejecución de los siguientes trabajos específicos:

-  Diseño y calibración del modelo de simulación de la **gestión de la cuenca en situación actual** [considerando la serie de recursos hídricos históricos 1940-2015 y las demandas de agua e infraestructuras actuales]. El objetivo principal consistió en realizar un análisis del

balance entre los recursos hídricos y demandas de agua en situación actual teniendo en cuenta los caudales ecológicos. Otro objetivo es disponer de una herramienta flexible para que pueda ser aplicada también en el análisis de escenarios futuros.

-  Evaluación del **impacto del CC** en las garantías de suministro mediante la simulación con SIMGES de distintos escenarios de recursos hídricos futuros para 3 posibles alternativas o planes de desarrollo a futuro y su comparativa con el escenario “base” o de “referencia” estimado a partir de la serie de recursos hídricos históricos 1940-2015.

Como paso previo a estos dos estudios, se ha llevado a cabo la **estimación de las demandas de agua y otros elementos necesarios para la simulación** de la gestión del agua en los sistemas de explotación para todos los escenarios simulados. Este trabajo ha sido llevado a cabo por GAN en colaboración con Gobierno de Navarra.

3.1 Definición de los elementos de entrada a los modelos

La simulación con el modelo de gestión en las cuencas navarras conlleva la definición de todos los elementos que intervienen en la gestión de un sistema de explotación y que, por lo tanto, constituyen los datos de entrada al modelo SIMGES de Aquatool: recursos hídricos en régimen natural, demandas de agua, infraestructuras de regulación y transporte, restricciones ambientales [caudales ecológicos], así como de criterios y reglas de explotación de los sistemas. Se deben definir todos ellos para todos los escenarios a simular.

Se ha dedicado un mayor esfuerzo a la caracterización de los datos de entrada y al diseño y calibración del modelo en **situación actual**, ya que la configuración de los escenarios para la simulación de los escenarios futuros y evaluación del impacto del CC suponen pequeños cambios con respecto a éste.

En este sentido, cabe señalar que, para el diseño del escenario en situación actual, la mayor parte de la información mencionada ha sido recabada de distintos estudios y Planes Sectoriales del Gobierno de Navarra, así como de los Planes hidrológicos de cuenca. Sin embargo, ha sido necesario realizar un **estudio específico** para la estimación de las demandas de agua de regadío en Navarra. Concretamente se ha estimado la demanda de agua para cada una de las 223 Comunidades de Regantes [CCRR] existentes en Navarra. Dentro de estas comunidades, aproximadamente el 40 % de las mismas dispone ya de datos de consumos medidos que han sido analizados y procesados para su incorporación al modelo. En el resto de las CCRR la demanda ha sido estimada por métodos indirectos, a partir de las alternativas de cultivo, necesidades hídricas netas y eficiencias de aplicación.

Las demandas de agua externas [atendidas por los ríos navarros pero situadas fuera de Navarra] si bien no han sido objeto del citado estudio, obviamente han tenido que ser consideradas en los

balances realizados con los modelos de gestión. Esta información se ha obtenido principalmente de los planes hidrológicos de cuenca.

3.2 Diseño y calibración del modelo de simulación de cuenca en situación actual

El principal objetivo de este estudio fue el análisis del balance entre recursos hídricos y demandas de agua e infraestructuras en el **escenario actual** [considerando las restricciones ambientales] para las cuencas de Navarra.

Como se ha comentado anteriormente, para la realización de este trabajo se ha utilizado el **software Aquatool** [www.upv.es/aquatool] junto con su módulo de cálculo asociado SIMGES. SIMGES es un modelo general para la Simulación de la Gestión de Cuencas, o sistemas de recursos hidráulicos complejos, en los que se dispone de elementos de regulación o almacenamiento tanto superficiales como subterráneos, de captación, de transporte, de utilización y/o consumo, y de dispositivos de recarga artificial [Andreu et al., 2007].

El diseño del modelo se efectúa en una interfaz en la que se representan todos **los elementos que integran un sistema de explotación**: aportaciones, acuíferos, demandas, retornos, embalses, canales, etc., sobre un esquema simplificado de la red fluvial.

El modelo conceptual desarrollado para el presente estudio considera los siguientes elementos:

-  **Recursos hídricos históricos** en régimen natural. La información se ha obtenido del estudio de recursos realizado por el Gobierno de Navarra en 2017 [GN, 2017], fruto del cual se obtuvieron series de aportaciones mensuales, en 129 subcuencas a lo largo del periodo 1940-2015. En el modelo de gestión, se han representado las subcuencas de aportación, con el mismo nivel de detalle que el del citado estudio.
-  **Acuíferos**: se han modelado los que se han considerado relevantes en el cumplimiento de garantías de suministros a las demandas respectivas.
-  **Demandas de agua** en situación actual. Se han considerado las siguientes demandas consuntivas:
 - Abastecimiento e industrial con tomas propias [92 hm³]. Proceden del Plan Director del Ciclo Integral de Agua de Uso Urbano de Navarra 2019-2030.
 - Regadíos [707 hm³]. Se han estimado de acuerdo a lo comentado en el apartado anterior las demandas de las CCRR de Navarra, correspondientes a una superficie de regadío de 113.000 ha.
 - Demandas externas [941 hm³ para regadío y 120 hm³ para abastecimiento].
-  **Caudales ecológicos**. Se han empleado los establecidos en los planes hidrológicos vigentes [2022-2027].
-  Para el caso del **Eje del Ebro**, se han considerado para la simulación los resultados del modelo de gestión empleado en el PHE 2015-2021 a su entrada en Navarra, y que proporciona en dicho punto las series de aportaciones una vez satisfechas todas las

demandas consideradas en la cuenca alta del Ebro, por lo que estas series estarían en régimen alterado.

- Embalses** con capacidad de regulación significativa. Se han simulado los embalses de Yesa [446,9 hm³ de capacidad], Itoiz [418 hm³], Alloz [65,3 hm³], El Val [25 hm³], Eugui [21,9 hm³], Irabia [13,5 hm³], Urdalur [5,4 hm³] y Mairaga [2,4 hm³].
- Conducciones de transporte principales:** se han simulado el Canal de Navarra, el Canal de Bardenas, Lodosa, Tauste y Canal Imperial de Aragón.

En la Figura 2 se muestra la **ubicación de los principales embalses y canales** considerados en la simulación. En el caso del Canal de Navarra [CN], que toma sus aguas de Itoiz, y atiende mayormente los regadíos de la zona media de Navarra, se muestra en una línea continua el trazado actual del mismo, y en línea discontinua, el futuro recorrido de lo que será la 2ª fase del Canal de Navarra y que permitirá atender, entre otras, las necesidades de agua de La Ribera. El análisis de las alternativas futuras que se describe a continuación se basa en la ejecución de la 2ª fase del CN.

