

Anejo 9

Análisis de incertidumbre y efectos previsibles del cambio climático

2024

Confederación Hidrográfica del Ebro O.A.



Índice

1	Introducción	1
2	Análisis de incertidumbre de las dotaciones objetivo de riego	1
2.1	Incertidumbre asociada a la variación espacial y temporal	1
2.1.1	Comarcalización agraria	1
2.1.2	Variación en las dotaciones según las características agroclimáticas de las campañas de riego	3
2.2	Incertidumbre asociada a la ETC.....	6
2.3	Incertidumbre asociada al balance de humedad del suelo.....	7
2.4	Incertidumbre en otros componentes del estudio	12
3	Efectos previsibles del cambio climático	13
3.1	Descripción de los estudios de cambio climático.....	13
3.1.1	Panorámica general de los estudios de cambio climático disponibles para España	13
3.1.2	El Informe Evaluación del impacto del cambio climático en los recursos hídricos y sequias en España. CEDEX 2017.....	14
3.2	Proyección de las variables agroclimáticas en el Ebro	15
3.3	Efectos previsibles del cambio climático sobre las dotaciones de riego de los cultivos más relevantes de la demarcación del Ebro.....	18
3.3.1	Metodología.....	18
3.3.2	Resultados	18
4	Referencias.....	22

Índice de figuras

Figura 1. Relación entre la evapotranspiración de referencia y la precipitación media del periodo 1980/81 a 2017/18 en las 95 comarcas agrarias delimitadas para el cálculo de necesidades de riego de los cultivos.....	2
Figura 2. Comarcas agrarias seleccionadas para la comparación de las necesidades de riego calculadas.	3
Figura 3. Comparativa de las necesidades de riego netas anuales (m ³ /ha/año) y percentiles 20%, 50% y 80% en tres comarcas agrarias seleccionadas para cebada, maíz y alfalfa.....	5
Figura 4. Comparativa de las necesidades de riego netas anuales (m ³ /ha/año) en tres comarcas agrarias seleccionadas para cebada, maíz y alfalfa.....	6

Índice de tablas

Tabla 1. Variación de la precipitación y la evapotranspiración de referencia medias anuales del periodo 1980/81 a 2017/18 entre las 95 comarcas agrarias consideradas: mínimo, percentil 20%, percentil 50%, media, percentil 80% y máximo.....	2
Tabla 2. Necesidades de riego anuales netas P80 (m ³ /ha/año) del periodo 1980/812 a 2017/18 en tres comarcas agrarias seleccionadas para su comparación para cebada, maíz y alfalfa.	4
Tabla 3. Necesidades de riego netas anuales de los percentiles 20%, 50%, 80%, 90% y 95% de la serie 1980/81 a 2017/18 de la cebada y el maíz en la comarca de Zaragoza para diferentes valores de ($\theta_{FC} - \theta_{WP}$).	8
Tabla 4. Variación porcentual de las necesidades de riego netas anuales de los percentiles 20%, 50%, 80%, 90% y 95% de la serie 1980/81 a 2017/18 de la cebada y el maíz en la comarca de Zaragoza con el cambio de valores de ($\theta_{FC} - \theta_{WP}$).	9
Tabla 5. Necesidades de riego netas anuales (m ³ /ha/año) de la serie 1980/81 a 2017/18, percentil 80%, media de todas las comarcas agrarias de cebada, maíz y alfalfa para diferentes valores de ($\theta_{FC} - \theta_{WP}$) y profundidad máxima de raíces ($Z_{m\acute{a}x}$).....	9
Tabla 6. Variación porcentual de las necesidades de riego netas anuales (m ³ /ha/año) de la serie 1980/81 a 2017/18, percentil 80%, media de todas las comarcas agrarias de cebada, maíz y alfalfa para diferentes valores de ($\theta_{FC} - \theta_{WP}$) y profundidad máxima de raíces ($Z_{m\acute{a}x}$), con respecto a las dotaciones netas medias calculadas en el presente estudio.....	10
Tabla 7. Necesidades de riego netas anuales de los percentiles 20%, 50%, 80%, 90% y 95% de la serie 1980/81 a 2017/18 de la cebada y el maíz en la comarca de Zaragoza para diferentes valores del factor de corrección por textura de suelos del factor de agotamiento (p_s).....	11
Tabla 8. Variación porcentual de las necesidades de riego netas anuales de los percentiles 20%, 50%, 80%, 90% y 95% de la serie 1980/81 a 2017/18 de la cebada y el maíz en la comarca de Zaragoza con el cambio de valores del factor de corrección por textura de suelos del factor de agotamiento (p_s).....	11
Tabla 9. Necesidades de riego anuales netas P80 (m ³ /ha/año) del periodo 1980/812 a 2017/18 en tres comarcas agrarias seleccionadas para cebada, maíz y alfalfa, según procedimiento de evaluación del percentil y porcentaje de variación.	12
Tabla 10. Valores trimestrales y anuales medios de los 6 Modelos Climáticos Globales presentados por el estudio del CEDEX 2017 para la DHE, según RCP 4.5 y RCP 8.5, periodo de control y horizonte de proyección: precipitación, temperatura, evapotranspiración y escorrentía.....	16
Tabla 11. Valores medios anuales y trimestrales de precipitación y evapotranspiración en la DHE del periodo de control del estudio CEDEX 2017 (1961-2000) y del periodo de cálculo de las necesidades de riego netas (1980-2017) y porcentajes de variación.	17
Tabla 12. Porcentajes de variación, anuales y trimestrales, de la precipitación y la evapotranspiración, según RCP y horizonte, respecto al periodo de cálculo de las dotaciones (1980-2017) en la DHE.....	17
Tabla 13. Dotaciones netas para los 18 cultivos más importantes de la DHE (P80) en el horizonte actual y los horizontes 2045 y 2070-2100, para las RCP 4.5 y RCP 8.5 (m ³ /ha/año).	19
Tabla 14. Dotaciones netas medias en la Demarcación Hidrográfica del Ebro con base en los 18 cultivos más importantes, en los horizontes actual, 2045 y 2070-2100, para las RCP 4.5 y RCP 8.5 (m ³ /ha/año).	19
Tabla 15. Porcentaje de incremento de las dotaciones netas por cultivo, en los horizontes 2045 y 2070-2100 respecto del actual, para las RCP 4.5 y RCP 8.5.	20

Tabla 16. Porcentaje de aumento de las dotaciones netas medias en la Demarcación Hidrográfica del Ebro con base en los 18 cultivos más importantes, en los horizontes 2045 y 2070-2100 respecto al actual, para las RCP 4.5 y RCP 8.5. 20

Índice de Apéndices

APÉNDICE 9.1* Precipitación y ETo mensual del periodo base 1980/81 a 2017/18 por comarca agraria, modificadas para los horizontes y proyecciones de cambio climático considerados

APÉNDICE 9.2* Evapotranspiración de los cultivos, Necesidades de Riego anuales y distribución mensual, según comarca agraria, para los percentiles 20%, 50%, 80%, 90% y 95%, para los horizontes y proyecciones de cambio climático considerados

*Los apéndices solo se encuentran en formato Excel debido a su gran tamaño.

1 Introducción

Este anejo integra dos vertientes del trabajo: el análisis de la incertidumbre asociada con determinados elementos del procedimiento de cálculo de los valores de las necesidades de riego evaluadas y el estudio de los efectos previsibles del cambio climático en los mismos.

El análisis de la incertidumbre aborda aspectos destacados que repercuten en los resultados o en su aplicación práctica, además de cuantificar en algunos casos el efecto de la variación de determinados parámetros.

Por su parte, el estudio de los efectos previsibles del cambio climático se fundamenta en los últimos trabajos de regionalización disponibles para el Ebro. Así, la reducción de la precipitación y el aumento de la evapotranspiración estimados en estos trabajos, para las diferentes sendas representativas de concentración de gases de efecto invernadero y horizontes temporales, son utilizados para la realización de los balances de humedad del suelo que permiten evaluar la afección en determinados escenarios de cambio climático para los años venideros en las necesidades de riego de los cultivos más importantes.

2 Análisis de incertidumbre de las dotaciones objetivo de riego

2.1 Incertidumbre asociada a la variación espacial y temporal

2.1.1 Comarcalización agraria

Las variables agroclimáticas, precipitación y evapotranspiración de referencia, así como el resto de los parámetros necesarios para el cálculo de las necesidades de riego netas han sido compartimentados espacialmente según 95 comarcas agrarias. Esta división afecta directamente a los resultados obtenidos.

Las comarcas finalmente delimitadas para este trabajo (ver Anejo 3) están trazadas de tal forma que un término municipal únicamente puede pertenecer a una comarca y solo en algunos casos muy concretos se permite que una comarca agraria integre municipios de más de una comunidad autónoma; siempre con el objetivo de obtener una adecuada representación agroclimatológica.

El tamaño de estas comarcas varía entre los 39,25 km² de Goierri, con únicamente 3 términos municipales y los 2.424,35 km² de Zaragoza, que se extiende a 36 términos municipales, con un valor medio de unos 900 km².

