

2022

ESTUDIO MEDIOAMBIENTAL

Guía metodológica para la estimación
de aportaciones mínimas a

EMBALSES

en el contexto de cambio climático

Canal
de Isabel II



FUNDACIÓN CANAL
Canal de Isabel II



Autores:
Salvador Navas, Manuel del Jesus, Dina Vanesa Gómez
Instituto de Hidráulica Ambiental de la Universidad de Cantabria

ISBN: 978-84-124743-1-2



ÍNDICE

1	Contenido de esta guía	7
2	Resumen ejecutivo	12
3	Introducción	14
3.1	Motivación y objetivo de esta guía	14
3.2	Cómo utilizar esta guía	14
4	Cambio climático	16
4.1	Visión general y aplicación	16
4.2	Pronósticos e incertidumbres actuales	19
4.2.1	GCMs y RCMs	19
4.2.2	Estudios de RCMs nacionales y europeos	20
4.2.3	Resumen de resultados de los diferentes estudios realizados	21
5	Estado del arte	24
5.1	Estudios previos	24
5.2	Fuentes de información	30
5.2.1	Datos climáticos	30
5.2.2	Datos hidrológicos	31
5.2.3	Datos de cambio climático	32
5.3	Metodologías para la estimación de aportaciones mínimas a embalses	34
5.3.1	Métodos basados en la modelización hidrológica	34
5.3.2	Métodos basados en la aplicación de técnicas de aprendizaje automático	35
5.3.3	Métodos basados en la utilización directa de fuentes de datos hidrológicos	38
5.4	Técnicas de corrección de sesgo y reducción de escala.	38
5.4.1	Métodos de mapeo	39
5.4.2	Aplicación de anomalías a las series instrumentales o método delta.	41
5.4.3	Diferencias entre métodos de corrección de sesgo.	45
5.5	Utilización directa de los pronósticos de cambio climático.	46
5.6	Análisis estadístico de las aportaciones mínimas	46
5.7	Análisis de la incertidumbre	48
5.8	Incorporación de estimaciones hidroclimáticas en la toma de decisiones	49
6	Metodología para el estudio de aportaciones mínimas a embalses	51
6.1	Introducción	51
6.2	Diagrama de aplicación de la metodología	52
6.3	Definición de la metodología	54
6.3.1	Descarga de información	54
6.3.2	Extracción de información hidroclimática en la cuenca de estudio	57
6.3.3	Construcción, calibración y validación del modelo de regresión.	60
6.3.4	Actualización de series climáticas en la cuenca de estudio con la información de escenarios de cambio climático	64
6.3.5	Análisis estadístico de las aportaciones mínimas a embalses	69
6.4	Aplicación SIMPCCe.	70
7	Casos de estudio	71
7.1	Introducción	71
7.2	Validación de modelos de redes neuronales	72
7.3	Análisis cambio climático	74
7.3.1	Análisis estadístico anual	76
7.3.2	Análisis estadístico mensual	78
7.3.3	Análisis de indicadores	79
8	Orientaciones prácticas para el uso de los resultados de la guía en la toma de decisiones	81
8.1	Análisis de incertidumbre	81



8.2	Análisis técnico de los resultados	82
8.3	Orientaciones y recomendaciones en la toma de decisiones	83
8.3.1	Toma de decisiones basadas en el principio de precaución.	84
8.3.2	Toma de decisiones basadas en el principio de gestión adaptativa.	84
9	Conclusiones	92
10	Bibliografía	94
ANEXO A.	TÉRMINOS Y CONCEPTOS CLAVE	100
ANEXO B.	RESULTADOS PRINCIPALES DEL ESTUDIO	108
1	Análisis anual	109
2	Análisis mensual	113
2.1	Figuras	113
2.2	Tablas	117
ANEXO C.	MANUAL APLICACIÓN SIMPCCe	121
1	Introducción	122
2	Inicio de la aplicación	124
3	Nuevo Proyecto	125
4	Abrir Proyecto	128
5	Configuración de la cuenca	129
6	Modelos de regresión	131
7	Cambio Climático	134
8	Tiempos de ejecución y recomendaciones	138



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Tabla de contenido de esta guía	8
Tabla 2. RCPs y sus SRES equivalentes en cuanto a la anomalía de la temperatura a nivel global. La tabla recoge para cada escenario el forzamiento radiativo, CO ₂ , anomalía en la temperatura, el Pathway o ruta que va a seguir cada escenario y la elevación del nivel medio del mar global.	17
Tabla 3. La tabla recoge un resumen de los principales resultados obtenidos en la presente sección.	23
Tabla 4. Tabla resumen con los resultados del informe Evaluación del Impacto del Cambio Climático en los recursos hídricos y sequías en España realizado por el CEDEX en 2017. Los cambios son porcentuales.	26
Tabla 5. Resumen de los principales resultados sobre el efecto de cambio climático sobre la disponibilidad de recursos hídricos y sus impactos en España	29
Tabla 6. Pros y contras del uso de los diferentes algoritmos de regresión	37
Tabla 7. Pros y contras del uso estadísticos para realizar el ensemble de factores de cambio en el método delta	44
Tabla 8. Pros y contras del uso de métodos de reducción de escala	45
Tabla 9. Escala índice SSFI.....	48
Tabla 10. Inputs de partida y resultados del proceso de extracción de información hidroclimática en la zona de estudio	58
Tabla 11. Inputs de partida y resultados del proceso de configuración, calibración y validación de modelos de regresión.	61
Tabla 12. Niveles de calidad del ajuste del nivel diario, en función del valor del coeficiente NSE y PBIAS.	63
Tabla 13. Resultados validación de modelos de regresión.....	72
Tabla 14: Resultados de indicadores mensuales en el periodo histórico 1976-2005.	79
Tabla 15. Resultados de aportaciones medias anuales (hm ³) período 2011-2040 para el escenario RCP 4.5.	109
Tabla 16. Resultados de aportaciones medias anuales (hm ³) período 2041-2070 para el escenario RCP 4.5.	109
Tabla 17. Resultados de aportaciones medias anuales (hm ³) período 2041-2070 para el escenario RCP 8.5.	109
Tabla 18. Resultados de indicadores para el período 2011-2040 en el escenario RCP 4.5. .	110
Tabla 19. Resultados de indicadores para el período 2011-2040 en el escenario RCP 8.5. .	110
Tabla 20. Resultados de indicadores para el período 2041-2070 en el escenario RCP 4.5. .	111
Tabla 21. Resultados de indicadores para el período 2041-2070 en el escenario RCP 8.5. .	111
Tabla 22. Resultados de indicadores para el período 2071-2100 en el escenario RCP 4.5. .	112
Tabla 23. Resultados de indicadores para el período 2071-2100 en el escenario RCP 8.5. .	112
Tabla 24. Análisis mensual de aportaciones en el Embalse 1.....	117
Tabla 25. Análisis mensual de aportaciones en el Embalse 2.....	118
Tabla 26. Análisis mensual de aportaciones en el Embalse 3.....	119
Tabla 27. Análisis mensual de aportaciones en el Embalse 4.....	120



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Forzamiento radiativo (W/m^2) para el siglo XXI para los escenarios SRES, SSPs y RCP.....	17
Figura 2. Evolución histórica de la temperatura media global y posibles evoluciones de los diferentes escenarios.....	18
Figura 3. Elevación del terreno para una resolución de malla de un GCM (panel situado a la izquierda) y de un modelo regional de EURO-CORDEX (panel situado a la derecha).....	20
Figura 4. Cambio porcentual en la precipitación media anual para el RCP4.5 y para el periodo 2041-2070 en relación con el periodo 1971-2000.....	22
Figura 5. Variación porcentual en la escorrentía para las principales cuencas de España para el escenario A2 y para el periodo 2041-2070 respecto al periodo 1961-1990.	25
Figura 6: Ejemplo de red neuronal.	36
Figura 7: Ejemplo de una Regresión de Vectores de Soporte (SVR).	37
Figura 8: Proceso de reducción de escala a través de métodos de mapeo.....	40
Figura 9. Representación gráfica de la aplicación del método de las deltas a la corrección de sesgo de una serie climática de temperatura.	42
Figura 10. Representación gráfica de la aplicación del método de las deltas a la corrección de sesgo de una serie climática de precipitación.	43
Figura 11: Proceso de reducción de escala a través del método delta.	45
Figura 12. Ejemplo de análisis de incertidumbre.	49
Figura 13. Análisis de regiones para identificar posibles problemas de escasez de agua.	50
Figura 14. Modelo conceptual para la evaluación de los efectos del cambio climático de acuerdo con el quinto Informe de evaluación del IPCC.	51
Figura 15. Componentes de riesgo para los proyectos de embalses.	52
Figura 16. Esquema metodológico general.	53
Figura 17. Esquema metodológico detallado.	53
Figura 18. Distribución de ficheros de la base de datos de SPAIN02 v5".....	55
Figura 19. Ejemplo distribución de ficheros de descarga de aportaciones desde la página web	56
Figura 20. Ejemplo de descarga de datos de cambio climático.	57
Figura 21. Ejemplo de distribución de ficheros en la descarga de ficheros comprimidos de la página web de AEMET.	57
Figura 22. Proceso de extracción hidroclimática en la cuenca de estudio.	58
Figura 23: Resultados del proceso de definición de la cuenca aportante y de la malla de puntos distribuidos.....	59
Figura 24: Proceso de construcción, calibración y validación de modelos de regresión.	60
Figura 25: Validación de resultados obtenidos en la cuenca vertiente al Embalse 2.....	63
Figura 26: Validación de serie temporal obtenida en la cuenca vertiente al Embalse 2.	64
Figura 27: Ejemplo de la serie temporal de precipitación de modelos de cambio climático para la cuenca aportante al Embalse 2.....	65
Figura 28: Proceso de construcción, calibración y validación de modelos de regresión.	66
Figura 29: Ejemplo mapeo de cuantiles.	67
Figura 30: Proceso de reducción de escala a través de métodos de mapeo.....	68
Figura 31: Interfaz de la aplicación SIMPCCe.....	70
Figura 32. Localización casos de estudio	71
Figura 33: Curvas de caudales clasificados para las aportaciones mensuales obtenidas con el algoritmo de ANN.....	73
Figura 34: Comparativa de gráficos de autocorrelación parcial de aportaciones mensuales obtenidos mediante ANN.....	74
Figura 35: Ejemplo de corrección de sesgo.....	75
Figura 36: Análisis anual de aportaciones medias mensuales.....	77
Figura 37: Análisis mensual de las aportaciones medias en el Embalse 2.	78
Figura 38: SSFI anual.	80
Figura 39: Análisis de incertidumbre de aportaciones. Test ANOVA.....	81
Figura 40: Ejemplo del análisis de cambios mensuales en las aportaciones.....	83
Figura 41: Ejemplo de perturbación anual de la serie de aportaciones.	86
Figura 42: Ejemplo de aplicación de cópulas para determinar las características de la sequía extrema para diferentes periodos de retorno.	87
Figura 43: Ejemplo la envolvente de probabilidad para cada uno de los periodos de retorno en el período 2011-2040.....	88
Figura 44: Curva demanda fiabilidad.	89
Figura 45: Análisis de riesgo de demanda en embalses.....	90
Figura 46: Análisis de probabilidad del riesgo de demanda en embalses.....	91
Figura 47: Análisis mensual de las aportaciones medias en el Embalse 1.	113



Figura 48: Análisis mensual de las aportaciones medias en el Embalse 2.	114
Figura 49: Análisis mensual de las aportaciones medias en el Embalse 3.	115
Figura 50: Análisis mensual de las aportaciones medias en el Embalse 4.	116
Figura 51. Interfaz.	123
Figura 52. Advertencia a usuarios.	124
Figura 53. Nuevo proyecto.	125
Figura 54. Carpetas del proyecto.	126
Figura 55. Selección descarga de datos.....	126
Figura 56. Fuentes de datos ya descargadas.	126
Figura 57. Descarga de datos.	127
Figura 58. Directorio fuentes de datos.	127
Figura 59. Abrir proyecto.	128
Figura 60. Configuración de la cuenca.	129
Figura 61. Ejemplo configuración cuenca.	130
Figura 62. Modelos regresión.....	131
Figura 63. Serie de aportaciones definida por el usuario.....	131
Figura 64. Estructura fichero aportaciones.	132
Figura 65. Opción de ejecución continua.	132
Figura 66. Activación botón ejecución continua.	132
Figura 67. Validación modelo redes neuronales.....	133
Figura 68. Cambio climático.	134
Figura 69. Ficha 1.	136
Figura 70. Ficha 2.	136
Figura 71. Ficha 3.	137



1 Contenido de esta guía

La presente guía se estructura en 9 secciones bien diferenciadas y 3 anexos. En ese sentido, la Tabla 1 sintetiza el contenido de cada una de las secciones, subsecciones y anexos, indicando además el uso previsto de los mismos.



Tabla 1. Tabla de contenido de esta guía

Sección	Subsección	Contenido	Uso previsto
1. Resumen ejecutivo	Sección única	Se sintetizan los fundamentos generales de la guía.	Proporcionar al usuario información general sobre el propósito de esta guía.
2. Introducción	2.1 Objetivo de esta guía	Se definen los objetivos que persigue la guía.	Dar a conocer los objetivos.
	2.2 Cómo utilizar esta guía	Se define cómo debe usarse la guía.	Proporcionar información sobre la estructura el documento.
3. Cambio climático	3.1 Visión general y aplicación	Se presenta una introducción a los pronósticos y su aplicación a estudios de cambio climático en embalses.	Información sobre cómo se evalúa el cambio climático en variables climáticas.
	3.2 Pronósticos e incertidumbres actuales	Se detallan los cambios previstos en el clima y la hidrología en España, así como notas técnicas sobre los mecanismos de impacto.	Limitaciones y conceptos generales del cambio climático.
4. Estado del arte	4.1 Estudios previos	Se identifican los estudios realizados de cambio climático en España y se proporciona un resumen de los resultados.	Información de fondo sobre los estudios realizados.
	4.2 Metodologías	Se realiza una recopilación de las metodologías más extendidas en el estudio de la influencia de cambio climático en el recurso hídrico.	Metodologías que fundamentan la sección 5 .
	4.3 Bases de datos	Se expone un conjunto de fuentes de datos hidroclimáticos disponibles a nivel regional y global que pueden ser utilizados en estudios de cambio climático.	Bases de datos que son utilizadas en la sección 5 .



Sección	Subsección	Contenido	Uso previsto
5. Metodología para el estudio de aportaciones mínimas a embalses	5.1 Introducción	Se realiza una introducción sobre los estudios del impacto del cambio climático sobre los embalses.	Información general sobre el análisis de riesgo sobre embalses.
	5.2 Diagrama de aplicación de la metodología	Se presenta el esquema metodológico general y detallado de la propuesta metodológica de esta guía.	Esquemas de la metodología que se aplica en la sección 5.2.
	5.3 Definición de la metodología	Se define de forma detallada la metodología propuesta en esta guía.	Información detallada de los pasos a seguir para la aplicación de la metodología.
	5.4 Aplicación SIMPCCe	Presentación de la aplicación SIMPCCe proporcionada con esta guía para la aplicación de la metodología en cualquier embalse de España.	Descripción de la herramienta.
6. Casos de estudio	6.1 Introducción	Se presentan los embalses donde se aplica esta metodología a modo de ejemplo.	Localización de los puntos de estudio.
	6.2 Principales resultados	Se analizan los resultados obtenidos en cada uno de los puntos de estudio.	Análisis de resultados.
7. Orientaciones prácticas para el uso de los resultados de la guía en la toma de decisiones	7.1. Análisis de las diferentes fuentes de incertidumbre	Se analizan las diferentes fuentes de incertidumbre.	Información sobre la incertidumbre existente en esta metodología.
	7.2 Análisis técnico de los resultados	Se define cómo los usuarios pueden utilizar los resultados de la metodología para tener una visión sobre la afección del cambio climático en la zona de estudio.	Definición de los posibles análisis que pueden realizarse a partir de los resultados.



7 (cont.)	7.3. Orientaciones y recomendaciones en la toma de decisiones	Se definen las orientaciones y recomendaciones a seguir por parte de los usuarios de esta guía.	Aplicación de las técnicas de ayuda a la decisión.
Sección	Subsección	Contenido	Uso previsto
8. Conclusiones	Sección única	Se exponen las conclusiones principales de esta guía	Conclusiones del documento
9. Bibliografía	Sección única	Se muestran las diferentes fuentes bibliográficas para la elaboración de esta guía.	Información de fuentes bibliográficas.
ANEXO A	Sección única	Se definen conceptos que se consideran importantes que aparecen a lo largo de la guía.	Definición de conceptos clave.
ANEXO B	1. Análisis anual	Se muestran los resultados del análisis anual realizado sobre los puntos de estudio definidos en la guía.	Resultados del análisis realizado en la sección 6 .
	2. Análisis mensual	Se muestran los resultados del análisis mensual realizado sobre los puntos de estudio definidos en la guía.	Resultados del análisis realizado en la sección 6 .
ANEXO C	1. Introducción	Se define de forma general el objetivo y la utilidad de la aplicación.	Descripción de la aplicación SIMPCCe.
	2. Inicio de la aplicación	Se describen los pasos para el inicio de la aplicación.	Descripción de los pasos para la utilización de la aplicación.
	3. Nuevo proyecto	Se describen los pasos para crear un proyecto nuevo.	Descripción de los pasos para la utilización de la aplicación.
	4. Abrir proyecto	Se describen los pasos para abrir un proyecto ya configurado.	Descripción de los pasos para la utilización de la aplicación.



ANEXO C	5. Configuración de la cuenca	Se describen los pasos para definir la cuenca vertiente a un punto de la red hídrica en España y la extracción de los datos hidroclimatológicos.	Descripción de los pasos para la utilización de la aplicación.
	6. Modelos de regresión	Se definen los pasos a seguir para elaborar el modelo de regresión que permita convertir las series climáticas en series de aportaciones.	Descripción de los pasos para la utilización de la aplicación.
	7. Cambio climático	Se definen los pasos para realizar el proceso de obtención de series de aportaciones ante escenarios de cambio climático.	Descripción de los pasos para la utilización de la aplicación.
	8. Tiempos de ejecución y recomendaciones	Se describen los tiempos de ejecución y una serie de recomendaciones para la utilización de la aplicación SIMPCCe.	Recomendaciones y tiempos en la ejecución de la aplicación.



2 Resumen ejecutivo

Esta guía propone una metodología completa y actualizada para el estudio del impacto del cambio climático en las aportaciones mínimas a embalses, a partir de los datos existentes de uso libre en España proporcionados por el CEDEX (Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas) y AEMET (Agencia Estatal de Meteorología). De manera complementaria, también incluye el desarrollo de la librería SIMPCCe (*Simulador de Pronósticos de Cambio Climático en Embalses*) y su implementación en una aplicación con el mismo nombre¹, que permite a cualquier usuario realizar todo el análisis que se describe en esta guía. Dichas herramientas pueden descargarse a través del repositorio de GitHub de la aplicación².

En ese sentido, esta guía contiene tanto una identificación del estado del arte, que evidencia los impactos potenciales del cambio climático en el recurso hídrico, como una metodología que los profesionales pueden utilizar de forma fácil y rápida para proporcionar una evaluación sólida de los riesgos del cambio climático y sus implicaciones en los procesos de gestión estratégica del recurso hídrico disponible en embalses. Aunque no se contemplan específicamente otros tipos de masas de agua artificiales (como estanques e instalaciones de almacenamiento que no están elevadas por encima del nivel natural del suelo), gran parte de las recomendaciones pueden ser aplicadas también en el estudio en estas infraestructuras. Las orientaciones y las herramientas se han elaborado a través de una amplia revisión de la literatura, la recopilación de información hidroclimatológica a nivel nacional, las aportaciones de los ingenieros del panel de expertos, las reuniones con los responsables del Canal de Isabel II y de su Fundación, y una serie de estudios de casos que proporcionaron una visión práctica y realista de los posibles impactos del cambio climático en las aportaciones mínimas a embalses.

No obstante, se debe considerar que cualquier orientación sobre el cambio climático es, por su naturaleza, sólo aplicable a los niveles actuales de conocimiento y comprensión de las condiciones climáticas y los impactos potenciales; por lo tanto, este documento proporciona una base para la evaluación de impactos y la posible adaptación teniendo en cuenta los niveles actuales de conocimiento y comprensión, pero los profesionales deben ser conscientes de que este conocimiento cambiará con el tiempo, y de manera consecuente, se deben esperar cambios en las orientaciones.

Algunas funciones de los embalses pueden ser vulnerables a las aportaciones mínimas que reciben en épocas de fuerte sequía, lo que puede suponer una afectación grave sobre el funcionamiento del embalse y las demandas que este satisface. De este modo, las orientaciones y la herramienta que se exponen en esta guía se centran en los enfoques necesarios para garantizar que la adaptación al cambio climático en este sector pueda lograrse a través de la mejora del régimen de supervisión, funcionamiento y mantenimiento que ya existe. Las orientaciones y la herramienta se han elaborado para que los gestores de los embalses puedan llevar a cabo evaluaciones sencillas, basadas en el riesgo del impacto del cambio climático en los embalses, que encajen en los planes de gestión.

Hay que tener en cuenta que la metodología descrita en esta guía junto con la aplicación proporcionada tiene una serie de limitaciones, entre las que cabe destacar que su escala temporal de trabajo es mensual, que no pretende analizar eventos extremos sino el régimen medio y, especialmente, las aportaciones bajas. La idea fundamental de la aplicación

¹ La aplicación informática SIMPCCe ha sido desarrollada por el Instituto de Hidráulica ambiental de Cantabria (IHC) como herramienta complementaria a esta guía. Está vinculada al encargo recibido de la Fundación Canal para el desarrollo de esta guía, pero fuera de su alcance. En consecuencia, la Fundación Canal no ostenta respecto de la misma ninguna titularidad, atribución, ni ningún tipo de responsabilidad.

El IHC permite el acceso a esta aplicación con el fin de facilitar la utilización práctica de la guía, si bien no otorga, respecto de la misma, garantía de ningún tipo, en particular, sobre su funcionamiento ni los resultados que genere. La aplicación no va a ser objeto de soporte ni de mantenimiento. En atención a lo expuesto, el desarrollador declina toda responsabilidad sobre la información que la aplicación pueda generar y el uso para el que ésta pudiera utilizarse.

² <https://github.com/IHCantabria/SIMPCCe>



informática es el uso complementario a la guía; por tanto, para su utilización es necesario que el usuario conozca la metodología descrita en la guía para evitar un uso incorrecto. El objetivo final de todo el análisis y de los resultados es ayudar en la toma de decisiones que permitan mitigar los efectos de cambio climático. En esta guía se proporciona la descripción de los análisis que pueden realizarse, sin embargo, no todos están implementados en la aplicación ya que no es posible generalizar para todos los sistemas.



3 Introducción

3.1 Motivación y objetivo de esta guía

Este trabajo surge tras el encargo por parte de la Fundación Canal al Instituto de Hidráulica Ambiental de la Universidad de Cantabria de realizar una revisión exhaustiva y actualizada del impacto del cambio climático en las aportaciones mínimas a embalses haciendo uso de los datos hidroclimatológicos disponibles en España y de herramientas fácilmente utilizables. Este trabajo ha contado con la colaboración de la Subdirección de Planificación Recursos Hídricos y Abastecimiento de Canal de Isabel II, así como de Luis María Garrote de Marcos como experto asesor.

Los últimos estudios de cambio climático globales realizados en España ponen de manifiesto la conveniencia de que toda la información elaborada a partir de estos estudios sea de fácil uso. Por esta razón, el objetivo de esta guía es proponer una metodología que permita la utilización sencilla y rápida de esta información, a la hora de realizar evaluaciones sólidas de los riesgos del cambio climático en las aportaciones mínimas a embalses y las implicaciones que podría tener para su gestión. La guía está pensada para su uso en presas y embalses; no obstante, sus orientaciones también son pertinentes para otras infraestructuras de almacenamiento de agua de menor entidad, tales como balsas o grandes depósitos.

Es de prever que las recomendaciones de esta guía constituyen una base para la evaluación de impactos y de posibles medidas de adaptación adecuadas, a partir de los niveles actuales de conocimiento y comprensión sobre el cambio climático. Sin embargo, estos niveles de conocimiento evolucionan con el tiempo, ofreciendo nueva información relevante y nuevas metodologías que deben ser incorporadas para optimizar la toma de decisiones. Por ello, las orientaciones propuestas son dinámicas y susceptibles a cambios.

El principal objetivo de la guía es proporcionar a hidrólogos, gestores y tomadores de decisión la información mínima necesaria y las herramientas imprescindibles para realizar análisis básicos del impacto del cambio climático sobre las aportaciones mínimas a embalses. Somos conscientes de que la evaluación de impactos del cambio climático es un campo amplísimo, difícil de resumir en una guía, pero el objetivo es permitir que aquellos profesionales que lo necesiten puedan realizar sus propias evaluaciones para formarse una opinión, en base a la evidencia existente, respecto a la influencia que el cambio climático pueda tener sobre los embalses que sean de su interés.

3.2 Cómo utilizar esta guía

Esta guía tiene por objeto consolidar una orientación práctica para que los responsables de explotación de embalses puedan incorporar los impactos del cambio climático en la regulación, planificación, diseño, operación y mantenimiento de estos.

De este modo, este informe está integrado y organizado de manera secuencial, diferenciando además las secciones informativas de las orientativas. Como complemento a la síntesis presentada en la Tabla 1, se deben tener en cuenta los siguientes aspectos:

- Las secciones 3 y 4 están destinadas a proporcionar antecedentes y referencias a los profesionales que pretenden utilizar este documento con fines de orientación.
- La sección 5 contiene los pasos a seguir en la aplicación metodológica para el estudio de aportaciones mínimas a embalses.
- La sección 6 presenta la aplicación de la metodología que esta guía aporta en diferentes casos de estudio.



- La sección 7 presenta las orientaciones para la utilización de los resultados obtenidos tras el estudio de cambio climático en la toma de decisiones.
- La sección 8 presenta algunas de las principales conclusiones del estudio sobre la vulnerabilidad de los embalses al cambio climático.
- La sección 10 presenta las fuentes bibliográficas utilizadas a lo largo de la guía.

Esta guía se dirige especialmente a los usuarios de los embalses, propietarios, operadores e ingenieros con un mínimo grado de conocimiento y experiencia. Se ha diseñado para que sea aplicable a todos los sistemas de abastecimiento de agua superficial regulados por embalses de España, siguiendo un procedimiento breve y sencillo de aplicar. Se prevé que el trabajo necesario para llevar a cabo una evaluación del impacto del cambio climático en los embalses esté en el entorno de las horas y las decenas de horas, pero dependerá del tamaño y la complejidad de la cuenca vertiente al embalse y de los recursos computacionales disponibles.



4 Cambio climático

4.1 Visión general y aplicación

Como consecuencia del cambio climático y del calentamiento global, se prevé que los regímenes de precipitación y de temperatura se vean modificados en muchas zonas del planeta. A su vez, esto podría generar impactos muy importantes sobre la hidrología y la disponibilidad de recursos hídricos, que se traducen en alteraciones de la escorrentía superficial y de la recarga de los acuíferos.

La metodología más extendida a la hora de analizar los efectos que podría provocar el cambio climático se basa en utilizar los resultados de los modelos climáticos globales. Estos modelos globales reciben el nombre de modelos de circulación general (GCMs por sus siglas en inglés). Los GCMs son modelos que simulan numéricamente las interacciones de la atmósfera, los océanos, los hielos y el relieve terrestre. Son frecuentemente utilizados para el estudio de las dinámicas del sistema meteorológico y climático con el propósito de obtener pronósticos climáticos³ del clima futuro. Aunque el principal forzamiento de los GCMs es la radiación solar, todos los modelos son también forzados con concentraciones de gases atmosféricos, tanto de origen antropogénico como natural (gases de efecto invernadero, aerosoles provenientes de erupciones volcánicas, quema de biomasa, o contaminación). Debido al desconocimiento acerca de la posible evolución futura de la situación socioeconómica global, que afecta al sistema climático de diversas maneras, en los GCMs estos cambios se modelan mediante escenarios sintéticos de emisiones de gases de efecto invernadero (principalmente desarrollo industrial) y cambios en el uso de suelo (desarrollo agrícola), que proporcionan situaciones de referencia para la simulación, de acuerdo con distintos escenarios plausibles de desarrollo socioeconómico.

El Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC), organismo de las Naciones Unidas para evaluar la ciencia relacionada con el cambio climático, redacta un informe cada 5 años aproximadamente, en el que analiza los resultados de numerosos GCMs forzados por dichos escenarios sintéticos. En el cuarto informe de evaluación AR4 (IPCC, 2007) los escenarios se conocen como SRES (*Special Report on Emissions Scenarios*) y se dividen en B1, A1B y A2, ordenados de menor a mayor en función de la cantidad de emisiones de carbono emitido a la atmósfera medidas en gigatonnes (Gt) de carbono (1 Gt = 1012 toneladas). En el quinto informe de evaluación AR5 (IPCC, 2014), que es el penúltimo informe emitido hasta la fecha y en el que se basa el análisis propuesto en esta guía, dichos escenarios se conocen como rutas de concentración representativas (*Representative Concentration Pathways, RCPs*) y, a diferencia de los SRES, prevén políticas de mitigación para limitar las emisiones. Además, en este caso, los escenarios (RCPs) se caracterizan por su Forzamiento Radiativo (FR) total para el año 2100 que oscila entre 2,6 W/m² y 8,5 W/m², entendiéndose por FR la diferencia entre la luz solar absorbida por la Tierra y la energía irradiada de regreso al espacio. Actualmente, se está desarrollando el 6º informe de evaluación AR6 en el que los diferentes escenarios pasan a llamarse rutas socioeconómicas (*Shared Socioeconomic Pathways* o SSP).

El escenario RCP 2.6 alcanza un máximo FR de 3.0 W/m², antes de disminuir a 2.6 W/m² en 2100, y requiere una fuerte mitigación de las concentraciones de gases de efecto invernadero en el siglo XXI. Los escenarios RCP 4.5 y RCP 6.0 se estabilizan después de 2100 en 4.5 W/m² y 6.0 W/m², respectivamente, mientras que en el RCP 8.5 las concentraciones de gases de efecto invernadero continúan incrementándose hasta los 8,5 W/m² en 2100.