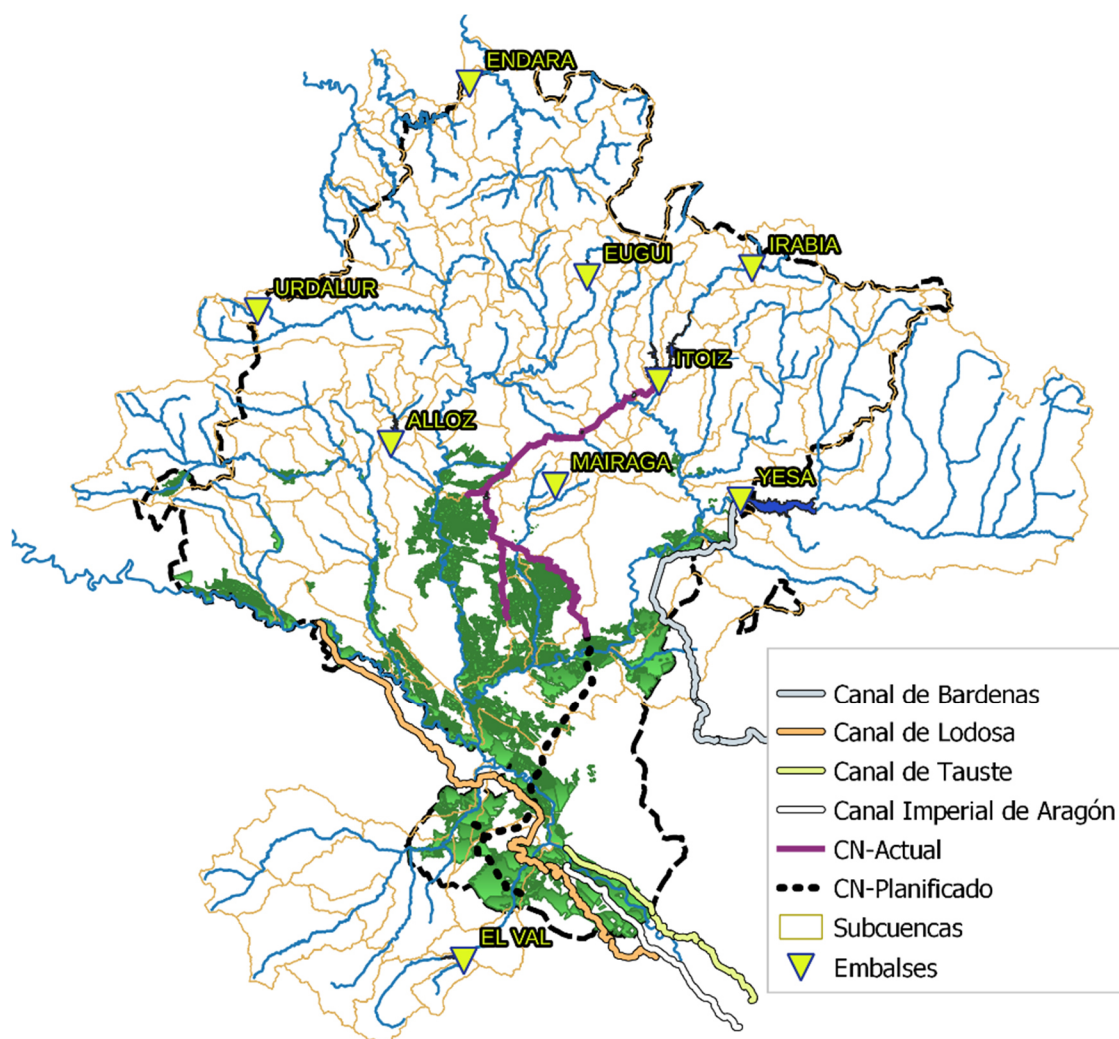


Figura 2 Localización de los embalses y principales canales considerados en la simulación

La **simulación** se realiza a nivel mensual y proporciona **resultados** que permiten realizar un diagnóstico de la disponibilidad del recurso en el sistema modelado como son: el déficit de las demandas, garantías de suministro, volumen de embalses, caudal en conducciones, etc. **El resultado del diagnóstico realizado en situación actual** para los distintos sistemas de explotación se expone en el apartado 3.4.1, bajo la denominación de escenario EDA.

El análisis realizado ha permitido identificar los sistemas de explotación más vulnerables en situación actual. Los resultados obtenidos reflejan de forma aceptable el comportamiento de las cuencas y de su gestión, por lo que se dispone de una herramienta de ayuda a la decisión para el análisis de escenarios futuros.

3.3 Evaluación del impacto del CC en las garantías de suministro

3.3.1 Definición de escenarios futuros de recursos hídricos y demandas de agua

La finalidad principal de este estudio es evaluar el impacto esperable del Cambio Climático sobre las garantías en los usos del agua de las cuencas navarras. Esto implica el análisis de la gestión de los recursos hídricos en todo el sistema para el escenario futuro de recursos hídricos y demandas correspondiente.

Este trabajo entraña importantes dificultades, debidas fundamentalmente a la gran incertidumbre existente en relación a la evolución futura, no solo de los recursos hídricos en régimen natural, sino también de las actuaciones humanas para el desarrollo y para la adaptación a las variaciones climáticas.

Desde el punto de vista de los **recursos hídricos naturales**, existe ya un criterio asumido de aceptar los pronósticos a largo plazo de emisiones de gases de efecto invernadero como factor de cambio. Como se ha comentado anteriormente, en el Primer estudio realizado en el marco del Proyecto LIFE NAdapta [LIFE-Nadapta, 2021], se realizó una selección de algunos de estos pronósticos para generar las consecuentes proyecciones de recursos hídricos por subcuencas en todo el territorio de Navarra. A partir de las series de recursos obtenidas se estimaron los coeficientes de cambio o % de variación de 3 horizontes futuros [2010-2040, 2040-2070, 2070-2100] con respecto al periodo de control 1970-2000. En total, se obtuvieron un conjunto de 54 coeficientes [a partir de 9 series de aportaciones futuras * 3 horizontes temporales * 2 escenarios de emisión].

Para la caracterización de los recursos hídricos naturales en el análisis de la gestión en condiciones de CC, se optó por considerar los anteriores pronósticos de coeficientes de variación para, aplicándolos a la serie histórica de recursos en régimen natural, obtener los **54 escenarios equiprobables de recursos futuros**.

Por otro lado, desde el punto de vista de la actividad humana la incertidumbre es aún mayor. Es imposible predecir cuál será la evolución de la sociedad a largo plazo, y por tanto las necesidades de

agua y las inversiones que se realicen tanto en infraestructura como en usos del agua. Para simplificar esta incertidumbre se ha optado por considerar **3 posibles alternativas de demandas de agua e infraestructuras** basadas en las perspectivas actuales de desarrollo. Estas son:

1. Escenario de demandas e infraestructuras actuales (**EDA**). Se supone que se mantienen como en el escenario actual tanto las demandas como las infraestructuras y criterios de gestión.
2. Escenario de demandas e infraestructuras a horizonte 2030 (**EDF**). Se considera que en este escenario se han ejecutado todas las inversiones en infraestructuras y modernizaciones de regadíos previstas para el horizonte 2030 y las inversiones en infraestructuras de abastecimiento urbano previstas a 2030 según el Plan director del Ciclo Integral del Agua de Uso Urbano. En este escenario, los principales cambios con respecto al EDA, son las relativas a:
 - **Infraestructuras planificadas:** Se contempla la ejecución de la 2ª Fase del Canal de Navarra que permitirá atender las demandas de agua para abastecimiento y regadío de la Comarca de La Ribera y el recrecimiento del embalse de Yesa a la cota 511 m, lo que supone un aumento del volumen actual de 446,9 hm³ a 1.079 hm³.
 - Se considera la ampliación del suministro de agua desde el CN a los **regadíos** deficitarios de la zona baja del Ega, eje del Ebro y principalmente margen derecha del Ebro [cuencas del Alhama y Queiles]. En la mayor parte de ellos se llevarían a cabo modernizaciones con cambio de origen de la fuente original al Canal de Navarra y aumento del suministro de agua a los regadíos que actualmente se encuentran infradotados. Es importante señalar que la estimación de las **demandas de agua** para estos regadíos se ha llevado a cabo empleando las **dotaciones de regadíos actuales** del canal con alternativas de cultivo y condiciones climáticas similares.
 - Se contempla la proyección de la evolución de la demanda de **abastecimiento** a horizonte 2030 que se utilizará como nuevo valor nominal de la demanda. Si bien el consumo de agua conectado a red es similar en situación actual y futura, no ocurre lo mismo con el origen del recurso ya que para este horizonte se considera la conexión de grandes poblaciones a Canal de Navarra, en las que el agua procedente del canal constituiría su principal fuente de abastecimiento. Esto tendrá lugar mayoritariamente en la comarca de La Ribera, Ribera Alta y Zona Media de Navarra. Asimismo, se ampliará el suministro actual a la Mancomunidad de la Comarca de Pamplona [MCP]. En este escenario se produce también un aumento importante de las demandas industriales con tomas propias con respecto a la alternativa actual.
3. Escenario “concesional” (**EDC**). Se considera el escenario anterior (EDF) que se amplía considerando que el suministro del Canal de Navarra corresponde al **volumen total otorgado en la concesión de aguas**

En la siguiente tabla se muestran las demandas totales de agua estimadas en los distintos escenarios para todo el ámbito de estudio. En el caso de la demanda de abastecimiento e industria se ha contabilizado la total [tanto la conectada a red como la de tomas propias]. Tal y como se aprecia

en la misma, se ha supuesto que la demanda externa tampoco sufre variaciones con respecto al escenario actual. Los volúmenes totales de demanda de agua de los distintos escenarios en el ámbito de estudio presentan variaciones de poca entidad, ya que los escenarios futuros se han basado en nuevos desarrollos centrados únicamente en el sistema Itoiz-Canal de Navarra. Con respecto al Canal de Navarra, la demanda de agua total asciende a 134 hm³ para el escenario actual EDA (131 hm³ para regadío y 3 hm³ abastecimiento), se ha estimado en 319 hm³ para el escenario EDF (289 hm³ para regadío y casi 30 hm³ abastecimiento) y en 400 hm³ para el escenario EDC (340 hm³ para regadío y 60 hm³ abastecimiento). Hay que señalar que, tanto para el abastecimiento como para el regadío, parte del desarrollo del Canal de Navarra implica sustituir las fuentes de suministro actuales por el agua procedente del Sistema Itoiz-Canal de Navarra (liberando recursos de los sistemas actuales), por lo tanto, el incremento en la demanda total de Navarra de un escenario a otro sólo contempla los nuevos suministros efectuados desde Canal de Navarra.