Tanto las mencionadas variables, precipitación y evapotranspiración de referencia, como los parámetros pueden ser divididos espacialmente según otras divisiones de mucha menor o mayor extensión. De hecho, dado los componentes concretos utilizados en el cálculo de las dotaciones en el presente estudio se podría haber dividido el territorio en elementos de medio kilómetro de lado, que es el tamaño de píxel utilizado por el modelo SIMPA (ver Anejo 4 y Anejo 6 para mayores detalles), o en el otro extremo haber dividido la demarcación según sistemas de explotación.

Sin embargo la elección de la división del territorio en 95 comarcas agrarias para la elaboración y presentación de resultados tiene un fundamento de orden práctico innegable ya que la aplicación de las dotaciones en las nuevas concesiones de agua resulta más sencilla si únicamente se requiere identificar el municipio en el que se encuentra en nuevo derecho, evitando así la realización de operaciones

complejas para la mayoría de los usuarios, que causarían mayor incertidumbre en la aplicación de la norma. Además, estas comarcas agrarias están muy relacionadas con las utilizadas por cada una de las 9 comunidades autónomas con territorio en la Demarcación del Ebro, lo que también genera menos confusión en la comparación de datos.

La Tabla 1 permite apreciar la variabilidad de la precipitación y la evapotranspiración de referencia que se produce en las 95 comarcas agrarias en el periodo utilizado para los cálculos de las necesidades de riego 1980/81 a 2017/18.

Tabla 1. Variación de la precipitación y la evapotranspiración de referencia medias anuales del periodo 1980/81 a 2017/18 entre las 95 comarcas agrarias consideradas: mínimo, percentil 20%, percentil 50%, media, percentil 80% y máximo.

	Min	P20	P50	Media	P80	Max
Precipitación (mm/año)	337	402	531	625	827	1.453
Evapotranspiración de referencia (mm/año)	730	883	993	1.005	1.124	1.327

La distribución que la división del territorio en las 95 comarcas agrarias mencionadas produce en la precipitación y evapotranspiración medias anuales del periodo 1980/81 a 2017/18, así como la relación entre ambas variables se puede apreciar en la Figura 1.

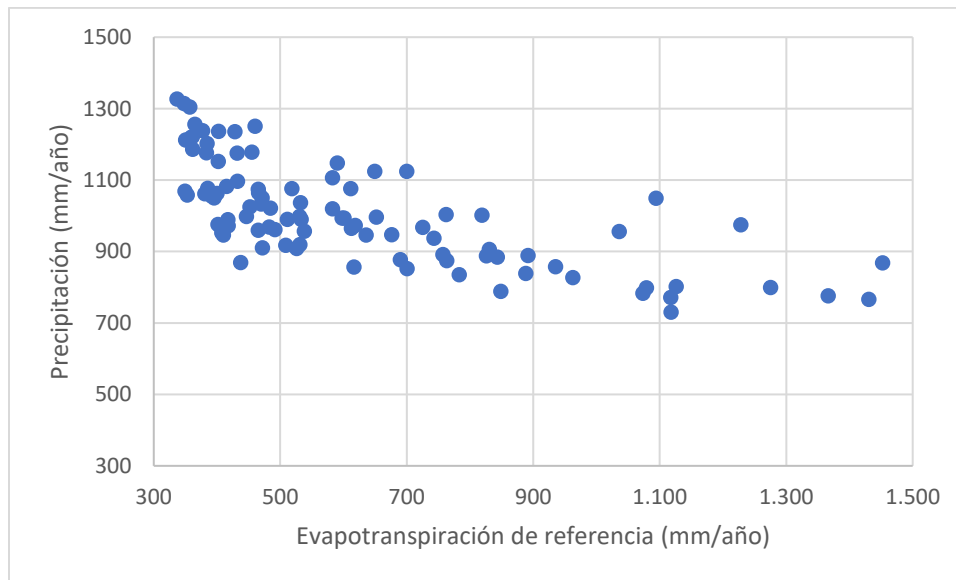


Figura 1. Relación entre la evapotranspiración de referencia y la precipitación media del periodo 1980/81 a 2017/18 en las 95 comarcas agrarias delimitadas para el cálculo de necesidades de riego de los cultivos.

En conclusión, se considera que la pérdida en precisión debida a la compartimentación del territorio en 95 comarcas agrarias en lugar de un pixelado de celdas de medio kilómetro de lado, es compensada ampliamente por la mayor claridad y aplicabilidad de los resultados.

2.1.2 Variación en las dotaciones según las características agroclimáticas de las campañas de riego

El Apéndice 6.6 presenta los resultados de las necesidades de riego netas anuales para los percentiles 20%, 50%, 80%, 90% y 95% del periodo 1980/81 a 2017/18 para el conjunto de parejas cultivo/variedad comarca agraria. De entre estos valores se seleccionan los correspondientes al percentil 80% que es el que se considera la dotación objetivo neta (ver Apéndice 6.8).

La elección del percentil 80 para el cálculo de las dotaciones objetivo es meramente convencional, tratando de responder a las necesidades de la planificación hidrológica. De este modo el riego se ve completamente atendido, de modo que no se limite la producción asociada a la falta de agua, el 80% de los años.

Este tratamiento no debe ocultar el hecho de la gran variación de las necesidades de riego entre campañas de características agroclimatológicas diferentes.

Para mostrar esta circunstancia, y la incertidumbre asociada a la misma, se han seleccionado las tres comarcas agrarias que se muestran en la Figura 2, comparando los resultados anuales obtenidos para tres cultivos importantes: cebada, maíz y alfalfa.

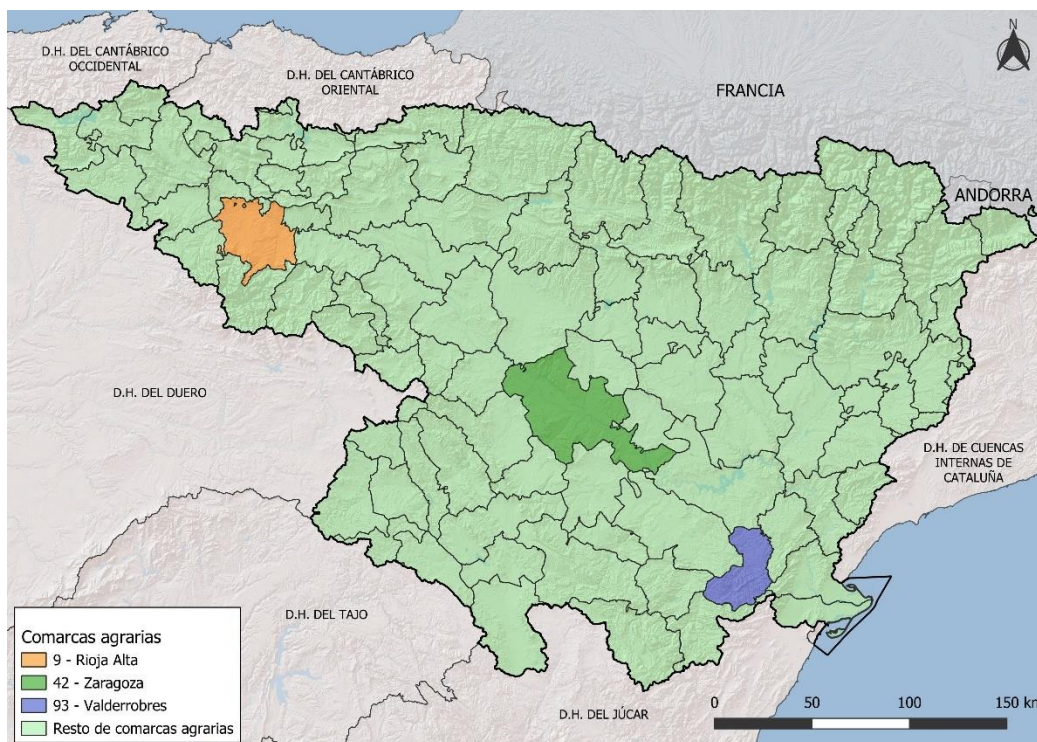


Figura 2. Comarcas agrarias seleccionadas para la comparación de las necesidades de riego calculadas.

En la Tabla 2 se muestran las dotaciones objetivo de la cebada, el maíz y la alfalfa, en las tres comarcas seleccionadas. Según cultivos las dotaciones más bajas son las de la cebada, seguidas del maíz y las más altas corresponden a la alfalfa. Por comarcas las necesidades más bajas de estas tres comarcas se dan en la Rioja Alta, seguidas de las de Valderrobres y las más altas son las de Zaragoza.

Tabla 2. Necesidades de riego anuales netas P80 (m³/ha/año) del periodo 1980/81 a 2017/18 en tres comarcas agrarias seleccionadas para su comparación para cebada, maíz y alfalfa.