³ Aunque en inglés el verbo *to project* sí se define como ‘calcular la cantidad, el tamaño o el coste futuros de algo basándose en lo que sucede en la actualidad’, en español esta idea queda mejor recogida en verbos como prever, calcular, predecir, pronosticar o esperar en vez de proyectar. <https://www.fundeu.es/recomendacion/proyectar-no-equivale-a-prever/>



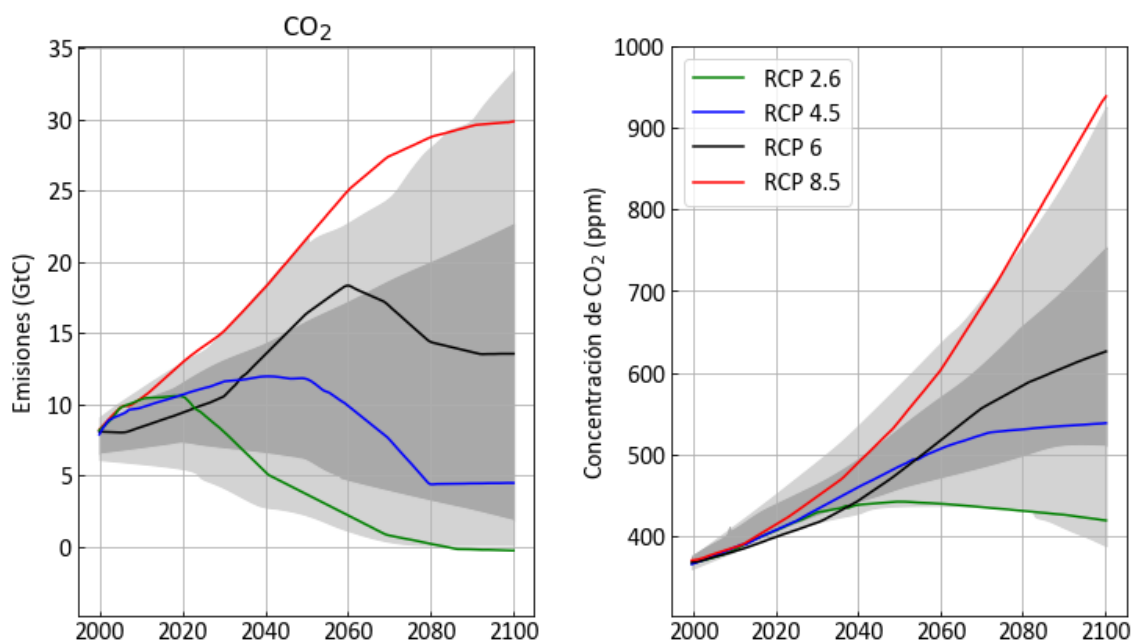
La Tabla 2 muestra los diferentes escenarios RCPs y sus equivalentes SRES y SSPs en cuanto a la anomalía en la temperatura global (ΔT). La tabla recoge, para cada escenario, el forzamiento radiativo, las emisiones de CO_2 , la anomalía de la temperatura global (ΔT), la ruta seguida por cada escenario (*Pathway*) y la elevación media del nivel del mar (SLR).

La Figura 1 muestra las rutas de forzamiento radiativo para los escenarios RCPs durante el siglo XXI.

Tabla 2. RCPs y sus SRES equivalentes en cuanto a la anomalía de la temperatura a nivel global. La tabla recoge para cada escenario el forzamiento radiativo, CO_2 , anomalía en la temperatura, el Pathway o ruta que va a seguir cada escenario y la elevación del nivel medio del mar global.

RCP	Forzamiento radiativo	Equivalente en CO_2 (ppm)	ΔT ($^{\circ}C$)	Pathway	SLR (cm)	SRES	SSP
8.5	8,5 W/m^2 para 2100	>1370	4.9	Incremento	40	A1F1	SSP5 8.5
6.0	6 W/m^2 para 2100	850	3.0	Estabilización	47	B2	Ninguno
4.5	4,5 W/m^2 para 2100	650	2.4	Estabilización	47	B1	SSP2 4.5
2.6	3 W/m^2 a mediados de siglo y 2.6 para 2100	490	1.5	Aumenta hasta un umbral y desciende	62	Ninguno	SSP1 2.6

Figura 1. Forzamiento radiativo (W/m^2) para el siglo XXI para los escenarios SRES, SSPs y RCP.

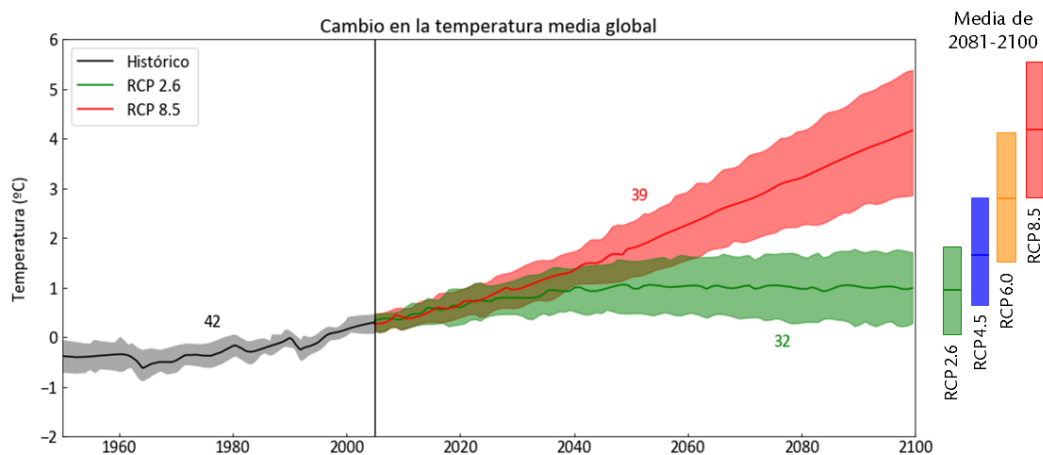


Fuente: Elaboración propia. Adaptado de IPCC AR5 WGII, Capítulo 1.



Los resultados del IPCC se basan en las simulaciones de los diferentes GCMs forzados con los escenarios sintéticos, y se enmarcan en los Proyectos de Intercomparación de Modelos Acoplados (CMIP), que no son más que un marco de colaboración diseñado para mejorar el conocimiento del cambio climático a través, principalmente, del desarrollo y la ejecución de GCMs. En el caso del IPCC-AR4 este proyecto se conoce como CMIP3, mientras que en el IPCC-AR5 se conoce como CMIP5 y en el IPCC-AR6 se le denomina CMIP6. Por lo tanto, cada CMIP comprende un conjunto muy amplio de simulaciones realizadas con diferentes GCMs, elaborados por numerosas instituciones, que son forzados por los diferentes escenarios de cambio climático que cubren generalmente el periodo 1950-2100.

Figura 2. Evolución histórica de la temperatura media global y posibles evoluciones de los diferentes escenarios.



Fuente: Elaboración propia. Adaptado de IPCC Working Group I Assessment Report, Summary for Policy Makers, 2013

Como idea general los modelos del IPCC-AR5 pronostican en España:

- Un incremento de temperatura por encima de la media global, más pronunciado en los meses estivales que en los invernales. Para el escenario RCP 8.5 y para finales del siglo XXI, España experimentará incrementos medios de temperatura de 3,8 °C y de 6,0 °C en los meses invernales y estivales, respectivamente.
- En la Península Ibérica se reducirá la precipitación anual, gradualmente más acusada hacia el sur. Las precipitaciones se reducirán fuertemente en los meses estivales. Para el escenario RCP 8.5 y para finales del siglo XXI, la Región Mediterránea experimentará reducciones medias de precipitación del 12% y del 24% en los meses invernales y estivales, respectivamente.
- Un aumento de los extremos relacionados con las precipitaciones de origen tormentoso.



4.2 Pronósticos e incertidumbres actuales

4.2.1 GCMs y RCMs

Los resultados de los pronósticos de cambio climático de las diferentes variables hidrometeorológicas obtenidos de los GCMs, principalmente precipitación y temperatura, sirven para alimentar a los modelos hidrológicos y así evaluar el efecto del cambio climático sobre la disponibilidad de recursos hídricos y su impacto sobre los aprovechamientos.

Los GCMs son simulaciones globales con una resolución espacial muy grosera ($2,5^\circ \times 2,5^\circ$)⁴ incapaces en muchos casos de capturar muchos de los procesos de mesoescala⁵ y microescala⁶; que son resultado de la orografía de la zona, de su distancia al mar o a cuerpos de agua dulce, como pueden ser las brisas, y las tormentas convectivas. Por lo tanto, para conocer con más detalle cómo podría variar el clima en una zona concreta se debe acudir a técnicas de reducción de escala dinámicas (*downscaling* dinámico) y/o estadísticas (*downscaling* estadístico). En la reducción de escala dinámica los resultados de los GCMs son utilizados como condiciones de contorno de los modelos de circulación regional (RCMs por sus siglas en inglés) capaces de capturar efectos locales al aumentar la resolución espacial y temporal, y ajustar sus parametrizaciones. En el caso de la reducción de escala estadística, generalmente se ajusta un modelo estadístico utilizando variables atmosféricas como predictores, y las variables de interés en el periodo presente como predictandos. Los predictores se modifican más tarde incluyendo los efectos del cambio climático para así predecir las variables de interés en el futuro. Los resultados de los GCMs y de los RCMs no pueden ser utilizados directamente, ya que presentan sesgos. Por tanto, estos modelos deben ser corregidos mediante técnicas de corrección de sesgo, utilizando para ello estaciones de control que proporcionan información climática observada.

En ese sentido, se ha realizado un esfuerzo muy importante para generar simulaciones regionales para todo el globo a través de la iniciativa CORDEX, un programa patrocinado por el Programa Mundial de Investigación del Clima (WRCP) que busca establecer un marco coordinado internacionalmente para producir pronósticos regionales de cambio climático en las regiones terrestres de todo el mundo. Los resultados de CORDEX se enmarcan en la línea del Quinto Informe de Evaluación (AR5) del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC). El proyecto que engloba las simulaciones dinámicas regionalizadas para Europa se conoce como EURO-CORDEX (Jacob et al., 2014); este es el proyecto europeo de la iniciativa internacional CORDEX que cubre la superficie de la Unión Europea, con una resolución espacial de unos $0,11^\circ$. En la Figura 3 se muestra un ejemplo de la manera en que varían los resultados de la variable elevación del terreno al ser agregados a diferentes resoluciones espaciales. El panel situado a la izquierda muestra la elevación para un GCM y el panel de la derecha para EURO-CORDEX.

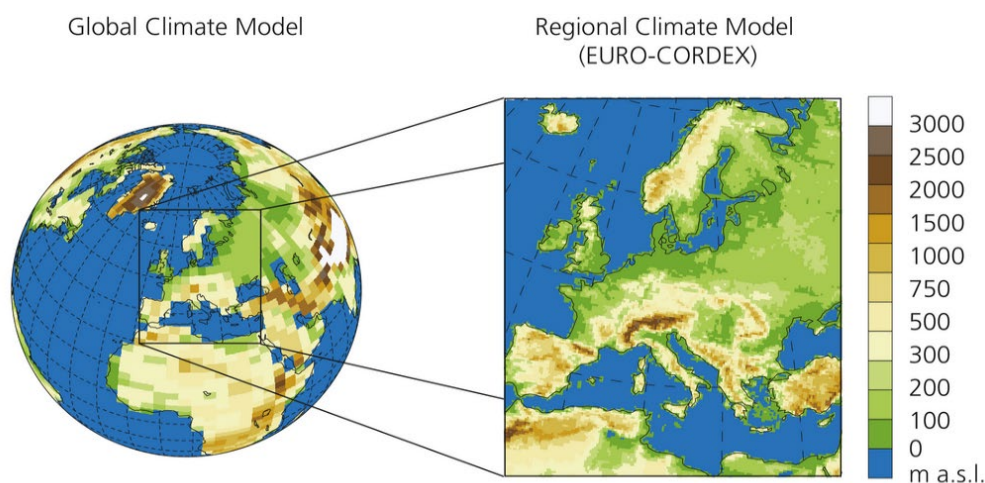
⁴ 1° equivale aproximadamente a 111 km.

⁵ Sistemas del tiempo atmosférico cuyas dimensiones horizontales oscilan entre 9 km y centenares de km.

⁶ Sistemas del tiempo atmosférico cuyas dimensiones horizontales oscilan entre 1 km y menos de 1 km.



Figura 3. Elevación del terreno para una resolución de malla de un GCM (panel situado a la izquierda) y de un modelo regional de EURO-CORDEX (panel situado a la derecha).



Fuente: National Centre for Climate Services NCCS ⁷.

4.2.2 Estudios de RCMs nacionales y europeos

Otra iniciativa también muy importante a nivel europeo es la serie de proyectos JRC PESETA del Centro Común de Investigación (JRC). Con PESETA se pretende comprender mejor las posibles consecuencias biofísicas y económicas del cambio climático futuro para Europa. Puntualmente, el proyecto JRC PESETA III se basa en el conocimiento y la experiencia derivados de proyectos anteriores de PESETA: PESETA y PESETA II; es por esto que el proyecto JRC PESETA III, en comparación con el JRC PESETA II, utiliza la nueva familia de escenarios climáticos (RCPs), así como los pronósticos regionales de EURO-CORDEX. Por esta razón, los resultados del proyecto JRC PESETA III se han incluido en el informe sobre la evaluación de la estrategia de adaptación de la UE.

En España, la información de las principales fuentes de cambio climático regional ha sido recogida por la iniciativa Escenarios-PNACC (Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático). El primer conjunto de datos consolidado (AEMET, 2012), basado en los pronósticos del CMIP3, proporciona información para la temperatura, precipitación y diferentes índices derivados para el periodo comprendido entre 1950-2100 (Montávez et al., 2017). A su vez, el subconjunto de modelos regionales dinámicos que utiliza la iniciativa Escenarios-PNACC 2012 es el mismo empleado en el proyecto ENSEMBLES, el cual es un proyecto financiado con fondos europeos orientado a la generación de un sistema probabilístico de predicción estacional y climática, que permita la cuantificación de las incertidumbres asociadas a la evolución del clima (Fortes et al., 2017). De este modo, Escenarios-PNACC 2012 incluye los resultados de ENSEMBLES a nivel europeo, incorporando además los resultados para España de los proyectos ESCENA y ESTCENA; estos son dos proyectos financiados por el antiguo Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, que aplican técnicas de reducción de escala dinámica y estadística con el objetivo de generar pronósticos regionales para España. Escenarios-PNACC 2012 también incluye algunos pronósticos realizados por AEMET (Agencia Estatal de Meteorología). El resultado de todos estos acoples es un conjunto homogéneo de datos que recoge las distintas fuentes de incertidumbre (escenarios, modelos globales, y técnicas de regionalización), por lo que resulta imprescindible integrarlo en los distintos estudios de impacto que se lleven a cabo.

⁷ <https://www.nccs.admin.ch/nccs/en/home/climate-change-and-impacts/swiss-climate-change-scenarios/understanding-climate-change-scenarios.html>



Escenarios-PNACC 2012 recoge, en definitiva, los pronósticos dinámicos y estadísticos de los proyectos ESCENA y ESTCENA, respectivamente. Así mismo, recoge varios proyectos de regionalización realizados por AEMET y algunos resultados de los pronósticos para Europa del proyecto ENSEMBLES.

4.2.3 Resumen de resultados de los diferentes estudios realizados

Dentro de este marco, hay muchos estudios que analizan los resultados y las limitaciones de las bases de datos que forman Escenarios-PNACC 2012. (Turco et al., 2015) considera los pronósticos de ENSEMBLES de temperatura y precipitación diaria en España, encontrando una reducción de la precipitación de entre el 5 % y el 25 % y un aumento en la temperatura de entre 1 °C y 2,5 °C, dependiendo de la estación del año y del área geográfica considerada, para el año 2050 y para el escenario A1B. (Gutiérrez et al., 2013) señala que existen ciertas limitaciones en las técnicas utilizadas para extrapolar la temperatura y la precipitación en el futuro (técnica de análogos), mientras que (San-Martín et al., 2017) encuentra un buen acuerdo entre los resultados de los pronósticos regionales dinámicos (ENSEMBLES) y los estadísticos (ESTCENA), aunque en algunos casos estas últimas presentan grandes incertidumbres.

Otros estudios han analizado el efecto en otras variables como la nieve, la velocidad del viento o la probabilidad de ocurrencia de intervalos secos, utilizando los modelos del proyecto ENSEMBLES. (Pons et al., 2016) muestra una tendencia negativa en el número de días con nieve en España, mientras que (Gómez et al., 2016) encuentra una reducción del 5 % en la velocidad del viento para el escenario A1B y para el periodo 2031-2050. (López-Franca et al., 2015) muestra, por su parte, un aumento en la probabilidad de ocurrencia de largos periodos secos en España.

Además de la iniciativa Escenarios-PNACC 2012, se han desarrollado también otra serie de estudios que realizan pronósticos de cambio climático regionales para España. Por ejemplo, (Osca et al., 2013) utiliza una metodología basada en tipos de tiempo⁸ para predecir la precipitación en España; los resultados muestran una reducción de la precipitación promediada en el territorio español de hasta el 30 % para finales de siglo para el escenario A1B. (Ribalaygua et al., 2013) adopta una metodología basada en la técnica de análogos⁹ para realizar una regionalización climática en Aragón para la temperatura y precipitación para los escenarios A2, A1B y B1, encontrando un aumento en la temperatura de entre 1,5 °C y 2,5 °C para mediados de siglo y de entre 2,1 °C y 3,75 °C para finales, dependiendo del escenario y estación del año; en el caso de la precipitación, se estima su descenso entre el 2 % y el 4 % para mediados de siglo, y entre el 4,5 % y el 5,5 % para finales. (Gómez-Navarro et al., 2010) presenta los resultados de los pronósticos realizados para España con el modelo MM5¹⁰, evidenciando grandes diferencias entre modelos en la evolución de la temperatura durante el siglo XXI. (Gonçalves et al., 2014) realiza una regionalización dinámica mediante el modelo WRF (*Weather Research and Forecasting Model*) para una cuenca situada en el noroeste del Mediterráneo para tres escenarios diferentes del CMIP3; los resultados sugieren un aumento de la temperatura de 1,4 °C y una reducción de la precipitación de entre el 5 % y el 13 % para mediados de siglo. Con relación a los valores extremos de precipitación, (Carlos Garijo & Mediero, 2018) analizan cómo podrían cambiar los periodos de retorno de esta variable para 12 modelos de EURO-CORDEX, obteniendo muy pocas celdas con significancia estadística positiva para un umbral del 5 % y para los periodos 2011-2040, 2041-2070 y 2071-2095.

⁸ Los tipos de tiempo son patrones sinópticos representativos de un régimen climático característico. Se pueden realizar pronósticos de cambio climático evaluando como podrían cambiar estos tipos de tiempo en el futuro.

⁹ La técnica de análogos se utiliza para realizar pronósticos de cambio climático en base a los registros históricos. Se busca en el periodo histórico el patrón sinóptico más parecido a un tipo de tiempo concreto en el futuro, y se le asigna la variable de interés.

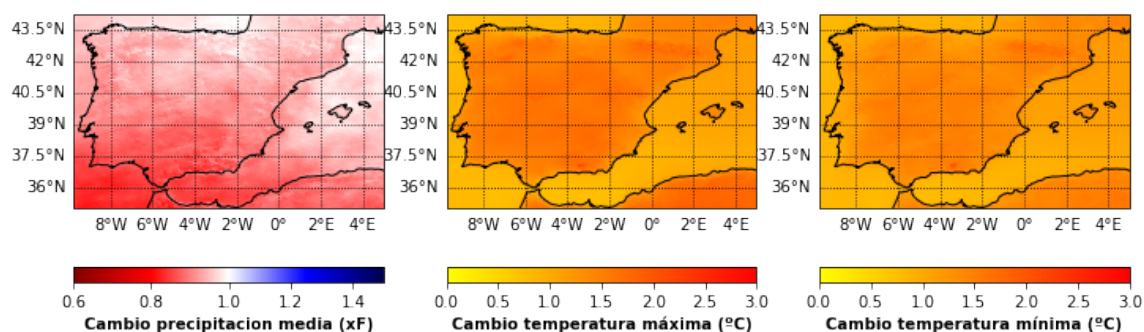
¹⁰ Modelo numérico de predicción atmosférico de mesoescala de quinta generación.



Por último, en el 2018 se concluyó una nueva iniciativa de Escenarios-PNACC 2017, basados en la nueva información de los modelos del CMIP5 para los escenarios RCP 2.6, RCP 4.5 y RCP 8.5. Esta iniciativa se fundamenta en la metodología presentada por varios grupos españoles bajo el proyecto EU VALUE SDM (Maraun et al., 2015) y en los pronósticos regionales EURO-CORDEX y MED-CORDEX (Ruti et al., 2016). Parte de los resultados se pueden encontrar en la web de Adaptecca (<https://www.adaptecca.es/>), en la que se pueden distinguir dos productos bien diferenciados. Primero, los pronósticos en rejilla provenientes de las regionalizaciones dinámicas (RCMs), generadas en la iniciativa EURO-CORDEX, segundo, los pronósticos puntuales obtenidas aplicando técnicas estadísticas de regionalización (SDMs) a las series de la red de estaciones de AEMET. Sin embargo, en el caso de los pronósticos de cambio climático realizados por AEMET, durante las Jornadas de Ingeniería del Agua del 2018 (C. Garijo et al., 2018a) presentaron un trabajo que puso de manifiesto las limitaciones de éstas, al sugerir sesgos muy importantes cuando se hacían comparaciones con las series observadas en el periodo histórico.

Los resultados de los modelos dentro de la iniciativa Escenarios-PNACC 2017 muestran un acuerdo en el aumento en la temperatura media superficial de entre 0.8 °C y 2.2 °C dependiendo de la estación de año analizada para mediados de siglo, siendo ésta más acusada para el RCP 8.5. En el caso de la precipitación, si bien el acuerdo no es tan claro, en general los modelos exhiben una reducción de la precipitación para mediados de siglo, siendo ésta mucho más acusada en el periodo comprendido entre el mes de marzo y agosto (20 %). Parte de los resultados de este proyecto se pueden visualizar en: <http://escenarios.adaptecca.es/>; en ese contexto, la Figura 4 corresponde al cambio porcentual en la precipitación media anual para el RCP8.5 y para el periodo 2011-2040 en relación con el periodo 1971-2000.

Figura 4. Cambio porcentual en la precipitación media anual para el RCP4.5 y para el periodo 2041-2070 en relación con el periodo 1971-2000.



Fuente: Elaboración propia a partir de datos obtenidos de Earth System Grid Federation (ESGF) <https://esgf.llnl.gov/>

Por lo tanto, se podría decir que existe un consenso muy amplio en cuanto al efecto que tendrá el calentamiento global sobre los regímenes de precipitación y temperatura en España. La mayoría de los trabajos predicen un aumento medio en la temperatura superficial del aire para mediados y finales de siglo de entre 1 °C y 2,5 °C y de entre 1,5 °C y 4 °C dependiendo del escenario y estación del año, respectivamente. En cuanto a la precipitación, los resultados presentan más incertidumbre, aunque de manera general se estima una reducción de entre el 5 % y el 25 % para mediados y finales de siglo, dependiendo del escenario y estación del año. En la Tabla 3 se sintetizan los principales resultados obtenidos para España en los trabajos anteriormente mencionados.



Tabla 3. La tabla recoge un resumen de los principales resultados obtenidos en la presente sección.

Autores	Principales Resultados
(Turco et al., 2015)	Aumento de la temperatura de entre 1°C y 2,5°C y reducción en la precipitación de entre un 5% y 25% para mediados de siglo.
(Pons et al., 2016)	Reducción en el número de días de nieve durante el siglo XXI.
(Gómez et al., 2016)	Reducción de un 5% en la velocidad del viento para el periodo 2031-2050.
(López-Franca et al., 2015)	Aumento en la probabilidad de ocurrencia de largos periodos secos.
(Osca et al., 2013)	Reducción de la precipitación de un 30% para finales de siglo.
(Ribalaygua et al., 2013)	Aumento en la temperatura de entre 1,5°C y 2,5 °C para 2050 y de entre 2,1°C y 3,5°C para 2100. Reducción en la precipitación de entre el 2% y el 4% para 2050 y de entre el 4,5 y el 5,5 para 2100.
(Gonçalves et al., 2014)	Aumento de 1,4°C y reducción en la temperatura de entre el 5% y el 13% en una cuenca situada al noreste del Mediterráneo.
(AEMET, 2012)	Aumento de la temperatura de entre un 0,8°C y un 2,2°C y reducción de la precipitación de un 20%, para los meses comprendidos entre marzo y agosto, para mediados de siglo.



5 Estado del arte

5.1 Estudios previos

La evaluación del efecto que podría tener el cambio climático sobre la disponibilidad del recurso hídrico en España es un aspecto crucial en la gestión integral de este recurso. En ese sentido, se pueden encontrar numerosos trabajos que utilizan los resultados de los pronósticos regionales y globales, presentados en el apartado anterior. Por ejemplo, desde España, el Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio ambiente solicitó al **CEDEX** (Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas) dos estudios sobre los efectos del cambio climático en los recursos hídricos; el primero, en el año 2012 (**“Estudio de los impactos del cambio climático en los recursos hídricos y las masas de agua”**), y el segundo en 2017 (**“Evaluación del Impacto del Cambio Climático en los recursos hídricos y sequías en España”**). El primer informe evalúa el efecto del cambio climático en los recursos hídricos en régimen natural, en las demandas de agua y estrategias de adaptación, en los recursos hídricos disponibles en los sistemas de explotación y en el estado ecológico de las masas de agua. Por otro lado, el segundo estima los impactos sobre los recursos hídricos en España (evapotranspiración real, humedad del suelo, recarga subterránea, escorrentía y aportaciones), en régimen natural, a través de la simulación hidrológica con el modelo SIMPA (Sistema Integrado para la Modelación del proceso Precipitación Aportación), a una resolución temporal mensual, usando para ello la regionalización estadística realizada por AEMET para los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5 y para 6 modelos diferentes; cabe resaltar que es para esta regionalización para la que (Carlos Garijo & Mediero, 2018) sugieren importantes limitaciones, relacionadas con el sesgo que presentan los modelos. Además, en el informe no se tienen en cuenta los cambios en los usos del suelo.

Los resultados de este último informe del CEDEX muestran descensos de la precipitación para todo el territorio nacional, siendo mayores estos descensos en el cuadrante SO de la Península y en los archipiélagos. Los descensos proyectados en precipitación para el conjunto de España son del -2 % y -4 % para 2010-2040, del -6 % y -8 % para 2040-2070 y del -7 % y -14 % para 2070-2100 para los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5, respectivamente. Se estiman aumentos generalizados en la evapotranspiración potencial (ETP), que responden a aumentos en la temperatura, siendo menores en las zonas de costa que en las de interior. De este modo, para el conjunto de España, la media de los incrementos para los RCP 4.5 y RCP 8.5 son respectivamente del 3 % y 4 % para 2010-2040, 7 % y 10 % para 2040-2070 y 9 % y 17 % para 2070-2100.

Si bien los cambios en la ETR (evapotranspiración real) responden a los cambios de ETP, éstos exhiben una mayor sensibilidad frente a las variaciones de la precipitación, en la medida en que determina el agua disponible para ser evaporada. En España, se estiman aumentos de ETR en el norte húmedo y zonas montañosas de las divisorias de aguas, y descensos generalizados en el resto del territorio. Para el conjunto de España, la media de los descensos para los RCP 4.5 y RCP 8.5 son respectivamente del -1 % y -3 % para 2010-2040, del -3 % y -4 % para 2040-2070 y del -3 % y -6 % para 2070-2100. Por otro lado, los cambios en la humedad del suelo responden en gran medida a los cambios de precipitación y a la disponibilidad de agua. Los mayores descensos se pronostican para el invierno y zonas húmedas del Atlántico norte y de divisorias de aguas; por el contrario, se estiman pocos descensos en verano y en la España seca (Canarias, Mediterráneo). Para el conjunto de España, la media de los descensos con relación al contenido medio de agua en el suelo para los RCP 4.5 y RCP 8.5 son respectivamente del -2 % y -2 % para 2010-2040, del -4 % y -5 % para 2040-2070 y del -5 % y -8 % para 2070-2100.

En lo que respecta a los acuíferos, los cambios en la recarga responden en gran medida a los cambios de precipitación, acentuándose. De ese modo, según el informe realizado en el 2017 se estiman descensos generalizados en la recarga de los acuíferos para el siglo XXI, aunque

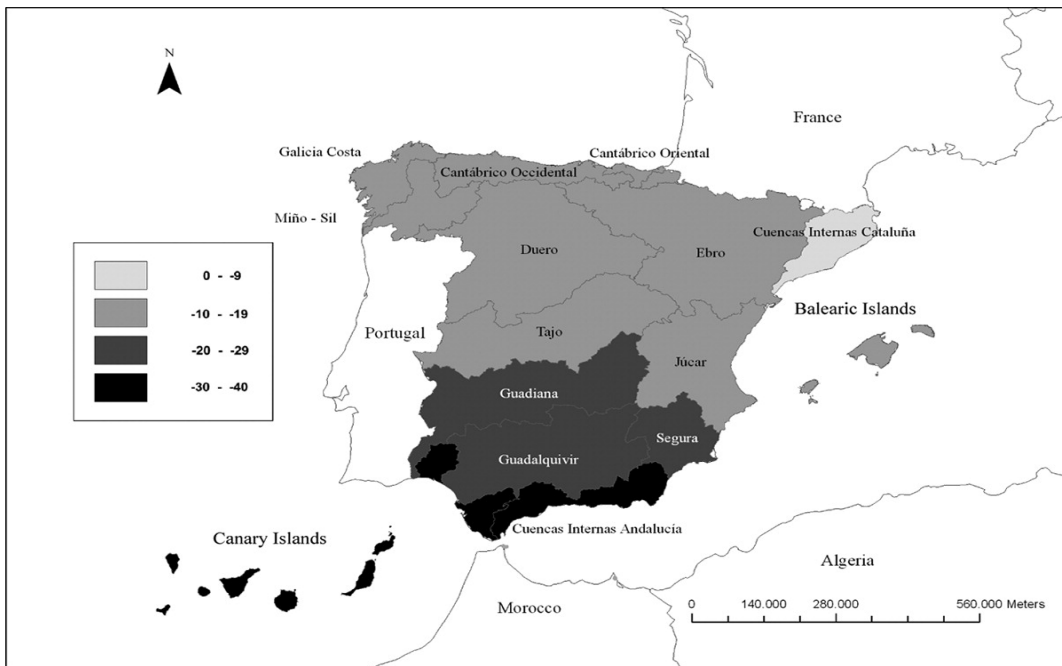


se evidencian grandes discrepancias entre las estimaciones según la proyección climática analizada. Las disminuciones son más acusadas hacia el sur y sobre todo en los archipiélagos. Son menos acusadas, incluso con aumentos, en el norte y NE de la Península. Para el conjunto de España, la media de los descensos para los RCP 4.5 y RCP 8.5 son respectivamente del -3 % y -7 % para 2010- 2040, del -11 % y -14 % para 2040-2070 y del -13 % y -24 % para 2070-2100.

En una primera aproximación, los cambios estimados en la escorrentía muestran grandes discrepancias según los pronósticos (ver Figura 5). Los rangos de variación para el conjunto de España van del -14 % a +20 % para 2010-2040, del -29 % a +9 % para 2040-2070 y del -43 % a +4 % para 2070-2100. Promediando los resultados de los pronósticos para España, se estiman siempre descensos de escorrentía; los cambios para los RCP 4.5 y RCP 8.5 son respectivamente del -3 % y -7 % para 2010-2040, del -11 % y -14 % para 2040-2070 y del -13 % y -24 % para 2070-2100.

Bajo este panorama se observa que, en general, hay una reducción de recursos hídricos más intensa hacia el sur peninsular y en los archipiélagos, y menos intensa (incluso con aumentos) en algunas zonas del este peninsular. La mayoría de los pronósticos climáticos muestran un futuro en el que las sequías serían más frecuentes, acusándose ese efecto con el tiempo. No obstante, hay pronósticos que no muestran tendencias claras, especialmente en cuencas del Mediterráneo y Canarias. En la Tabla 4 se presentan los principales resultados del informe realizado por el CEDEX en el 2017. Comparando los resultados obtenidos en los estudios del 2012 y del 2017, se puede concluir que en este último se pronostican, en general, menores reducciones de recursos hídricos para el siglo XXI.