Tabla 3-1 Demanda de agua total estimada en el ámbito de estudio.

ESCENARIO	REGADÍO [hm ³ /año]			ABASTECIMIENTO E INDUSTRIA [hm ³ /año]			DEMANDA TOTAL ANUAL [hm ³ /año]
	Navarra	Externa	TOTAL	Navarra	Externa	TOTAL	
EDA	706,6		1647,8	92,1		211,9	1859,7
EDF	801,8	941,2	1743,0	104,5	119,8	224,3	1967,3
EDC	852,3		1793,6	134,5		254,3	2047,9

Con respecto a las **demandas ambientales o caudales ecológicos** se ha considerado un único escenario que consiste en mantener los caudales ecológicos tal cual se encuentran establecidos en los Planes Hidrológicos actuales.

Una vez configurados los escenarios de recursos hídricos y demandas de agua, se llevó a cabo el **diseño del modelo de gestión para los escenarios futuros** (EDF, EDC). Se realizó a partir del modelo en situación actual modificando su configuración topológica en lo mínimo necesario para reflejar los escenarios de demandas e infraestructuras futuros tratando de mantener la coherencia con el EDA en la medida de lo posible.

3.3.2 Metodología empleada para el análisis de resultados

Cada una de las 3 alternativas de demandas de agua e infraestructuras se ha simulado con los siguientes escenarios de recursos hídricos:

-  Un escenario determinista, “base” o de “referencia”, en el que se consideran los recursos hídricos históricos del periodo 1940-2015.
-  Los 54 escenarios de recursos hídricos futuros estimados en base a los resultados obtenidos en el primer estudio realizado en NAdapta.

Como paso previo al análisis del efecto del CC, se ha llevado a cabo el análisis de los resultados de la simulación obtenidos con el **escenario base o de referencia** frente a las 3 alternativas planteadas, lo que ha permitido obtener información sobre la variación en el nivel de garantía ofrecido por el sistema con la ejecución de los planes de desarrollo considerados.

Finalmente, el **análisis del impacto del CC** se ha efectuado comparando los resultados de garantías y otros indicadores obtenidos con los escenarios futuros de recursos hídricos con respecto al escenario base o de referencia para cada una de las alternativas planteadas.

En conjunto, combinando los 3 escenarios de desarrollo con los 54+1 escenarios de recursos, se cuenta con 162+3 posibles escenarios de gestión futuros.

El modelo de gestión empleado en el estudio, se ha configurado representando los distintos elementos que intervienen en cada cuenca con un elevado grado de detalle. Este hecho, unido al elevado número de simulaciones que se han realizado [165], produce un **elevado volumen de resultados que dificulta el análisis** y la interpretación de los mismos. Por este motivo, se han realizado las siguientes consideraciones:

-  Los resultados de las 54 simulaciones realizadas con los escenarios de recursos hídricos futuros se agrupan del siguiente modo: para cada horizonte temporal [2010-2040, 2040-2070 y 2070-2100] se representa una banda de color que indica el rango de variación de los resultados obtenidos con los 9 escenarios de recursos hídricos futuros, tanto para el escenario RCP4.5 como para el escenario RCP8.5 [ver figuras del apartado 3.4.2].
-  Se han definido salidas gráficas agrupadas, a nivel anual, por sistemas de explotación, embalses y otros sistemas singulares [como CN] para un conjunto de **indicadores** que reflejan el estado de los sistemas [garantía volumétrica, riesgo de meses con déficit de suministro grave e indicadores del estado de los embalses]. También se han estimado indicadores en escala mensual, evaluando los promedios para cada mes del déficit de suministro y porcentaje de reservas.

En este informe, sólo se presentan algunos de los indicadores obtenidos en el estudio, sin embargo, se pueden consultar todos los resultados obtenidos en el Portal Web de NAdapta: <https://lifenadapta.navarra.es/es/accion-c2.7>

3.4 Resultados obtenidos

3.4.1 Resultados obtenidos en la simulación con los escenarios base o de referencia [calculados con los recursos hídricos históricos 1940-2015]

A partir del análisis de las garantías teóricas y otros indicadores estimados en la modelización de los **escenarios “base”** se extraen las siguientes conclusiones:

La simulación de la **alternativa de demandas e infraestructuras actuales (EDA)** con la serie de recursos hídricos históricos, ha permitido obtener un primer diagnóstico de la gestión de las cuencas en situación actual. En este escenario, para el caso del suministro de las **demandas de agua para regadío**, se observa cómo los sistemas Alhama y Queiles, presentan ya problemas conocidos de sostenibilidad para el escenario “base”, debido a un importante desequilibrio entre recursos hídricos y demandas de agua, lo que supone un fallo generalizado de garantías.

En el resto de los sistemas, en general, los suministros de agua están garantizados salvo fallos puntuales originados principalmente por la disminución del recurso en periodos de sequía. En este sentido, la cuenca alta del Ega, resulta especialmente vulnerable a una disminución del recurso ya que presenta fallos en su cabecera debidos principalmente a la escasa regulación de que dispone, lo que combinado con que en los meses con menos recursos circulantes es cuando se produce la mayor demanda de agua, da lugar a pequeños fallos en el suministro. Esto mismo ocurre en otras cabeceras de cuencas sin regulación. El sistema Aragón, que cuenta con un volumen de regulación significativo, puede presentar fallos en periodos de sequía. Por su parte, los regadíos que se atienden desde el río Arga no presentan problemas de suministro. Finalmente, para concluir, hay que señalar que el sistema Eje del Ebro no tiene graves problemas de suministro, únicamente se producen fallos en la demanda del río Linares [incluido en este sistema], debido a que este río no dispone de regulación.

En el caso de las **demandas urbanas**, de menor cuantía que las anteriores, y por ser prioritarias, presentan una elevada garantía volumétrica en todos los sistemas. Únicamente se llegan a dar fallos puntuales en pequeños sistemas de abastecimiento en cabeceras de cuencas sin regulación en situaciones de sequía.

El **sistema Itoiz - Canal de Navarra** [en el que se concentran los cambios más importantes considerados en las alternativas EDF y EDC] suministra con total garantía las demandas dependientes del mismo [131 hm³ para regadío y aproximadamente 3 hm³ para abastecimiento], ya que la capacidad de regulación del embalse está por encima de sus necesidades.

Con respecto a la **alternativa EDF** puesto que el desarrollo del Canal de Navarra supone un cambio de las fuentes originales de captación al sistema Itoiz-Canal de Navarra en los sistemas Ega, Arga, Queiles, Alhama y eje del Ebro, se mejora sensiblemente las garantías en estas cuencas, especialmente en Alhama y Queiles, donde se corrigen los fallos en las garantías de suministros para los **regadíos** que se daban en EDA. El déficit promedio en el ámbito de estudio se reduciría con respecto a EDA, pasando de 90 a 40 hm³. El sistema Aragón, mantiene sus garantías similares a las de EDA, lo que indica una baja afección de los nuevos usos del canal sobre las garantías de la cuenca cedente.

El **embalse de Itoiz** sigue contando con un alto margen de regulación, por lo que el sistema permite una gestión sostenible; todas las demandas asignadas al sistema Itoiz-canal de Navarra [289 hm³ para regadío y 30 hm³ para abastecimiento] cumplen los criterios de garantía de la Instrucción de Planificación Hidrológica [IPH].