	Comarca agraria		
	Rioja Alta	Zaragoza	Valderrobres
Cebada	2.079	2.674	2.345
Maíz	4.298	6.492	4.828
Alfalfa	4.805	6.819	5.293

La Figura 3 presenta gráficamente los valores año a año de las necesidades de riego y que sirven para el cálculo de la dotación objetivo (percentil 80%). Como se puede apreciar las variaciones que se producen entre los diversos años en respuesta a las circunstancias agroclimáticas de cada año son significativas, especialmente en aquellos cultivos con necesidades de riego menores.



Figura 3. Comparativa de las necesidades de riego netas anuales (m³/ha/año) y percentiles 20%, 50% y 80% en tres comarcas agrarias seleccionadas para cebada, maíz y alfalfa.

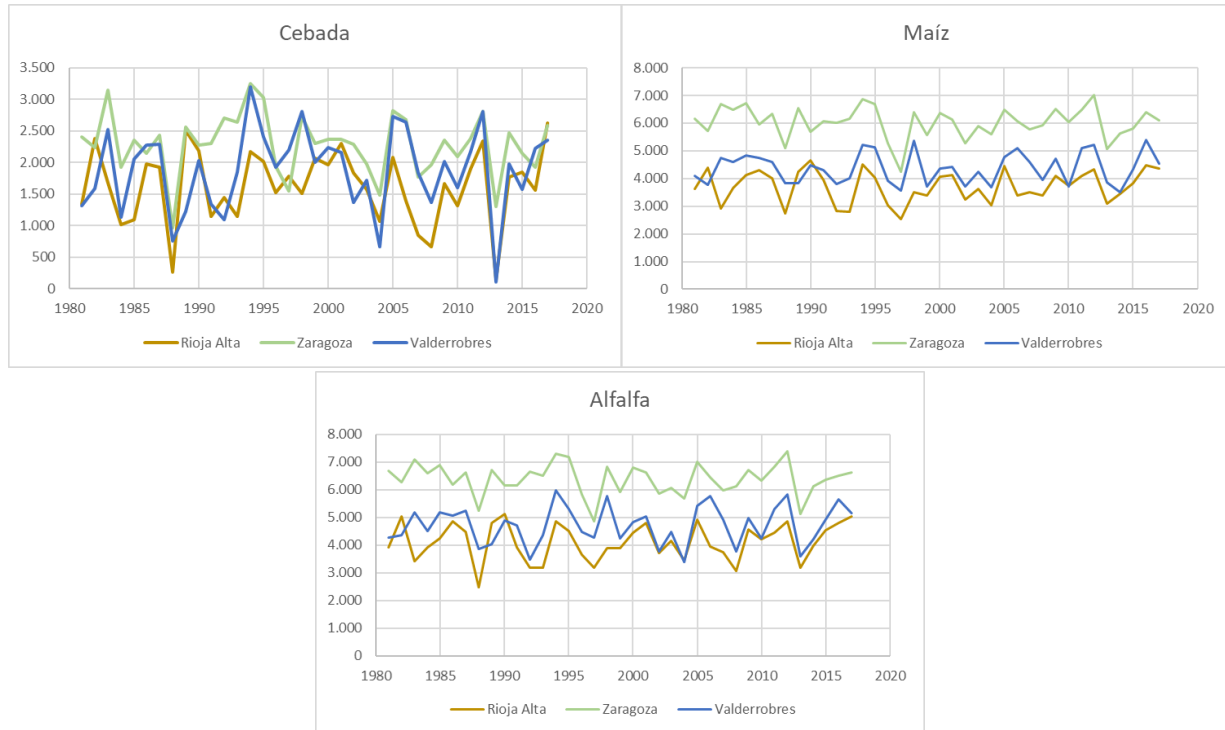


Figura 4. Comparativa de las necesidades de riego netas anuales (m³/ha/año) en tres comarcas agrarias seleccionadas para cebada, maíz y alfalfa.

La Figura 4 muestra cómo, a pesar de que la dotación objetivo de un cultivo sea más alta en una comarca que en otra, en años concretos esta relación se puede invertir momentáneamente en respuesta a condiciones concretas.

2.2 Incertidumbre asociada a la E_{Tc}

De acuerdo al enfoque del coeficiente del cultivo, tal y como es expuesto en FAO (2006), la evapotranspiración del cultivo E_{Tc} se calcula como el producto de la evapotranspiración de referencia E_{T0} y el coeficiente del cultivo K_c en cada una de las fases de desarrollo de los cultivos:

$$E_{Tc} = K_c * E_{T0}$$

donde:

- E_{Tc} evapotranspiración del cultivo [L T⁻¹],
- K_c coeficiente del cultivo [adimensional],
- E_{T0} evapotranspiración de referencia [L T⁻¹].

Así, mientras E_{T0} representa un indicador de la demanda climática, el valor de K_c corresponde principalmente a las características particulares del cultivo, variando solo en una pequeña proporción en función del clima. Este procedimiento se ha afianzado como un método fiable para la estimación de las necesidades de agua de los cultivos.

La cuantificación de la **evapotranspiración de referencia E_{T0}** se ha realizado con base en los resultados mensuales del modelo SIMPA para el periodo 1980/81 a 2017/18 distribuidos según celdas de medio kilómetro de lado. Los valores de estos ráster de valores mensuales han sido reajustados por métodos

geoestadísticos a los valores puntuales aportados por la red de estaciones agroclimatológicas del SiAR y de las comunidades autónomas. Posteriormente estos ráster ajustados se utilizaron para obtener los valores mensuales de la serie de referencia en las comarcas agrarias.

Por su parte, los valores de los **coeficientes de cultivo K_c** para las fases de mediados y finales propuestos por FAO (2006) han sido contrastado satisfactoriamente mediante mediciones, en multitud de estudios posteriores (véase por ejemplo Pereira, 2021).

Los valores de K_c de las fases de desarrollo de mediados y finales, disponibles en la literatura, corresponden a condiciones climáticas estándar, es decir las de climas sub-húmedos, con una humedad relativa mínima diaria de aproximadamente el 45% y con velocidades del viento bajas a moderadas, que se asimilan a un promedio de 2 m/s. Para condiciones de mayor humedad o condiciones áridas, los coeficientes K_c de la etapa de mediados de temporada y final han sido ajustados teniendo en cuenta valores promedio de humedad relativa mínima y velocidad del viento para cada comarca agraria* de la Demarcación Hidrográfica del Ebro. En todo caso, tal y como indica FAO (2006) la sensibilidad del método a estos ajustes climáticos de K_c es moderada.

En la mayoría de los casos, y siempre que ha sido posible, se han utilizado valores de K_c de las fases de desarrollo de los cultivos, convenientemente ajustados a las condiciones climáticas medias de cada comarca teniendo en cuenta la humedad relativa mínima y la velocidad del viento. Sin embargo en otros casos únicamente se ha contado con datos de coeficientes de cultivo mensuales que han sido seleccionados de las fuentes de información más fiables disponibles.

La cuantificación de las necesidades de riego netas resulta muy sensible a la determinación precisa de la **fenología de los cultivos y variedades**, en lo que se refiere a las fechas medias de comienzo y fin de cada una de las cuatro fases de desarrollo, en los distintos territorios. La mayor parte de la información en este sentido proviene del estudio precedente de este, realizado por el CSIC (2004). En algunos casos se han realizado extrapolaciones de determinadas comarcas a otras con similares características agroclimatológicas y algunas correcciones. A pesar de que se ha dispuesto de información recopilada por algunos servicios de asesoramiento al regante, esta no ofrecía garantías suficientes ni se encontraba sistematizada para poder mejorar la amplia información recopilada en el estudio del CSIC (2004).

2.3 Incertidumbre asociada al balance de humedad del suelo

El **total de agua disponible en la zona radicular (ADT)** que se utiliza en el balance de humedad del suelo en presencia de cultivo se ha evaluado como la diferencia entre los contenidos de humedad a capacidad de campo y a punto de marchitez permanente, teniendo en cuenta la profundidad de raíces:

$$ADT = 1000 (\theta_{FC} - \theta_{WP}) Z_r$$

donde:

* Tal y como se muestra de modo detallado en el capítulo correspondiente, los valores de ET_0 han sido evaluados en este trabajo para el periodo de referencia 1980/81 a 2017/18. Por su parte, la velocidad media del viento y la humedad relativa mínima, en cada comarca, dada la baja sensibilidad del método a estas variables se han mantenido con base en el trabajo realizado al efecto en CSIC (2004).

- ADT agua disponible total en la zona radicular del suelo (mm),
- θ_{FC} contenido de humedad a capacidad de campo [$L^3 L^{-3}$],
- θ_{WP} contenido de humedad en el punto de marchitez permanente [$L^3 L^{-3}$], y
- Z_r profundidad de las raíces (m).

Valores más altos de ADT, en los periodos con cultivo, se relacionan con menores necesidades de riego y viceversa. Los valores de capacidad de campo (θ_{FC}) y de punto de marchitez (θ_{WP}), y en consecuencia su diferencia ($\theta_{FC} - \theta_{WP}$), que es el valor que interesa al cálculo, se relacionan con la textura de los suelos y la cantidad de materia orgánica. El este trabajo se ha introducido un ajuste en relación con las características granulométricas de los suelos con base en numerosas muestras de suelos recopiladas por el proyecto LUCAS, tal y como se describe en el Anejo 6. Sin embargo, se ha considerado que, dada la finalidad de las dotaciones de riego a obtener, además de la falta de información al efecto, no se deben considerar variaciones asociadas a las cantidades de materia orgánica en los suelos.