Figura 5. Variación porcentual en la escorrentía para las principales cuencas de España para el escenario A2 y para el periodo 2041-2070 respecto al periodo 1961-1990.



Fuente: CEDEX. 2010. "Estudio de los impactos del cambio climático en los recursos hídricos y las masas de agua. Ficha 1".



Tabla 4. Tabla resumen con los resultados del informe Evaluación del Impacto del Cambio Climático en los recursos hídricos y sequías en España realizado por el CEDEX en 2017. Los cambios son porcentuales.

Periodo Horizonte	2010-2040		2040-2070		2070-2100	
Escenario	RCP4.5	RCP8.5	RCP4.5	RCP8.5	RCP4.5	RCP8.5
Precipitación	-2	-4	-6	-8	-7	-14
ETP	3	4	7	10	9	17
ETR	-1	-3	-3	-4	-3	-6
Humedad del suelo	-2	-2	-4	-5	-5	-8
Recurso	-3	-7	-11	-14	-13	-24
Escorrentía	-14+20		-29+9		-43+4	

Por otro lado, los **Planes Especiales de Sequía (PES)** hacen una revisión de las sequías históricas sufridas en las diferentes cuencas, y de los efectos que se prevé que el cambio climático tenga en ellas para los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5. En ese sentido, los resultados coinciden con los presentados en el estudio del CEDEX, realizado en 2017, en la mayoría de las cuencas. De este modo, se espera un aumento significativo en la intensidad y frecuencia de las sequías. Las cuencas correspondientes a las demarcaciones del Tajo, del Guadiana y del Ebro arrojan un régimen más propenso a sequías que en el norte.

Además de estos dos estudios solicitados por el ministerio y de los PES de las confederaciones, se han realizado otros trabajos enfocados en valorar los efectos del cambio climático. Por ejemplo, la Confederación Hidrográfica del Ebro presentó en el 2011 en el IV encuentro Internacional de Expertos "Gestión del agua y cambio climático: enfrentándose a las incertidumbres", un trabajo sobre el efecto del cambio climático en la gestión de recursos hídricos y eventos extremos (sequías e inundaciones); los resultados muestran que, para el horizonte 2030-2050, la disminución de los recursos hídricos de la cuenca del Ebro puede oscilar entre el 5 % y el 15 %.

Así mismo, en las cuencas del Tajo y del Guadiana, (Kilsby et al., 2007) utilizaron dos modelos climáticos y un modelo hidrológico distribuido¹¹ de paso mensual, estimando disminuciones del recurso medio anual en el periodo 2071-2100 respecto al de control 1961-1990 del 49 % y 20 % en el Tajo y del 26 % y 21 % en el Guadiana (para cada uno de los dos modelos climáticos). En este trabajo también se sugiere que estos descensos se darían en todas las estaciones del año, siendo los menos acusados porcentualmente en verano.

En el 2012 se publica en el "*Hydrological Sciences Journal*" un artículo que hace una revisión de los efectos hidrológicos del cambio climático, los impactos esperados en los recursos hídricos y las implicaciones en las cuencas más importantes de España (Estrela et al., 2012). En éste se analizan los cambios en la precipitación y variabilidad de la escorrentía para los años 2040, 2070 y 2100, y para los escenarios de cambio climático A2 y B2. Los resultados muestran en general una reducción de la escorrentía de entre el 10 % y el 30 % en todo el territorio, a lo largo del siglo XXI.

¹¹ Un modelo distribuido considera la variación espacial en todos sus parámetros y variables en cada punto de la cuenca. Si un modelo presenta este tipo de estructura es compatible directamente con datos producidos por SIG de formato de celdas. En la extensión vertical, cada celda puede dar una profundidad o ser discretizada en un número de celdas sobrepuestas (por ejemplo, columnas). Para cada celda la descarga de agua hacia la celda vecina se calcula de acuerdo con el proceso hidrológico activo; de esta manera, la distribución del flujo de agua dentro de la cuenca se representa a través de mapas.



Por otro lado, en Andalucía, se evaluó el impacto de 4 hipótesis climáticas para el año 2050 mediante un balance hídrico (Junta de Andalucía, 2012). Los resultados muestran una elevada variabilidad territorial, con reducciones de los recursos hídricos que oscilan entre el 20% y el 50% según el escenario SRES A2 y entre el 0% y el 30% según el B2, siendo mayores los descensos cerca de Almería.

En Extremadura se realizó un estudio del impacto del cambio climático en los recursos hídricos, aplicando el método de la estimación del balance hídrico directo a unos pronósticos derivados de un GCM y los SRES A2 y B2 (Corzo, 2013). Éste concluye que hay una gran variabilidad espacial de resultados, aunque estima una reducción de los recursos hídricos en 2011-2040 y 2041-2070 respecto a 1961-1990.

También se han realizado varios estudios en cuencas pequeñas del Ebro y Navarra (Martínez, 2010), (Zambrano-Bigiarini et al., 2010), (Bovolo et al., 2010), (Quiroga et al., 2011), implementando diferentes metodologías y en ocasiones, con un número escaso de pronósticos climáticos. Se obtuvieron resultados que estimaban, en general, descensos de los recursos hídricos con amplios márgenes de variación entre pronósticos. Así, por ejemplo, la Oficina de Planificación Hidrológica de la Confederación Hidrográfica del Ebro ha dirigido un trabajo de evaluación de impacto en numerosas subcuencas aplicando los resultados del GCM CGCM3 al modelo hidrológico BALAN implementado sobre un sistema de información geográfica (Samper & Álvarez, 2005). El impacto durante los tres periodos del siglo XXI: 2011-2040, 2041-2070, 2071-2100 (respecto a 1970-2000) se cifraba, respectivamente, en los siguientes cambios medios de escorrentía: -12 %, -21 % y -19 %. Los descensos serían superiores en la vertiente derecha del Ebro que en la vertiente pirenaica.

En el año 2014, en la revista "*Hydrological Sciences Journal*" se publica un artículo en el que se calcula el efecto de diferentes pronósticos para los escenarios B1 y A2 en los caudales en tres cuencas de Cataluña, utilizando el modelo SWAT (*Soil & Water Assessment Tool*) (Pascual et al., 2015). Los resultados muestran una reducción en los caudales de entre el 25 % y el 34 % para el 2076-2100, siendo más notables en otoño y verano.

(Pulido-Velazquez et al., 2018) hacen uso de un modelo de balance hídrico continuo de un acuífero en el sureste español, para evaluar las variaciones en la recarga de éste debidas al cambio climático. Sus resultados muestran reducciones de la recarga de entre el 14 % y el 58 % para los escenarios A2 y A1B, respectivamente, para finales de siglo.

En el 2010 se publica en "*Journal of Hydrology*" un artículo que evalúa el impacto de sequías y gestión de recursos hídricos en sistemas hidrológicos en la cabecera del río Tajo (Lorenzo-Lacruz et al., 2010); éste sugiere que, bajo un contexto de cambio climático, el agua disponible de la cuenca disminuye, haciendo que la estrategia actual de trasvases sea imposible de mantener.

(Esteve et al., 2015) desarrollan un modelo hidro-económico para la cuenca media del Guadiana con el objetivo de cuantificar los impactos potenciales del cambio climático en la agricultura, así como para determinar las medidas óptimas de adaptación al mismo. Este estudio hace uso de pronósticos climáticos del AR4, y combina un modelo hidrológico con un modelo de optimización económica de explotaciones agrarias. Los resultados apuntan a que el cambio climático va a aumentar las necesidades de riego para la agricultura (en torno a un 15 %), reduciendo las producciones (en torno a un 7 %) y el recurso hídrico disponible.

(Buendia et al., 2016) hicieron uso de información climática y de usos del suelo para evaluar los cambios en la descarga fluvial en cuencas pirenaicas de montaña. Su análisis concluye que los efectos de la cobertura vegetal y los usos del suelo pueden alcanzar el 40 % del efecto total observado, por lo que tan importante como la caracterización del clima es la caracterización de los cambios en los usos del suelo.



(Touhami et al., 2015) centran su atención en los impactos del cambio climático sobre el balance hídrico y la recarga del acuífero en una región semiárida del suroeste español (acuífero Ventós-Castellar en el municipio de Alicante), haciendo uso de los escenarios climáticos del AR4 y de un modelo de balance hídrico. El interés de este análisis se deriva de los pronósticos para este tipo de localizaciones, en las que los modelos predicen reducciones de precipitación y aumentos de temperatura, que amenazan con disminuir de forma drástica los recursos hídricos. De este modo, los resultados estiman reducciones en la recarga del balance hídrico de entre el 3 % y el 17 %.

(Pulido-Velazquez et al., 2015) desarrollan un análisis de recarga en acuíferos a nivel de toda España, sobre una malla de 10km x 10km, combinando los pronósticos climáticos (EURO-CORDEX) para el periodo 2016–2045, y con un modelo de balance hídrico para cuantificar la recarga del suelo. Sus resultados son compatibles con los de (Touhami et al., 2015), mostrando una reducción media de la recarga del 12 %, aunque con una gran heterogeneidad espacial. Además, destacan el aumento de la variabilidad temporal, con un incremento del 8 % en la desviación estándar de la recarga.

En el 2016 se publica también en "*Journal of Hydrology*" un artículo en el que se propone una metodología para determinar situaciones de sequías e implementar sistemas de alerta en sistemas regulados (Haro-Monteagudo et al., 2017). Esta metodología es aplicada al río Júcar en el período 1998-2009, permitiendo concluir que dichos sistemas de alerta pueden ser muy beneficioso para los gestores.

(Sánchez-Arcilla et al., 2016) utilizan los pronósticos del CMIP3 para evaluar los impactos sobre los recursos hídricos mediante un modelo de balance simplificado, estimando una reducción media para Cataluña del 11 % para el horizonte 2021 y del 18 % para 2051, siendo menor la reducción en el Pirineo. Además de estos estudios, se han realizado otros en cuencas más pequeñas como son (Candela et al., 2012) y (Pascual et al., 2015).

(Vicente-Serrano et al., 2017) evalúan el cambio en los regímenes de caudal de los ríos por la presencia de embalses en la cuenca del río Segre. Su análisis destaca que la presencia de embalses es capaz de modificar las descargas fluviales de manera similar a como lo hacen los cambios en el clima, especialmente cuando estos están dedicados a usos consuntivos del agua como es el regadío en agricultura. Concluyen que, para una correcta evaluación de los efectos del cambio climático en los regímenes fluviales, es necesario incorporar todos aquellos usos que tengan que ver con cambios en la gestión del recurso, ya que, en algunos casos, aunque los pronósticos climáticos no hagan referencia a este hecho, los consumos en las cuencas pueden llevar a reducciones tan significativas como las que se podrían producir por el efecto del cambio climático.

(Escriba-Bou et al., 2017) desarrollan una metodología para analizar los impactos del cambio climático y las medidas de adaptación en una cuenca del Júcar. Mediante un análisis multiobjetivo, seleccionan aquellos pronósticos climáticos que mejor se ajustan al periodo histórico de referencia con el objetivo de alimentar el modelo hidrológico, y de esta manera, generar predicciones en los flujos hidrológicos. Posteriormente, estos pronósticos alimentan a un modelo hidro económico de la cuenca, que a su vez permite evaluar las medidas de adaptación mediante análisis coste beneficio. En ese sentido, las medidas de adaptación exploradas fueron: mejorar la eficiencia en la irrigación, reducir la demanda, mejorar la equidad del sistema asignando la misma prioridad a todas las áreas, y crear un "mercado del agua" que abarate su precio a través de la propia competencia en el mercado.

Recientemente, (Marcos-García & Pulido-Velazquez, 2017) estudiaron el impacto en el Sistema de Explotación del Júcar con 14 combinaciones de modelos climáticos, los RCP 4.5 y RCP 8.5, y 3 modelos hidrológicos. Sus resultados estiman descensos de aportaciones (APN) respecto 1940-2009 del 20 % para 2011-2040 y del 29 % (RCP 4.5) y 36 % (RCP 8.5) para 2040-70, resaltando además la dispersión de resultados y la alta incertidumbre y la variabilidad espacial de los cambios previstos, con diferencias entre las zonas de cabecera y las partes bajas de la cuenca.



Otro artículo publicado en “*Environmental Research Letters*” en el 2018 muestra que, incluso bajo el escenario más optimista, tanto la duración como la temperatura máxima de las olas de calor se incrementará en todas las ciudades europeas (Guerreiro et al., 2018). Entre 2051 y 2100 en un escenario de bajo impacto climático, ciudades del sur de la Península Ibérica, como Málaga y Almería, experimentarán más del doble de sequías que entre 1951 y 2000. En un escenario de alto impacto, el 98 % de las ciudades europeas tendrán periodos de escasez de lluvia más intensos y prolongados.

Por último, en el proyecto PESETA III, referido en la sección previa, se estima una reducción en la escorrentía para gran parte del territorio español para 11 modelos de EURO-CORDEX y un escenario de cambio climático de aumento en la temperatura superficial del aire de 2°C. La escorrentía en las zonas sur y noroeste de la península se podría ver reducida hasta un 50%.

La Tabla 5 muestra los principales resultados recopilados a lo largo de la sección.

Tabla 5. Resumen de los principales resultados sobre el efecto de cambio climático sobre la disponibilidad de recursos hídricos y sus impactos en España

Autores	Principales resultados
(CEDEX, 2017a)	Aumento significativo en la frecuencia de sequías sobre todo en las cuencas del Tajo, Guadalquivir y Ebro.
Confederación hidrográfica del Ebro (2011)	Disminución en los recursos hídricos para la cuenca del Ebro de entre un 5% y un 15% para el periodo 2030-2050.
(Kilsby et al., 2007)	Disminución del recurso hídrico para el periodo 2071-2100 para el Tajo del 20% al 49% y para el Guadiana del 21% al 26%.
(Estrela et al., 2012)	Reducción en la escorrentía de entre el 10% al 30% para todo el territorio español.
(Junta de Andalucía, 2012)	Reducción en los recursos hídricos en toda Andalucía de entre el 20% y el 50% siendo más intensa dicha reducción en Almería.
(Corzo, 2013)	Reducción de los recursos hídricos en Almería.
(Zabalza-Martínez et al., 2016)	Reducción de la escorrentía en el Ebro del 12%, 21% y 19% para un horizonte de corto, medio y largo plazo, respectivamente.
(Esteve et al., 2015)	Reducción del recurso hídrico en el Guadiana para el 2050 del 7%.
(Touhami et al., 2015)	Reducción del recurso hídrico en Alicante de entre el 3% y el 17% para mediados de siglo.
(Marcos-García & Pulido-Velazquez, 2017)	Reducción en la recarga del 12% para toda España en el periodo 2016-2045,
(Sánchez-Arcilla et al., 2016)	Reducción del recurso hídrico en Cataluña del 11% para el 2021 y del 18% para el 2050.
(Marcos-García & Pulido-Velazquez, 2017)	Descensos en las aportaciones en el Júcar del 20% para el periodo 2011-2040 y del 30% para el periodo 2040-2070.
(Ciscar et al., 2018)	Para un escenario de aumento de la temperatura superficial de 2°C se vería reducida la escorrentía en torno al 50% en las zonas sur y noroeste de la Península Ibérica.



5.2 Fuentes de información

La aplicación de una metodología para el estudio de las aportaciones mínimas a embalses y su evolución a futuro requiere de la utilización de información de partida en el período histórico o de control que se tome, por lo que el uso de las diversas fuentes de información depende del proceso metodológico seleccionado. En ese sentido, a continuación, se describen las diferentes fuentes de datos oficiales existentes según el tipo de información que proporcionan.

5.2.1 Datos climáticos

El principal input para cualquier estudio de recursos hídricos son las variables climáticas. Estas variables climáticas serán utilizadas para reproducir los flujos hidrológicos en la cuenca a partir de modelos que transformen las variables climáticas en variables hidrológicas. Cabe anotar que existen datos globales a gran escala que es necesario estudiar y analizar previamente con criterio científico, para que puedan ser considerados en la zona de estudio. Las diferentes bases de datos que se pueden utilizar son las siguientes:

- Datos de estaciones de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) ¹².
- SPAIN02: Datos en rejilla de 10 Km de precipitación y temperatura para España con resolución temporal diaria (Herrera et al., 2012a) ¹³. Existen disponibles cuatro versiones de los ficheros Spain02: Spain02_v2.1, Spain02_v3.1, Spain02_v4.1 y Spain02_v5.0.

En la versión v3 se describe una nueva rejilla de datos de precipitación interpolados a partir de una red de 833 estaciones con al menos 40 años con el 90% de los datos en el período 1950-2011 para la mejora del estudio de tendencias.

La versión v4 se ha desarrollado para la validación de los modelos regionales del proyecto Euro-CORDEX por lo que presenta dos grandes diferencias respecto a las versiones anteriores: a) por un lado, se ha considerado el *grid* rotado utilizado por dichos modelos a las resoluciones de 0,11°, 0,22° y 0,44°; y b) por otro lado, los valores son representativos del promedio areal, ya que han sido obtenidos promediando los valores obtenidos interpolando a una malla auxiliar de 0,01° de resolución.

La versión v5 provee datos diarios de precipitación y temperatura para el periodo de 1950 a 2015 en una rejilla regular de resolución de 0,1° (~10km).

- Datos espaciales AEMET en rejilla de 5km de precipitación y temperatura (Peral García et al., 2017) ¹⁴. El conjunto de datos que componen esta base de datos corresponde a una rejilla aproximada de 5 Km que cubre la España peninsular e islas Baleares, en la que se han interpolado los datos diarios de precipitación acumulada en 24h, y de temperatura máxima y de temperatura mínima de un numeroso conjunto de estaciones de la Agencia Estatal de Meteorología desde el año 1951 hasta 2020.

El método utilizado para crear los campos de precipitación acumulada a escala diaria es un análisis por interpolación estadística, un método de estimación lineal que maneja bien distribuciones irregulares de observaciones, y produce el mínimo error de interpolación con una correcta formulación de las estadísticas de los errores de las estimaciones de las que parte para crear el campo analizado.

¹² http://www.aemet.es/es/datos_abiertos/AEMET_OpenData

¹³ http://www.aemet.es/es/serviciosclimaticos/cambio_climat/datos_diarios?w=2&w2=1

¹⁴ http://www.aemet.es/es/serviciosclimaticos/cambio_climat/datos_diarios?w=2&w2=1



Como punto de partida, se ha utilizado el sistema de análisis de superficie del modelo de predicción numérica HIRLAM operativo en AEMET, el cual ha sido modificado y adaptado en ciertos aspectos para el desarrollo de esta serie en rejilla. Entre los más importantes están los parámetros que regulan las propiedades del análisis por interpolación estadística, que han sido sintonizados con las series de observaciones utilizadas. El análisis generado considera la influencia de la orografía, así como la variación estacional de la resolución de las estructuras de la precipitación, y de la distribución espacial de la propia precipitación y su variabilidad diaria.

Las rejillas de temperaturas diarias extremas se han generado utilizando el total de estaciones disponibles en el Banco Nacional de Datos Climatológicos de AEMET, 1800 estaciones termométricas. Estas rejillas están actualizadas hasta diciembre de 2020. Sin embargo, a diferencia de la rejilla de precipitación se utiliza una climatología basada en los análisis históricos del modelo de predicción numérica HIRLAM operativo en AEMET como información de partida, o primera estimación, que es corregida por las observaciones.

5.2.2 Datos hidrológicos

Otra de las fuentes de información que proporcionan directamente la información del recurso hídrico sin necesidad de hacer un estudio hidrológico previo para transformar las variables climáticas en escurrimiento son:

- Anuario de aforos del Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX). Se incluyen los datos de las estaciones de aforo en río, en conducción, datos de embalses y datos de las estaciones evaporimétricas¹⁵.
- Datos del sistema automático de información del agua (SAIH) de las Confederaciones¹⁶.
- Datos del modelo SIMPA (CEDEX, 2019a). A partir del modelo hidrológico SIMPA se realiza en España la evaluación de los recursos hídricos en régimen natural. Con el proceso de modelado se obtienen las variables hidrológicas: precipitación, temperatura, evapotranspiración potencial, evapotranspiración real, humedad del suelo, infiltración, escurrimiento subterráneo, escurrimiento superficial, escurrimiento total y aportación total, que comprenden desde el año hidrológico 1940/41 hasta el 2017/18.¹⁷
- Descarga de datos históricos relacionados del Sistema Europeo de Información sobre Inundaciones (Mazzetti, C., Decremmer, D., Barnard, C., Blick, M., Carton de Wiart, C., Wetterhall F., Prudhomme, 2020)¹⁸. Este conjunto de datos proporciona series de tiempo hidrológico diarias modeladas en cuadrículas forzadas con observaciones meteorológicas. El conjunto de datos es una representación coherente de las variables hidrológicas más importantes en el dominio del Sistema Europeo de Alerta de Inundaciones (EFAS). La base de datos contiene hasta 30 años de series de tiempo modeladas de:
 - Descarga de ríos.
 - Humedad del suelo para tres capas de suelo.
 - Equivalente de agua de nieve.

¹⁵ <https://ceh.cedex.es/anuarioaforos/default.asp>

¹⁶ <https://www.miteco.gob.es/es/agua/temas/evaluacion-de-los-recursos-hidricos/SAIH/>

¹⁷ <https://www.miteco.gob.es/es/agua/temas/evaluacion-de-los-recursos-hidricos/evaluacion-recursos-hidricos-regimen-natural/>

¹⁸ <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/efas-historical?tab=overview>



- También proporciona datos estáticos para las tres capas de suelo. Los datos de la humedad del suelo y la descarga de los ríos se acompañan de archivos auxiliares para su interpretación (consulte las variables relacionadas y los enlaces en la documentación).
- Este conjunto de datos se produjo forzando el modelo hidrológico LISFLOOD con datos de observación en cuadrícula de precipitación y temperatura, a una resolución de 5x5 km en todo el dominio EFAS. La versión más reciente utiliza un intervalo de tiempo de 6 horas, mientras que las versiones anteriores utilizan un intervalo de tiempo de 24 horas. Está disponible desde 1991-01-01 hasta la actualidad, con un retraso de 6 días.

5.2.3 Datos de cambio climático

Para analizar cómo influye el cambio climático es necesario recopilar información de modelos para los escenarios de concentración de gases de efecto invernadero que se estén considerando en el estudio. Esta información se utiliza para construir los pronósticos atmosféricos de cambio climático, y con esto, la evolución del recurso hídrico en la zona de estudio. Cabe mencionar que existen otras bases de datos que proporcionan directamente la evolución del recurso hídrico para escenarios de cambio climático. Entre las bases de datos que se pueden analizar se encuentran:

- Datos climáticos
 - Pronósticos climáticos para el siglo XXI sobre España realizado por AEMET ¹⁹. Se incluye información numérica y gráfica, relativa a los pronósticos de cambio climático para el siglo XXI regionalizados sobre España y correspondientes a diferentes escenarios de emisiones. Estos datos han sido elaborados en el marco del Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático (PNACC) para su uso en trabajos de evaluación de impactos y vulnerabilidad. Se proporcionan datos diarios en estaciones o en rejilla para 23 modelos de cambio climático regionalizados mediante las técnicas de regionalización de análogos, regresión o redes neuronales para los escenarios RCP 4.5, 6.0 y 8.5. Esta información es relativa al Quinto Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC AR5), aunque también se pueden descargar datos del AR4.
 - Visor de Escenarios de Cambio Climático ²⁰. A partir de esta fuente de datos se pueden consultar los pronósticos regionalizados de cambio climático para España, realizadas a partir de los pronósticos globales del Quinto Informe de Evaluación del IPCC (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático) en el marco de la iniciativa Escenarios PNACC, y concretamente, de la colección de Escenarios PNACC 2017.
 - Los datos disponibles se nutren principalmente de dos fuentes: pronósticos puntuales de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET), y pronósticos en rejilla procedentes de la iniciativa internacional Euro-CORDEX. Estos datos pueden ser descargados, además de ser visualizados en el visor.

¹⁹ www.aemet.es/es/serviciosclimaticos/cambio_climat/datos_diarios?w=0

²⁰ http://escenarios.adaptecca.es/#&model=EURO-CORDEX-EQM.average&variable=tasmax&scenario=rcp85&temporalFilter=year&layers=AREAS&period=MEDIUM_FUTURE&anomaly=RAW_VALUE



- Pronósticos climáticos del proyecto NEX-GDDP²¹ (Melton, 2015). El conjunto de datos de Pronósticos de escala reducida diarias globales de *NASA Earth Exchange* (NEX-GDDP) se compone de escenarios climáticos reducidos para el mundo, derivados de las ejecuciones del Modelo de circulación general (GCM) realizadas bajo la Fase 5 del Proyecto de intercomparación de modelos acoplados (CMIP5), y en dos de los cuatro escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero conocidos como vías de concentración representativas (RCP). Las simulaciones CMIP5 GCM se desarrollaron en apoyo del Quinto Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC AR5). El conjunto de datos NEX-GDDP incluye pronósticos reducidos para RCP 4.5 y RCP 8.5 de los 21 modelos y escenarios para los cuales se produjeron y distribuyeron escenarios diarios bajo CMIP5. Cada uno de los pronósticos climáticos incluye la temperatura máxima diaria, la temperatura mínima y la precipitación para los períodos de 1950 a 2100.
- Datos hidrológicos:
 - Datos proporcionados por el estudio de evaluación del impacto del cambio climático en los recursos hídricos y sequías en España (CEDEX, 2019b). En este trabajo se presenta la evaluación del impacto de doce pronósticos de cambio climático sobre los recursos hídricos en todo el territorio español. Este estudio emplea el modelo hidrológico SIMPA y presenta resultados de las variables características: precipitación, evapotranspiración, infiltración y escorrentía agregados para el conjunto de España y para cada Demarcación Hidrográfica (DH). Toda esta información es accesible a través de la aplicación CAMREC²² (Barranco et al., 2018), la cual condensa información digital sobre los principales mapas que mejor representan los pronósticos de variables hidroclimáticas a lo largo del siglo XXI en España. Este software permite entonces calcular los mapas de impacto del cambio climático, expresado como cambios porcentuales en períodos futuros de 30 años con relación a los valores medios de 1961-2000.
 - Indicadores de impacto climático relacionados con la hidrología de 1970 a 2100 derivados de los pronósticos climáticos europeos ajustadas al sesgo (Copernicus Climate Change, 2021). Este conjunto de datos proporciona variables e indicadores del agua basados en modelos de impacto hidrológico, forzados por simulaciones climáticas regionales ajustadas al sesgo del Experimento Regional Coordinado Europeo de Reducción del Clima (EURO-CORDEX). El conjunto de datos contiene datos de Variables Climáticas Esenciales (ECV) en forma de caudal medio diario del río, así como un conjunto de indicadores de impacto climático para la cantidad y calidad del agua. De este modo, se utilizan ocho simulaciones de modelos para forzar una configuración del modelo hidrológico E-HYPE y VIC en una cuadrícula de 5 km x 5 km. Los datos se presentan como valores absolutos a resolución diaria, tanto para el período histórico o de referencia (1970-2005), como para períodos futuros; en este último caso, cubriendo 3 períodos de tiempo (2011-2040, 2041-2070 y 2071-2100).

²¹ <https://www.nccs.nasa.gov/services/data-collections/land-based-products/nex-gddp>

²² <https://www.adaptecca.es/cambio-climatico-y-recursos-hidricos-en-espana-aplicacion-camrec>



5.3 Metodologías para la estimación de aportaciones mínimas a embalses

La evaluación de los recursos hídricos es una pieza clave para la solución sostenible de problemas relacionados con las aportaciones que reciben los embalses. Este es el punto de partida para la planificación y la gestión del agua, y la base para el análisis del impacto de fenómenos como el cambio climático.

Las principales metodologías de evaluación utilizan como instrumento los modelos hidrológicos, ya que permiten el análisis del ciclo del agua a escala de cuenca a través de expresiones matemáticas. Sin embargo, gracias a los recientes avances en los sistemas de cómputo, han surgido nuevas metodologías basadas en técnicas de aprendizaje automático, que permiten traducir las variables climáticas en flujos hidrológicos. Además de la aplicación de estas metodologías para obtener una cuantificación del recurso hídrico, existen diversas fuentes que proporcionan esta información a nivel regional o global y que el usuario puede utilizar para sus zonas de interés.

Debido a la necesidad de realizar estudios de cambio climático que permitan mitigar las consecuencias, se requiere que las metodologías utilizadas sean capaces de estimar la evolución del recurso hídrico en el futuro a partir de modelos climáticos, o que las fuentes de datos proporcionen directamente la cuantificación del recurso hídrico en el futuro.

A continuación, se describen diversas fuentes bibliográficas donde se aplican las metodologías mencionadas:

- Métodos basados en la modelización hidrológica.
- Métodos basados en la aplicación de técnicas de aprendizaje automático.
- Métodos basados en la utilización directa de fuentes de datos hidrológicos.

5.3.1 Métodos basados en la modelización hidrológica

El uso de estos métodos se fundamenta en la obtención de un conjunto de escenarios hidrológicos representativos, derivados de los resultados de los modelos climáticos. El esquema fundamental de esta metodología es el encadenamiento de modelos en cascada (Garrote et al., 2020).

El proceso general que se sigue es el siguiente:

- 1- Recopilación de series hidroclimáticas.
- 2- Configuración, calibración y validación de uno o varios modelos hidrológicos
- 3- Recopilación de los pronósticos climáticos derivados de modelos globales o regionales de clima, tanto para el escenario de control como para el futuro.
- 4- Actualización de las series climáticas en los puntos de estudio con los pronósticos de cambio climático.
- 5- Acoplamiento de uno o varios de los modelos hidrológicos configurados para obtener las series de variables hidrológicas (evapotranspiración, escorrentía, infiltración, humedad del suelo, caudal, recarga, etc.) en distintos puntos y en diferentes ventanas temporales (por ejemplo: series de 30 años para el futuro cercano, medio y largo plazo), a partir de las series climáticas actualizadas.



- 6- Análisis de los resultados de las variables hidrológicas obtenidas, y evaluación de la tendencia de estas series o comparación de sus valores medios en distintos horizontes temporales.

Esta metodología ha sido aplicada en multitud de estudios, tomando como referencia el realizado en España por el CEDEX en 2017 titulado **“Evaluación del impacto del Cambio Climático en los recursos hídricos y sequías en España”** (CEDEX, 2017b), que tiene como objetivo evaluar el impacto del cambio climático en los recursos hídricos en régimen natural y en el régimen de sequías en España.

De manera particular, en este trabajo se parte de los pronósticos climáticos regionalizados elaborados por la Agencia Estatal de Meteorología. Estos pronósticos se realizaron para emplazamientos de estaciones de medida mediante el método de análogos (Amblar-Francés et al., 2017), empleando técnicas de reducción de escala estadísticas y dinámicas. Los datos puntuales de precipitación y temperatura se procesaron para obtener mapas mensuales con la resolución espacial de trabajo de 1 km² y se obtuvieron las variables climáticas derivadas, como la evapotranspiración potencial.

El tercer bloque de tareas abarca el análisis y contraste de los pronósticos mediante la comparación con las series observadas, buscando identificar sus características básicas, precisar su grado de fiabilidad y determinar la conveniencia de abordar tareas de estudio de incertidumbre o de corrección de sesgo. En el caso del trabajo del CEDEX, no se aplicó un método específico de corrección de sesgo, sino que se aplicó el método “delta” para atenuarlo (Ramirez-Villegas & Jarvis, 2010).