Finalmente, en lo que respecta a la **alternativa EDC**, el aumento del suministro con respecto a la alternativa EDF da lugar a un ligero aumento en el volumen de déficit promedio, repartido entre los sistemas conectados al Canal de Navarra, aunque este aumento es inferior al volumen adicional de demanda servida. El aumento del suministro desde el CN se refleja en el descenso de las reservas en el embalse de Itoiz, que alcanzan con más frecuencia la cota de toma del Canal de Navarra, por debajo de la cual no es posible derivar caudales a este canal. Consecuentemente en estas ocasiones se producen **fallos en los suministros del CN**. Varias demandas dependientes del suministro desde el Canal [todas las de regadío y alguna de abastecimiento], dejan de cumplir los criterios de garantía de la IPH.

En el estudio realizado, se ha analizado también el grado de cumplimiento de los **caudales ecológicos** para la alternativa actual [EDA]. Aunque no existe un criterio claro para evaluar el grado de cumplimiento de los caudales mínimos, para tener una medida del efecto de esta medida sobre el caudal ecológico, se ha calculado un indicador de garantía para los caudales ecológicos que mide el número de meses con fallo [meses en los que con los recursos históricos no se pueden cumplir los mismos] en relación al número total de meses simulados. En general, la garantía en los tramos simulados es alta, si bien se dan fallos puntuales por escasez del recurso en varias cabeceras de cuencas sin regulación en los sistemas Ega, Arga y Aragón. Además, se dan fallos importantes en algunos tramos altos, como, por ejemplo, la cabecera del río Irtzu y el río Cemborain que sin embargo no están afectados por ningún uso que les detraiga el recurso.

3.4.2 Análisis de los efectos del Cambio Climático

3.4.2.1 *Garantías volumétricas agrupadas, a nivel anual, por sistemas de explotación*

Como se ha comentado anteriormente, para el análisis de los resultados de proyecciones climáticas, se han obtenido diversos indicadores que facilitan la interpretación de los mismos. En este apartado, se muestran únicamente los resultados obtenidos para las garantías volumétricas, ya que resumen bastante bien el impacto del CC en los sistemas de explotación. Tal y como se ha comentado anteriormente, se muestra este indicador agrupado para cada sistema de aprovechamiento. La evaluación del impacto del CC se efectúa mediante la comparativa gráfica de los resultados obtenidos con los escenarios futuros de aportaciones y el resultado obtenido con el escenario base o de referencia [estimado en base a los recursos hídricos históricos 1940-2015].

Se entiende por garantía volumétrica la relación entre el volumen total suministrado y el volumen total demandado. Por lo tanto, una disminución en la garantía volumétrica indica una menor capacidad del sistema para atender una determinada demanda de agua.

Atendiendo a las garantías de suministro por sistemas, en la Figura 3 se representa cómo afectaría el Cambio Climático a las **garantías volumétricas de las demandas agrarias** para la alternativa EDA [gráficos de la izquierda] y para la alternativa futura EDF [gráficos de la derecha] en los distintos sistemas de aprovechamiento de Navarra y para los 2 escenarios de emisión [RCP4.5 y RCP8.5]. En

todas las figuras se muestran los resultados para el escenario base o de referencia representado por un punto rojo y se representa por una banda entre el valor mínimo y el máximo de los valores obtenidos en cada una de las 9 simulaciones futuras correspondientes a cada horizonte temporal [2010-2040, 2040-2070, 2070-2100].

En **situación actual EDA** [gráficos de la izquierda] se aprecia cómo, tal como se ha visto en el análisis de los escenarios “base”, partimos ya de la existencia de zonas con importantes problemas de sostenibilidad [Alhama y Queiles]. Para las proyecciones climáticas futuras, vemos que la **garantía volumétrica desciende significativamente** en los sistemas que presentan más problemas en la actualidad- principalmente cabecera del **Ega, Alhama y Queiles**- como consecuencia de la disminución del recurso [especialmente para el Ega y Queiles con el escenario RCP8.5 y horizonte 2070-2100]. En el resto de sistemas, la disminución de recursos hídricos tendría un efecto leve sobre las garantías de los sistemas, siendo estas cercanas a la del escenario “base”. Las proyecciones para el tercer horizonte presentan también una mayor dispersión entre ellas que para el resto de los horizontes, lo que es indicativo de la incertidumbre que presentan.

Como se puede apreciar en la Figura 3 [gráficos de la derecha], las ampliaciones previstas para el Canal de Navarra definidas como **alternativa EDF** mejoran significativamente las garantías en los sistemas receptores -Alhama y Queiles- de tal modo que el **escenario RCP4.5 resulta bastante más favorable que el EDA**, ya que prácticamente la garantía es alta para casi todos los sistemas. Sin embargo, si el CC fuese más grave, como el supuesto para el horizonte temporal **2070-2100 en RCP8.5**, se **generarían problemas de garantía** por falta de recursos en todos los sistemas de la cuenca del Ebro. A este respecto, cabe remarcar que, los resultados para este horizonte tienen una gran dispersión, con los resultados más optimistas similares a los otros horizontes.

En la Figura 4 se muestran los mismos indicadores de garantía, pero para las **demandas urbanas**. Para ambas alternativas se observa que el CC tiene poco efecto en las garantías de suministro para el escenario de emisiones RCP4.5 ya que para este escenario son muy similares a las del escenario “base”. Sin embargo, para la **situación actual EDA**, sí se aprecia un cierto riesgo de fallo con el tercer horizonte en el escenario de emisiones RCP8.5 para el Ega. Para **la alternativa EDF** se producen fallos para este mismo escenario, para los sistemas Ega, Arga y Aragón.

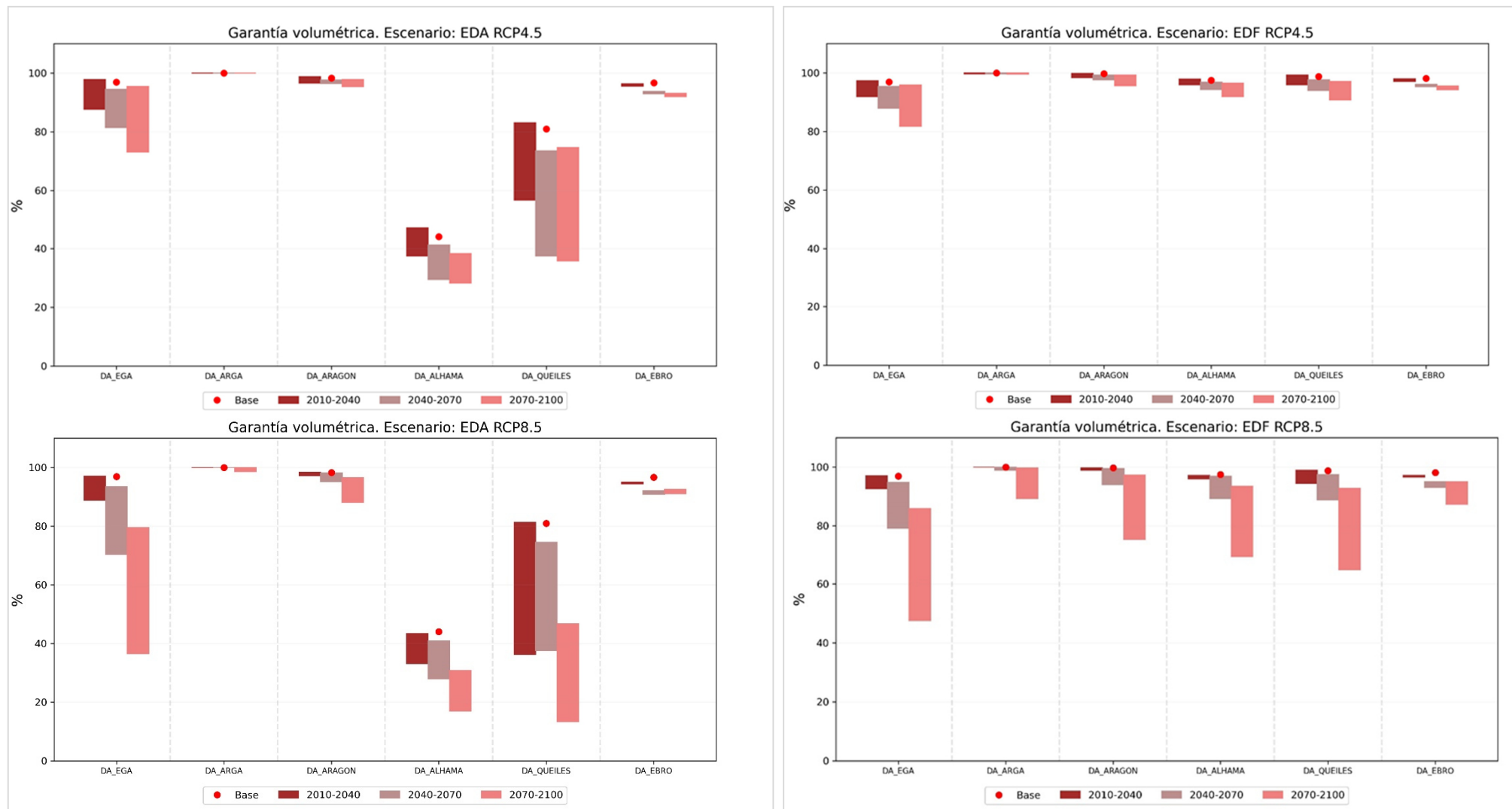


Figura 3 Resultados de garantía volumétrica en demandas agrarias por sistemas para el escenario EDA [izquierda] y para el escenario EDF [derecha]