La sensibilidad de los resultados a la consideración de los ajustes relacionados con la textura de los suelos es moderada. Con el objetivo de dar una idea de la repercusión de la consideración de las texturas de los suelos en los resultado se han calculado las necesidades hídricas netas para diferentes percentiles de la cebada y el maíz en la comarca de Zaragoza, que tiene una diferencia ($\theta_{FC} - \theta_{WP}$) de 17,92%, cambiando esta diferencia por el valor máximo de los calculados para las 95 comarcas, 18,48% (correspondiente a Bajo Cinca) y por el mínimo 16,69% (Pallars Sobirà). Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 9 y la diferencia porcentual al aumentar o disminuir el término ($\theta_{FC} - \theta_{WP}$) en la Tabla 4.

Tabla 3. Necesidades de riego netas anuales de los percentiles 20%, 50%, 80%, 90% y 95% de la serie 1980/81 a 2017/18 de la cebada y el maíz en la comarca de Zaragoza para diferentes valores de ($\theta_{FC} - \theta_{WP}$).

	P20	P50	P80	P90	P95
$(\theta_{FC} - \theta_{WP}) = 17,92\%$					
Cebada	1.944	2.355	2.674	2.813	3.055
Maíz	5.646	6.075	6.492	6.699	6.745
$(\theta_{FC} - \theta_{WP}) = 16,69\%$					
Cebada	2.011	2.422	2.741	2.880	3.122
Maíz	5.707	6.106	6.539	6.759	6.801
$(\theta_{FC} - \theta_{WP}) = 18,48\%$					
Cebada	1.914	2.325	2.644	2.783	3.025
Maíz	5.622	6.075	6.485	6.669	6.715

Como se puede observar, el efecto sobre las necesidades de riego de la consideración de las texturas de suelos es limitada, únicamente de unos pocos puntos porcentuales, siendo menores para los percentiles altos y para las dotaciones de cultivos que requieren más volumen de agua de riego.

Tabla 4. Variación porcentual de las necesidades de riego netas anuales de los percentiles 20%, 50%, 80%, 90% y 95% de la serie 1980/81 a 2017/18 de la cebada y el maíz en la comarca de Zaragoza con el cambio de valores de $(\theta_{FC} - \theta_{WP})$.

	P20	P50	P80	P90	P95
Variación al considerar el valor mínimo (16,69%) respecto al medio (17,92%)					
Cebada	3,4%	2,8%	2,5%	2,4%	2,2%
Maíz	1,1%	0,5%	0,7%	0,9%	0,8%
Variación al considerar el valor máximo (1848%) respecto al medio (17,92%)					
Cebada	-1,6%	-1,3%	-1,1%	-1,1%	-1,0%
Maíz	-0,4%	0,0%	-0,1%	-0,4%	-0,4%

Para completar este análisis se analiza la sensibilidad del procedimiento de balance a la variación conjunta de la diferencia $(\theta_{FC} - \theta_{WP})$ y de la profundidad de raíces. En los periodos con cultivo, valores más altos de $(\theta_{FC} - \theta_{WP})$ o de la profundidad de raíces producen necesidades de riego más bajas. A la hora de calcular las dotaciones objetivo en el Anejo 6 del presente estudio, los valores de la diferencia $(\theta_{FC} - \theta_{WP})$ se han considerado en la parte alta del rango indicado en Riego y Drenaje 56 de FAO para cada textura de suelo. Por el contrario, la profundidad del suelo, equiparada con la profundidad de raíces en cada etapa de crecimiento del cultivo, en general, se encuentra en la zona inferior del rango señalado por la citada publicación de FAO.

La Tabla 5 muestra las dotaciones medias de todas las comarcas, para cebada, maíz en grano y alfalfa con los valores de la diferencia $(\theta_{FC} - \theta_{WP})$ y de la profundidad de raíces consideradas en este trabajo, junto con las dotaciones medias que se obtendrían con otras combinaciones de estos parámetros.

Tabla 5. Necesidades de riego netas anuales ($m^3/ha/año$) de la serie 1980/81 a 2017/18, percentil 80%, media de todas las comarcas agrarias de cebada, maíz y alfalfa para diferentes valores de $(\theta_{FC} - \theta_{WP})$ y profundidad máxima de raíces ($Z_{m\acute{a}x}$).

	$Z_{m\acute{a}x}$	$(FC-WP)^{(*)}$		
		Superior	Media	
Cebada	Mínima	1,0 m	1.723	1.838
Maíz grano	Mínima	1,0 m	4.272	4.342
Alfalfa	Mínima	1,0 m	4.577	4.629
Cebada	Máxima	1,5 m	1.273	1.436
Maíz grano	Máxima	1,7 m	3.732	3.920
Alfalfa	Máxima	2,0 m	3.907	4.092

(*) FC-WP) Superior/Media. Respectivamente, valor de la diferencia entre capacidad de campo y punto de marchitez en la zona superior o media del rango de valores propuesto por FAO (2006) para las diferentes texturas de suelos

Nota: se resaltan en negrita las dotaciones netas medias calculadas en el presente estudio

La Tabla 6, recoge los porcentajes de variación de las dotaciones netas medias de estos tres cultivos al modificar $(\theta_{FC} - \theta_{WP})$ y profundidad de raíces, con respecto a las obtenidas en el presente trabajo. Como puede apreciarse, al disminuir la diferencia $(\theta_{FC} - \theta_{WP})$ manteniendo la profundidad de raíces produce un aumento moderado de las dotaciones medias que resulta porcentualmente más marcado, en general,

para los cultivos con menores necesidades de agua. Además, se muestra la disminución relativa de las dotaciones medias que se produce al considerar la longitud de raíces en la parte superior de rango propuesto por FAO, 2006.

Tabla 6. Variación porcentual de las necesidades de riego netas anuales (m³/ha/año) de la serie 1980/81 a 2017/18, percentil 80%, media de todas las comarcas agrarias de cebada, maíz y alfalfa para diferentes valores de ($\theta_{fc} - \theta_{wp}$) y profundidad máxima de raíces ($Z_{m\acute{a}x}$), con respecto a las dotaciones netas medias calculadas en el presente estudio.

			(FC-WP)	
		$Z_{m\acute{a}x}$	Superior	Medio
Cebada	Mínima	1,0 m	-	6,6%
Maíz grano		1,0 m	-	1,6%
Alfalfa		1,0 m	-	1,1%
Cebada	Máxima	1,5 m	-26,1%	-16,7%
Maíz grano		1,7 m	-12,6%	-8,2%
Alfalfa		2,0 m	-14,7%	-10,6%

Por otro lado, según disminuye la cantidad de agua en la zona radicular se irá incrementando la dificultad con la que el cultivo puede extraer agua, por lo que se introduce el concepto de **agua fácilmente aprovechable (AFA)** que corresponde con la fracción del ADT que puede ser extraída por el cultivo sin causar estrés hídrico en la planta.

$$AFA = p \text{ ADT}$$

donde:

- AFA agua fácilmente extraíble (aprovechable) por los cultivos en la zona radicular del suelo (mm), y
- p factor de agotamiento del cultivo.

El factor p varía de un cultivo a otro. Además, p está en función del poder evaporante de la atmósfera y de las características de los suelos. Los valores del factor de agotamiento p atribuidos en condiciones medias para cada cultivo, $p_{c(\text{tabulado})}$ (ver Tabla 6.1.3 en el Apéndice 6.1) deberán ser aumentados cuando se den tasas bajas de ET_c y disminuidos con tasas altas de ET_c . Para condiciones atmosféricas cálidas y secas, donde el valor de ET_c es alto, p será 10-25% menor que los valores tabulados, y el suelo se encontrará relativamente húmedo aun cuando comiencen a ocurrir situaciones de estrés. Cuando la evapotranspiración del cultivo es baja, el valor de p será hasta 20% mayor que los valores tabulados. Por otra parte, tal y como se señala en FAO (2006), en general se puede establecer que para suelos de textura fina (arcilla) los valores de p pueden ser reducidos en un 5-10%, mientras para suelos de textura más gruesas (arenosos), estos pueden incrementarse en un 5-10%.

En consecuencia, en el balance se ha utilizado un valor de p para cada mes ajustándolo según la siguiente expresión:

$$p_i = p_{c(\text{tabulado})} + 0,04 (5 - ET_{c_i}) + p_s$$

donde:

- p_i factor de agotamiento del cultivo en el mes i ,
- p_c factor de agotamiento básico de cada cultivo,
- p_s factor de corrección del factor de agotamiento debido a las características del suelo, y
- ET_{ci} evapotranspiración del cultivo para el mes i (mm/día).

El procedimiento aplicado para la evaluación del valor de p_s se describe en el apartado 3.1.2. del Anejo 6.