En la cuarta fase se procede a la modelación hidrológica a partir de los escenarios climáticos caracterizados en la fase anterior.

Como se evidenció, resulta crucial corregir el sesgo, ya que los modelos climáticos suelen ofrecer representaciones sesgadas de las series temporales observadas, debido a los errores sistemáticos del modelo causados por una conceptualización, una discretización y un promedio espacial imperfectos dentro de las celdas de la cuadrícula. Los datos de los modelos climáticos son incorporados a las estaciones de referencia a partir de las celdas más cercanas, si los modelos están conceptualizados en forma de rejilla, o si en las estaciones de estudio ya se encuentran realizadas las regionalizaciones o reducción de escala, se utilizan dichas estaciones, tal como ocurre con la base de datos de AEMET (Amblar-Francés et al., 2017).

Por tanto, pueden existir diferentes formas de utilizar los pronósticos de cambio climático:

- Aplicando técnicas de corrección de mapeo a partir de las observaciones.
- Aplicación de anomalías a las series instrumentales o simuladas o método delta.

5.3.2 Métodos basados en la aplicación de técnicas de aprendizaje automático

La previsión de caudales es de gran importancia para la planificación y gestión de los recursos hídricos a corto y largo plazo. Los métodos de predicción de caudales se pueden agrupar en dos categorías: modelos basados en la física y modelos basados en datos. Por ejemplo, los modelos hidrológicos conceptuales se consideran un tipo de modelos de base física; las redes neuronales artificiales (ANN) y las máquinas de vectores de apoyo (SVR) se clasifican como modelos basados en datos.

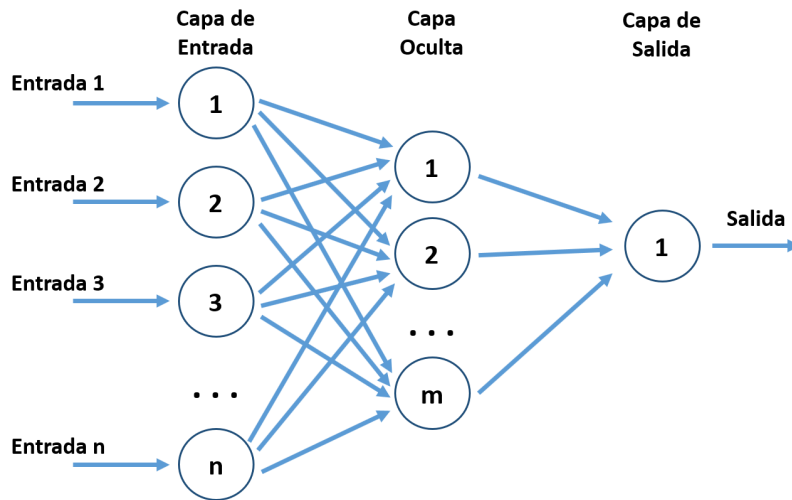


Si bien existen algunos estudios que utilizan métodos de aprendizaje automático en la previsión de caudales, son pocos los estudios que exploran las capacidades de previsión a largo plazo de estos métodos, obteniendo una visión de la comparación sistemática del rendimiento del modelo de previsión tanto a corto como a largo plazo.

De este modo, diversos estudios sustentan la superioridad del algoritmo de Regresión de vectores de apoyo (SVR) y de las redes neuronales (ANN) en varias aplicaciones hidrológicas. A continuación, se define cada uno de los algoritmos.

Una red neuronal es un modelo simplificado que emula el modo en que el cerebro humano procesa la información: Funciona simultaneando un número elevado de unidades de procesamiento interconectadas que parecen versiones abstractas de neuronas. Es una red de muchos procesadores simples ("nodos"), cada uno con una pequeña memoria local. Los nodos están conectados por canales de comunicación ("conexiones") que generalmente contienen datos numéricos codificados de varias maneras. Los nodos operan sobre sus propios datos y entradas que reciben de las conexiones.

Figura 6: Ejemplo de red neuronal.



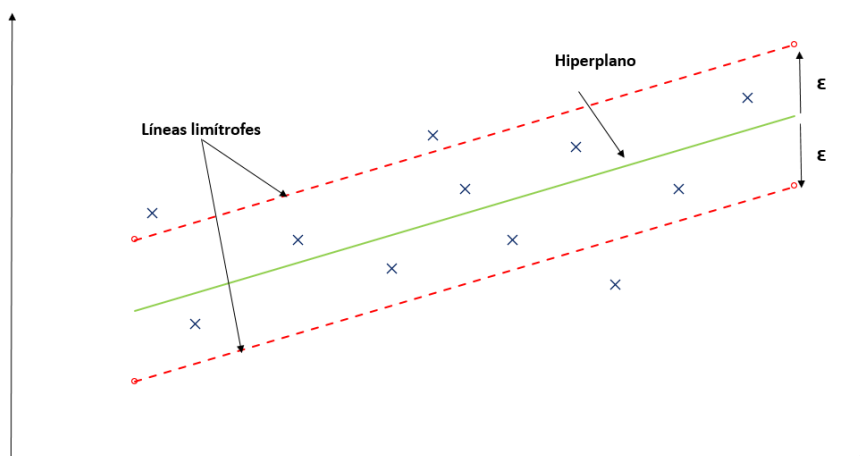
Fuente: Elaboración propia

La Regresión de Vectores de Soporte (SVR) es un algoritmo de regresión basado en los mismos algoritmos que usan las Máquinas de Vectores de Soporte (SVM, del inglés *Support Vector Machines*) para la creación de modelos de clasificación.

Mientras que en la regresión lineal se busca minimizar una función de error, generalmente el error cuadrático en todos los puntos del conjunto de entrenamiento, en la SVR se define una zona en torno al hiperplano donde se ignoran los errores. Esto significa que en SVR se busca aproximar el mejor valor dentro de un margen dado por ϵ , tal como se muestra en la Figura 7.



Figura 7: Ejemplo de una Regresión de Vectores de Soporte (SVR).



Fuente: Elaboración propia

Una vez definidas las características generales de cada uno de los métodos, en la Tabla 6 se muestran las ventajas y desventajas del uso de cada uno de los algoritmos de regresión.

Tabla 6. Pros y contras del uso de los diferentes algoritmos de regresión

Algoritmos de regresión	Pros	Contras
ANN	<ol style="list-style-type: none"> 1. Tiempo reducido de calibración 2. Escasa capacidad computacional necesaria (CPU) 3. Tiempo de simulación muy reducido 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Resultados de calibración ligeramente inferiores a SVR
SVR	<ol style="list-style-type: none"> 1. Resultados de calibración precisos 2. Tiempo de simulación muy reducido 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Tiempo elevado en el proceso de calibración del modelo 2. Alta capacidad computacional (CPU)

La aplicación de esta metodología se basa en la utilización de valores medios mensuales de las principales variables de entrada (Precipitación, Temperatura máxima y Temperatura mínima) como variables predictoras, para obtener como variable objetivo el caudal (Parisouj et al., 2020). Esta metodología proporciona resultados aceptables, aunque se debe tener especial cuidado en cuencas donde la influencia del deshielo sea importante.

Una vez que los modelos de regresión han sido ajustados y las series climáticas actualizadas a escenarios de cambio climático, se procede a simular la información de cambio climático para obtener series de caudal en periodos futuros.

Como ocurre con los métodos descritos anteriormente, para un análisis más preciso es aconsejable corregir el sesgo de las series de cambio climático aplicando las técnicas de corrección existentes:

- Aplicando técnicas de corrección de mapeo a partir de las observaciones.
- Aplicación de anomalías a las series instrumentales o método delta.



5.3.3 Métodos basados en la utilización directa de fuentes de datos hidrológicos

En la actualidad, existen diversas fuentes de datos que proporcionan información hidrológica de diferentes modelos y escenarios de cambio climático. Esta información puede resultar de gran utilidad, ya que no es necesario realizar ningún proceso de simulación previo y puede dar una visión aproximada de la evolución del recurso hídrico. En España existen los datos de la aplicación CAMREC (Barranco et al., 2018), de donde se pueden obtener datos medios mensuales y anuales en un punto determinado de la red hídrica además de los datos climáticos. A partir de los datos hidrológicos obtenidos en cualquier punto de la red hídrica es posible evaluar los cambios que pueden sufrir las aportaciones y si pudiera existir un cambio en la estacionalidad anual.

Otra de las fuentes de datos hidrológicos existente de la que poder extraer información de aportaciones es la que proporciona el Servicio de Cambio Climático de Copernicus para toda Europa (Copernicus Climate Change, 2021). Esta base de datos proporciona datos de aportaciones diarias en una red hídrica de menor resolución que CAMREC. Esta información puede ser útil para realizar un análisis diario de las aportaciones; sin embargo, al ser un estudio a escala regional, la incertidumbre existente es elevada, por lo que la utilización de estos datos requiere de un análisis previo del sesgo existente entre el período histórico y los datos reales. Si los sesgos son elevados, esto indica que esta fuente de datos no reproduce correctamente los flujos hidrológicos en el punto considerado, por lo que sería aconsejable desestimar la opción de utilizar esta fuente de datos.

5.4 Técnicas de corrección de sesgo y reducción de escala.

La resolución de los RCM (como el caso de las regionalizaciones desarrolladas por AEMET) suele coincidir con el tamaño de las cuencas de captación a mesoescala (es decir, entre 10 y 10.000 km), por lo que no debería ser necesaria la reducción de escala. Sin embargo, es común que se requiera corregir el sesgo. Los sesgos típicos son la aparición de demasiados días húmedos con lluvias de baja intensidad o la estimación incorrecta de las temperaturas extremas en las simulaciones RCM (Ines & Hansen, 2006). Un sesgo en las variables simuladas por la RCM puede conducir a simulaciones de la escorrentía de los ríos poco realistas (Donnelly et al., 2016); por ello, se recomienda la aplicación de métodos de corrección de sesgos. El término "corrección del sesgo" describe el proceso de escalar los resultados de los modelos climáticos para tener en cuenta los errores sistemáticos de los mismos. El principio básico es que se identifican los sesgos entre las series temporales climáticas simuladas y las observaciones, y posteriormente se utilizan para corregir tanto las series de control como las del escenario. Un supuesto principal es que la misma corrección de sesgo se aplica a las condiciones de control y de escenario; por esto, existen diferentes enfoques según la complejidad del método utilizado.

A lo largo de los años, se han desarrollado numerosos métodos de corrección de sesgos, utilizando enfoques univariantes y multivariantes. Los métodos se dividen en dos grandes grupos:

- Aplicación de anomalías a las series instrumentales o método delta.
- Transformaciones a través de las funciones de distribución o métodos de mapeo.



5.4.1 Métodos de mapeo

Los métodos de mapeo consisten, de forma simplificada, en calibrar la función de distribución acumulativa (CDF) de las series simuladas por los modelos de cambio climático, a partir de la CDF de las series observadas, de acuerdo con la siguiente formulación:

$$q_m^* = F_o^{-1}(F_m(q_m)), \quad (1)$$

donde q_m y q_m^* corresponden a los cuantiles simulados y corregidos del modelo climático global y F_m y F_o a las CDFs empíricas simuladas y observadas, respectivamente. Dependiendo del tipo de mapeo la calibración de la CDF se lleva a cabo de forma distinta.

Cualquier técnica de mapeo se puede aplicar fácilmente de manera que tenga en cuenta los cambios en la distribución de la variable de interés entre diferentes periodos temporales. En ese caso la fórmula tendría la siguiente forma:

$$q_{raw}^* = F_{obs}^{-1}(F_{mod}(q_{raw})), \quad (2)$$

donde q_{raw} y q_{raw}^* corresponden a los cuantiles de las series del GCM original y corregidas para el periodo futuro, y F_{mod} y F_{obs} a las CDFs empíricas de las series de los GCMs y de las series observadas para el periodo de referencia 1950-2005, respectivamente.

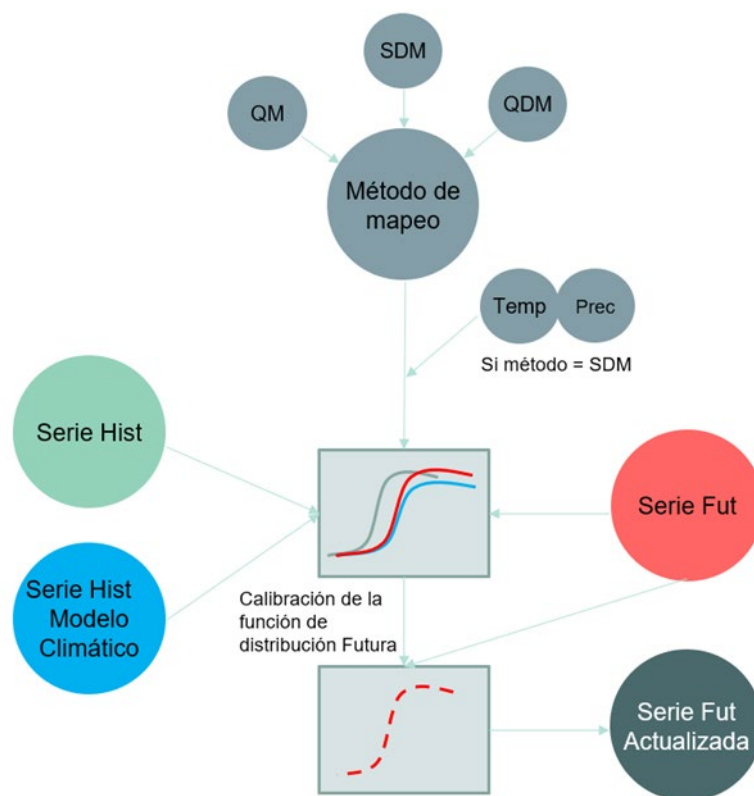
Las series observadas utilizadas como estaciones de referencia son las extraídas en los puntos distribuidos en la cuenca de estudio.

En el caso de la utilización del método de mapeo *Scaled Distribution Mapping* o Mapeo de distribución a escala (SDM) es necesario definir el tipo de variable climática que se esté estudiando ya que la forma de calibrar la función de distribución es distinta, debido a que en el caso de la precipitación existen días donde no se produce lluvia.

En la Figura 30 se muestra de forma esquemática el proceso que se sigue en la aplicación de métodos de mapeo para actualizar las series climática a futuro.



Figura 8: Proceso de reducción de escala a través de métodos de mapeo.



Fuente: Elaboración propia

A continuación, se describe cada uno de los métodos.

- Mapeo de cuantiles (QM)

La comunidad científica ha hecho un gran esfuerzo en revisar y comparar muchos métodos populares de corrección de sesgos existentes y se ha descubierto que el mapeo de cuantiles (QM) supera a otros métodos. Al mismo tiempo, los estudios han señalado los graves problemas que surgen al utilizar QM para la corrección de sesgos (Switanek et al., 2017).

En particular, el método puede alterar los cambios proyectados del modelo en bruto (Themeßl et al., 2012), esta inflación o deflación de la señal cruda de cambio climático simulado existe como un artefacto del supuesto de estacionariedad. Esta alteración de la señal de cambio climático sin procesar puede atribuirse al supuesto de estacionariedad, que implica que los valores de corrección de sesgos establecidos en un período de calibración pueden aplicarse a cualquier período de tiempo dentro o fuera del período de calibración.

El mapeo de cuantiles (QM) corrige los sesgos en la distribución de una variable simulada comparando el resultado bruto del modelo con una distribución observacional de la misma variable. Las distribuciones simuladas y observadas se ajustan aproximadamente estableciendo una función de corrección dependiente de la cuantía que traduce los cuantiles simulados en sus contrapartidas observadas a partir del valor de la diferencia de los cuantiles. Esta función se utiliza posteriormente para traducir una serie temporal transitoria simulada en una serie corregida. El supuesto implícito del QM es que un modelo climático puede proyectar con precisión las categorías clasificadas de la variable de interés, es decir, los cuantiles, pero no sus valores reales. Los cuantiles simulados y observados pueden basarse en la distribución empírica completa (implementación no paramétrica; o en una distribución teórica ajustada (implementación paramétrica).



- Mapeo de delta cuantiles (QDM)

El QDM se desmarca de otros métodos típicos de QM en la medida en que no está limitado por el supuesto de estacionariedad. En el método QM tradicional, un valor modelado en bruto siempre se corrige por el mismo valor de sesgo o error que está determinado por su respectivo cuantil en el período de calibración. En cambio, el QDM multiplica los valores observados por la relación de los valores modelados (período de interés determinado por el período de calibración) en los mismos cuantiles (Cannon et al., 2015).

El procedimiento de este método es similar al anterior, pero en este caso las distribuciones simuladas y observadas se ajustan estableciendo una función de corrección dependiente de la cuantía que traduce los cuantiles simulados en sus contrapartidas observadas a partir del cambio relativo de los cuantiles

- Mapeo de distribución a escala (SDM)

El método SDM, comparte algunas similitudes con QDM; sin embargo, hay tres diferencias importantes:

- SDM utiliza un modelo paramétrico en lugar de uno no paramétrico.
- SDM y QDM manejan los días con precipitación cero de manera muy diferente.
- SDM tiene en cuenta de manera más precisa las diferencias en las varianzas modeladas, para la temperatura, entre el período de interés y el período de calibración (Switanek et al., 2017).

El procedimiento de corrección a través de este método se basa en que los cuantiles simulados y observados sean comparados a través de una función de distribución paramétrica como puede ser la función gamma o normal en función del tipo de variable que se esté analizando. En el caso de la precipitación se utiliza la función gamma lo que permite la versatilidad de manejar los días de lluvia y no lluvia, y para la variable temperatura se utiliza la función normal lo que permite tener en cuenta de forma más precisa las varianzas modeladas.

5.4.2 Aplicación de anomalías a las series instrumentales o método delta.

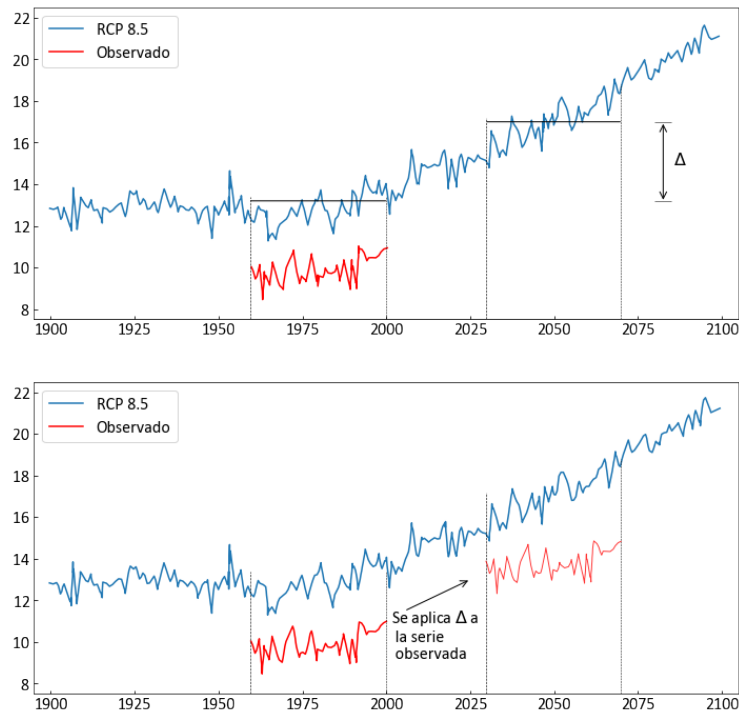
El enfoque de cambio delta (ver Figura 9) es una alternativa al uso directo de simulaciones de RCM. Método basado en la interpolación espacial de anomalías mensuales (deltas) de las salidas originales de RCM o GCM. Las anomalías se interpolan entre los centroides de las celdas de la malla GCM o RCM y luego se aplican a un clima de referencia dado (Hijmans et al., 2005). La principal desventaja es que con este enfoque el patrón temporal de las variables climáticas no cambiará para las futuras simulaciones de escenarios. El número de días de lluvia, por ejemplo, no cambiará con el enfoque de cambio delta.

Este método permite determinar, a partir de las predicciones de los modelos climáticos, cuál es la corrección que es conveniente añadir a las observaciones para convertirlas en el equivalente de observaciones en el periodo futuro. Es decir, se calcula el cambio en las medias obtenidas a partir del modelo climático, y este cambio se le aplica a la observación:

$$y^f = y^p + (\bar{x}^f - \bar{x}^p) \quad (3)$$



Figura 9. Representación gráfica de la aplicación del método de las deltas a la corrección de sesgo de una serie climática de temperatura.



Fuente: Elaboración propia. Adaptado de "Guidebook on Climate Scenarios: Using Climate Information to Guide Adaptation Research and Decisions"

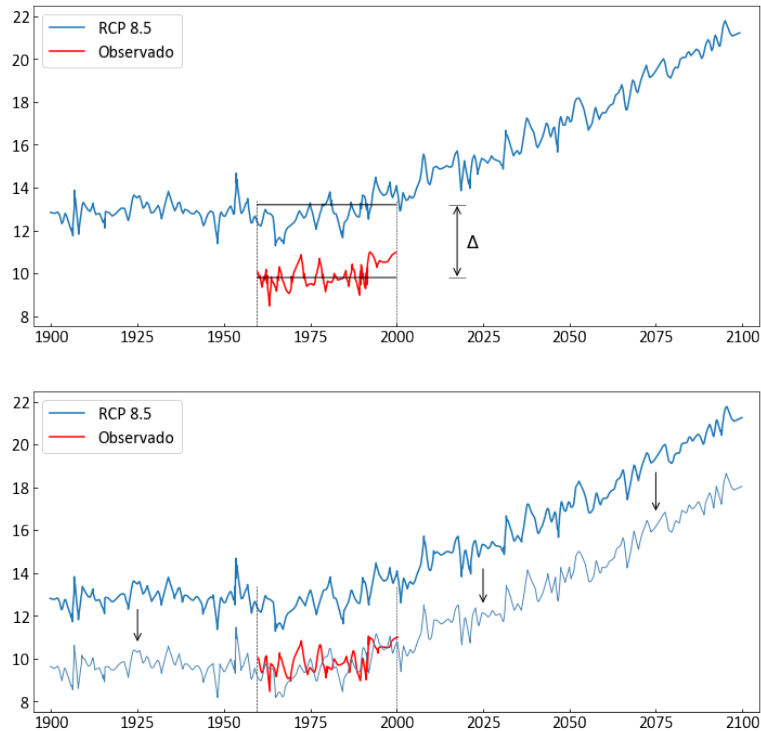
Nota: La imagen muestra los datos observados (línea de color rojo) y los pronósticos del modelo (en color azul). El método de las deltas calcula la diferencia entre las medias del periodo histórico del modelo y el futuro del modelo. Este cambio en las medias del modelo se aplica a las observaciones, generando una mejor proyección de las observaciones a futuro.

Para aquellas variables que toman valores positivos, como por ejemplo la precipitación, también puede llevarse a cabo una modificación a partir del cambio relativo:

$$y^f = y^p \times \left(\frac{\bar{x}^f}{\bar{x}^p} \right) \quad (4)$$



Figura 10. Representación gráfica de la aplicación del método de las deltas a la corrección de sesgo de una serie climática de precipitación.



Fuente: Elaboración propia. Adaptado de "Guidebook on Climate Scenarios: Using Climate Information to Guide Adaptation Research and Decisions"

Nota: La imagen muestra las observaciones (línea de color rojo) y los pronósticos del modelo (línea de color azul). En el método directo se calcula la diferencia relativa en las medias entre el modelo y las observaciones para el periodo histórico. Esta diferencia se sustrae de la serie del modelo para generar el equivalente a una observación que cubre todo el periodo incluido en el modelo.

Es necesario tener en cuenta que el método delta aplicado a través de la ecuación (3) la variabilidad de la serie se deja inalterada, es decir, produce la misma varianza que la original, sin embargo, en el caso de aplicar el método a través de la ecuación (4), la variabilidad de la serie se reduce en la misma medida que la media, por tanto, produce el mismo coeficiente de variación que la original.

Generalmente la aplicación del cambio a través de las diferencias, ecuación (3), se usa para temperaturas, debido a que se usan los conceptos de "aumento o disminución" de temperatura en valor absoluto. Para las variables hidrológicas o precipitación se aplica el cambio relativo, ecuación (4), lo que implica que al reducir la media se reduce también su varianza.

Este método además puede realizarse de forma mensual, es decir, y^p serían los valores observados de la variable considerada en el periodo de referencia en un mes determinado, mientras que y^f serían los valores de la serie actualizada para un mes determinado. Por su parte, \bar{x}^f y \bar{x}^p serían las medias de los valores correspondientes al mes considerado de la serie histórica del modelo climático y del escenario climático respectivamente.

Por ejemplo, si se quiere actualizar una serie a futuro, lo primero que es necesario hacer es recorrer cada uno de los meses del año y calcular la media de la variable tanto de la serie histórica del modelo climático como del escenario que se desea estudiar, de esta forma se obtienen 12 factores de cambio correspondiente a cada mes del año.



El objetivo de aplicar este método es reducir el número de series futuras resultantes; por tanto, es necesario realizar un *ensemble*²³ o un conjunto de los diferentes resultados de cambio que se obtienen para cada uno de los modelos.

Se pueden utilizar dos formas de realizar el ensemble, a través de la media de los factores de cambio para cada mes o a través de la mediana. En la Tabla 7 se muestran las ventajas y desventajas de usar un método u otro.

Tabla 7. Pros y contras del uso estadísticos para realizar el ensemble de factores de cambio en el método delta

Ensemble método delta	Pros	Contras
Media (μ)	1. Considera todos los valores	1. Valores anómalos pueden aumentar o disminuir considerablemente el valor
Mediana (M_e)	1. Evita valores anómalos que puedan afectar al resultado final	1. Puede subestimar el resultado final

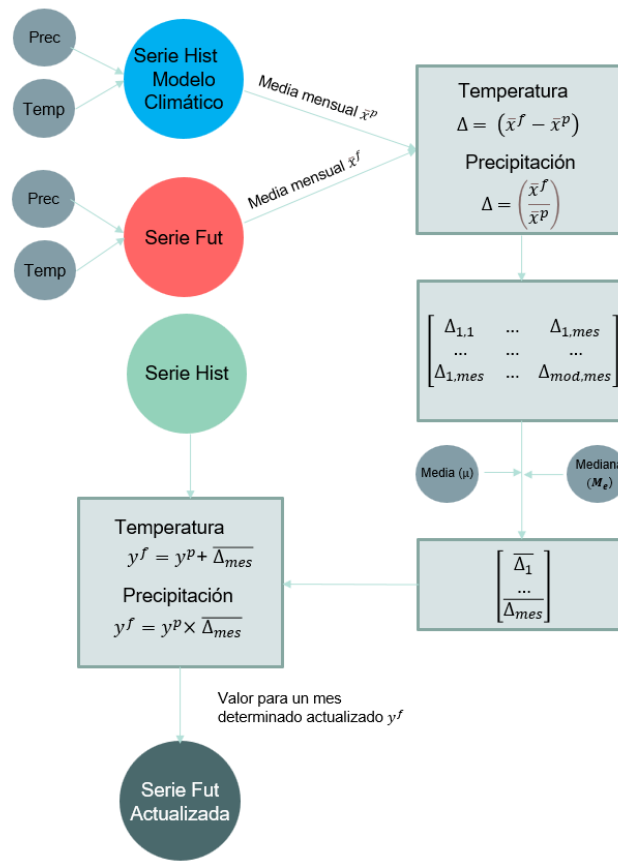
El resultado final del ensemble es un conjunto de 12 valores para cada mes del año en el período temporal considerado. Estos 12 valores de cambio se aplican a la serie histórica y^p para obtener así la serie futura para el escenario de cambio climático y^f . La forma de aplicar estos cambios es de forma iterativa para cada uno de los meses, por ejemplo, para el caso de enero, el factor de cambio obtenido se aplica a todos los valores del mes de enero de la serie histórica del período considerado. De la misma forma se aplica al resto de meses quedando así actualizada la serie futura para el escenario y período considerado.

En la Figura 11 se muestra el proceso de actualización de series de cambio climático a través del método delta.

²³ Un ensemble es un conjunto de modelos. Cada modelo produce una predicción diferente. Las predicciones de los distintos modelos se combinan para obtener una única predicción.



Figura 11: Proceso de reducción de escala a través del método delta.



Fuente: Elaboración propia

5.4.3 Diferencias entre métodos de corrección de sesgo.

A continuación, en la Tabla 8 se enumeran las ventajas de usar un método de corrección de sesgo u otro.

Tabla 8. Pros y contras del uso de métodos de reducción de escala

Métodos de reducción de escala		Pros	Contras
Métodos de mapeo	QQM	1. Método utilizado ampliamente por la comunidad científica.	1. No tiene en cuenta el tipo de variable climática. 2. No tiene en cuenta el número de días de lluvia. 3. Hipótesis de estacionariedad 4. Número de series igual al número de modelos climáticos por escenario
	QDM	1. Método utilizado ampliamente por la comunidad científica. 2. No está limitado por el supuesto de estacionariedad	1. No tiene en cuenta el tipo de variable climática. 2. No tiene en cuenta el número de días de lluvia. 3. Número de series igual al número de modelos climáticos por escenario



	SDM	<ol style="list-style-type: none"> 1. Tiene en cuenta la frecuencia de días de lluvia (para la precipitación) y la probabilidad de eventos. 2. No es necesario depender del supuesto inválido de estacionariedad 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Mayor tiempo de ejecución 2. Número de series igual al número de modelos climáticos por escenario
Método delta		<ol style="list-style-type: none"> 1. Una única serie por variable climática. 2. Poco tiempo de ejecución para actualización de las series climáticas 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Mayor incertidumbre al obtener como resultado una única serie de caudales. 2. La estacionalidad anual se repite en cada año de la serie de estudio a futuro. 3. No tiene en cuenta el número de días de lluvia.

5.5 Utilización directa de los pronósticos de cambio climático.

En ocasiones existen fuentes de datos que proporcionan los pronósticos de cambio climático en estaciones climáticas como es el caso de los datos regionalizados de AEMET (Amblar-Francés et al., 2017). Los pronósticos de precipitación y temperatura suministradas por AEMET son puntuales en una serie de puntos donde existen pluviómetros y termómetros (2321 estaciones), por lo que la utilización de estos datos es inmediata si las estaciones consideradas para el estudio son las mismas que contiene el estudio realizado por AEMET. Sin embargo, hay que tener especial cuidado en el uso directo de los datos dependiendo del tipo de estudio y considerando, es decir, si el estudio se centra en el estudio del recurso hídrico o en el análisis de extremos. Según (C. Garijo et al., 2018b), mientras que los modelos regionalizados se comportan razonablemente bien para valores medios, no ocurre así para valores máximos anuales; todos los modelos subestiman las precipitaciones extremas (precipitaciones máximas anuales), empeorando los resultados para el área mediterránea. Por tanto, los métodos de regionalización utilizados por AEMET no son adecuados para caracterizar los extremos de precipitación.

5.6 Análisis estadístico de las aportaciones mínimas

Una vez que se tienen las secuencias de aportaciones obtenidas a partir de diversas metodologías, es necesario evaluar cómo se van a comportar en el futuro por la influencia del cambio climático. Los análisis que más información pueden dar los *stakeholders* (partes interesadas) a la hora de gestionar los embalses son los análisis de indicadores hidrológicos.