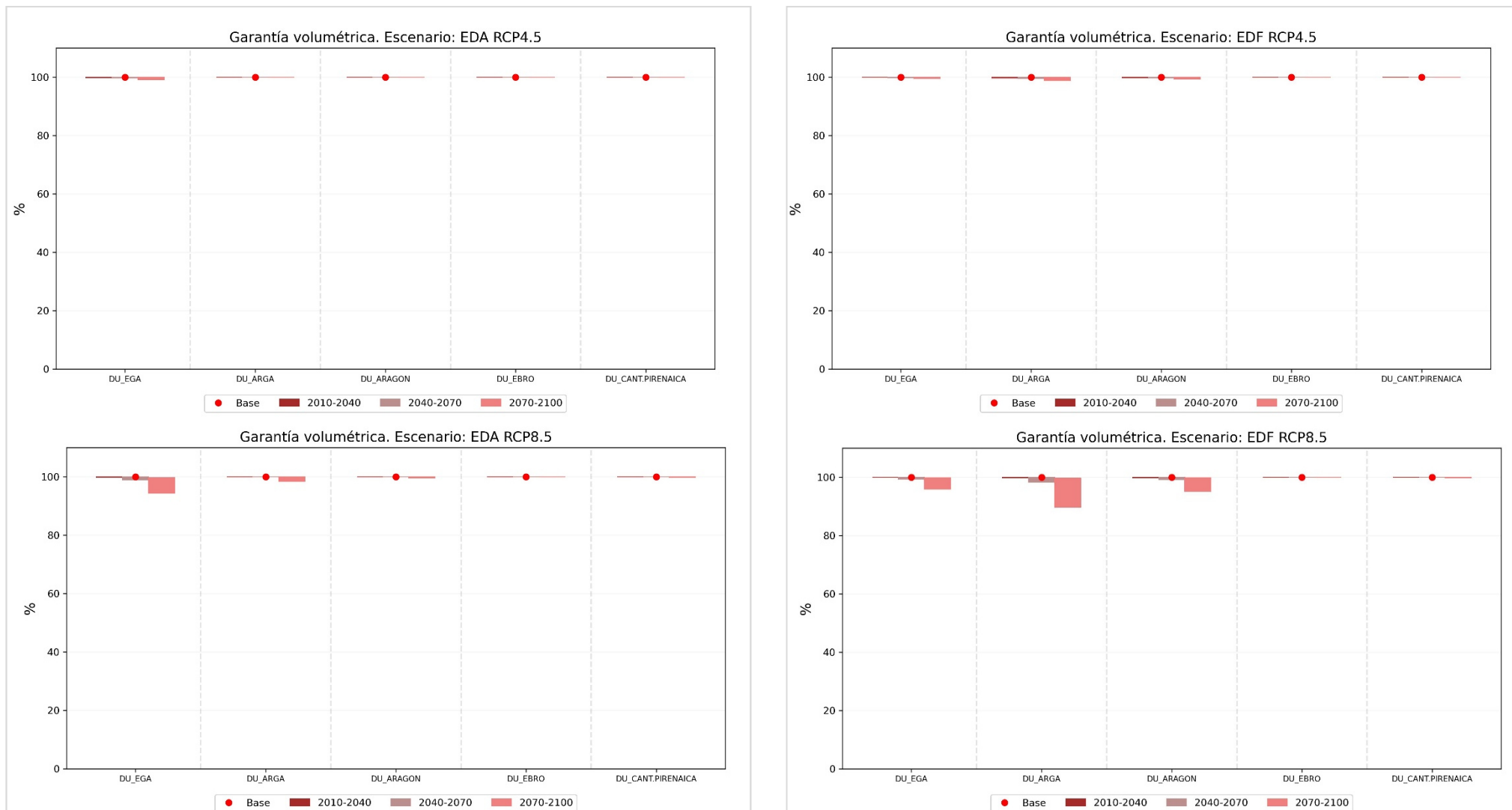


Figura 4 Resultados de garantía volumétrica en demandas urbanas por sistemas para los escenarios EDA [izquierda] y EDF [derecha].

Los resultados obtenidos en las garantías de suministro de la **alternativa EDF**, se comparan ahora con la **alternativa EDC**, que como se ha comentado anteriormente es muy similar a ésta sólo que el suministro desde CN es mayor ya que se considera el volumen total otorgado en la concesión. Se comparan las garantías volumétricas de las demandas agrarias de ambas alternativas [Figura 5] y ambos escenarios de emisión. Se puede observar cómo la mayor parte de los sistemas sufren un claro descenso en la garantía al pasar del EDF al EDC, siendo este más acusado para el horizonte 2070-2100 y con más intensidad en RCP8.5.

En cuanto a las demandas urbanas, tal y como sucedía para la alternativa EDF, estas dejan de estar garantizadas con los RCP8.5 y 3er horizonte en las cuencas Ega, Arga y Aragón.