Para evaluar el efecto sobre las necesidades de riego netas de esta corrección se ha procedido de forma similar a la aplicada para cuantificar el efecto de la variación del ADT. Así, en la Tabla 7 se incluyen los valores de necesidades de riego netas para distintos percentiles de la cebada y el maíz, en la comarca de Zaragoza, para los valores de p_s obtenidos para esa comarca según las texturas de los suelos (-0,02), en comparación con las necesidades que se obtendrían con un factor p_s máximo de los considerados en el Ebro (0,00) y con el mínimo (-0,04).

Tabla 7. Necesidades de riego netas anuales de los percentiles 20%, 50%, 80%, 90% y 95% de la serie 1980/81 a 2017/18 de la cebada y el maíz en la comarca de Zaragoza para diferentes valores del factor de corrección por textura de suelos del factor de agotamiento (p_s).

	P20	P50	P80	P90	P95
$p_s = -0,02$					
Cebada	1.944	2.355	2.674	2.813	3.055
Maíz	5.646	6.075	6.492	6.699	6.745
$p_s = -0,04$					
Cebada	1.980	2.391	2.710	2.849	3.091
Maíz	5.682	6.081	6.522	6.735	6.781
$p_s = 0,00$					
Cebada	1.909	2.319	2.638	2.777	3.019
Maíz	5.620	6.075	6.484	6.663	6.709

En la Tabla 8 se puede apreciar como la influencia en los resultados va en el mismo sentido de la indicada para la variación del ADT, sumándose a la relacionada con este, si bien es también reducida.

Tabla 8. Variación porcentual de las necesidades de riego netas anuales de los percentiles 20%, 50%, 80%, 90% y 95% de la serie 1980/81 a 2017/18 de la cebada y el maíz en la comarca de Zaragoza con el cambio de valores del factor de corrección por textura de suelos del factor de agotamiento (p_s).

	P20	P50	P80	P90	P95
Variación al considerar el valor mínimo de p_s (-0,04) respecto al medio (-0,02)					
Cebada	1,8%	1,5%	1,3%	1,3%	1,2%
Maíz	0,6%	0,1%	0,5%	0,5%	0,5%
Variación al considerar el valor máximo de p_s (0,00) respecto al medio (-0,02)					
Cebada	-1,8%	-1,5%	-1,3%	-1,3%	-1,2%
Maíz	-0,5%	0,0%	-0,1%	-0,5%	-0,5%

Como puede deducirse del concepto de agua disponible total en la zona radicular, la **profundidad máxima de raíces** afecta directamente a esta variable y por lo tanto a las necesidades de riego que se obtienen. En general los datos de profundidad máxima de raíces están tabulados o pueden ser asimilados a los de cultivos similares. Estos valores se presentan habitualmente en forma de rangos por lo que en el presente trabajo se ha optado por utilizar valores medios en primera instancia. Posteriormente estos han sido modificados en muchos casos, siempre dentro del rango propuesto por la literatura, atendiendo a los trabajos de validación de las necesidades de riego calculadas con las dotaciones registradas en parcelas reales con riego eficiente y no limitante (ver Anejo 8).

2.4 Incertidumbre en otros componentes del estudio

El **procedimiento de cálculo de los percentiles** también influye en los resultados obtenidos. Las necesidades de riego asociadas al percentil 80 de la serie 1980/81 a 2017/18, valor que determina las dotaciones objetivo de cada pareja cultivo-comarca, se ha obtenido en el presente estudio con base en la serie de valores anuales. Otra posibilidad podría ser calcular el percentil asociado a cada mes y sumar los resultados. Para mostrar la sensibilidad a la elección de uno u otro método, en la Tabla 9 se presentan los valores correspondientes a las dotaciones objetivo según ambos métodos de cálculo del percentil 80. Como puede apreciarse los valores de las dotaciones objetivo resultado de la aplicación del segundo método citado son mayores. Sin embargo, este procedimiento se ha desestimado dado que tiene menor robustez estadística al generar años completamente ficticios que no representan adecuadamente las series de las variables agroclimáticas.

Tabla 9. Necesidades de riego anuales netas P80 (m³/ha/año) del periodo 1980/81 a 2017/18 en tres comarcas agrarias seleccionadas para cebada, maíz y alfalfa, según procedimiento de evaluación del percentil y porcentaje de variación.

Procedimiento A). Cálculo del percentil 80% sobre los valores anuales

	Comarca agraria		
	Rioja Alta	Zaragoza	Valderrobres
Cebada	2.079	2.674	2.345
Maíz	4.298	6.492	4.828
Alfalfa	4.805	6.819	5.293

Procedimiento B). Cálculo del percentil 80% sobre los valores mensuales y agregación anual posterior

	Comarca agraria		
	Rioja Alta	Zaragoza	Valderrobres
Cebada	2.269	3.039	2.745
Maíz	4.748	6.998	5.451
Alfalfa	5.101	7.561	5.926

Porcentaje de variación del procedimiento B) con respecto al A)

	Comarca agraria		
	Rioja Alta	Zaragoza	Valderrobres
Cebada	9,1%	13,6%	17,1%
Maíz	10,5%	7,8%	12,9%
Alfalfa	6,2%	10,9%	12,0%

Otro aspecto a destacar es el relacionado con las **dobles cosechas**. Aunque el trabajo realizado está enfocado a la determinación de las dotaciones objetivo de riego, en el Anejo 7 que trata específicamente sobre los grandes sistemas de riego se ha realizado una incursión en la traducción de las dotaciones necesarias para el riego de los cultivos a los volúmenes de agua que requieren anualmente estos sistemas. Para ello se han evaluado los cultivos realmente presentes y sus superficies de plantación en base a la información estadística agronómica disponible, especialmente datos a nivel de parcela del SIGPAC y catastro. La información en general resulta adecuada, sin embargo, los datos de dobles cosechas no aparecen reflejados en las estadísticas con el nivel de detalle necesario, salvo en casos excepcionales. Esta circunstancia ha llevado a la necesidad de recurrir a solicitar de forma específica esta información a los grandes sistemas de riego, en los que no siempre la información está disponible. Sería deseable que la información relacionada con las dobles cosechas se fuera generalizando e incorporando a las estadísticas agrarias en general y de los grandes sistemas de riego en particular.

3 Efectos previsibles del cambio climático

3.1 Descripción de los estudios de cambio climático

3.1.1 Panorámica general de los estudios de cambio climático disponibles para España

Los trabajos realizados sobre estudios del impacto del cambio climático sobre los recursos hídricos en España son diversos y han sido realizados mediante diferentes metodologías, lo cual ha complicado su comparación a lo largo de los años. Entre los primeros estudios realizados en España se encuentra el de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) en 1996, o el del Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX) en 1999, en los cuales ya se preveía una disminución de las precipitaciones, siendo más acusadas en el sur para el horizonte 2060 según la AEMET (1996) y en el suroeste peninsular, la cuenca del Guadiana, el valle del Ebro y la España insular para el horizonte 2030, según el estudio del CEDEX (1999).

En 2008 la AEMET realiza un nuevo estudio, principalmente orientado a evaluar la evolución de los patrones espaciales de temperaturas máximas y mínimas. Los resultados muestran que a lo largo del siglo XXI se producirá un aumento de las temperaturas (máximas y mínimas), siendo más acusado en el interior de la Península. Además de un descenso en las precipitaciones en el sur peninsular y más acusado a medida que avanza el siglo XXI.

En 2012 el CEDEX publicó su segundo estudio, en el cual se usaba un conjunto de proyecciones climáticas regionalizadas para España a partir de resultados de simulaciones con modelos climáticos del 3^{er} informe de evaluación (AR3, 2001) del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés). En este trabajo se consideraron 3 horizontes (2040, 2070 y 2100) y en todos ellos se prevé un descenso en la escorrentía, un 8% para 2040, entre 11-16% para 2070 y un 28% para 2100, siendo más acusadas estas disminuciones en el suroeste de España y Canarias.

Otros estudios relevantes son el realizado en 2016 por el Institut d'Estudis Catalans y la Generalitat de Catalunya (IEC-Gencat), en el cual se estima una reducción de los recursos hídricos del 18% para el periodo 2031-2050, y el realizado por la Universitat Politècnica de València (UPV) en 2017, donde se estima una reducción de las aportaciones del 29% para el escenario RCP 4.5 y del 36% en el escenario RCP 8.5 ambos para el horizonte 2040-2070. En todos estos trabajos se resalta el alto nivel de incertidumbre en estos estudios.

En 2017 el CEDEX realizó una actualización del estudio realizado por el CEDEX en 2012 en el cual se evalúa el impacto del cambio climático en los recursos hídricos y las sequías en España. Este estudio utiliza proyecciones climáticas regionalizadas basadas en dos escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero[†] (RCP 4.5 y RCP 8.5) y seis Modelos Climáticos Globales (MCG). Los resultados obtenidos proyectan una disminución de las precipitaciones y un aumento de la evapotranspiración, produciéndose una reducción de los recursos hídricos en España a lo largo del siglo XXI, siendo estos cambios más acusados en el escenario RCP 8.5 y hacia finales de siglo. Los resultados también muestran una reducción de la escorrentía y de la recarga de acuíferos, aumentando la frecuencia de sequías.