La metodología *Indicators of Hydrologic Alteration* (IHA), se utiliza para evaluar el grado de desviación del régimen natural de caudales debido a las presas y al cambio climático proyectado (Richter et al., 1996). El IHA, diseñado originalmente para analizar los efectos hidrológicos de las presas mediante la comparación de los caudales en periodos anteriores y posteriores al impacto, parte de la base de que la alteración del caudal natural altera el ecosistema. Es útil para comparar los parámetros de flujo bajo diferentes escenarios (período observado y futuro en este tipo de estudios) y particularmente para evaluar las características clave del régimen de flujo, como la magnitud, el momento, la frecuencia y la duración.

Para analizar el grado de alteración hidrológica, el IHA estima 67 parámetros hidrológicos derivados de las estadísticas de flujo diario. Estos se subdividen en dos categorías: 33 parámetros IHA y 34 componentes de flujo ambiental (EFC). Los parámetros IHA más utilizados constan de cinco categorías principales (I) magnitud de los caudales mensuales; (II) magnitud y duración de los caudales extremos anuales; (III) calendario de los caudales



extremos anuales; (IV) frecuencia y duración de los caudales altos y bajos y (V) tasa y frecuencia de los cambios de caudal. Los cinco componentes del caudal que describen las formas en que un cauce experimenta la variabilidad del caudal, incluyen (I) caudales bajos extremos; (II) caudales bajos; (III) pulsos de caudal alto; (IV) pequeñas inundaciones y (V) grandes inundaciones.

Dentro de los estudios en los que el interés es evaluar las aportaciones a embalses es necesario centrarse en los siguientes indicadores dependiendo de la resolución temporal a la que se esté trabajando (The Nature Conservancy, 2011):

- Magnitud de las condiciones hidrológicas mensuales.
 - Valor de la media o la mediana para cada mes calendario
- Magnitud y duración de las condiciones hidrológicas extremas anuales
 - Mínimos anuales, media de 1 día
 - Mínimos anuales, medias de 3 días
 - Mínimos anuales, medias de 7 días
 - Mínimos anuales, medias de 30 días
 - Mínimos anuales, medias de 90 días
 - Máximos anuales, media de 1 día
 - Máximos anuales, medias de 3 días
 - Máximos anuales, medias de 7 días
 - Máximos anuales, medias de 30 días
 - Máximos anuales, medias de 90 días
 - Cantidad de días con caudal cero
 - Índice de flujo de base: caudal mínimo de 7 días/caudal medio anual
- Momento de las condiciones hidrológicas extremas anuales
 - Fecha juliana de cada máximo anual de 1 día
 - Fecha juliana de cada mínimo anual de 1 día
- Tasa y frecuencia de los cambios de las condiciones hidrológicas
 - Tasas de ascenso: Media o mediana de todas las diferencias positivas entre valores diarios consecutivos
 - Tasas de descenso: Media o mediana de todas las diferencias negativas entre valores diarios consecutivos Cantidad de inversiones hidrológicas

Si se quieren evaluar explícitamente los caudales mínimos, los indicadores que se deben evaluar son los siguientes:

- Caudales bajos mensuales
 - Valores de la media o la mediana de los caudales bajos durante cada mes calendario



- Caudales extremadamente bajos
 - Frecuencia de los caudales extremadamente bajos durante cada año hidrológico o estación
 - Valores de la media o la mediana de eventos de caudal extremadamente bajo:
 - Duración (días) Pico del caudal (caudal mínimo durante el evento)
 - Momento (fecha juliana del pico del caudal)

Uno de los índices más utilizados para identificar sequías hidrológicas es el índice normalizado de los caudales fluviales (SSFI). Este índice, similar al SPI, caracteriza las sequías mediante la cuantificación del déficit de aportaciones en diferentes períodos de tiempo. Valores negativos del SSFI representan sequías, mientras valores positivos indican periodos húmedos (Telesca et al., 2012). El cálculo del SSFI se basa en el ajuste de la serie de aportaciones a una distribución de probabilidades y a continuación se transforma en una distribución normal de modo que el SSFI medio y el período deseado sea cero (Edwards y McKee, 1997). Los valores positivos de SSFI indican que la precipitación es mayor que la mediana, y los valores negativos, que es menor. Dado que el SSFI está normalizado, los climas húmedos y secos se pueden representar del mismo modo, por lo que también se puede hacer un seguimiento de los períodos húmedos utilizando el SSFI.

Tabla 9. Escala índice SSFI

SSFI	Severidad
2,0 y más	Húmedo extremo
1,5 a 1,99	Húmedo severo
1,0 a 1,49	Húmedo moderado
0,99 a 0	Húmedo ligero
0 a -0,99	Sequía ligera
-1,0 a -1,49	Sequía moderada
-1,5 a -1,99	Sequía severa
-2 y menos	Sequía extrema

A partir del cálculo de los indicadores tanto en el período de referencia como para escenarios de cambio climático es posible identificar cómo influye el cambio climático en las aportaciones a embalses, y de esta forma, poder mitigar los efectos posibles del cambio climático mediante la consideración de medidas de adaptación en los planes de gestión.

5.7 Análisis de la incertidumbre

Los estudios de cambio climático sobre los caudales llevan asociado diferentes fuentes de incertidumbre como son los escenarios de emisiones, los modelos globales y regionales de clima, las técnicas de reducción de escala y los modelos hidrológicos. Por esta razón, es de buena práctica evaluar las fuentes de incertidumbre de en los estudios de impacto de cambio climático en la hidrología (Garrote et al., 2020).

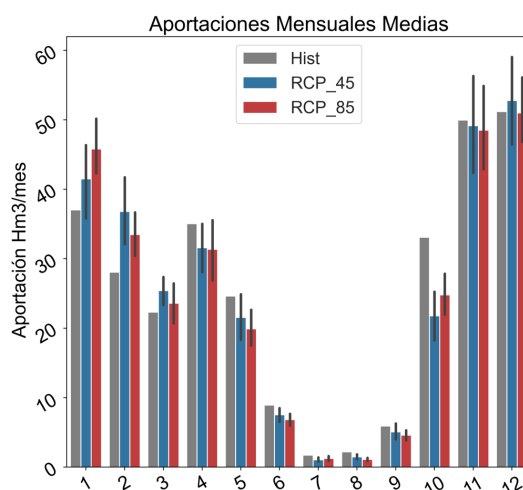
Además de evaluar cuáles son las fuentes de incertidumbre, puede ser necesario cuantificar esta incertidumbre en el estudio. Entre los métodos más reconocidos para cuantificar la incertidumbre se encuentra el método ANOVA (Bosshard et al., 2013). Esta técnica permite



cuantificar las distintas fuentes de incertidumbre y compararlas entre sí. La variable básica es la suma total del cuadrado de las diferencias de escurrimiento con relación al valor medio, para cada una de las tres fuentes de incertidumbre analizadas. La suma total se descompone en siete sumandos: tres valores de fuentes de incertidumbre individuales, tres combinaciones de dos fuentes y una combinación de las tres fuentes. Los términos de interacción tienen en cuenta los efectos no lineales y no aditivos de las tres fuentes. Este tipo de análisis suele poner de manifiesto que la variabilidad asociada a los distintos modelos climáticos es incluso mayor que la asociada a los distintos escenarios de emisiones.

Otra de las formas de evaluar la incertidumbre existente en los estudios de cambio climático es calculando diferentes estadísticos, como puede ser la media, la varianza, los cuantiles... para cada uno de los modelos, y observar como resultado final la dispersión de los valores de estos estadísticos. Un ejemplo de este tipo de análisis es el que se presenta en la Figura 12, que corresponde a los valores de aportación mensual. Cada barra del gráfico representa la mediana de los valores medios de aportaciones que cada uno de los modelos climáticos proporciona en los escenarios de cambio climático, en el caso de la barra que representa el período histórico se representa la media del periodo histórico. En el caso de las mechas de las barras que representan el cambio climático, éstas indican la variación o dispersión del conjunto de los modelos en un mes determinado.

Figura 12. Ejemplo de análisis de incertidumbre.



Fuente: Elaboración propia

Con este tipo de análisis el usuario puede identificar aquellas situaciones más optimistas o pesimistas en el momento de valorar el riesgo asociado al impacto de cambio climático, además de ayudar al planteamiento de medidas para mitigar los efectos del cambio climático en los embalses.

5.8 Incorporación de estimaciones hidroclimáticas en la toma de decisiones

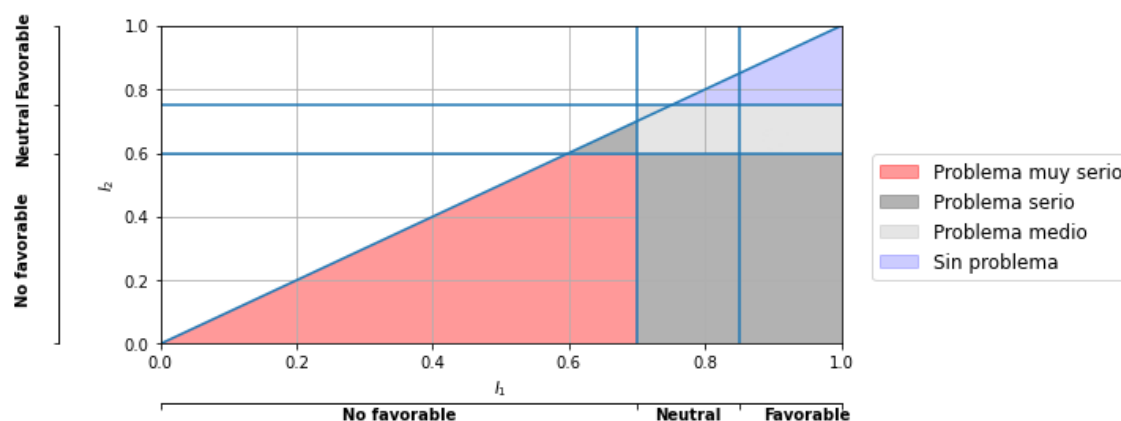
Tras la revisión del estado del arte, se ha observado que uno de los efectos que tendrá el cambio climático en España será la reducción de la precipitación, lo que conlleva a posibles escenarios de escasez de recurso hídrico. Por esta razón, algunos estudios, generalmente los que evalúan las cuencas, examinan el problema planteado estableciendo indicadores que permiten valorar la fiabilidad de los recursos para satisfacer la demanda de agua. Uno de los estudios que plantea este tipo de análisis es (Chavez-Jimenez et al., 2013), donde se ofrece y valida una metodología de uso general para caracterizar el comportamiento de los sistemas de recursos hídricos expuestos a los riesgos asociados al cambio climático, mediante la



evaluación de la sensibilidad de los indicadores de rendimiento bajo un amplio rango de escenarios climáticos, tomando como variable de partida las aportaciones al embalse en los distintos escenarios de cambio climático planteados.

La metodología trabaja bajo dos conceptos: sistema y región. Sistema es la unidad a través de la cual se puede modelar la explotación de los recursos hídricos como un conjunto de elementos relacionados dinámicamente, que realizan una actividad para cumplir con el objetivo de satisfacer la demanda. Dentro del sistema es posible definir el análisis de regiones (Figura 13) que permiten identificar problemas de escasez de agua en los embalses. Este tipo de análisis, junto con el modelo de gestión de embalses que se disponga, permite plantear medidas de adaptación que permitan reducir el riesgo de presentar problemas serios y muy serios. Estas medidas pueden ir desde realizar recrecimientos de embalses, establecer nuevas reglas de operación de los embalses o realizar una reordenación de las demandas.

Figura 13. Análisis de regiones para identificar posibles problemas de escasez de agua.



Fuente: Elaboración propia. Adaptado de (Chavez-Jimenez et al., 2013)

Además de conocer la posible afección del cambio climático sobre los embalses, interesa saber cómo será la gravedad de las sequías, la duración y la intensidad, además de su probabilidad. Este tipo de análisis puede abordarse a través del SSFI. En (Motevali Bashi Naeini et al., 2021a) se utiliza el índice SPI para identificar los periodos de retorno asociados a las sequías. Esta metodología se puede aplicar al índice SSFI, dado que se comportan de la misma manera, aunque lo único que cambia es la variable de estudio.

Según la definición, la duración de la sequía significa los meses consecutivos en los que el valor del SSFI es inferior a (-1). La gravedad de la sequía es el valor absoluto de los valores acumulados del SSFI en los períodos en los que los valores del SSFI son sistemáticamente inferiores a (-1), y la intensidad máxima de la sequía es el valor mínimo del SSFI para cada evento de sequía. Para determinar las características de la sequía se pueden utilizar funciones de distribución, como la función de distribución log-normal, la función de distribución exponencial, la función de distribución gamma y la función de distribución Weibull. El ajuste de estas funciones a los parámetros que definen una sequía permite el uso de cópulas (Motevali Bashi Naeini et al., 2021a) para generar eventos sintéticos y calcular los periodos de retorno asociados a cada uno de los eventos de sequías u obtener los parámetros de una sequía para un período de retorno dado. La utilización de este tipo de metodología se debe a la escasa cantidad de información que se tiene de las series de aportaciones y a su vez del índice SSFI para el cálculo de periodos de retorno; sin embargo, con esta metodología se pueden generar miles de eventos sintéticos que recojan la posible variabilidad de las sequías en la zona de estudio y así tener años suficientes para calcular un periodo de retorno.



6 Metodología para el estudio de aportaciones mínimas a embalses

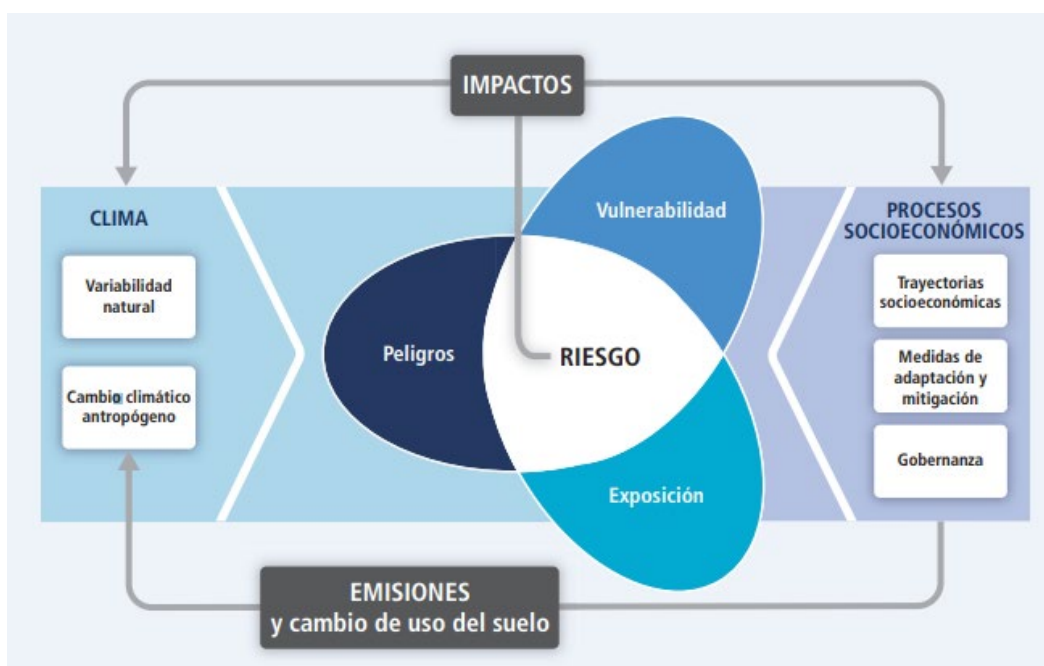
En este apartado se describe paso a paso la metodología para analizar las aportaciones mínimas a embalse, y principalmente el riesgo climático existente, evaluando todos los aspectos que integran este término.

6.1 Introducción

Es en el quinto Informe de evaluación del IPCC (AR5) donde el concepto de “riesgo” adquiere un papel protagonista a la hora de evaluar los retos asociados al cambio climático y definir una respuesta para mitigar los efectos. En la metodología de análisis propuesta en esta guía, el concepto de “riesgo” integra las componentes de la vulnerabilidad, la exposición y la amenaza de la forma que se ilustra en la Figura 14.

En el mismo informe, el IPCC destaca también que el concepto de vulnerabilidad está caracterizado por las componentes de sensibilidad y capacidad adaptativa.

Figura 14. Modelo conceptual para la evaluación de los efectos del cambio climático de acuerdo con el quinto Informe de evaluación del IPCC.



Fuente: (IPCC, 2014)

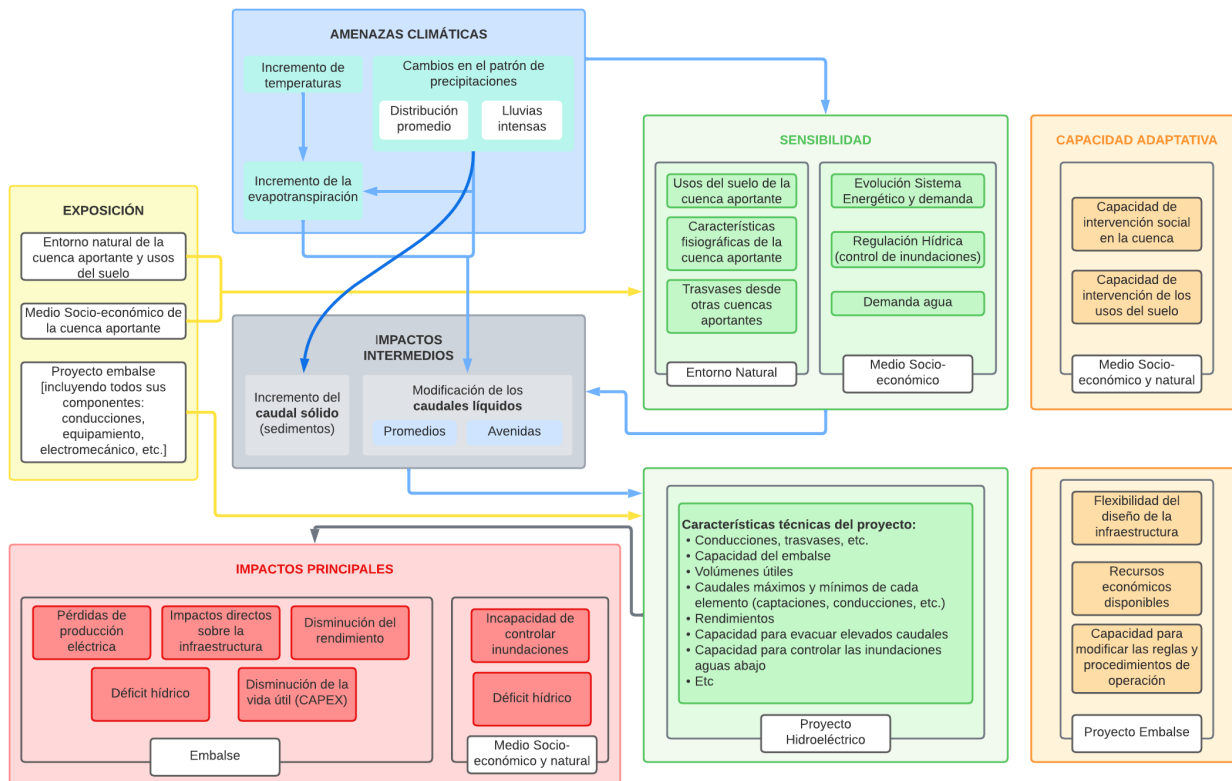
El tipo de estudios en los que se centra esta guía es el **análisis de la vulnerabilidad de los embalses entendiendo como amenaza la reducción de las aportaciones a los embalses**. Los embalses tienen unas implicaciones sociales y ambientales complejas, ya que intervienen diferentes aspectos “aguas arriba” y “aguas abajo” de donde se localiza el proyecto de estudio. Por ello, los componentes del riesgo climático de estos proyectos son muy diversos. La Figura 15 resume estos aspectos para una cuenca donde se localiza un embalse con diferentes objetivos de explotación. Es necesario destacar que, por el elevado número de posibles objetivos con los que pueden contar estos proyectos, pueden existir particularidades que no se recojan en la misma.

En los apartados siguientes se expone la metodología a seguir para evaluar el impacto del cambio climático en los embalses, atendiendo principalmente a las aportaciones mínimas. Este



tipo de metodología tratan de valorar el riesgo que puede ocurrir si las aportaciones mínimas se reducen. El riesgo puede venir asociado a la reducción del recurso hídrico disponible, la afeción de la demanda o la repercusión sobre el medio natural.

Figura 15. Componentes de riesgo para los proyectos de embalses.



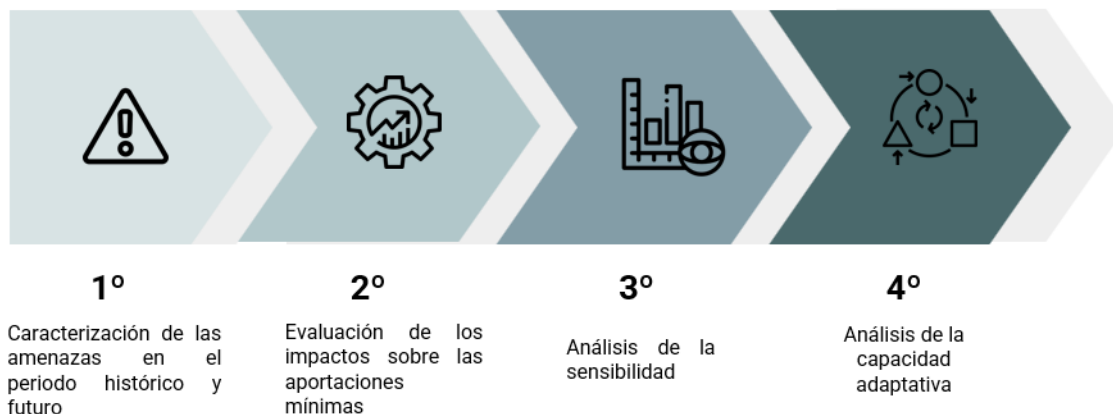
Fuente: Elaboración propia.

6.2 Diagrama de aplicación de la metodología

A continuación, en la Figura 16 y Figura 17 se muestra el esquema metodológico a seguir para la evaluación del impacto del cambio climático en las aportaciones a embalses. En la Figura 16 se presenta un esquema general atendiendo a los aspectos principales de cualquier estudio de riesgo climático. En base a estos aspectos principales, en la Figura 17 se detalla cuáles son los diferentes pasos para la consecución de los objetivos que la Figura 16 muestra de forma general. Cada uno de los pasos a seguir tiene un color asociado para que pueda identificarse cada uno de los pasos a qué objetivo corresponde.

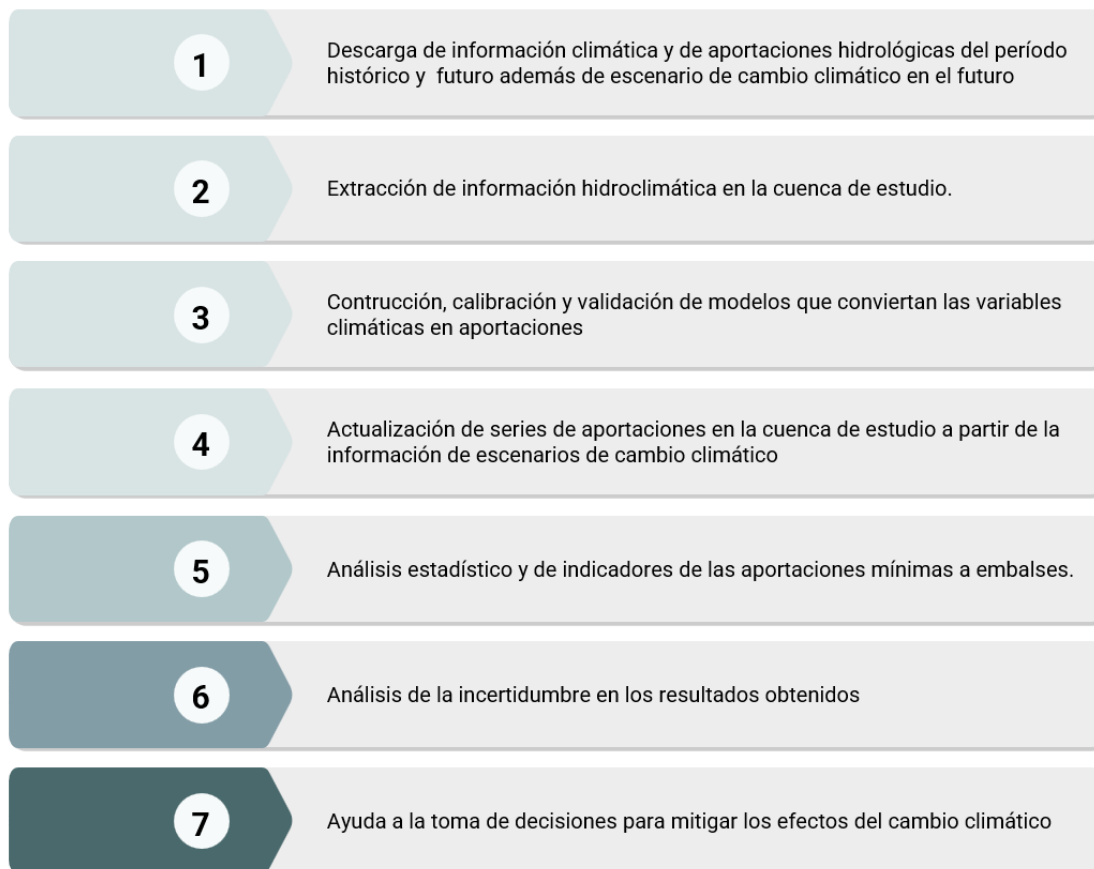


Figura 16. Esquema metodológico general.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 17. Esquema metodológico detallado.



Fuente: Elaboración propia.

En los siguientes apartados se explica de forma detallada cada uno de los pasos que el esquema metodológico muestra. Además, es necesario destacar que la metodología propuesta está implementada en la herramienta adjunta a esta guía.



6.3 Definición de la metodología

Antes de proceder a describir la metodología es pertinente aclarar ciertos aspectos metodológicos de los que depende el desarrollo de la metodología que en esta guía se propone.

Para realizar estudios de aportaciones mínimas a embalses se opta por una **resolución temporal mensual**. Esto es debido a que, en cuencas reguladas, los cambios que se producen en el recurso hídrico disponible tienen una mayor visión global a escala mensual; por tanto, para observar y analizar la influencia del cambio climático en las aportaciones a embalses, una resolución temporal mensual es suficiente.

La metodología que en esta guía se propone **no analiza eventos extremos puntuales**, es decir, eventos máximos o mínimos que afectan únicamente un mes. Sin embargo, al trabajar con series mensuales de aportaciones es posible reproducir las persistencias y las secuencias de meses consecutivos con aportaciones muy bajas, lo que permite identificar aquellos eventos con aportaciones mínimas e identificar las características de las sequías.

Los datos de partida que se propone utilizar proceden de **bases de datos oficiales a nivel nacional**, lo que permite acceder a ellos de forma sencilla y que garantiza que éstos han seguido un control de calidad, además de constituir una referencia oficial.

La **metodología** que se expone en esta guía busca ser **replicable** a través de la herramienta que la acompaña, o de las propias de cada usuario, siguiendo los pasos establecidos en la Figura 16 y Figura 17.

A continuación, se expone cada uno de los pasos a seguir siguiendo el diagrama de flujo descrito anteriormente.

6.3.1 Descarga de información

El primer paso que es necesario realizar en cualquier estudio de impacto de cambio climático, es obtener las fuentes de información que permitan desarrollar el estudio, tanto para el período histórico (también llamado período de control), como para analizar escenarios futuros de cambio climático. Es importante definir previamente la resolución temporal a la que se desea trabajar, ya que dependiendo de la resolución pueden utilizarse unas fuentes de información u otras.

Como se especifica en el apartado 5.2 existen diversas fuentes de datos a nivel nacional; sin embargo, para el desarrollo de esta metodología se proponen dos fuentes de datos que permiten obtener datos climáticos y datos de aportaciones en la red fluvial española.

Los datos necesarios para la aplicación de esta guía son:

- Datos climáticos para el período histórico o de referencia.
- Datos de aportaciones en la red hídrica española.
- Datos de cambio climático

A continuación, se describe el proceso de descarga de cada una de las fuentes de datos. Es necesario destacar que todo el proceso está automatizado en la aplicación desarrollada y que se explicará en el ANEXO C.

6.3.1.1 Datos climáticos para el período histórico o de referencia

Una de las bases de datos que se propone utilizar es SPAIN02 versión v5 (Herrera et al., 2012b), que proporciona datos mensuales de precipitación y temperatura para el período de 1950 a 2015 en una rejilla regular de resolución de 0,1° (~10km).












Los datos pueden ser descargados en el siguiente enlace²⁴:



Los datos se descargan en un fichero comprimido donde se encuentran bases de datos para las variables precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima en formato netcdf²⁵. Una vez descomprimido el fichero, se encuentran dichas variables en diferentes resoluciones temporales (anual, diario y mensual), aunque sólo serán utilizadas en la aplicación de esta guía las bases de datos mensuales.

En la Figura 18 se muestra la distribución de ficheros de la descarga de la base de datos SPAIN02 v5. Como se puede observar, existen diferentes ficheros con distintos nombres, pero en esta metodología sólo son utilizados los que contienen como comienzo de nombre "Spain02_V5.0_MM" que se corresponden con los datos mensuales.

Figura 18. Distribución de ficheros de la base de datos de SPAIN02 v5"

-  Spain02_v5.0_DD_010reg_aa3d_pr.nc
-  Spain02_v5.0_DD_010reg_aa3d_tas.nc
-  Spain02_v5.0_DD_010reg_aa3d_tasmax.nc
-  Spain02_v5.0_DD_010reg_aa3d_tasmin.nc
-  Spain02_v5.0_DD_010reg_orog.nc
-  Spain02_v5.0_MM_010reg_aa3d_pr.nc
-  Spain02_v5.0_MM_010reg_aa3d_tas.nc
-  Spain02_v5.0_MM_010reg_aa3d_tasmax.nc
-  Spain02_v5.0_MM_010reg_aa3d_tasmin.nc

6.3.1.2 Datos de aportaciones para la red hídrica española.

Otra de las fuentes de datos que se propone para analizar el período histórico en cuanto a las aportaciones de la red hídrica española es la correspondiente al modelo SIMPA. A partir del modelo hidrológico SIMPA se realiza en España (CEDEX 2019) la evaluación de los recursos hídricos en régimen natural. Como resultado del modelado se obtienen las variables hidrológicas y climáticas a escala mensual desde el año 1940 hasta el año 2018 con una resolución espacial de 500 m.