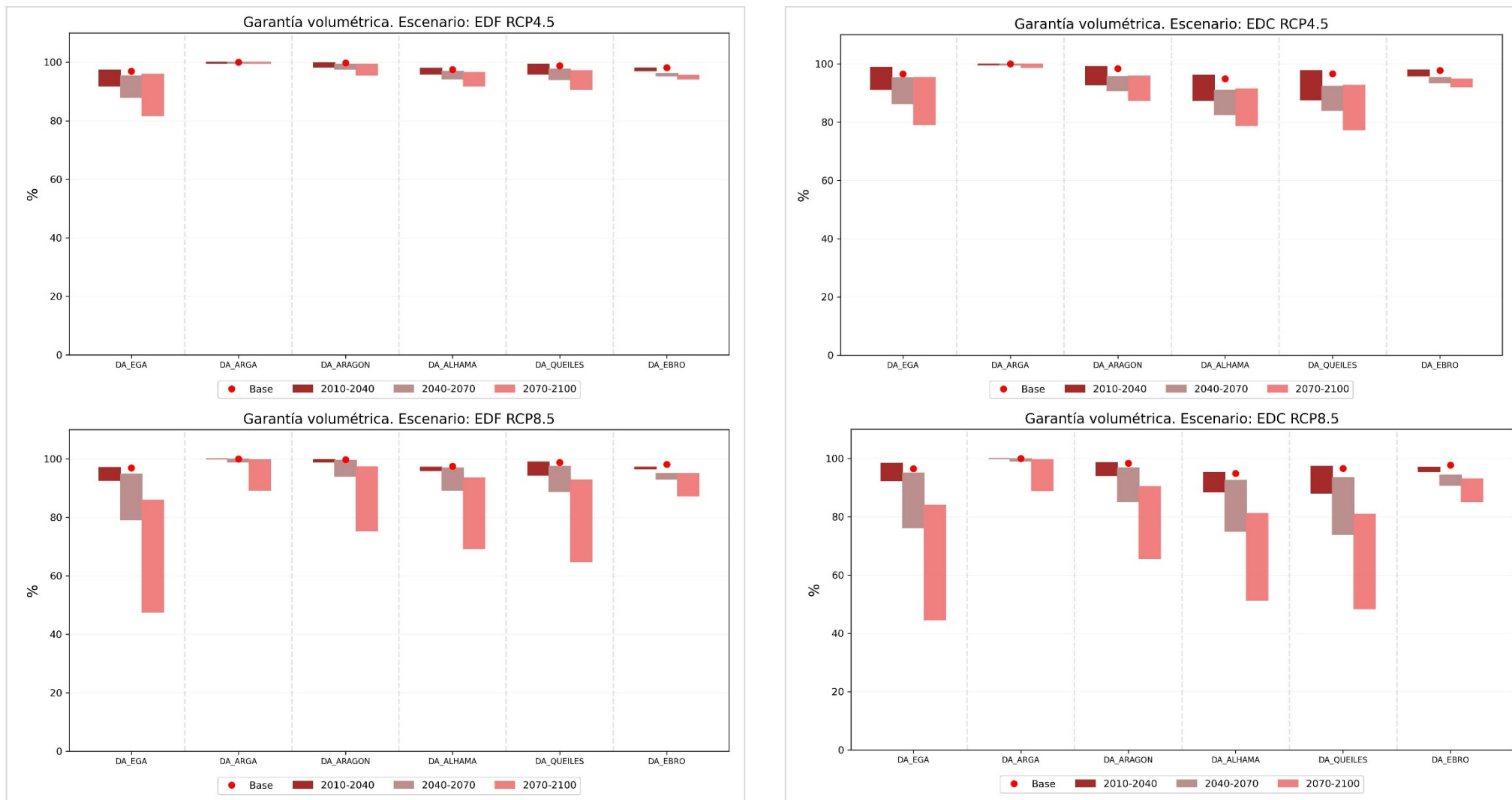


Figura 5 Resultados de garantía volumétrica en demandas agrarias por sistemas para los escenarios EDF [izquierda] y EDC [derecha].

3.4.2.2 Resultados para el Sistema Itoiz-Canal de Navarra

Dado que todas las alternativas futuras se basan en el desarrollo completo del sistema Itoiz-Canal de Navarra y que una de las medidas propuestas en la hoja de Ruta de CC de Navarra es incluir las consecuencias de los nuevos escenarios de cambio climático futuro en los estudios que se están realizando para la Fase II del Canal de Navarra [Medida A7 dentro de la línea L4 Gestión del agua], se ha realizado un apartado específico para su análisis.

Tal y como se ha comentado anteriormente en los resultados obtenidos para los **escenarios base o de referencia [estimados con la serie de recursos históricos]**, en situación **actual [EDA]**, el sistema Itoiz- Canal de Navarra suministra con total garantía las demandas dependientes del mismo ya que la capacidad de regulación del embalse está por encima de las mismas. En el caso de la **alternativa EDF**, en la que se considera el recrecimiento del embalse de Yesa y una ampliación de los suministros del Canal de Navarra hasta un volumen de 319 hm³, el embalse de Itoiz sigue contando con un alto margen de regulación, por lo que el sistema permite una gestión sostenible y en consecuencia no se producen fallos en las demandas de agua dependientes del canal. Finalmente, con la **alternativa EDC**, que parte de la misma configuración que la alternativa EDF pero supone un aumento del suministro realizado desde CN al volumen total otorgado en la concesión (400 hm³), se produce un descenso importante en las reservas del embalse de Itoiz, y por consiguiente, las demandas dependientes del mismo dejan de cumplir los criterios de garantía de la IPH. Hay que señalar que, para las alternativas futuras, la gestión conjunta de los embalses de Yesa e Itoiz para el servicio de las demandas comunes en la cuenca baja del Aragón, permite apoyar la regulación de Itoiz y el Canal de Navarra.

Los **escenarios de CC** reducen los recursos de que dispone el embalse de Itoiz para la regulación. Esta circunstancia se ha resumido en indicadores de llenado de embalses para cada uno de los 12 meses del año. Las siguientes figuras representan las probabilidades de estado del embalse de Itoiz por niveles de reservas a lo largo del año para las **alternativas EDA y EDF** para el **escenario base o de referencia** (Figura 6). En dichos gráficos se definen 5 zonas de llenado del embalse y se grafica la probabilidad de que el embalse finalice cada mes con las reservas en cada zona.

Puede apreciarse cómo en los meses de invierno y primavera la mayor probabilidad es que los embalses estén prácticamente llenos, mientras que esta se reduce durante los meses de verano y otoño. Comparando ambas alternativas de demandas se aprecia el efecto del aumento de la demanda en el canal (alternativa EDF), que podría ser aceptable porque el embalse solo baja del 40 % de sus reservas menos del 5 % de los años para dicha alternativa.

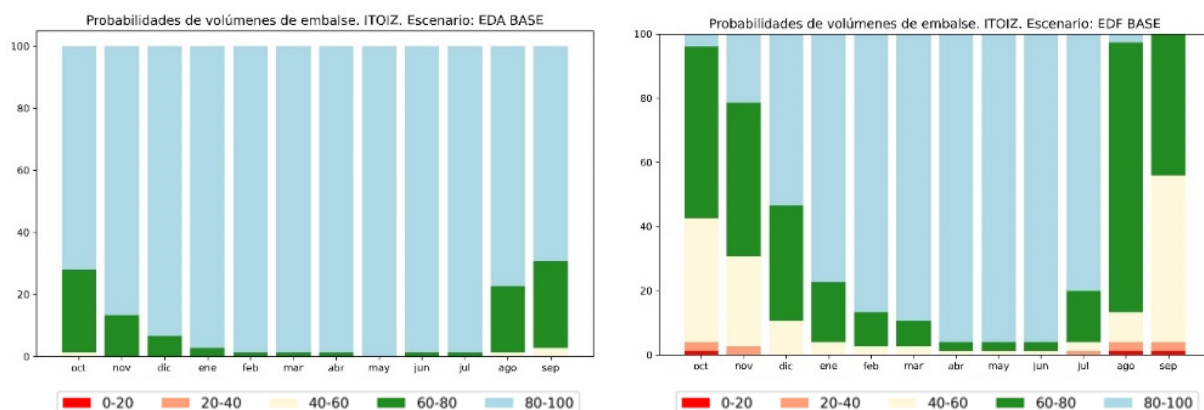


Figura 6 Evolución de la probabilidad de estado de las reservas en Itoiz por meses para el escenario "base" de la alternativa EDA [izquierda] y EDF [derecha]

Si comparamos estos resultados [obtenidos con el escenario de referencia] con los que se obtienen con el horizonte **2070-2100** y **escenario de emisiones RCP8.5** (Figura 7) se aprecia cómo empeora la situación para la alternativa actual EDA y para **el EDF se hace insostenible**, con más del 60 % de los años en que las reservas quedan por debajo del 40 % y casi el 50 % por debajo del 20 %. Hay que señalar, que el escenario RCP8.5 y tercer horizonte, se trata del escenario más desfavorable en cuanto a la disponibilidad de los recursos, y por tanto, los resultados obtenidos concuerdan con las bajas garantías obtenidas en los sistemas de explotación para este mismo escenario.

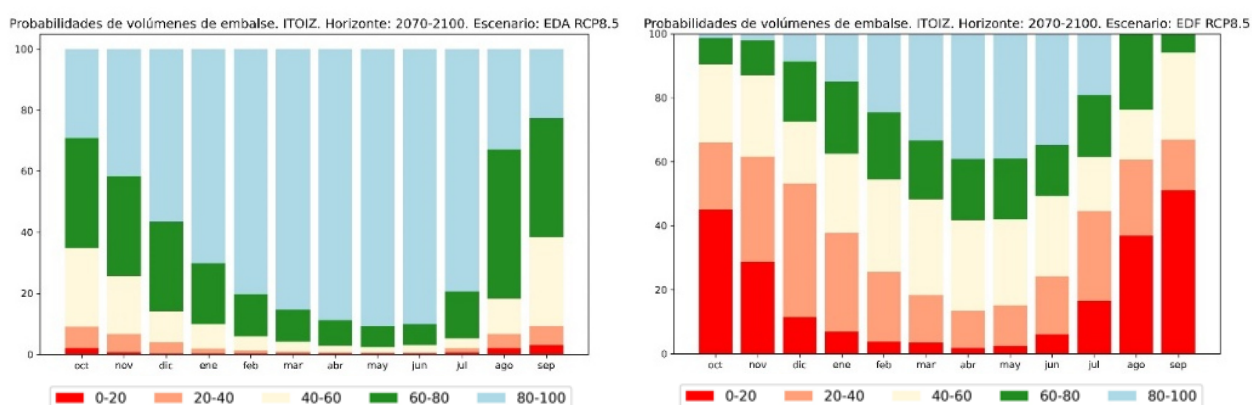


Figura 7 Evolución de la probabilidad de estado de las reservas en Itoiz por meses para el escenario con CC RCP 8.5 y 3er horizonte temporal para las alternativas EDA[izquierda] y EDF [derecha]

Del mismo modo en que anteriormente se han analizado las garantías volumétricas de las demandas agrupadas por sistemas de explotación, en la Figura 8 se representan en este caso para el **Canal de Navarra**. En dicha figura se muestra la comparativa entre las alternativas, **EDA y EDF** [gráficos de la

izquierda] y entre las alternativas **EDF y EDC** [gráficos de la derecha]. De igual forma, se representan con un punto rojo los resultados para el escenario base o de referencia estimado con la serie de recursos históricos [puesto que solo se dispone de una simulación para este caso] y mediante una banda el rango de valores obtenidos con el conjunto de simulaciones en cada escenario de CC.