El quinto Informe de Evaluación del IPCC (AR5, 2013) de la Organización de las Naciones Unidas (ONU) indican que para España las precipitaciones anuales disminuirán y las temperaturas aumentarán, en consecuencia, se producirá una disminución de los recursos hídricos. Por lo tanto, es fundamental incorporar la incertidumbre del cambio climático en la planificación y gestión de los recursos hídricos. El sexto y último informe publicado por el IPCC (AR6, 2022), expone que en el caso de España las temperaturas medias han aumentado significativamente y se espera que esta tendencia continúe, siendo cada vez más frecuentes las olas de calor. Para las precipitaciones se observa una tendencia a la reducción, especialmente en climas mediterráneos, así como un aumento de los eventos extremos, como lluvias torrenciales.

3.1.2 El Informe Evaluación del impacto del cambio climático en los recursos hídricos y sequías en España. CEDEX 2017

El objetivo de este estudio es analizar los impactos del cambio climático en los recursos hídricos en régimen natural y en régimen de sequía en España. Dicho objetivo se encuentra recogido en una de las actividades indicadas en el Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático (PNACC).

Los valores climáticos de partida de este trabajo proceden de modelos climáticos globales y de escenarios de emisiones utilizados en el AR5 (2013) del IPCC. En este estudio se utilizaron 12 proyecciones, 6 proyecciones en RCP 4.5 y 6 proyecciones en RCP 8.5. El IPCC definió cuatro trayectorias de concentración de gases de efecto invernadero en función de las acciones de mitigación que se pudieran implementar y el uso de nuevas tecnologías. El escenario RCP 4.5 presenta una mitigación moderada, en el cual se implementarían políticas climáticas que reducen las emisiones significativamente y tendría una variación de la temperatura de unos 2.5°C por encima de los niveles preindustriales para el año 2100. El escenario 8.5 es el más pesimista de los cuatro, ya que supone la ausencia de medidas para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y proyecta los niveles más altos de CO₂ equivalente en la atmósfera para el

[†] Con el AR5 (Assessment Report 5) se definieron cuatro nuevos escenarios de emisiones, las denominadas Sendas Representativas de Concentración (RCP, por sus siglas en inglés). Éstas se identifican por su forzamiento radiativo total para el año 2100. Los cuatro RCP son: RCP2.6, RCP 4.5, RCP6.0 y RCP 8.5. Cada RCP tiene asociada una base de datos de alta resolución espacial de emisiones de sustancias contaminantes (clasificadas por sectores), de emisiones y concentraciones de GEI y de usos de suelo hasta el año 2100, basada en una combinación de modelos de distinta complejidad de la química atmosférica y del ciclo del carbono (IPCC 2013). Las RCP suponen un avance con respecto a los escenarios de emisiones utilizados en anteriores informes del IPCC (denominados SRES) ya que las nuevas RCP pueden contemplar los efectos de las políticas orientadas a limitar el cambio climático del siglo XXI.

siglo XXI, con lo que el aumento de temperatura sería entre 4 y 5°C por encima de los niveles preindustriales para 2100, por lo tanto, a priori, presentará un mayor impacto sobre el ciclo hidrológico.

El IPCC utiliza Modelos Climáticos Globales realizados por la comunidad científica internacional, en gran medida, a través del proyecto CMIP (Coupled Model Intercomparison Project) en el cual se obtienen simulaciones estandarizadas que pueden ser analizadas y comparadas por el IPCC. Los 6 MCG utilizados en el estudio del CEDEX (2017) son:

- **bcc-csm1-1:** Centro Climático de Pekín, China. Acopla la atmósfera, el océano, la superficie terrestre y el hielo marino e incorpora el ciclo global del carbono y la cubierta vegetal.
- **CNRM-CM5:** Centre National de Recherches Meteorologiques – Coupled Model 5, Francia. Los modelos que acopla son: atmósfera (ARPEGE), océano (NEMO), hielo marino (GELATO), superficies terrestres (SURFEX) y escorrentía (TRIP).
- **inmcm4:** Institute of Numerical Mathematics Climate Model Version 4, Rusia. Es un modelo acoplado atmósfera-océano. El modelo consiste en dos modelos principales: el modelo atmosférico y el modelo oceánico. Usado para proyectar la sensibilidad climática a incrementos de CO₂.
- **MIROC.ESM:** Universidad de Tokio, Instituto Nacional de Estudios Medioambientales de Japón y la Agencia de Ciencia Marina y Terrestre y de Tecnología de Japón Model for Interdisciplinary Research on Climate Institute – Earth System Model, es un modelo que acopla la atmósfera, el océano y la superficie terrestre, mediante el intercambio de energía, momento, agua y CO₂.
- **MPI-ESM-MR:** Instituto Max Planck de Meteorología de Hamburgo, Alemania. Es un modelo que acopla la atmósfera, el océano y la superficie terrestre, mediante el intercambio de energía, momento, agua y el CO₂.
- **MRI.CGCM3:** Meteorological Research Institute (MRI), Japón. Es un modelo acoplado atmósfera-océano, mediante el intercambio de energía entre ambos.

La regionalización para España de los modelos del AR5 (2013) del IPCC fue llevada a cabo por la AEMET en 2016. A través de estas proyecciones se obtuvieron valores de temperaturas máximas y mínimas y de precipitación sobre 2695 puntos de observación, de los cuales 374 corresponden a estaciones termométricas y 2321 a estaciones pluviométricas, distribuidas por España peninsular, Baleares y Canarias.

3.2 Proyección de las variables agroclimáticas en el Ebro

Las proyecciones de las variables agroclimáticas utilizadas en este trabajo provienen del Anexo 3 del estudio del CEDEX (2017). Este estudio se basó en los valores diarios de precipitación y temperatura máxima y mínima de las proyecciones climáticas, ofrecidos por la AEMET, tratándolos a escala mensual y presentando los resultados tanto para el conjunto de España como para cada Demarcación Hidrográfica. A partir de estos datos mensuales particularizados a nivel trimestral para la Demarcación Hidrográfica del Ebro (DHE) se ha realizado el análisis en el presente trabajo.

La Tabla 10 resume las variables agroclimáticas en la Demarcación Hidrográfica del Ebro, correspondientes a los valores medios de los 6 modelos climáticos globales (MCG), según la RCP 4.5 y la RCP 8.5, para los horizontes de proyección 2010-2040, 2040-2070, 2070-2100 y para el periodo de control (1961-2000).

Tabla 10. Valores trimestrales y anuales medios de los 6 Modelos Climáticos Globales presentados por el estudio del CEDEX 2017 para la DHE, según RCP 4.5 y RCP 8.5, periodo de control y horizonte de proyección: precipitación, temperatura, evapotranspiración y escorrentía.

	Precipitación (mm)									
	RCP 4.5					RCP 8.5				
	Anual	Oto	Inv	Pri	Ver	Anual	Oto	Inv	Pri	Ver
1961-2000	627	174	169	162	122	627	174	169	162	122
2010-2040	624	166	176	165	117	609	168	166	159	116
2040-2070	599	164	168	153	115	597	157	166	153	121
2070-2100	599	163	161	157	119	564	146	153	149	117

	Temperatura (°C)									
	RCP 4.5					RCP 8.5				
	Anual	Oto	Inv	Pri	Ver	Anual	Oto	Inv	Pri	Ver
1961-2000	10,8	7,3	5,8	12,3	17,5	10,8	7,3	5,8	12,3	17,5
2010-2040	11,7	8,2	6,5	13,0	18,7	11,8	8,5	6,7	13,2	19,0
2040-2070	12,2	8,7	6,8	14,0	19,8	13,0	9,5	7,5	14,7	20,5
2070-2100	12,8	9,0	7,3	14,3	20,0	14,7	10,7	8,8	16,7	22,3

	ETP (mm)									
	RCP 4.5					RCP 8.5				
	Anual	Oto	Inv	Pri	Ver	Anual	Oto	Inv	Pri	Ver
1961-2000	719	79	94	256	291	719	79	94	256	291
2010-2040	743	81	96	262	304	750	82	97	265	306
2040-2070	769	84	99	274	313	789	87	101	282	321
2070-2100	781	85	101	277	318	840	92	107	298	343

	Escorrentía (mm)									
	RCP 4.5					RCP 8.5				
	Anual	Oto	Inv	Pri	Ver	Anual	Oto	Inv	Pri	Ver
1961-2000	196	50	75	49	22	196	50	75	49	22
2010-2040	190	46	75	48	21	182	47	71	45	20
2040-2070	173	44	69	41	19	168	41	69	40	19
2070-2100	171	44	66	42	19	142	35	58	34	16

El estudio realizado por el CEDEX (2017) utiliza como periodo de control el 1961-2000, sin embargo, las necesidades de riego en el presente trabajo se han obtenido con base en la precipitación y evapotranspiración mensuales en las comarcas agrarias del periodo 1980/81 a 2017/18 que resulta más seco y con valores medios de evapotranspiración de referencia más elevados. La Tabla 11 muestra los valores medios de precipitación y evapotranspiración en la DHE para ambos periodos y los porcentajes de variación anual y trimestrales.