²⁴ Los enlaces web de descarga podrían no funcionar debido a que podrían verse modificados o eliminados por las instituciones que los alojan. Si se diera esta situación se recomienda realizar la consulta sobre estos datos a las instituciones responsables:

SPAIN02 (Grupo de Meteorología de la Universidad de Cantabria - <http://www.meteo.unican.es>)

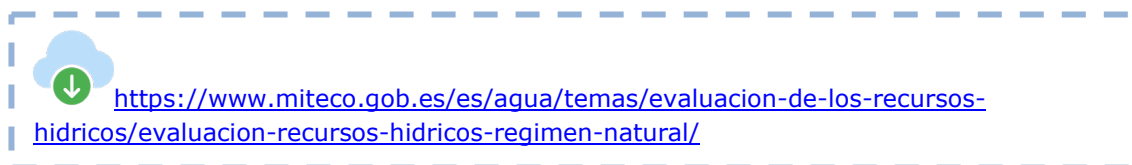
SIMPA (Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX - <http://www.cedex.es>)

CORDEX-AEMET (Agencia Estatal de Meteorología - <https://www.aemet.es>)

²⁵ El netCDF (formulario de datos comunes en red) es un formato de archivo destinado a almacenar datos científicos multidimensionales (variables) como la temperatura, la humedad, la presión, la velocidad del viento y la dirección. Cada una de estas variables se puede mostrar mediante una dimensión (por ejemplo, tiempo) en ArcGIS creando una vista de tabla o de capa a partir del archivo netCDF.



Los datos pueden ser descargados en el siguiente enlace²⁴:



En este caso los datos se proporcionan en formato ráster en carpetas comprimidas en periodos de 10 años. En cada fichero se encuentran datos mensuales. La descarga es necesaria realizarla por periodo de tiempo, lo que supone un mayor tiempo. En la Figura 19 se muestra la distribución de los ficheros de descarga para la variable aportaciones en la página web.

Figura 19. Ejemplo distribución de ficheros de descarga de aportaciones desde la página web



Una vez descargado el fichero de una variable y periodo determinado, y descomprimido, se obtienen ficheros ráster en formato “.asc” para cada año y mes.

6.3.1.3 Datos de cambio climático

En la metodología que se propone en esta guía, para analizar el cambio climático se utilizan los datos de los pronósticos climáticos para el siglo XXI sobre España, realizado por AEMET del proyecto CORDEX²⁶ a resolución temporal mensual. Estos datos son proporcionados en formato “ráster” con una resolución espacial de 12,5 km²⁴.



Los datos se descargan en ficheros comprimidos para cada escenario de cambio climático (**Histórico, RCP 4.5 y RCP 8.5**). En la Figura 20 se muestra un ejemplo de la configuración de descarga desde la página web de AEMET.

²⁶ https://www.aemet.es/documentos/es/serviciosclimaticos/cambio_climat/datos_mensuales/ANEXO-CORDEX_Guia_de_usuario.pdf



Figura 20. Ejemplo de descarga de datos de cambio climático.

Variable	Escenario	Proyecto	Formato	Fichero
Tª máxima	HISTORICAL	CORDEX	SIG	Descargar fichero (119 MB)
Tª máxima	RCP4.5	CORDEX	SIG	Descargar fichero (275 MB)
Tª máxima	RCP8.5	CORDEX	SIG	Descargar fichero (276 MB)

Cada uno de los ficheros comprimidos lo componen a su vez ficheros en formato ráster “.txt” para cada modelo de cambio climático, mes y año. **El número total de modelos que pueden descargarse es un total de 10.** En la Figura 21 se muestra un ejemplo de la distribución de ficheros tras descomprimir el fichero que se descarga desde la página de AEMET.

Figura 21. Ejemplo de distribución de ficheros en la descarga de ficheros comprimidos de la página web de AEMET.

- TXMM_CLMcom-CCLM4-8-17_CNRM-CERFACS-CNRM-CM5_HISTORICAL_r1i1p1_196101
- TXMM_CLMcom-CCLM4-8-17_CNRM-CERFACS-CNRM-CM5_HISTORICAL_r1i1p1_196102
- TXMM_CLMcom-CCLM4-8-17_CNRM-CERFACS-CNRM-CM5_HISTORICAL_r1i1p1_196103
- TXMM_CLMcom-CCLM4-8-17_CNRM-CERFACS-CNRM-CM5_HISTORICAL_r1i1p1_196104
- TXMM_CLMcom-CCLM4-8-17_CNRM-CERFACS-CNRM-CM5_HISTORICAL_r1i1p1_196105
- TXMM_CLMcom-CCLM4-8-17_CNRM-CERFACS-CNRM-CM5_HISTORICAL_r1i1p1_196106
- TXMM_CLMcom-CCLM4-8-17_CNRM-CERFACS-CNRM-CM5_HISTORICAL_r1i1p1_196107
- TXMM_CLMcom-CCLM4-8-17_CNRM-CERFACS-CNRM-CM5_HISTORICAL_r1i1p1_196108
- TXMM_CLMcom-CCLM4-8-17_CNRM-CERFACS-CNRM-CM5_HISTORICAL_r1i1p1_196109
- TXMM_CLMcom-CCLM4-8-17_CNRM-CERFACS-CNRM-CM5_HISTORICAL_r1i1p1_196110
- TXMM_CLMcom-CCLM4-8-17_CNRM-CERFACS-CNRM-CM5_HISTORICAL_r1i1p1_196111
- TXMM_CLMcom-CCLM4-8-17_CNRM-CERFACS-CNRM-CM5_HISTORICAL_r1i1p1_196112
- TXMM_CLMcom-CCLM4-8-17_CNRM-CERFACS-CNRM-CM5_HISTORICAL_r1i1p1_196201

6.3.2 Extracción de información hidroclimática en la cuenca de estudio

Una vez que han sido descargados los datos hidroclimáticos necesarios, se procede a definir la cuenca de estudio y extraer los datos en la misma. Para ello se siguen una serie de pasos que se definen en la Figura 22 de forma general.



Figura 22. Proceso de extracción hidroclimática en la cuenca de estudio.



Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 10 se muestran los datos de partida que son necesarios para realizar proceso descrito anteriormente y los resultados que se obtienen.

Tabla 10. Inputs de partida y resultados del proceso de extracción de información hidroclimática en la zona de estudio

Inputs de partida	Resultados
Coordenadas del punto donde se localiza el embalse de estudio	Fichero en formato shapefile del contorno de la cuenca
	Fichero csv con la serie temporal de precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima de los puntos de la cuenca
	Fichero csv con la serie temporal de aportaciones en el punto donde se localiza el embalse
	Fichero csv con las coordenadas de los puntos donde se extraen los datos climáticos en el interior de la cuenca

A continuación, se describen los pasos de forma detallada.

1. Localización

El primer paso que es necesario realizar es localizar el punto donde se encuentra la presa que se desea estudiar. La localización se realiza a través de las coordenadas del punto en metros. Debido a la diversidad de sistemas de coordenadas, se toma como sistema de referencia el **EPSG:25830 (ETRS89 / UTM zona 30N)**²⁷.

2. Definición de la cuenca aportante

Una vez definidas las coordenadas del punto donde se localiza la presa de estudio, se delimita la cuenca aportante a través de las propiedades geomorfológicas que se pueden obtener de un modelo digital del terreno, como son las direcciones de flujo y la acumulación de flujo. Estas propiedades pueden ser obtenidas a través de herramientas que poseen los sistemas de información geográfica.

Con la herramienta que se proporciona con esta guía es posible delimitar la cuenca aportante a un punto dado, a partir de dos ficheros ráster que contiene y que se corresponden con las

²⁷ <https://spatialreference.org/ref/epsg/25830/>

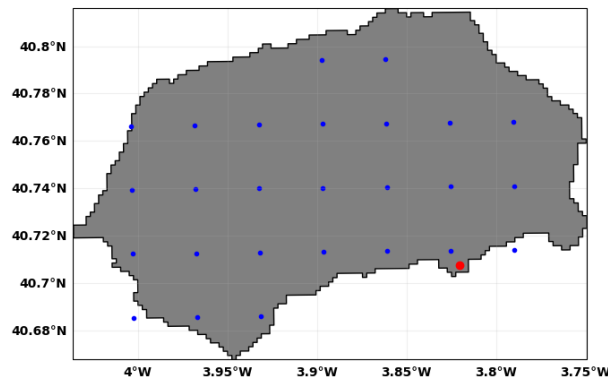


direcciones de flujo y el flujo acumulado de toda la Península Ibérica con una resolución de 500m. Además, es posible extraer la cuenca vertiente de forma automática dando como resultado un fichero en formato *shapefile* (.shp) con el contorno de la cuenca vertiente como se puede observar en la Figura 23.

3. Definición de la malla de puntos distribuidos en la cuenca

Una vez que se ha definido la cuenca vertiente, es necesario establecer una malla de puntos geolocalizados distribuidos en la zona de estudio donde posteriormente se extraerán los datos climáticos. En este caso los puntos se extraen de las mallas de propiedades geomorfológicas, es decir, al ser capas en formato ráster, es posible extraer los centros de las celdas que se encuentran en el interior de la cuenca definida. Como puede observarse en el ejemplo de la Figura 23, los puntos en azul son en los que se extrae la información climática que permita definir las propiedades climáticas de la cuenca de estudio.

Figura 23: Resultados del proceso de definición de la cuenca aportante y de la malla de puntos distribuidos.



Fuente: Elaboración propia.

4. Extracción de los datos hidroclimáticos.

Los datos climáticos que se propone utilizar en esta guía se encuentran en formato matricial geolocalizados, esto permite extraer de forma directa los datos del punto más cercano al punto de la malla definida en la cuenca. Por tanto, para obtener los datos climáticos, se procede de forma iterativa a recorrer cada uno de los puntos de la malla y a extraer la información de la celda más cercana de los datos climáticos para cada año y mes. En este proceso iterativo se va construyendo una serie temporal de forma tabulada, en la que en las columnas se encuentra cada uno de los puntos y en las filas cada mes del año desde 1950 hasta 2016.

En el caso de las aportaciones, se procede de la misma forma, se localiza la celda más cercana al punto donde se encuentra la presa de la malla de aportaciones de SIMPA.

5. Exportado de resultados en ficheros CSV.

El formato de fichero de resultados más útil es el formato CSV (valores delimitados por comas). Este tipo de fichero puede abrirse con cualquier lector de texto plano y es fácilmente utilizable con cualquier lenguaje de programación.

Una vez que se configuran las tablas que contienen las series temporales de las variables hidroclimáticas en cada uno de los puntos, se procede a exportar esta información en forma de ficheros CSV. Estos ficheros serán necesarios en procesos posteriores por lo que tienen que ser debidamente localizados en el equipo de trabajo.



6.3.3 Construcción, calibración y validación del modelo de regresión.

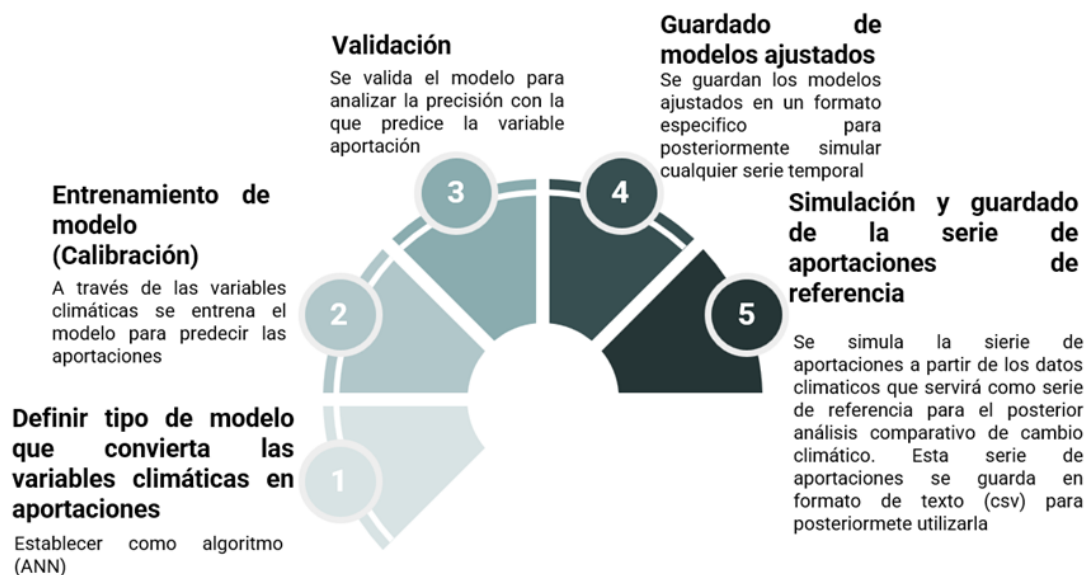
En la metodología que se expone en esta guía se propone la utilización de algoritmos de regresión basados en redes neuronales (ANN) que sustituyan a los modelos hidrológicos. Esto es posible debido a la resolución temporal mensual que se establece en esta metodología. El uso de algoritmos de regresión facilita el proceso iterativo de calibración, ya que dicho proceso es realizado de forma automática y precisa. La elección del algoritmo de ANN frente a los que aparecen en fuentes bibliográficas se debe principalmente al tiempo computacional necesario para ajustar los modelos y a la alta predictibilidad que se consigue en las aportaciones.

Una vez definido el algoritmo de regresión que se utiliza en la metodología, es necesario especificar cuáles son las variables predictoras (variables a partir de las cuales se predice) y cuál es el predictando (variable que se predice) en la configuración de cualquiera de los algoritmos.

En este tipo de estudios las principales variables predictoras son las variables climáticas precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima, a resolución mensual. Estas variables permiten configurar los modelos de redes neuronales para obtener como resultado las aportaciones de una cuenca vertiente en un punto dado. En estos modelos es necesario realizar un entrenamiento (calibración) a partir de series de aportaciones previamente obtenidas de fuentes de datos u observaciones.

A continuación, en la Figura 24 se muestra el proceso a seguir para configurar, calibrar y validar los modelos de redes neuronales que permitan reproducir las aportaciones en un periodo de tiempo a partir de las variables climáticas.

Figura 24: Proceso de construcción, calibración y validación de modelos de regresión.



Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 11 se muestran los datos de partida que son necesarios para realizar el proceso descrito anteriormente y los resultados que se obtienen.



Tabla 11. Inputs de partida y resultados del proceso de configuración, calibración y validación de modelos de regresión.

Inputs de partida		Resultados
Tipo de algoritmo		Ficheros de configuración de los modelos para posteriormente ser utilizados
Series temporales de las variables climáticas		
Serie temporal de aportaciones		

1. Definir el tipo de modelo que convierta las variables climáticas en series de aportaciones

El primer paso a seguir es la elección del tipo de modelo que convierta las variables climáticas en aportaciones como puede ser un modelo hidrológico o como en esta metodología, modelos de regresión. Como se ha comentado anteriormente en esta metodología se propone el uso de ANN (redes neuronales artificiales).

2. Entrenamiento del modelo

Una vez que se tiene definido el tipo de modelo que se desea utilizar, se requiere definir las variables climáticas necesarias; en la metodología descrita en esta guía se utiliza la precipitación, la temperatura máxima mensual media (la media de las temperaturas máximas del mes) y la temperatura mínima mensual media (la media de las temperaturas mínimas del mes).

Una vez definidas las variables climáticas que se utilizan, es preciso estructurar tanto los predictores como el predictando en forma de matriz para que el modelo de redes neuronales pueda ejecutarse correctamente. La configuración matricial consiste en unir todos los datos climáticos de los puntos de la cuenca extraídos en el apartado 6.3.2.

En la expresión (5) se muestra la configuración matricial necesaria en la que en las filas se encuentran los valores de precipitación y temperatura de cada mes del año (t) y en las columnas los puntos distribuidos en la cuenca (n). En la columna final se encuentra la serie temporal de las aportaciones del punto de estudio.

$$\begin{array}{ccccccc}
 P_{1,1} & T_{max_{1,1}} & T_{min_{1,1}} & \dots & P_{1,n} & T_{max_{1,n}} & T_{min_{1,n}} & \longrightarrow & Aport_1 \\
 \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & & \dots \\
 P_{t,1} & T_{max_{t,1}} & T_{min_{t,1}} & \dots & P_{t,n} & T_{max_{t,n}} & T_{min_{t,n}} & \longrightarrow & Aport_t
 \end{array} \quad (5)$$

En la utilización de inteligencia artificial uno de los problemas que pueden existir es el sobreajuste u *overfitting*, en pocas palabras, significa tener en cuenta demasiada información de sus datos y / o conocimientos previos, y utilizarla en un modelo.

En el caso de la utilización de puntos distribuidos en las cuencas donde se introduce la información climática que permitan reproducir las aportaciones, dan lugar a sobreajustes cuando el área de la cuenca tiene un tamaño considerable. Por esta razón es necesario redimensionar la matriz que se muestra en la expresión (5) a través de componentes principales (PCA). *Principal Component Analysis* (PCA) es un método estadístico que permite simplificar la complejidad de espacios muestrales con muchas dimensiones a la vez que conserva su información. En esta metodología se utiliza el método PCA que explique el 95% de la varianza del conjunto de los datos, por lo que la matriz de la expresión (5) quedaría reducida a un número de columnas inferior que representan el conjunto de los datos considerados inicialmente.

Configurados los datos de la forma descrita anteriormente y reducida la dimensión, se proceden a entrenar y validar el modelo de redes neuronales.



La forma de entrenar o calibrar un modelo de redes neuronales es a través de la búsqueda de la mejor configuración de parámetros para minimizar o maximizar la métrica deseada. En las herramientas desarrolladas en esta guía se trata de maximizar el coeficiente de determinación (R^2), maximizar el coeficiente Nash-Sutcliffe (NSE) y minimizar el porcentaje de sesgo (PBIAS), en los siguientes apartados se explica cada una de estas métricas.

El proceso de optimización consta de dos fases, una fase propiamente de *entrenamiento* a partir del 80% de los datos de aportaciones desde el año 1950 hasta 2015, y una fase de *prueba* que utiliza el 20% de los datos para verificar el ajuste realizado. Con este proceso se consiguen generar modelos que reproduzcan de forma fidedigna las series de aportaciones en el punto de estudio considerado.

3. Validación de los modelos

Al ser una variable hidrológica lo que se obtiene como resultado de los modelos, es necesario realizar un análisis para validar que el modelo reproduce el comportamiento hidrológico de forma adecuada. Para ello se utilizan dos criterios basados en métricas como son:

- Coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe a nivel mensual (NSE) (D. N. Moriasi et al., 2007)
- Porcentaje de sesgo (PBIAS)

Una vez que el modelo está configurado se simula un periodo de tiempo entre 5 y 10 años para poder ser comparada la serie resultante con la serie adoptada como real.

El coeficiente de eficiencia NSE es uno de los más usados en hidrología para la comprobación de que los ajustes simulados son aceptables. El rango de variación del citado coeficiente de eficiencia se sitúa entre $-\infty$ y 1, correspondiendo este último valor a un ajuste perfecto. Con respecto a la medida de la desviación del volumen, expresa cuantitativamente la relación entre el volumen del hidrograma observado y el simulado. El ajuste perfecto corresponde a un valor de PBIAS = 0, por lo que se debe obtener el valor más bajo del mismo. Esta media de bondad de ajuste es adecuada para análisis mensuales y anuales de aportaciones.

Valores positivos del coeficiente PBIAS, indican infraestimación de los valores de aportaciones simulados por el modelo. Por el contrario, valores negativos del mismo indican sobreestimación de las aportaciones simuladas por el modelo con respecto a los observados o tomados como referencia (D. N. Moriasi et al., 2007).

Los mencionados coeficientes se determinan a partir de las siguientes expresiones:

$$NSE = 1.0 - \frac{\sum_{i=1}^n (Aport_{oi} - Aport_{si})^2}{\sum_{i=1}^n (Aport_{oi} - Aport_{om})^2} \quad (6)$$

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (Aport_{oi} - Aport_{si})}{\sum_{i=1}^n (Aport_{oi})} * 100 \quad (7)$$

NSE: Coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe.

PBIAS: Desviación del volumen.

N: Número de parejas de caudales consideradas en el proceso de calibración.

Aport_{oi}: Aportaciones observadas en el instante *i*.

Aport_{si}: Aportaciones simuladas en el instante *i*.



$Aport_{om}$: Valor medio de los caudales observados a lo largo del período de calibración.

En función de la combinación del valor de dichos coeficientes (NSE y PBIAS) conjuntamente, se pueden distinguir distintos niveles de calidad del ajuste, según se indica en la tabla siguiente:

Tabla 12. Niveles de calidad del ajuste del nivel diario, en función del valor del coeficiente NSE y PBIAS.

Calidad del ajuste	NSE	PBIAS (%)
Excelente	$0,75 < NSE \leq 1,00$	$PBIAS < \pm 10$
Bueno	$0,65 < NSE \leq 0,75$	$\pm 10 \leq PBIAS < \pm 15$
Aceptable	$0,50 < NSE \leq 0,65$	$\pm 15 \leq PBIAS < \pm 25$
No aceptable	$NSE \leq 0,50$	$PBIAS \geq \pm 25$

Nota: conforme a Moriasi et al., 2007.

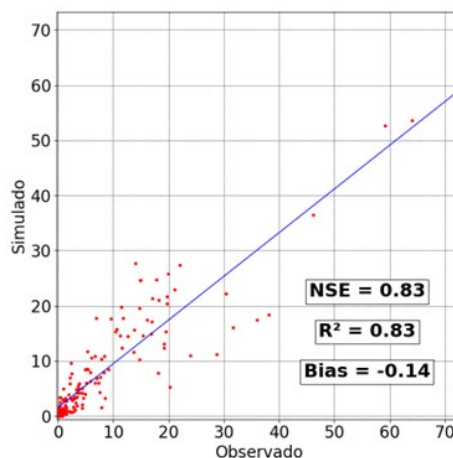
Otros de los coeficientes que se analizan es el coeficiente de determinación (R^2), medida estadística que define lo cerca están los datos de la línea de regresión ajustada y que refleja la bondad del ajuste de un modelo a la variable que pretender explicar. Es importante saber que el resultado del coeficiente de determinación oscila entre 0 y 1. Cuanto más cerca de 1 se sitúe su valor, mayor será el ajuste del modelo a la variable que estamos intentando explicar. De forma inversa, cuanto más cerca de cero, menos ajustado estará el modelo y, por tanto, menos fiable será.

$$R^2 = \frac{\sigma_{XY}^2}{\sigma_X^2 \sigma_Y^2} \quad (8)$$

Donde σ_{XY}^2 es la covarianza entre las aportaciones simuladas y las aportaciones observadas, σ_X^2 la varianza de las aportaciones observadas y σ_Y^2 la varianza de las aportaciones simuladas

Como resultado de validación del modelo calibrado, la aplicación de la herramienta de esta guía proporciona los coeficientes NSE, R^2 y PBIAS, utilizando para su cálculo el 20% de los datos restantes de la serie de aportaciones utilizada para calibrar el modelo, en este caso la de SIMPA, y las aportaciones resultantes de la red neuronal. Además, se obtiene de forma gráfica el grado de ajuste entre los resultados observados y simulados como se muestra en la Figura 25.

Figura 25: Validación de resultados obtenidos en la cuenca vertiente al Embalse 2.

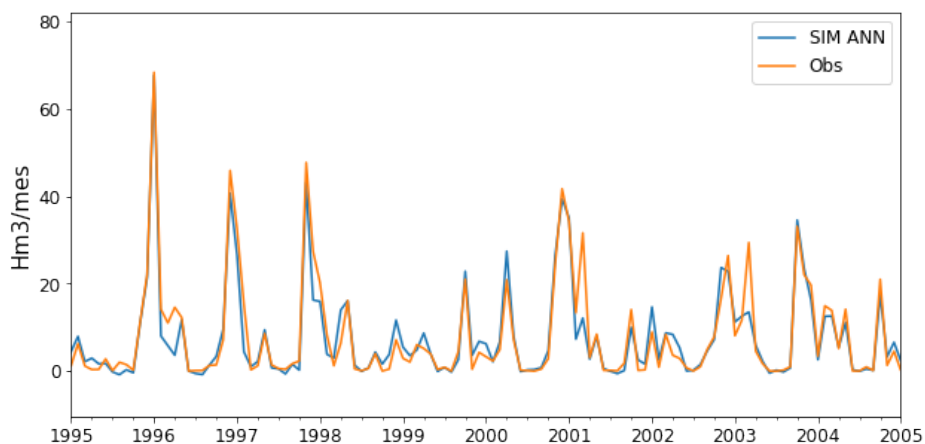


Fuente: Elaboración propia.



Además, a través de las herramientas proporcionadas con esta guía es posible comparar la serie temporal de forma gráfica, lo que permite identificar si el modelo reproduce la estacionalidad correctamente. En la Figura 26 se muestra un ejemplo de la comparativa entre la serie temporal de aportaciones simulada y la serie real. Como puede observarse los resultados obtenidos en este ejemplo tomando 5 años de análisis son de excelente calidad ya que se ajustan de forma adecuada a la serie de referencia de SIMPA.

Figura 26: Validación de serie temporal obtenida en la cuenca vertiente al Embalse 2.



Fuente: Elaboración propia.

4. Guardado de los modelos ajustados

Tras calibrar y validar los modelos, éstos se guardan en un formato determinado que permita posteriormente cargarlos para simular cualquier escenario climático. El tipo de fichero utilizado para guardar los parámetros ajustados de modelos de redes neuronales es el formato “.sav”, una extensión genérica que se utiliza para guardar los parámetros de ajuste de los modelos de regresión. Este tipo de ficheros permite cargar los modelos ajustados de forma automática e introducir en formato matricial las series temporales climáticas de los puntos distribuidos en la cuenca.

5. Simulación de la serie de aportaciones de referencia

Una vez configurado el modelo de redes neuronales es necesario realizar la simulación de la serie de aportaciones que servirá como referencia en el posterior análisis de cambio climático. A esta serie se le denomina serie histórica o serie de control. Cualquier análisis comparativo que se realice posteriormente con las series de cambio climático, para analizar los cambios que se producen con respecto al período histórico debe considerarse esta serie acotada al número de años definido en los diferentes periodos futuros, que en esta metodología se propone que sean 30 años (1976-2005).

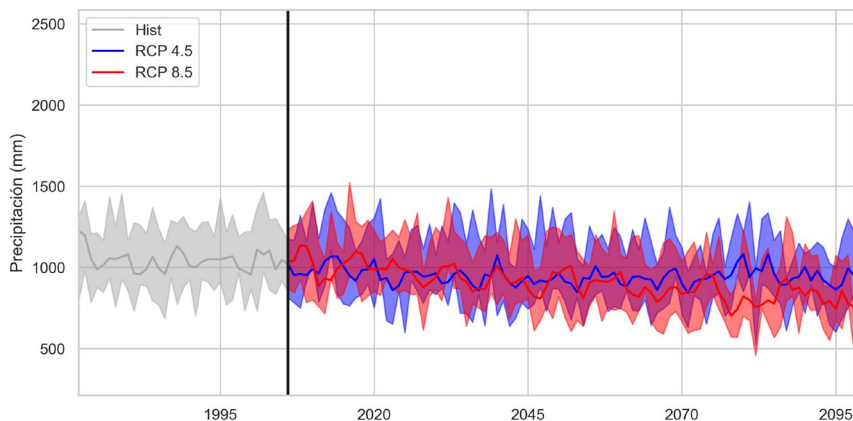
6.3.4 Actualización de series climáticas en la cuenca de estudio con la información de escenarios de cambio climático

Para poder evaluar cómo va a influir el cambio climático en la temperatura y la precipitación, es necesario utilizar el conjunto de las diferentes predicciones climáticas que permitan reproducir, a través de los modelos que transforman datos climáticos en aportaciones, cada uno de los modelos y escenarios de cambio climático.

En los estudios de cambio climático se debe tener en cuenta el amplio abanico de predicciones que proporcionan los modelos de cambio climático para cada uno de los escenarios de emisiones como se puede observar en la Figura 27.



Figura 27: Ejemplo de la serie temporal de precipitación de modelos de cambio climático para la cuenca aportante al Embalse 2



Fuente: Elaboración propia.

Uno de los principales inconvenientes de los pronósticos climáticos de los GCMs/RCMs es que no se pueden utilizar directamente en aplicaciones hidrológicas en cuencas, ya que presentan sesgos muy importantes. Por ello es importante reducir la escala de los modelos globales o regionales a través de la corrección de sesgo, utilizando series de referencia distribuidas en la cuenca (Cannon et al., 2015).

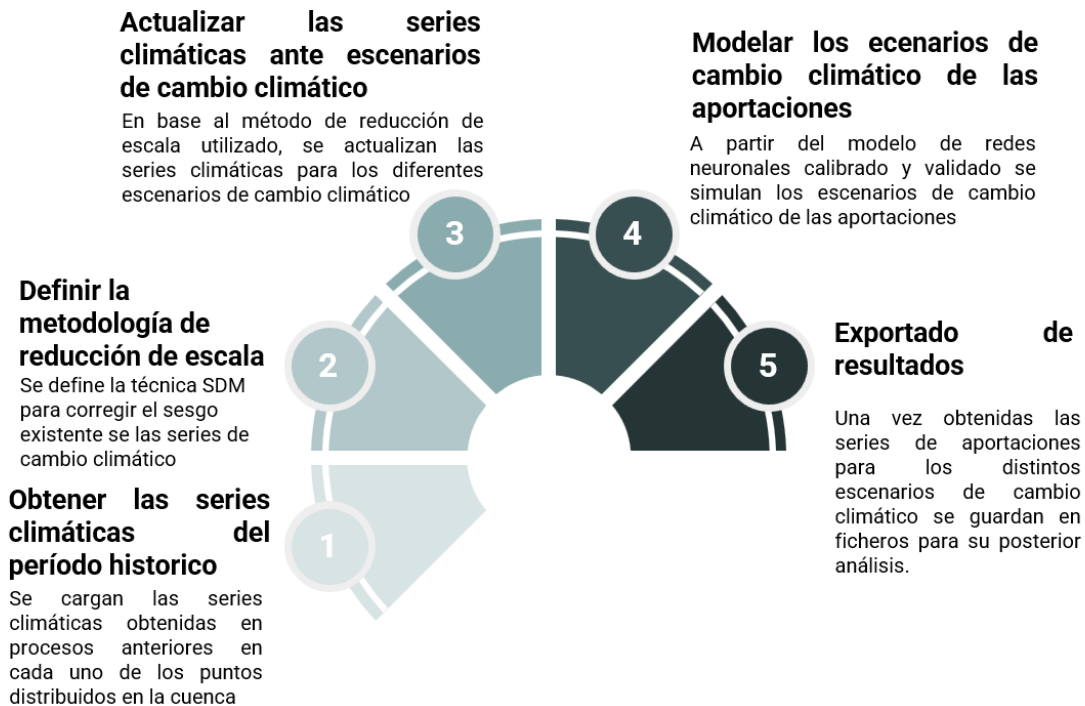
Como se refleja en el estado del arte (Apartado 5.4) existen diversos métodos de corrección de sesgo, sin embargo, en la metodología que se define en esta guía se propone utilizar el método de mapeo de cuantiles SDM (*Scaled Distribution Mapping* o Mapeo de distribución a escala). La elección de este método se debe a que tiene en cuenta la frecuencia de días de lluvia (para la precipitación) y la probabilidad de eventos, y porque no es necesario depender del supuesto inválido de estacionariedad. Además, este tipo de método permite corregir cada modelo de forma independiente obteniendo así una variedad de modelos de cambio climático para posteriormente evaluar la incertidumbre existente.

Por tanto, para llevar a cabo el análisis de la influencia del cambio climático de la forma adecuada, es necesario seguir los distintos pasos definidos en la Figura 28. El objetivo principal de esta parte de la metodología es obtener las series de aportaciones para los distintos escenarios climáticos a partir de las series climáticas utilizando los modelos de regresión previamente configurados, calibrados y validados.