Comparando los resultados obtenidos para las alternativas **EDA y EDF** se puede apreciar cómo los niveles de garantía son elevados para el RCP4.5 en ambos escenarios de desarrollo y también para el EDA con RCP8.5. Pero para la alternativa EDF disminuye significativamente a partir del horizonte 2040-2070. Para el RCP8.5 y horizonte 2070-2100 esta banda se amplía mucho con riesgo de déficits promedio de casi el 30%. Este resultado es coherente con la drástica reducción de las reservas del embalse de Itoiz que se produce en este mismo escenario.

Finalmente, en la Figura 8 [gráficos de la derecha], se comparan los resultados de las dos alternativas futuras, **EDF y EDC** [misma alternativa que EDF pero se supone que se suministra el volumen total de la concesión de CN]. Puede verse como en todos los horizontes, para EDC, la garantía del canal disminuye sensiblemente a la vez que aumenta su rango de incertidumbre.

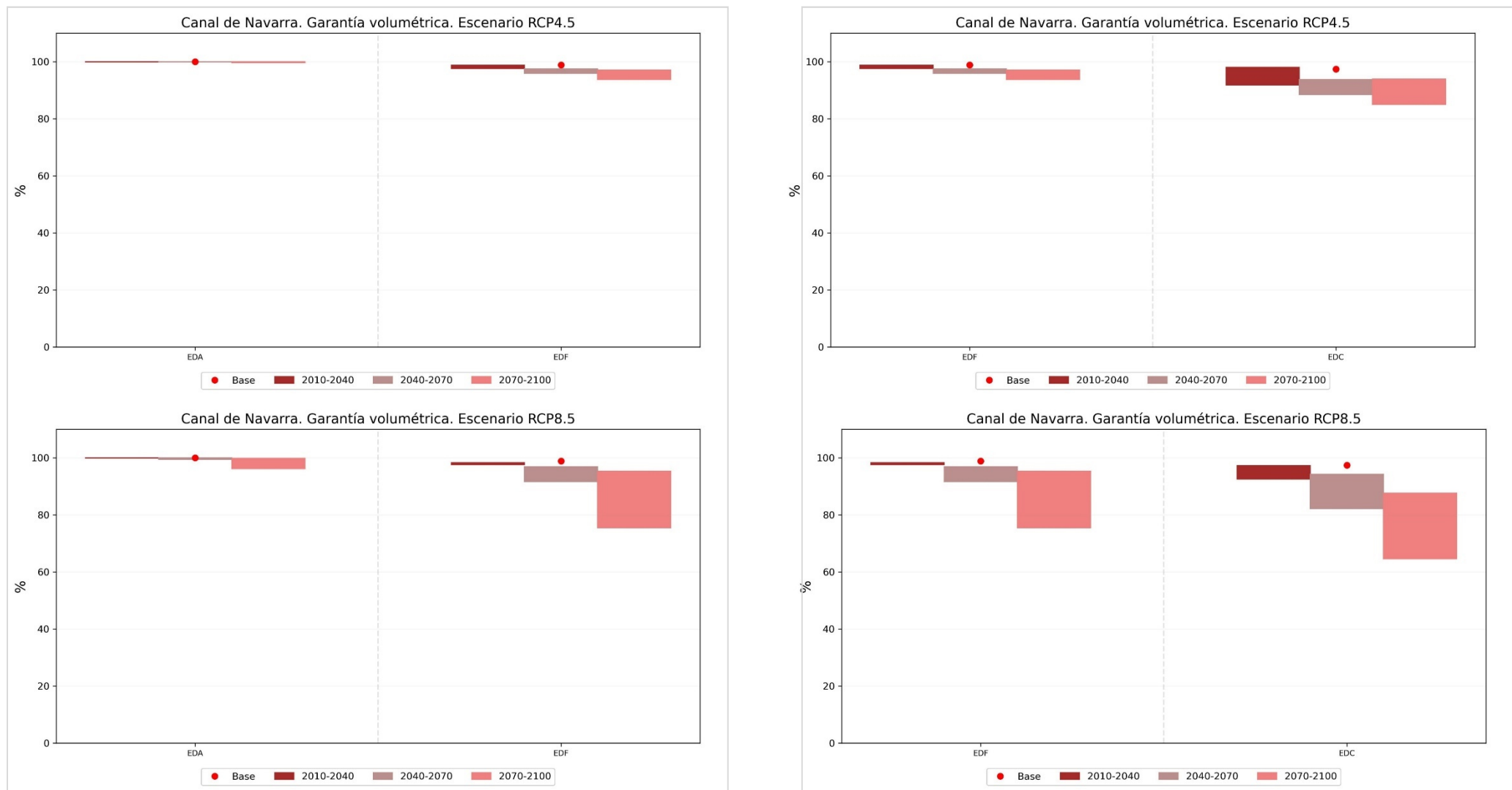


Figura 8 Comparativa de resultados de garantía volumétrica en el Canal de Navarra para los escenarios EDA y EDF [izquierda] y para los escenarios EDF y EDC [derecha].

4. CONCLUSIONES

Los escenarios futuros de recursos basados en las proyecciones climáticas del Quinto Informe del IPCC nos advierten de una probable reducción de los recursos hídricos y un aumento de las sequías conforme avance el siglo. Tanto en los modelos analizados desde un escenario en el que los esfuerzos de mitigación de las emisiones de gases de efecto invernadero llevan a una estabilización de las mismas [RCP 4.5] como el escenario que contempla un nivel alto de emisiones [RCP 8.5], nos muestran en general **una reducción de los recursos hídricos** generados en nuestro territorio, mas importante cuanto más avancemos en el siglo y cuanto menor sea el esfuerzo global de mitigación del cambio climático, pudiendo llegarse a fin de siglo a reducciones bastante relevantes en los recursos hídricos de Navarra, que pueden ser más o menos acusadas según las cuencas analizadas.

El agua desempeña un papel esencial en la economía y la sociedad de Navarra, por lo que, a la vista de los resultados obtenidos, **resulta imprescindible incorporar los efectos del cambio climático en la planificación y gestión de los recursos hídricos**.

Con este fin, se ha realizado un estudio para evaluar el efecto que tal disminución en el recurso puede tener en el grado de garantía de los suministros de agua futuros. Dicho análisis, se ha llevado a cabo mediante el módulo SIMGES de simulación de la Gestión de Recursos, integrado en el Sistema de Soporte a la Decisión para planificación hidrológica Aquatool [SSD AQUATOOL].

El impacto del CC se ha evaluado para 3 posibles planes de desarrollo con sus demandas de agua e infraestructuras asociadas [considerando las restricciones ambientales] mediante la comparativa entre las simulaciones realizadas con las series de recursos hídricos históricas y las series de recursos futuras [procedentes del estudio previo de NAdapta].

El estudio realizado ha permitido identificar los sistemas de explotación y las alternativas de desarrollo más vulnerables al cambio climático en Navarra, lo que permitirá una mejor planificación de la gestión del agua de todos los sectores en su conjunto.

Se presentan a continuación las conclusiones y recomendaciones finales **desde el punto de vista de la planificación de actividades futuras obtenidas en dicho estudio**:

Para la alternativa actual de demandas de agua e infraestructuras [EDA]:

 En situación actual, el análisis de los resultados del **escenario base o de referencia** [considerando la serie de recursos hídricos históricos 1940-2015], permite extraer las siguientes conclusiones:

- En el caso de las **demandas de regadío**, el sistema dispone de recursos hídricos suficientes para garantizar las demandas de agua actuales. No obstante, fruto de la variabilidad espacial y temporal del recurso, se pueden dar fallos puntuales en los suministros de agua. En este sentido, la cuenca alta del Ega, resulta especialmente vulnerable a una disminución

del recurso ya que presenta fallos en su cabecera debidos principalmente a la escasa regulación de que dispone, lo que combinado con que en los meses con menos recursos circulantes es cuando se produce la mayor demanda de agua, da lugar a pequeños fallos en el suministro. Esto mismo ocurre en otras cabeceras de cuencas sin regulación. El sistema Aragón, que cuenta con un volumen de regulación significativo, puede presentar fallos en periodos de sequía. Por su parte, los regadíos que se atienden desde el río Arga no presentan problemas de suministro. Finalmente, para concluir, hay que señalar que el sistema Eje del Ebro no tiene graves problemas de suministro, únicamente se producen fallos en la demanda del río Linares [incluido en este sistema], debido a que este río no dispone de regulación.