Tabla 11. Valores medios anuales y trimestrales de precipitación y evapotranspiración en la DHE del periodo de control del estudio CEDEX 2017 (1961-2000) y del periodo de cálculo de las necesidades de riego netas (1980-2017) y porcentajes de variación.

	Precipitación (mm)				
	Anual	Oto	Inv	Pri	Ver
1961-2000	627	185	137	184	120
1980-2017	605	177	136	180	113
% variación	-3,42%	-4,49%	-1,13%	-2,15%	-6,31%

	Evapotranspiración ETP (mm)				
	Anual	Oto	Inv	Pri	Ver
1961-2000	719	73	82	257	306
1980-2017	730	74	84	264	308
% variación	1,62%	1,44%	1,79%	2,67%	0,72%

Con base en los datos incluidos en la Tabla 10 y Tabla 11 se han obtenido los porcentajes de variación con respecto al periodo 1980/81 a 2017/18, de la precipitación y la evapotranspiración, anuales y trimestrales, para las RCP 4.5 y 8.5, en los horizontes 2010-2040, 2040-2070 y 2070-2100, y 2045 mediante interpolación (Tabla 12).

Tabla 12. Porcentajes de variación, anuales y trimestrales, de la precipitación y la evapotranspiración, según RCP y horizonte, respecto al periodo de cálculo de las dotaciones (1980-2017) en la DHE

	Precipitación: Porcentajes de reducción con respecto al periodo 1980/81 - 2017/18									
	RCP 4.5					RCP 8.5				
	Anual	Oto	Inv	Pri	Ver	Anual	Oto	Inv	Pri	Ver
2010-2040	3,0%	-0,1%	5,2%	4,1%	2,5%	0,5%	0,8%	-0,8%	0,4%	1,2%
2045	0,3%	-0,9%	2,2%	-1,0%	1,2%	-0,8%	-3,4%	-0,4%	-2,3%	4,2%
2040-2070	-1,1%	-1,3%	0,6%	-3,6%	0,5%	-1,4%	-5,5%	-0,3%	-3,6%	5,7%
2070-2100	-1,1%	-2,2%	-3,7%	-0,9%	3,7%	-6,9%	-12,3%	-8,3%	-6,1%	1,9%

	ETP: Porcentajes de reducción con respecto al periodo 1980/81 - 2017/18									
	RCP 4.5					RCP 8.5				
	Anual	Oto	Inv	Pri	Ver	Anual	Oto	Inv	Pri	Ver
2010-2040	1,8%	1,5%	0,5%	-0,1%	3,8%	2,7%	2,3%	2,3%	1,1%	4,5%
2045	4,1%	3,7%	2,6%	2,9%	5,9%	6,3%	6,5%	4,8%	5,2%	7,7%
2040-2070	5,3%	4,9%	3,7%	4,3%	6,9%	8,1%	8,6%	6,1%	7,3%	9,3%
2070-2100	6,9%	7,0%	5,6%	5,5%	8,6%	15,0%	14,9%	12,4%	13,6%	16,9%

Como puede verse la precipitación presenta una tendencia moderada a la disminución en las próximas décadas mientras que el aumento previsto de la evapotranspiración es notablemente más marcado. Además, los mayores incrementos de las evapotranspiraciones trimestrales se producen en la época estival, mientras que el reparto intranual de la precipitación ofrece una distribución más errática. Además, como es de esperar, el escenario correspondiente a la RCP 8.5 es significativamente más pesimista que el obtenido para la RCP 4.5.

3.3 Efectos previsibles del cambio climático sobre las dotaciones de riego de los cultivos más relevantes de la demarcación del Ebro

3.3.1 Metodología

La estimación de las necesidades de riego netas afectadas por la evolución previsible del cambio climático para los cultivos seleccionados en cada comarca agraria se ha realizado mediante el balance de humedad del suelo, modificando la precipitación y la evapotranspiración de referencia del periodo base de cálculo (1980/81 a 2017/18) mediante los coeficientes de variación trimestrales previamente calculados para los horizontes 2045 y el 2070-2100, y las RCP 4.5 y 8.5. El balance y el resto de los detalles del cálculo siguen el procedimiento detallado en el Anejo 6.

Las cuatro parejas de series de precipitación y evapotranspiración de referencia modificadas pueden consultarse en el Apéndice 9.1.

A continuación, se realiza la simulación de los principales cultivos de la DHE, cuyos resultados se muestran en el siguiente apartado y se ponen en comparación con los valores correspondientes a la situación actual.

3.3.2 Resultados

La comparación de los resultados de las simulaciones para los horizontes 2054 y 2070-2100, con las dotaciones del presente estudio se ha muestra para los 18 cultivos más importantes en la DHE, tanto por la superficie que ocupan en el territorio como por su consumo de agua. Los cultivos representados son los cereales para grano; cebada, trigo, maíz en grano, arroz y triticale, las forrajeras; alfalfa y ballico, los frutales no cítricos; almendro en riego deficitario controlado (RDC), melocotonero, peral, manzano, cerezo y paraguay, los cultivos industriales; girasol y colza, la hortaliza; guisante verde, el olivar y el viñedo.

El análisis se ha realizado para las necesidades de riego netas, por lo tanto, las dotaciones, tanto en parcela como en alta, son mayores a las aquí presentadas, debido a las eficiencias de aplicación, de conducción y distribución.

En la Tabla 13 se muestran los resultados obtenidos de las necesidades de riego netas para el horizonte actual en el presente trabajo, en comparación con las proyecciones y los horizontes 2045 y 2070-2100. El horizonte actual hace referencia a los valores anuales correspondientes al percentil 80 de las dotaciones netas calculadas para cada cultivo del periodo 1980/81 a 2017/18. El número de comarcas se refiere a el número de comarcas agrarias donde se considera el cultivo. Los resultados se muestran para las sendas representativas de concentración (RCP, de sus siglas en inglés) 4.5 y 8.5.

La Tabla 14 presenta los valores de dotaciones netas medias para el conjunto de la demarcación del Ebro y su evolución futura previsible calculadas como media ponderada según las superficies regadas de cada cultivo en 2022.

Actualización de las dotaciones de riego para el PHE 2028-2033

Tabla 13. Dotaciones netas para los 18 cultivos más importantes de la DHE (P80) en el horizonte actual y los horizontes 2045 y 2070-2100, para las RCP 4.5 y RCP 8.5 (m³/ha/año).

Código	Cultivo Nombre	Nº Comarcas	Horizonte 2045									Horizonte 2070-2100					
			Horizonte actual			RCP 4.5			RCP 8.5			RCP 4.5			RCP 8.5		
			P20	P50	P80	P20	P50	P80	P20	P50	P80	P20	P50	P80	P20	P50	P80
1-012-00	Cebada	95	855	1.707	2.683	955	1.816	2.799	1.046	1.933	2.892	1.051	1.948	2.901	1.343	2.324	3.274
1-041-00	Trigo	95	1.277	2.153	3.021	1.400	2.302	3.164	1.496	2.417	3.307	1.501	2.432	3.331	1.880	2.882	3.814
1-030-01	Maíz en grano	94	3.107	4.383	5.342	3.386	4.694	5.691	3.482	4.844	5.827	3.515	4.888	5.878	4.011	5.497	6.544
2-044-00	Alfalfa	95	3.244	4.630	5.913	3.471	4.921	6.247	3.564	5.055	6.439	3.590	5.090	6.486	4.078	5.730	7.213
3-055-10	Almendro (RD)	80	2.068	2.696	3.432	2.211	2.836	3.627	2.294	2.934	3.764	2.308	2.950	3.783	2.669	3.353	4.264
3-053-00	Olivar	87	1.320	2.930	3.873	1.514	3.143	4.099	1.643	3.290	4.253	1.674	3.317	4.282	2.227	3.904	4.866
3-063-00	Viñedo	90	1.092	2.143	3.029	1.255	2.329	3.228	1.339	2.427	3.325	1.359	2.443	3.355	1.772	2.955	3.837
2-048-00	Ballico	95	2.767	4.174	5.317	2.987	4.387	5.567	3.108	4.563	5.738	3.134	4.602	5.773	3.682	5.236	6.435
1-005-00	Arroz	33	7.383	7.964	9.138	7.786	8.385	9.587	7.953	8.565	9.798	8.003	8.624	9.855	8.779	9.436	10.801
3-060-02	Melocotonero	71	3.386	4.220	5.273	3.648	4.505	5.586	3.801	4.659	5.751	3.853	4.709	5.797	4.448	5.352	6.441
3-062-03	Peral	92	2.578	4.280	5.487	2.829	4.584	5.829	2.941	4.732	5.998	2.973	4.784	6.044	3.562	5.403	6.737
1-024-00	Guisante verde	87	1.640	2.219	3.076	1.733	2.316	3.202	1.802	2.422	3.305	1.805	2.446	3.311	2.117	2.770	3.695
1-022-01	Girasol	93	2.329	3.445	4.402	2.554	3.698	4.678	2.669	3.838	4.807	2.707	3.869	4.850	3.138	4.460	5.425
3-059-03	Manzano	95	2.516	3.964	5.228	2.773	4.253	5.571	2.881	4.389	5.733	2.912	4.442	5.787	3.520	5.054	6.543
1-068-00	Triticale	95	995	1.861	2.719	1.118	1.999	2.865	1.214	2.116	3.007	1.219	2.132	3.032	1.593	2.609	3.518
3-057-03	Cerezo	89	2.544	3.833	4.917	2.751	4.080	5.170	2.859	4.237	5.332	2.876	4.277	5.376	3.364	4.944	6.040
3-111-00	Paraguay	47	4.143	5.234	6.608	4.402	5.533	6.952	4.560	5.700	7.143	4.605	5.739	7.193	5.269	6.456	7.954
1-017-00	Colza	88	649	1.722	2.476	689	1.839	2.593	717	1.953	2.721	726	1.972	2.745	1.036	2.355	3.174