A continuación, se definen cada uno de los pasos de forma detallada.



Figura 28: Proceso de construcción, calibración y validación de modelos de regresión.



Fuente: Elaboración propia.

1. Carga de las series climáticas del período histórico

Para poder reproducir las aportaciones en escenarios de cambio climático es necesario previamente actualizar las series climáticas, ya que será a partir de éstas como se obtengan las series de aportaciones. Por ello el primer paso es cargar las series climáticas para el período de referencia o periodo histórico. El período histórico considerado en estudios de cambio climático es desde **1976 hasta 2005**. Se considera el año de fin el 2005 ya que los escenarios de cambio climático comienzan en el año 2006. Como año de inicio se considera el año 1976 para considerar un período de referencia climatológico de unos 30 años, tal como lo define la Organización Meteorológica Mundial (OMM).

Por tanto, además de cargar las series climáticas, se debe extraer el intervalo de tiempo entre el año 1976 y 2005.

2. Definición del método de reducción de escala

Como se ha especificado anteriormente el método que se propone utilizar es el método de mapeo de cuantiles SDM (*Scaled Distribution Mapping* o Mapeo de distribución a escala), debido a que es un método que tiene en cuenta la frecuencia de días de lluvia (para la precipitación) y la probabilidad de eventos, y además no es necesario depender del supuesto inválido de estacionariedad. Al mismo tiempo, este método permite corregir cada modelo de forma independiente obteniendo así una variedad de modelos de cambio climático para posteriormente evaluar la incertidumbre existente.



3. Actualización de las series climáticas con escenarios de cambio climático

Antes de aplicar cualquier método de reducción de escala es necesario establecer los periodos de análisis a futuro. Un período de referencia climatológico popular es un período "normal" de unos 30 años, tal como lo define la Organización Meteorológica Mundial (OMM); por tanto, los períodos que se establecen en esta metodología para aplicar los métodos de reducción de escala son: **2011-2040, 2041-2070 y 2071-2100**.

Una vez establecidos los periodos de análisis se procede a actualizar las series climáticas ante escenarios de cambio climático. A continuación, se describe de forma detallada en qué consiste el método de mapeo de cuantiles SDM y el proceso a seguir.

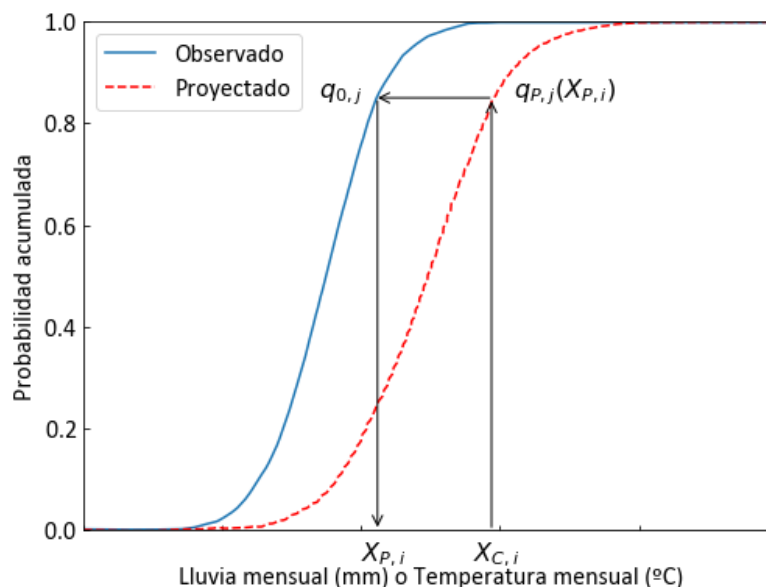
Para llevar a cabo la corrección mediante mapeo de cuantiles, se calcula el cuantil del valor del modelo (x^f) mediante la función de distribución del modelo (F_{mod}). Este cuantil se convierte de nuevo en valor de la variable mediante la inversa de la función de distribución de las observaciones (F_{obs}). El método del mapeo de cuantiles modifica la distribución completa de los datos modelados de manera no uniforme lo que permite un ajuste más fino del sesgo.

$$y_f = F_{obs}^{-1}(F_{mod}(x^f)), \quad (9)$$

En este caso las series observadas utilizadas como estaciones de referencia en esta metodología son las extraídas en los puntos distribuidos en la cuenca de estudio.

Para la función de distribución puede utilizarse un amplio abanico de opciones (Gaussiana, Gamma, Exponencial, etc.), en el caso de aplicar el método SDM, la función de distribución será la Gamma para la variable precipitación y normal para la variable temperatura, por tanto, durante el proceso de corrección es necesario definir el tipo de variable climática que se esté estudiando ya que la forma de calibrar la función de distribución es distinta.

Figura 29: Ejemplo mapeo de cuantiles.



Fuente: Elaboración propia.

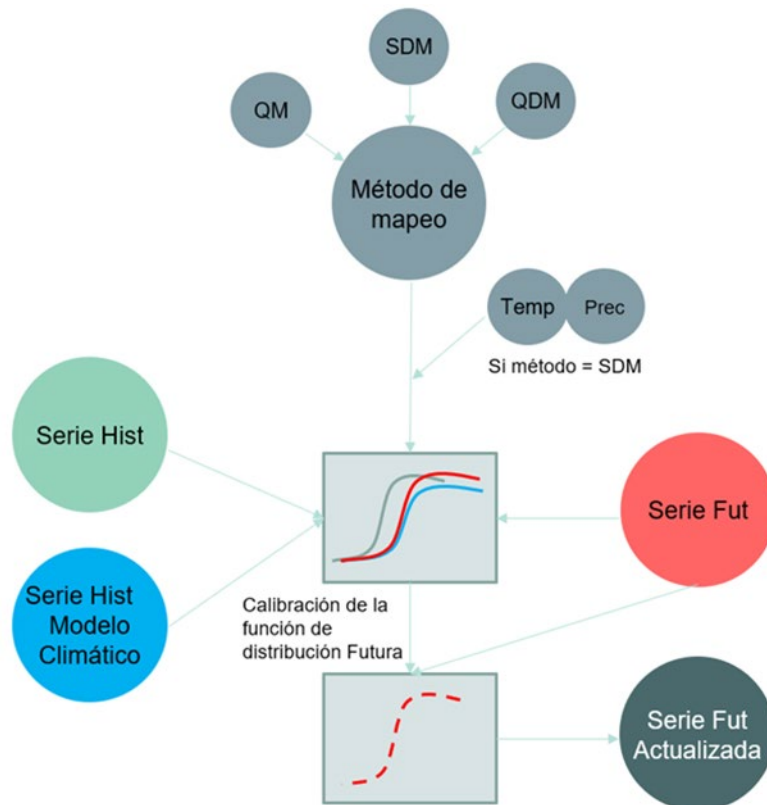
Nota: La línea continua representa la función de distribución de las observaciones, mientras que la línea discontinua representa la función de distribución del modelo.



Es importante destacar que las técnicas de corrección del sesgo pretenden reducir o eliminar los errores sistemáticos cometidos por el modelo, pero este sesgo no tendría por qué ser homogéneo a lo largo del tiempo. Por ello, las técnicas de corrección de sesgo normalmente se aplican por meses o estaciones, asumiendo que el error sistemático del modelo no es independiente de las condiciones reinantes. Es decir, puede que un modelo sea capaz de capturar adecuadamente las dinámicas en épocas húmedas, pero no en las secas; o que reproduzca de forma más precisa la radiación durante la época estival que en invierno.

En la Figura 30 se muestra de forma esquemática el proceso que se sigue en la aplicación de métodos de mapeo para actualizar las series climática a futuro.

Figura 30: Proceso de reducción de escala a través de métodos de mapeo.



Fuente: Elaboración propia.

Este proceso se lleva a cabo con cada una de las variables climáticas, para cada uno de los modelos de cambio climático y escenario. Es decir, en total este proceso se realiza 60 veces (10 modelos x 2 Escenarios x 3 periodos) por cada variable

Una vez que se han actualizado las series para cada uno de los períodos establecidos, se procede a unir las series temporales para cada uno de los modelos y escenarios de cambio climático. Como resultado se obtienen en total 20 series climáticas comprendidas entre 2010 y 2100 por cada variable.

4. Modelado de los escenarios de cambio climático de las aportaciones

Con las series climáticas actualizadas a escenarios de cambio climático, se simulan las aportaciones a embalses en el futuro para cada uno de los escenarios de cambio climático, mediante el modelo de redes neuronales. La forma de estructurar los datos para poder utilizar los modelos de regresión es la misma que aparece en la expresión (5) de este documento.

Dependiendo del método de reducción de escala utilizado, el número de simulaciones a realizar es distinto; en este caso al utilizar métodos de mapeo el número de simulaciones aumenta, ya



que es necesario simular las series de los 10 modelos climáticos. De este modo, en total es necesario realizar **20 simulaciones**, 10 para cada uno de los escenarios de cambio climático.

5. Exportado de los resultados

Tras haber realizado las diferentes simulaciones, las series de aportaciones se exportan en ficheros “.csv” para posteriormente realizar cualquier tipo de análisis sobre dichas series.

6.3.5 Análisis estadístico de las aportaciones mínimas a embalses

Como se ha comentado anteriormente, el objetivo principal que se pretende obtener a través de la propuesta metodológica en esta guía es el análisis de la vulnerabilidad de los embalses entendiéndolo como amenaza la reducción de las aportaciones a los embalses.

Una vez obtenidas las series de aportaciones para los distintos escenarios de cambio climático, es necesario realizar un análisis estadístico para valorar cómo será la influencia del cambio climático en las aportaciones en los embalses de estudio.

El análisis estadístico debe realizarse en dos escalas temporales distintas, una escala anual que proporcione una valoración de lo que ocurra en un periodo de tiempo considerado y una escala mensual que permita analizar posibles cambios estacionales o para conocer si la variación anual de un mes determinado tiene una tendencia distinta de lo que ocurre a nivel anual.

La información de los cambios en las aportaciones mínimas anuales y mensuales puede ser explicada a través de 3 estadísticos:

- Caudales medios: Proporciona información sobre el cambio generalizado en el recurso hídrico.
- Caudales correspondientes al cuantil del 25% o inferior: Proporciona información sobre las aportaciones más bajas que llegan al embalse.
- Varianza: Este estadístico muestra la variabilidad existente en las aportaciones medias mensuales.

Otro de los análisis que es posible realizar es en base a indicadores que permiten identificar el número de meses en los que el embalse puede llegar a situaciones críticas por la falta de aportaciones o secuencias de aportaciones por debajo de un umbral. Estos indicadores pueden ser:

- Número de meses con aportaciones por debajo de un umbral. Permite identificar cuántos meses durante el período de análisis puede estar en situación crítica un embalse, estableciendo el criterio de un umbral mínimo a partir del cual se supone una situación crítica en el embalse.
- Número de meses consecutivos con aportaciones por debajo de un umbral. No sólo es importante identificar cuántos meses tienen aportaciones por debajo de un umbral, sino la sucesión continuada de meses donde la aportación es menor que la del umbral establecido.
- Índice normalizado de los caudales fluviales (SSFI). Caracteriza las sequías hidrológicas de una cuenca, mediante la cuantificación del déficit de aportaciones en diferentes períodos de tiempo. Valores negativos del SSFI representan sequías, mientras valores positivos indican periodos húmedos (OMM, 2016).

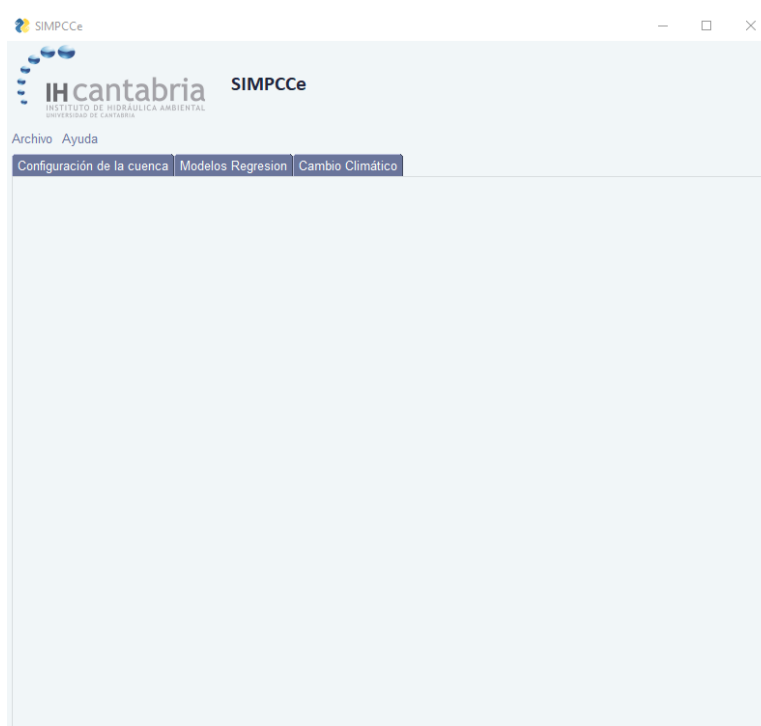


6.4 Aplicación SIMPCCe.

Como se ha comentado a lo largo de esta guía, además de la explicación de la metodología propuesta para la evaluación del impacto climático en las aportaciones mínimas a embalses, se proporciona una serie de herramientas que permiten utilizar dicha metodología en cualquier embalse de la geografía española.

Dichas herramientas consisten en una librería y su implementación en una aplicación informática²⁸, que permiten al usuario aplicar la metodología sin necesidad de conocer el lenguaje de programación en el que se desarrolla. La librería y la aplicación reciben el nombre de SIMPCCe (*Simulador de Pronósticos de Cambio Climático en Embalses*). Estas herramientas han sido desarrolladas en el lenguaje de programación Python, lo que permite ser utilizada en cualquier sistema operativo. Además, al ser la aplicación una herramienta interactiva, permite a cualquier usuario introducir los diferentes campos requeridos y elegir las posibles opciones que en esta metodología se valoran. Si el usuario tiene conocimientos del lenguaje de programación Python puede ejecutar la metodología a través de cuadernos Jupyter y modificar el código de la librería que se encuentra en el repositorio de GitHub²⁹.

Figura 31: Interfaz de la aplicación SIMPCCe.



En el ANEXO C se muestra el manual del uso de la aplicación SIMPCCe.

²⁸ La aplicación informática SIMPCCe ha sido desarrollada por el Instituto de Hidráulica ambiental de Cantabria (IHC) como herramienta complementaria a esta guía. Está vinculada al encargo recibido de la Fundación Canal para el desarrollo de esta guía, pero fuera de su alcance. En consecuencia, la Fundación Canal no ostenta respecto de la misma ninguna titularidad, atribución, ni ningún tipo de responsabilidad.

El IHC permite el acceso a esta aplicación con el fin de facilitar la utilización práctica de la guía, si bien no otorga, respecto de la misma, garantía de ningún tipo, en particular, sobre su funcionamiento ni los resultados que genere. La aplicación no va a ser objeto de soporte ni de mantenimiento. En atención a lo expuesto, el desarrollador declina toda responsabilidad sobre la información que la aplicación pueda generar y el uso para el que ésta pudiera utilizarse.

²⁹ <https://github.com/IHCantabria/SIMPCCe>



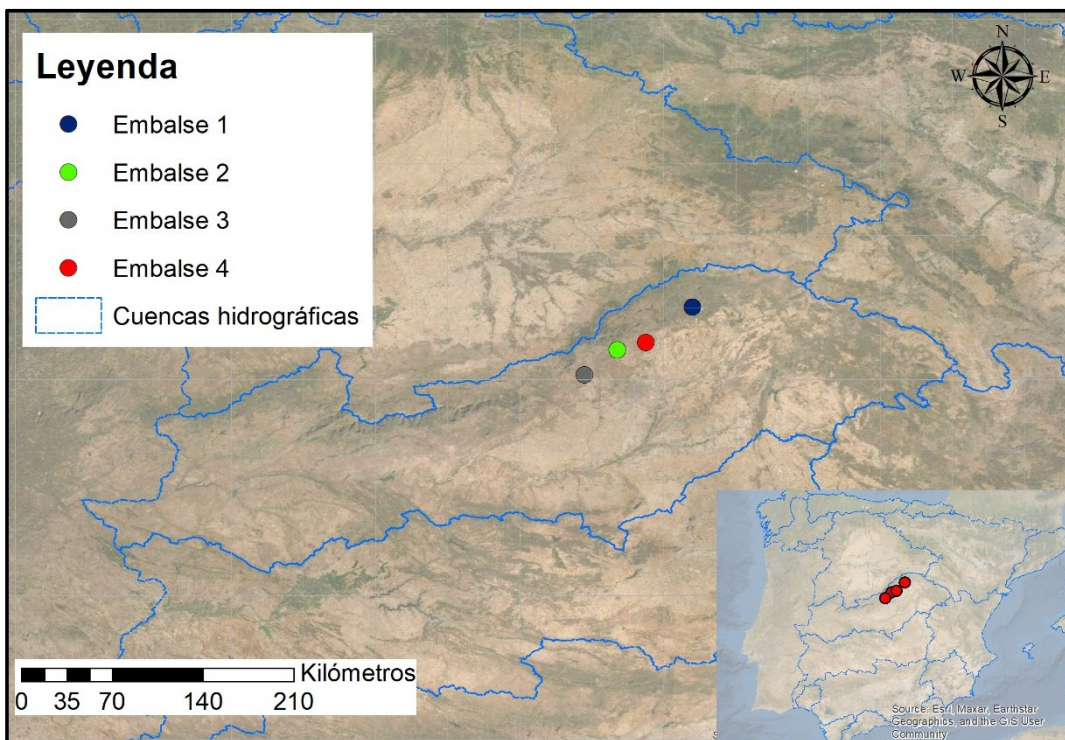
7 Casos de estudio

7.1 Introducción

El objetivo principal del estudio de casos piloto es identificar de forma práctica cómo podrían presentarse las vulnerabilidades frente al cambio climático en una variedad de presas y cómo el régimen de aportaciones mínimas podría verse afectado. Para ello es aplicada la metodología propuesta en este guía teniendo en cuenta cada una de las variantes metodológicas que se definen.

Para la evaluación de la metodología se utilizan 4 embalses localizados en la cuenca hidrográfica del río Tajo. A continuación, en la Figura 32, se muestra la localización aproximada de cada uno de ellos.

Figura 32. Localización casos de estudio



Fuente: Elaboración propia.

Una vez que se localizan cada uno de los embalses se procede a aplicar paso a paso la metodología descrita en esta guía.

Con el análisis de los casos de estudio definidos, se busca evaluar los distintos procedimientos metodológicos que se han definido en el apartado 6.3.

A continuación, se analizan los resultados obtenidos en cada uno de los procesos:

- Ajuste de modelos de redes neuronales (ANN)
- Análisis de cambio climático



7.2 Validación de modelos de redes neuronales

Para analizar la bondad del ajuste de los modelos se analizan diferentes coeficientes o métricas como son:

- Coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe a nivel mensual (NSE) (D. N. Moriasi et al., 2007).
- Porcentaje de sesgo (PBIAS).
- Coeficiente de determinación (R^2) que refleja la bondad del ajuste de un modelo a la variable que pretender explicar.

Además de estos tres coeficientes típicos definidos más detalladamente en el apartado 6.3.3, se utiliza otro coeficiente para determinar cuáles de los algoritmos de regresión predicen mejor. El coeficiente utilizado es el Coeficiente de correlación de Pearson $r_{X,Y}$, que es una prueba que mide la relación estadística entre dos variables continuas. El coeficiente de correlación puede tomar un rango de valores de +1 a -1. Un valor de 0 indica que no hay asociación entre las dos variables. Un valor mayor que 0 indica una asociación positiva. Es decir, a medida que aumenta el valor de una variable, también lo hace el valor de la otra. Un valor menor que 0 indica una asociación negativa; esto es, a medida que aumenta el valor de una variable, el valor de la otra disminuye. El cálculo de este coeficiente se muestra en la expresión (10).

$$r = \frac{\sigma_{XY}}{\sigma_X \sigma_Y} \quad (10)$$

Donde σ_{XY} es la covarianza entre la serie de aportaciones simulada y observada, σ_X es la desviación estándar de la serie de aportaciones observadas, σ_Y es la desviación estándar de las aportaciones simuladas y N es el número de datos.

En la Tabla 13 se muestran los resultados obtenidos para cada uno de los índices descritos anteriormente en cada uno de los embalses de estudio tomando como serie de referencia los datos de SIMPA.

Tabla 13. Resultados validación de modelos de regresión

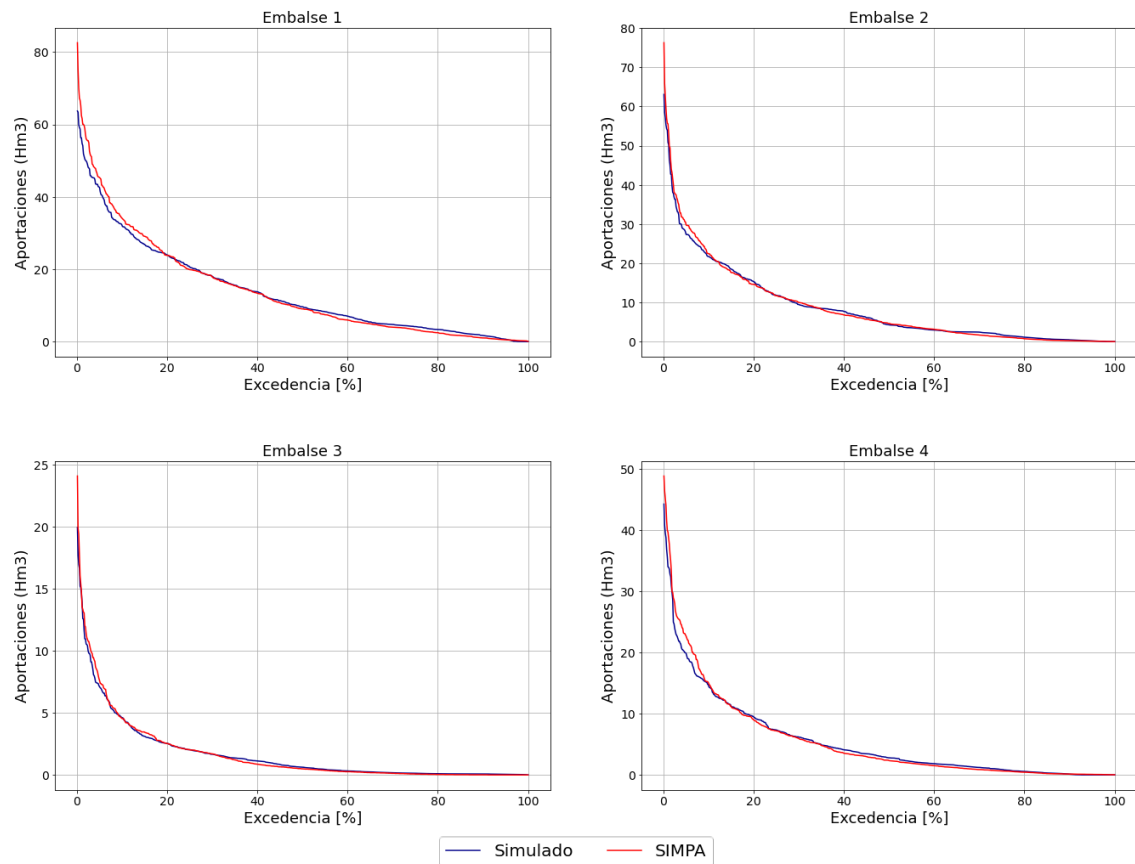
	ANN			
	NSE	PBIAS	R^2	r
Embalse 1	0,81	1,48	0,76	0,90
Embalse 2	0,89	0,83	0,87	0,94
Embalse 3	0,87	0,76	0,84	0,93
Embalse 4	0,83	1,08	0,79	0,91

También se realizan otros análisis basados en gráficos como son las curvas de caudales clasificados y los gráficos de autocorrelación parcial.

La Curva de Caudales Clasificados (en inglés *Flow Duration Curve*, FDC) representa el porcentaje del tiempo durante el cual los caudales han sido igualados o excedidos. Además, la curva indica el valor del caudal en función de la frecuencia de su ocurrencia. En la Figura 33 se muestran las curvas de caudales clasificados tanto para las series de aportaciones simuladas como para las series obtenidas de SIMPA para cada uno de los embalses de estudio.



Figura 33: Curvas de caudales clasificados para las aportaciones mensuales obtenidas con el algoritmo de ANN.



Fuente: Elaboración propia.

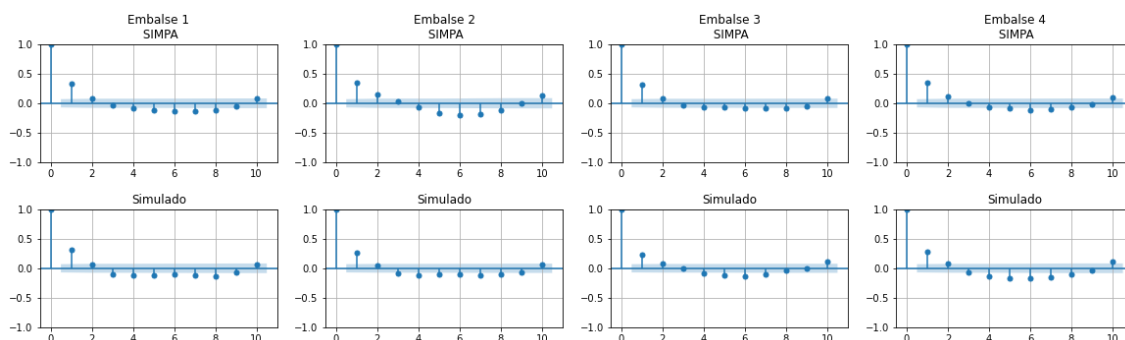
Por otro lado, los gráficos de autocorrelación parcial están diseñados para mostrar si los elementos de una serie de tiempo están correlacionados positivamente, correlacionados negativamente o son independientes entre sí.

Un gráfico de autocorrelación muestra el valor de la función de autocorrelación (acf) en el eje vertical. Puede variar de -1 a 1. El eje horizontal de un gráfico de autocorrelación muestra el tamaño del retraso entre los elementos de la serie temporal. Por ejemplo, la autocorrelación con retraso 2 es la correlación entre los elementos de la serie de tiempo y los elementos correspondientes que se observaron dos períodos de tiempo antes.

El análisis comparativo de la forma de estos gráficos para la serie simulada de aportaciones y la serie observada, en este caso la de SIMPA, permite conocer cómo de parecidas son las series. En la Figura 34 se muestra el análisis comparativo de autocorrelación entre las aportaciones simuladas utilizando el modelo ajustado de ANN.



Figura 34: Comparativa de gráficos de autocorrelación parcial de aportaciones mensuales obtenidos mediante ANN.



Fuente: Elaboración propia.

Tras analizar los resultados obtenidos de la validación de los modelos de ANN en los distintos embalses de estudio, se observa la gran capacidad predictiva de las aportaciones en base a los resultados de SIMPA. En el caso de la utilización de series reales en régimen natural, los resultados no serían tan precisos debido a que el modelo de ANN estaría “aprendiendo” a reproducir los fenómenos naturales, mientras que en el caso de la utilización de aportaciones de SIMPA las redes neuronales reproducen los procesos hidrológicos en un modelo hidrológico a través de ecuaciones, siendo más sencillo de aprender por la red neuronal.

7.3 Análisis cambio climático

El cambio climático supone una gran amenaza para los embalses por la influencia que tiene sobre las aportaciones mínimas. Por esta razón este apartado se centra en analizar mediante diferentes indicadores la evolución de las aportaciones mínimas en los embalses de estudio en diferentes periodos y escenarios de cambio climático.

Para la caracterización climática futura, se han analizado los resultados de los pronósticos climáticos para el siglo XXI sobre España realizado por AEMET del proyecto CORDEX³⁰ a resolución temporal mensual para los escenarios de cambio climático RCP 4.5 y RCP 8.5. Estos datos son proporcionados en formato “ráster” con una resolución espacial de 12,5 km.

Para poder reproducir las aportaciones en cada uno de los escenarios de cambio climático es necesario previamente actualizar las series climáticas, ya que será a partir de éstas como se obtengan las series de aportaciones. Por ello el primer paso es cargar las series climáticas para el período de referencia o periodo histórico. El período histórico considerado en estudios de cambio climático es desde **1976 hasta 2005**. Se considera el año de fin el 2005 ya que los escenarios de cambio climático comienzan en el año 2006. Como año de inicio se considera el año 1976 para considerar un período de referencia climatológico de unos 30 años, tal como lo define la Organización Meteorológica Mundial (OMM).

Uno de los principales inconvenientes de los pronósticos climáticos es que no se pueden utilizar directamente en aplicaciones hidrológicas, ya que presenta sesgos muy importantes. Éstos, deben ser corregidos a través de series climáticas tomadas como referencia, en este caso se toma como referencia los datos de SPAIN02 (Cannon et al., 2015). Por tanto, el objetivo principal es disminuir la escala de los modelos globales o regionales a localizaciones específicas como son las estaciones climáticas o en estos casos de estudio a los puntos distribuidos a lo largo de las cuencas vertientes.

³⁰ https://www.aemet.es/documentos/es/serviciosclimaticos/cambio_climat/datos_mensuales/ANEXO-CORDEX_Guia_de_usuario.pdf



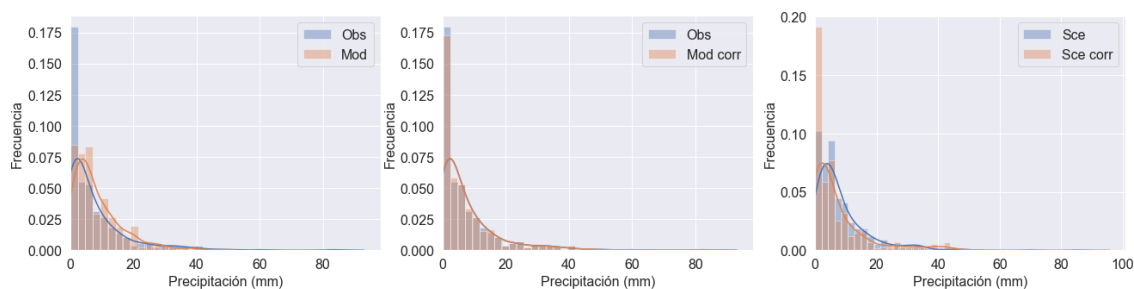
Como se ha reflejado en el estado del arte de esta guía, existen diversas técnicas de corrección de sesgo o reducción de escala, siendo la técnica de mapeo de cuantiles SDM la seleccionada en esta metodología.

Antes de aplicar cualquier método de reducción de escala es necesario establecer los periodos de análisis a futuro. Un período de referencia climatológico popular es un período "normal" de unos 30 años, tal como lo define la Organización Meteorológica Mundial (OMM), por tanto, los períodos que se establecen en esta metodología para aplicar los métodos de reducción de escala son: **2011-2040, 2041-2070 y 2071-2100**.

Teniendo establecidos los periodos de análisis, se procede a actualizar las series climáticas de cada una de las cuencas aportantes a cada uno de los embalses de estudio ante escenarios de cambio climático. En la Figura 30 se muestra el proceso seguido.