La **margen derecha del Ebro es una excepción** a lo anterior, ya que aquí sí existe una clara deficiencia de recursos.

- En cuanto a las demandas urbanas, de menor cuantía que las anteriores, y por ser prioritarias, **presentan una elevada garantía volumétrica** en todos los sistemas. Únicamente se dan problemas localizados de fallos en pequeños sistemas de abastecimiento en cabeceras de cuencas sin regulación en situaciones de sequía [Ega y cuencas Pirenaicas]. Hay que señalar que una pequeña parte de la demanda urbana, corresponde a pequeños ayuntamientos, situados aguas arriba de las infraestructuras principales, distribuidos en zonas muy extensas que llevan a cabo la captación desde numerosos manantiales y pozos. Estas pequeñas demandas se contabilizan únicamente para el balance general, ya que su simulación requiere un grado de detalle que no ha podido contemplarse con la escala espacial y temporal del presente estudio. Esto ocurre principalmente en las cuencas de la vertiente cantábrica y cabeceras de cuencas pirenaicas. Según lo comentado, las demandas en estos sistemas, de acuerdo a los balances del modelo pueden estar garantizadas, pero en realidad, son bastante **vulnerables a los periodos de sequía**, por lo que se podrían dar problemas localizados de fallos que no pueden detectarse por el nivel de agregación de los datos de recursos, tanto en escala espacial como temporal. Esta vulnerabilidad a la sequía, también se aprecia en los fallos puntuales de caudales ecológicos que se dan en la simulación en dichas zonas.

 Para esta alternativa, la disminución del recurso estimado de acuerdo a **las proyecciones de Cambio Climático**, provocaría un **descenso significativo** de la garantía volumétrica de las demandas de regadío en los **sistemas más vulnerables en la actualidad** [Ega, Alhama y Queiles] tanto para el escenario RCP4.5 como para el RCP8.5. El impacto sería especialmente acusado para el Alhama y Queiles con el escenario RCP8.5 y horizonte 2070-2100. En el resto de los sistemas, se mantiene similar a la del escenario base o de referencia.

Respecto a las demandas urbanas, la garantía es elevada para todos los escenarios futuros de recursos, a excepción del 3er horizonte con emisiones RCP8.5 para el sistema Ega. Como se ha indicado anteriormente, los pequeños sistemas de abastecimiento que son vulnerables ya en la

actualidad a los periodos de sequía, verían agravada su situación debido a la disminución del recurso prevista.

Desde el punto de vista de los planes de desarrollo futuro de demandas e infraestructuras (EDF y EDC) basados en la conexión de varios sistemas de explotación al Canal de Navarra, y el recrecimiento del embalse de Yesa:

El análisis de resultados obtenidos con el **escenario base o de referencia** permite obtener las siguientes conclusiones:

- Las ampliaciones previstas para el Canal de Navarra, **mejoran significativamente las garantías en los sistemas receptores -Alhama y Queiles.**
- La **alternativa EDF** que considera un volumen de suministro desde el canal de 319 hm³ permitiría una gestión sostenible del sistema Itoiz- Canal de Navarra, obteniéndose una disminución del déficit conjunto en los sistemas de aprovechamiento de Navarra de 90 hm³ a 40 hm³. Sin embargo, la **alternativa EDC** en la que se considera un volumen de suministro de 400 hm³ [correspondiente a la concesión de aguas] podría comprometer las reservas del embalse de Itoiz, lo que en consecuencia aumentaría el riesgo de fallos en el suministro desde el mismo. Estos resultados son acordes con los obtenidos en los balances de asignación de recursos realizados en el Plan Hidrológico del Ebro vigente.

Evaluando los resultados obtenidos a partir de las **proyecciones climáticas** se aprecia que el **escenario RCP4.5 resulta más favorable que el actual (EDA)**, ya que la garantía es alta para casi todos los sistemas gracias a la mejora obtenida en los Sistemas Alhama y Queiles. Esto se puede dar siempre que el volumen de suministro desde CN no comprometa las reservas del embalse de Itoiz, lo que, según se ha comentado anteriormente, tendría lugar para la alternativa EDC. El **horizonte 2070-2100 del escenario RCP8.5** incluye pronósticos en los que la disminución del recurso hídrico es tan acusada que **disminuyen las garantías de suministro** de manera importante para cualquier alternativa. Si bien, los resultados obtenidos en dicho escenario presentan una dispersión importante, lo que indica una menor fiabilidad de los mismos dado el grado de incertidumbre que presentan.

Atendiendo a las **demandas urbanas**, se aprecia un cierto riesgo de fallo con el escenario de emisiones RCP8.5 y tercer horizonte temporal (2070-2100), en el sistema Ega (como en EDA) y también en las cuencas Arga y Aragón. Con el escenario RCP4.5 el EDC también presenta algunos fallos en las mismas cuencas. Como se ha indicado anteriormente, los pequeños sistemas de abastecimiento que son vulnerables ya en la actualidad a los periodos de sequía, verían agravada su situación debido a la disminución del recurso prevista.

-  El recrecimiento de Yesa podría mejorar la garantía general del sistema, al permitir un margen de regulación que se emplearía para garantizar las demandas en el bajo Aragón y Ebro, apoyando así la regulación de Itoiz y el Canal de Navarra. Para cualquier escenario de desarrollo futuro será de gran utilidad el **diseño adecuado de unas normas de explotación conjunta de ambos embalses**.
-  Las pequeñas demandas, **principalmente urbanas**, que dependen de las **cabeceras de ríos sin regulación** [cuencas cantábricas, cabeceras de cuencas pirenaicas, cabecera del Ega], según los balances del modelo pueden estar garantizadas, pero como se ha comentado anteriormente, en la realidad, son vulnerables a episodios de sequía y disminuciones de los recursos naturales. Esta situación podría agravarse con la disminución del recurso hídrico prevista según los escenarios futuros analizados. En estos casos sería de utilidad la realización de **estudios de detalle** para mejorar el conocimiento sobre su situación y una propuesta de soluciones para cada caso.
-  En las cuencas **con sistemas de regulación** [Arga, Ebro y Aragón], en las que también se pueden dar problemas puntuales de suministro en periodos de sequía, debe hacerse una planificación adecuada para garantizar una gestión eficiente de los recursos y demandas.
-  Con el fin de llevar a cabo la adaptación de los planes sectoriales que implican un consumo de agua en Navarra a la evolución del Cambio Climático, se recomienda en base a los resultados obtenidos en el presente estudio considerar en las revisiones de los mismos **una disminución del recurso estimada en torno al 20 %**, cifra global promedio que podría alcanzarse para el horizonte 2040-2070.

En resumen, los escenarios futuros de recursos basados en las proyecciones climáticas del IPCC dan lugar a un aumento del riesgo de fallos en las garantías, tanto agrícolas como urbanas, aunque también se ha podido comprobar que, el **sistema tiene todavía un margen de desarrollo**.

Con el fin de asegurar las garantías de suministro de las demandas de agua actuales y planificadas en los escenarios presentes y futuros de recursos hídricos, se deben incrementar los esfuerzos en ayudar a los sectores estratégicos que consumen agua a realizar **una gestión de la demanda**, que promueva un consumo racional y eficiente del recurso hídrico, que se adapte a su disponibilidad y preserve los ecosistemas acuáticos de Navarra.

Por tanto, y a la vista de los resultados del estudio, se hace necesario incorporar la información de los estudios realizados en las **futuras revisiones del Plan Director del Ciclo Integral del Agua de Uso Urbano y del Plan Foral de Regadíos**, de cara a adaptarlos a los nuevos escenarios previstos, así como a que puedan diseñar e incorporar en los propios planes nuevas medidas de adaptación al cambio climático basadas en el conocimiento actual.