Nota: Los percentiles P20, P50 y P80 que aparecen reflejados en la tabla corresponden a los de la serie de dotaciones de cada cultivo en las diferentes comarcas en las que aparece. No debe confundirse con el percentil de la serie cronológica (1980/81 a 2017/18) con el cual han sido calculadas las dotaciones objetivo (P80)

Tabla 14. Dotaciones netas medias en la Demarcación Hidrográfica del Ebro con base en los 18 cultivos más importantes, en los horizontes actual, 2045 y 2070-2100, para las RCP 4.5 y RCP 8.5 (m³/ha/año).

Horizonte actual			Horizonte 2045						Horizonte 2070-2100					
			RCP 4.5			RCP 8.5			RCP 4.5			RCP 8.5		
P20	P50	P80	P20	P50	P80	P20	P50	P80	P20	P50	P80	P20	P50	P80
2.167	3.225	4.223	2.352	3.434	4.454	2.453	3.565	4.594	2.473	3.593	4.625	2.911	4.117	5.185

Actualización de las dotaciones de riego para el PHE 2028-2033

Tabla 15. Porcentaje de incremento de las dotaciones netas por cultivo, en los horizontes 2045 y 2070-2100 respecto del actual, para las RCP 4.5 y RCP 8.5.

Cultivo		% de incremento del horizonte 2045 sobre el actual						% de incremento del horizonte 2070-2100 sobre el actual					
		RCP 4.5			RCP 8.5			RCP 4.5			RCP 8.5		
Código	Nombre	P20	P50	P80	P20	P50	P80	P20	P50	P80	P20	P50	P80
1-012-00	Cebada	12%	6%	4%	22%	13%	8%	23%	14%	8%	57%	36%	22%
1-041-00	Trigo	10%	7%	5%	17%	12%	9%	18%	13%	10%	47%	34%	26%
1-030-01	Maíz en grano	9%	7%	7%	12%	11%	9%	13%	12%	10%	29%	25%	23%
2-044-00	Alfalfa	7%	6%	6%	10%	9%	9%	11%	10%	10%	26%	24%	22%
3-055-10	Almendro (RD)	7%	5%	6%	11%	9%	10%	12%	9%	10%	29%	24%	24%
3-053-00	Olivar	15%	7%	6%	24%	12%	10%	27%	13%	11%	69%	33%	26%
3-063-00	Viñedo	15%	9%	7%	23%	13%	10%	24%	14%	11%	62%	38%	27%
2-048-00	Ballico	8%	5%	5%	12%	9%	8%	13%	10%	9%	33%	25%	21%
1-005-00	Arroz	5%	5%	5%	8%	8%	7%	8%	8%	8%	19%	18%	18%
3-060-02	Melocotonero	8%	7%	6%	12%	10%	9%	14%	12%	10%	31%	27%	22%
3-062-03	Peral	10%	7%	6%	14%	11%	9%	15%	12%	10%	38%	26%	23%
1-024-00	Guisante verde	6%	4%	4%	10%	9%	7%	10%	10%	8%	29%	25%	20%
1-022-01	Girasol	10%	7%	6%	15%	11%	9%	16%	12%	10%	35%	29%	23%
3-059-03	Manzano	10%	7%	7%	15%	11%	10%	16%	12%	11%	40%	27%	25%
1-068-00	Triticale	12%	7%	5%	22%	14%	11%	22%	15%	12%	60%	40%	29%
3-057-03	Cerezo	8%	6%	5%	12%	11%	8%	13%	12%	9%	32%	29%	23%
3-111-00	Paraguayo	6%	6%	5%	10%	9%	8%	11%	10%	9%	27%	23%	20%
1-017-00	Colza	6%	7%	5%	10%	13%	10%	12%	15%	11%	60%	37%	28%

Tabla 16. Porcentaje de aumento de las dotaciones netas medias en la Demarcación Hidrográfica del Ebro con base en los 18 cultivos más importantes, en los horizontes 2045 y 2070-2100 respecto al actual, para las RCP 4.5 y RCP 8.5.

% de variación del horizonte 2045 sobre el actual						% de variación del horizonte 2070-2100 sobre el actual					
RCP 4.5			RCP 8.5			RCP 4.5			RCP 8.5		
P20	P50	P80	P20	P50	P80	P20	P50	P80	P20	P50	P80
9%	6%	5%	13%	11%	9%	14%	11%	10%	34%	28%	23%

En la Tabla 15 se muestran los porcentajes de incremento de las dotaciones netas para cada cultivo en los horizontes 2045 y 2070-2100 respecto al horizonte actual y según las RCP 4.5 y 8.5. Como se puede observar, todas las dotaciones se ven incrementadas para ambos horizontes futuros y de forma más intensa en las comarcas con menores exigencias (P20) que en las comarcas que ya parten de una situación más exigente en términos de volumen de agua necesaria para el riego (P80).

En la Tabla 16 se sintetizan las dotaciones netas para el conjunto de la Demarcación Hidrográfica del Ebro, obtenidas mediante ponderación según la superficie de cada cultivo considerado en la Demarcación. En esta se puede observar cómo la dotación asociada al percentil 50% en 2045 aumentaría con respecto a la situación actual un 6% para la senda representativa de concentración 4.5, y un 11% de incremento, en el caso de la senda representativa de concentración RCP 8.5. Para el horizonte 2027-2100 estos incrementos se situarían en el 11% y el 28% respectivamente para las RCP 4.5 y 8.5.

4 Referencias

- AEMET, 1996. Casado, M. J., Pastor, A. (1996). *Atmospheric Response to a CO2 doubling of the ARPEGE Climate Model over Europe*. Instituto Nacional de Meteorología. Subdirección General de Programas Especiales e Investigación Climatológica.
- AEMET, 2008. *Generación de escenarios regionalizados de cambio climático para España*. VV.AA. Agencia Estatal de Meteorología. Ministerio de Medio Ambiente. ISBN: 978-84-8320-470-2.
- AR3, 2001. IPCC, 2001: *Climate Change 2001: Synthesis Report. A Contribution of Working Groups I, II, and III to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Watson, R.T. and the Core Writing Team (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, and New York, NY, USA, 398 pp.
- AR5, 2013. IPCC, 2013: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.
- AR6, 2022. IPCC, 2022: *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 3056 pp., doi:10.1017/9781009325844.
- CEDEX, 1999. Cabezas, F.; Estrada, F. y Estrela, T. (1999). *Algunas contribuciones técnicas del libro Blanco del Agua en España*. Ingeniería Civil, 115: 79-96.
- CEDEX, 2012. Álvarez-Rodríguez, J.; Barranco, L.M. y Potenciano de las Heras, Á. (2012). *Evaluación del Impacto del Cambio Climático en los Recursos Hídricos de España*. Monografía del CEDEX, M-116. Centro de Publicaciones, Secretaría General Técnica del Ministerio de Fomento. ISBN: 978-84-7790-533-2, NIPO: 163-12-011-1.
- CEDEX, 2017. *Evaluación del impacto del cambio climático en los recursos hídricos y sequías en España*. Monografía del CEDEX. Centro de Publicaciones, Secretaría General Técnica del Ministerio de Fomento. Centro de Estudios Hidrográficos.
- IEC-Gencat, 2016. Calbó et al. (2016). *Projeccions climàtiques i escenaris de futur*. En: Tercer informe sobre el canvi climàtic a Catalunya. Institut d'Estudis Catalans, Generalitat de Catalunya: 113-133.
- Pereira, L.S. et al. (2021). Standard single and basal crop coefficients for vegetable crops, an update of FAO56 crop water requirements approach. *Agricultural Water Management* 243.
- UPV, 2017. Marcos-García, P., & Pulido-Velázquez, M. (2017). *Cambio climático y planificación hidrológica: ¿Es adecuado asumir un porcentaje único de reducción de aportaciones para toda la demarcación?*. Ingeniería Del Agua, 21(1), 35–52. <https://doi.org/10.4995/ia.2017.6361>.