Para analizar cuáles son los cambios que se producen en las series climáticas tras realizar el proceso de corrección de sesgo definido en la Figura 35, se muestra un ejemplo de cómo cambian las series de precipitación de un modelo climático tanto en el periodo histórico definida como *Mod* y la serie en escenarios futuros definida como *Sce* a partir de la serie observada tomada como referencia denominada *Obs*. En la subfigura izquierda de la Figura 35 se muestra las funciones de densidad de probabilidad tanto de la serie observada en el período histórico como la serie histórica del modelo climático y como se puede observar existen diferencias importantes como puede ser la cantidad de días de no lluvia y los valores máximos, por esta razón siempre es recomendable realizar una corrección de sesgo que permita corregir las diferencias existentes entre la series de los modelos y la realidad. A partir de estas dos series se configura la función que permita realizar el mapeo de cuantiles de cualquier serie futura del modelo climático considerado o incluso la corrección de la propia serie histórica. En la subfigura central se muestra la función de probabilidad de la serie histórica del modelo climático tras aplicar el mapeo de cuantiles y como se puede observar la serie es similar a la observada en el periodo histórico. De igual forma se aplica la función de mapeo a la serie del escenario futuro para corregirla como se observa en la subfigura derecha, en este caso, la función de probabilidad toma una forma similar a la de la serie observada en el período histórico, pero cambian las frecuencias y aparecen nuevos valores máximos.

Figura 35: Ejemplo de corrección de sesgo.



Fuente: Elaboración propia.

La actualización de las series climáticas se realiza para cada uno de los periodos, escenarios y modelos. Con las series climáticas de la cuenca actualizadas, se realiza la simulación a través de los modelos ajustados de redes neuronales.

Una vez concluida la actualización de las series de aportaciones a escenarios de cambio climático, se procede a realizar un análisis anual y mensual de las aportaciones en cada uno de los embalses de estudio.



7.3.1 Análisis estadístico anual

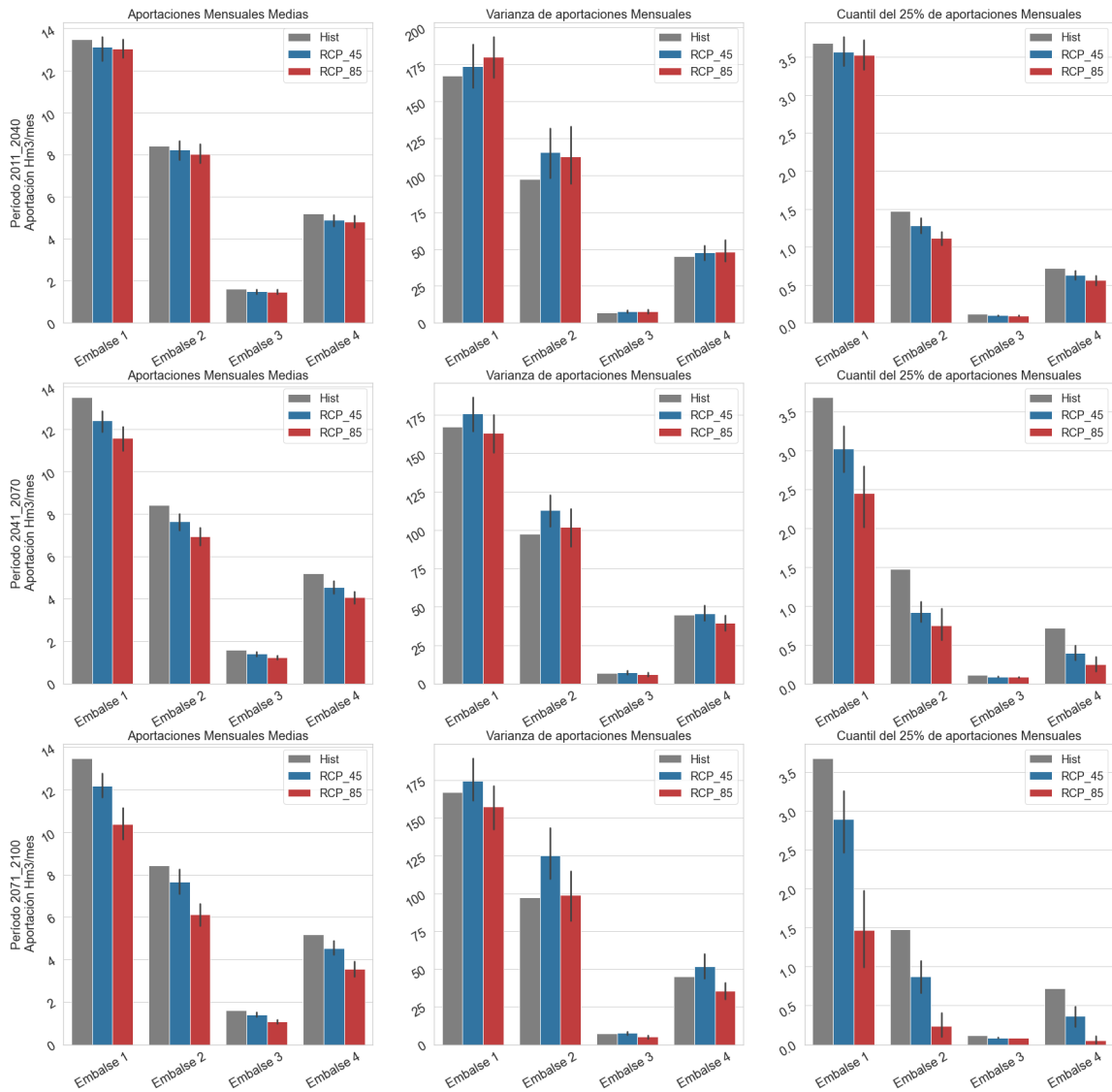
Tras realizar las simulaciones de las aportaciones para cada uno de los embalses de estudio en escenarios de cambio climático, se pueden realizar diversos análisis basados en estadísticos que puedan proporcionar información de los posibles cambios que pueden sufrir las aportaciones en embalses. A escala temporal anual, la información de los cambios en las aportaciones mínimas puede ser explicados a través de 3 estadísticos:

- Caudales medios: Proporciona información sobre el cambio generalizado en el recurso hídrico.
- Caudales correspondientes al percentil del 25% o percentiles inferiores: Proporciona información sobre las aportaciones bajas que llegan al embalse.
- Varianza: este estadístico muestra la variabilidad existente en las aportaciones medias mensuales.

El análisis realizado a escala temporal anual se muestra de forma gráfica en la Figura 36, donde se representa el análisis de los 3 estadísticos definidos anteriormente para cada uno de los embalses, escenarios y periodos de cambio climático. En cada una de las filas se representa los periodos de tiempo establecidos en la metodología y en las columnas los estadísticos definidos anteriormente. Las barras en cada figura representan las aportaciones medias mensuales para el período histórico y la media de los valores de aportaciones medias que cada modelo climático proporciona para cada uno de los escenarios de cambio climático. Como se puede observar en este tipo de figuras, las barras de los escenarios muestran una mecha que representa la variabilidad existente entre los 10 modelos de cambio climático analizados para cada uno de los estadísticos. El valor superior de la mecha se corresponde con el percentil del 95% de los modelos y el valor inferior con el percentil del 25%. En la Tabla 15, Tabla 16, y Tabla 17 del ANEXO B, se muestran los valores obtenidos de forma tabulada.



Figura 36: Análisis anual de aportaciones medias mensuales.



Fuente: Elaboración propia.

Analizando los resultados obtenidos se observa de forma general una disminución de las aportaciones en todos los puntos de estudio, siendo en mayor medida para el RCP 8.5; además se identifica una disminución progresiva a lo largo de los periodos analizados, siendo a final de siglo cuando la reducción de las aportaciones se hace más grande.

Por otro lado, analizando la varianza se observa que la variabilidad entre modelos tiende a reducirse para el RCP 4.5 a medida que se avanza en el tiempo, es decir, es en el periodo 2071-2100 donde la varianza de la media de los modelos es menor; sin embargo, ocurre lo contrario con el RCP 8.5, es en el último periodo cuando mayor variabilidad existe entre modelos. De igual forma ocurre con los cuantiles, a final de siglo la diferencia de los cuantiles con respecto a la media de todos los modelos disminuye para el RCP 4.5 y aumenta para el RCP 8.5.



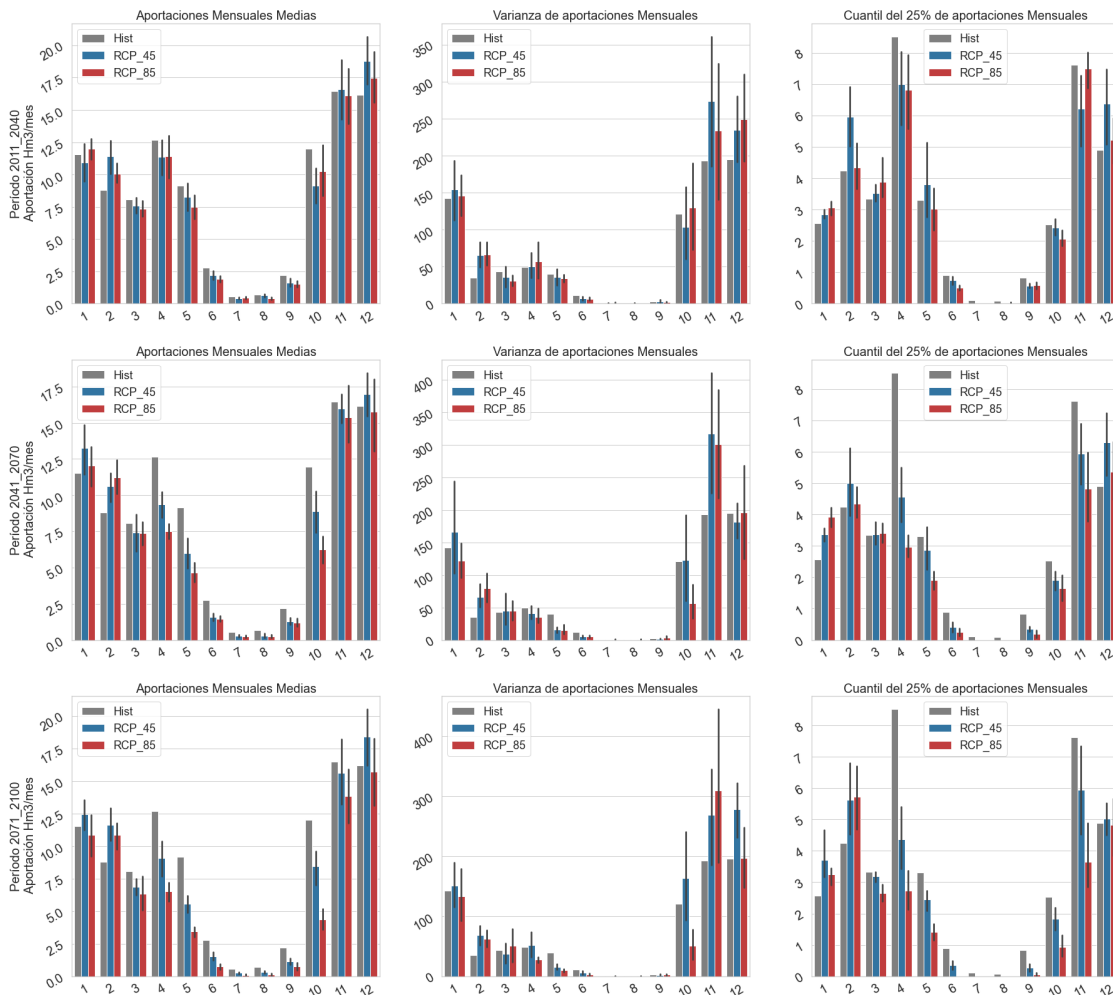
7.3.2 Análisis estadístico mensual

Además de un análisis anual de las aportaciones, es posible realizar un análisis mensual. De igual forma que en el caso anterior se analizan los tres estadísticos definidos.

- Caudales medios.
- Caudales correspondientes al cuantil del 25%.
- Varianza.

En este caso en la Figura 37 se muestra un ejemplo del análisis mensual realizado sobre el Embalse 2. De igual forma que en el análisis anual cada una de las filas corresponde a cada período de tiempo establecido en la metodología y en las columnas se representan cada uno de los estadísticos.

Figura 37: Análisis mensual de las aportaciones medias en el Embalse 2.



Fuente: Elaboración propia.

De igual forma que para el análisis anual, para cada uno de los embalses de estudio se ha realizado un análisis mensual, para el período histórico y para los escenarios de cambio climático, tanto de forma gráfica como en formato de tabla. En el ANEXO B se encuentran todos los resultados obtenidos.

A partir de este análisis mensual, se observa una reducción de las aportaciones de forma generalizada; sin embargo, hay tres meses al año en los que las aportaciones se sitúan por



encima del período histórico (enero y febrero y marzo). Esto indica que ante escenarios de cambio climático los meses iniciales del año pueden ser más húmedos, siendo en mayor medida para el RCP 4.5. Es para el período 2041-2070 donde este fenómeno se acentúa. Sin embargo, en el resto de los meses se observa una reducción considerable, lo que provoca que las medias anuales sufran grandes disminuciones a lo largo de los periodos analizados. De igual forma ocurre con las aportaciones mínimas, el cambio climático afectará de forma positiva a los meses de enero, febrero y marzo, donde pueden incrementarse las aportaciones mínimas, mientras que el resto de los meses las variaciones en las aportaciones bajas con respecto al período histórico pueden disminuir, lo que puede afectar a la operatividad del embalse.

7.3.3 Análisis de indicadores

Otro de los análisis que es posible realizar a partir de las series de aportaciones mensuales, es el estudio de diversos indicadores que permiten identificar el número de meses en los que el embalse puede llegar a situaciones críticas por la falta de aportaciones o secuencias de aportaciones por debajo de un umbral. A continuación, se muestran los resultados obtenidos para los diferentes indicadores analizados:

- Número de meses con aportaciones por debajo de un umbral. Permite identificar cuántos meses durante el período de análisis puede estar en situación crítica un embalse, estableciendo el criterio de un umbral mínimo a partir del cual se supone una situación crítica en el embalse.
- Número de meses consecutivos con aportaciones por debajo de un umbral. No sólo es importante identificar cuántos meses tienen aportaciones por debajo de un umbral, también la sucesión continuada de meses donde la aportación es menor que la del umbral establecido.
- Índice normalizado de los caudales fluviales (SSFI). Caracteriza las sequías hidrológicas de una cuenca mediante la cuantificación del déficit de aportaciones en diferentes períodos de tiempo. Valores negativos del SSFI representan sequías, mientras valores positivos indican periodos húmedos (OMM, 2016).

Una vez definidos los diferentes indicadores que se desean analizar, se muestran los resultados obtenidos para cada uno de los escenarios y periodos considerados en el estudio. Para realizar el análisis de indicadores se ha definido como aportación mensual umbral el cuantil del 25% de la serie histórica, tanto para el análisis del período de referencia como para los periodos futuros.

En la Tabla 14 se muestran los resultados de los indicadores para cada uno de los embalses de estudio. En dicha tabla se refleja el análisis realizado sobre los 360 meses que componen los 30 años, por ejemplo, en el número de meses con aportaciones por debajo del percentil del 25% indica que de los 360 meses hay 93 en los que el caudal se sitúa por debajo de este umbral.

Tabla 14: Resultados de indicadores mensuales en el periodo histórico 1976-2005.

	Nº de meses con aportaciones < Q25	Nº máximo de meses consecutivos con aportaciones < Q25	SSFI
Embalse 1	93	4	0,13
Embalse 2	93	5	0,11
Embalse 3	93	4	-0,03
Embalse 4	93	4	0,17

Nota: SSFI: Índice normalizado de los caudales fluviales. Valor medio mensual.

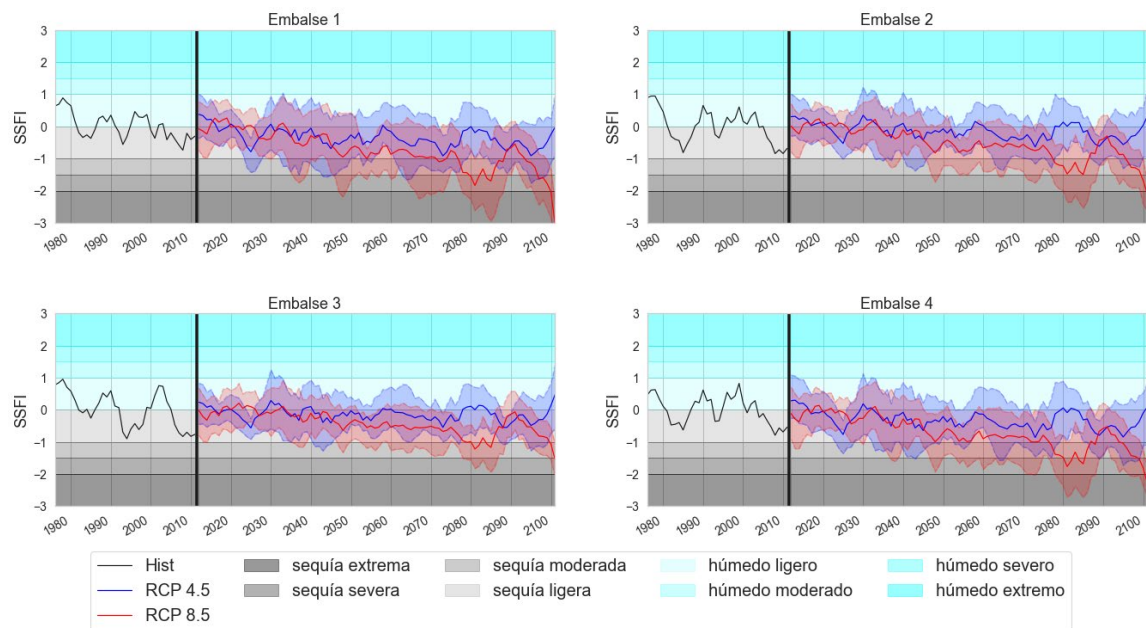


Para poder analizar la influencia del cambio climático en los indicadores, se estudian los diferentes escenarios y períodos de cambio climático. Dicho análisis se realiza además para cada uno de los modelos climáticos, por lo que en los resultados se refleja el valor máximo, medio y mínimo del conjunto de valores del indicador obtenido para cada modelo. Para realizar el análisis de indicadores se ha definido como aportación mensual umbral el cuantil del 25% de la serie histórica, tanto para el análisis del período de referencia como para los periodos futuros.

En el ANEXO B, de la Tabla 18 a la Tabla 23 se muestran los resultados. Estos exhiben un aumento generalizado de los indicadores que reflejan el número de días que se puede dar una situación crítica en el embalse, siendo mayor a medida que se avanza en el tiempo, lo que empeora de forma considerable en el RCP 8.5. En cuanto al índice SSFI que indica el grado de sequía, se observa una disminución con el paso del tiempo, situándose por debajo de 0, lo que indica que en el futuro se darán mayor número de meses en situaciones de sequía cada vez más severas. Es para el RCP 8.5 donde se dan índices SSFI menores.

Para tener una visión general de la sequía a lo largo del período 2011-2100, se evalúa el índice SSFI anual para cada uno de los embalses como se muestra en la Figura 38; en ésta se muestra la media móvil del SSFI anual para poder ver de forma clara el comportamiento que tiene este índice a lo largo del tiempo. Además, para el período futuro 2011-2100 se muestra de forma sombreada, el cuantil del 25% y del 75% de los resultados obtenidos con todos los modelos analizados para cada año. La línea roja y azul muestran el valor medio de todos los modelos, tanto para el RCP 4.5 como el 8.5.

Figura 38: SSFI anual.



Fuente: Elaboración propia.



8 Orientaciones prácticas para el uso de los resultados de la guía en la toma de decisiones

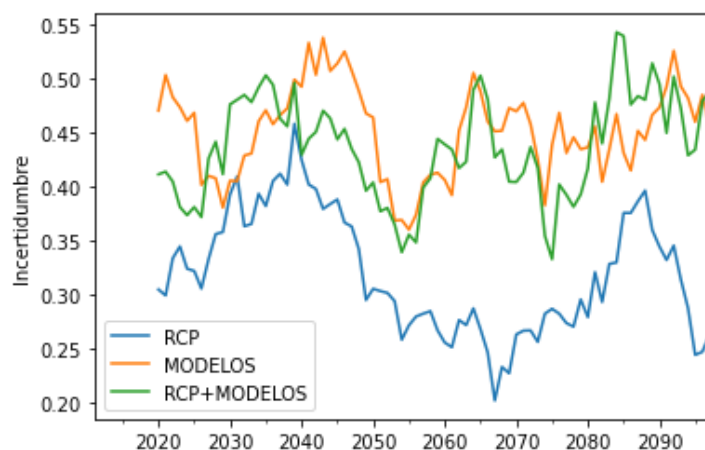
Una vez descrita la metodología y habiéndola aplicado a diferentes casos de estudio, es pertinente mencionar una serie de orientaciones, de tal modo que cualquier usuario pueda aprovechar los resultados obtenidos con esta metodología, en la toma de decisiones que permitan plantear medidas de adaptación que mitiguen los efectos del cambio climático en las aportaciones mínimas a embalses.

8.1 Análisis de incertidumbre

Como se ha observado durante el análisis de los resultados obtenidos y en el test ANOVA realizado (ver Figura 39) en los puntos de estudio, existen diferencias significativas entre unos modelos climáticos y otros, e incluso entre los diferentes escenarios, habiendo quedado establecido que los estudios deberán utilizar un número suficiente de modelos para explicar las incertidumbres asociadas a los mismos (Sheridan & Lee, 2012). En el ejemplo mostrado en la Figura 39 se observa que la menor incertidumbre se da entre los dos escenarios de cambio climático analizados y las mayores incertidumbres se dan entre los modelos debido al amplio abanico seleccionado. Sin embargo, cuando se combinan los resultados obtenidos en años donde la incertidumbre de los RCP aumenta y la de los modelos disminuye hace que la combinación proporcione una variabilidad de resultados mayor, lo que indica que es necesario tanto evaluar el conjunto de modelos y RCPs.

La variabilidad de los resultados de cambio climático se debe a la diversidad en las simulaciones de modelos climáticos. Esta variabilidad puede ser positiva, ya que los resultados de múltiples modelos brindan el punto de partida para definir argumentos alternativos sobre el cambio climático en la evaluación de opciones para la toma de decisiones.

Figura 39: Análisis de incertidumbre de aportaciones. Test ANOVA.



Fuente: Elaboración propia.

Esta variabilidad de resultados podría generar dudas en cómo utilizar los modelos climáticos por parte de los operadores de embalses. Por esta razón se proponen una serie de recomendaciones y orientaciones que permitan a los operadores lidiar con la incertidumbre de los resultados de aportaciones.



Otra de las fuentes de incertidumbre viene asociada a los modelos que convierten los datos climáticos en series hidrológicas; en ocasiones la calibración de dichos modelos no es efectiva, por lo que los resultados de pronósticos hidrológicos pueden presentar sesgos importantes, impidiendo su uso directo como entrada para un modelo de gestión de recursos hídricos o para el cálculo de eventos extremos de sequía. Por esta razón se aconseja actualizar las series de aportaciones consideradas como reales, a través de métodos de perturbación, teniendo en cuenta las series de aportaciones simuladas en el período de control y las series futuras para los diferentes modelos y escenarios.

8.2 Análisis técnico de los resultados

Para realizar un análisis técnico en la comparativa de los diferentes escenarios de cambio climático con el periodo de control o de referencia, es necesario tener en cuenta que **toda comparativa debe realizarse entre series de aportaciones que hayan sido simuladas** a través de modelos hidrológicos o modelos de regresión, para ser concordantes en los resultados de los posibles cambios entre los estadísticos de referencia y los resultantes de los escenarios de cambio climático. Si los resultados de cambio climático se comparan con series reales o series tomadas como referencia para calibrar los modelos hidrológicos o modelos de regresión, es posible que haya un sesgo debido a la calibración realizada; por tanto, no se estaría comparando correctamente los resultados.

Como se ha comentado anteriormente en el apartado 7.3, dentro de los estadísticos más utilizados son:

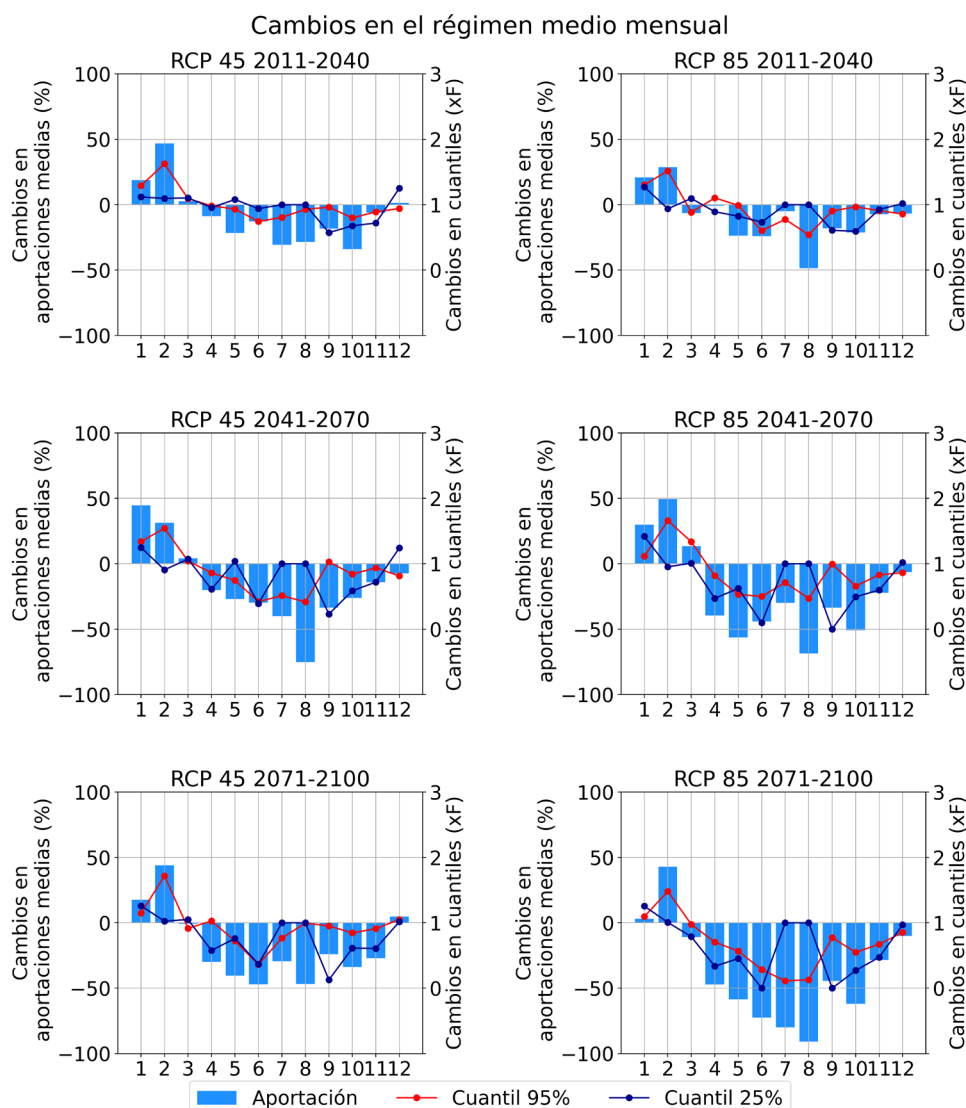
- Caudales medios mensuales y anuales.
- Caudales correspondientes al cuantil del 25% y del 95% a escala mensual y anual.
- Índice SSFI mensual y anual.
- Caudales mínimos mensuales y anuales.

De toda esta gama de estadísticos o índices se tendrían tantos como modelos climáticos y escenarios se estén considerando. Con la amplia variabilidad de los diferentes estadísticos, el operador puede establecer diversos criterios para tener una idea aproximada de lo que puede ocurrir en el futuro. Un ejemplo es obtener la **mediana** de los cambios que proporcionan los modelos entre el periodo de control y el periodo futuro, como se muestra en la Figura 40. En esta figura se representa:

- barras azules: la mediana de los cambios porcentuales de aportaciones que se obtienen a partir de cada uno de los modelos climáticos en cada periodo y escenario a escala mensual
- en líneas azules: la mediana del factor de cambio del cuantil del 25% del conjunto de los modelos para cada uno de los meses
- en línea roja: la mediana del factor de cambio del cuantil del 25% del conjunto de los modelos para cada uno de los meses en cada período y escenario.



Figura 40: Ejemplo del análisis de cambios mensuales en las aportaciones.



Fuente: Elaboración propia.

Sin embargo, hay que tener en cuenta que no se tiene claro cuál es el modelo más probable o aquel escenario que puede llegar a haber a medio y largo plazo; por ello en la toma de decisiones se debe tener precaución a la hora de evaluar las posibles medidas de adaptación. En el siguiente apartado se dan una serie de orientaciones para tener en cuenta estos aspectos a la hora de diseñar e implementar medidas de adaptación que mitiguen los efectos del cambio climático.

8.3 Orientaciones y recomendaciones en la toma de decisiones

Para plantear las orientaciones y recomendaciones debe considerarse que la incertidumbre es irreductible, debido a que no se puede confiar en un escenario o proyección individual para el futuro. Bajo este panorama, se pueden contemplar dos cursos de acción: **el principio de precaución y la gestión adaptativa.**



8.3.1 Toma de decisiones basadas en el principio de precaución.

El principio de precaución se basa en los conceptos máximos y mínimos o escenario pesimista u optimista. A partir de este principio es posible elegir dentro del abanico de resultados de aportaciones aquellos valores que representan el **escenario más pesimista** del análisis técnico realizado (ver apartado 8.2) para plantear medidas blandas, ya que son medidas que pueden ser utilizadas en cualquier tipo de escenario. Las medidas blandas incluyen por ejemplo sistemas de pronóstico y de alerta temprana, planificación del uso de la tierra, seguros (frente a inundaciones y sequías) y capacitación.

8.3.2 Toma de decisiones basadas en el principio de gestión adaptativa.

En el caso del principio de gestión adaptativa, la base es un enfoque probabilístico en el que se obtenga un periodo de retorno asociado o la probabilidad del riesgo. De este modo, se plantean varios enfoques.

8.3.2.1 Enfoque de la toma de decisiones basadas en periodos de retorno.

Como se ha comentado a lo largo de la guía el cambio climático afectará de forma negativa a las aportaciones mínimas, lo que dará lugar a episodios donde los embalses estén sometidos a episodios de sequías y a su vez podrían no satisfacer las demandas.

Al realizar un estudio sobre los caudales mínimos es necesario garantizar que el modelo hidrológico o modelos de regresión representen de la mejor forma los eventos extremos, sin embargo, en ocasiones no es así debido al proceso de calibración y a los datos climáticos de partida. Por esta razón es recomendable llevar a cabo una corrección de la serie real a través de perturbaciones en la media y en el coeficiente de variación aplicando la metodología descrita en (Chavez-Jimenez et al., 2013). A partir de las series simuladas para cada uno de los modelos climáticos para los escenarios futuros y la serie del periodo de control simulada tras la calibración con los datos climáticos iniciales, es posible establecer las variaciones de la media y el coeficiente de variación. Una vez obtenidas dichas variaciones, son aplicadas a la serie de aportaciones consideradas como reales a escala anual. Una vez que la serie real anual ha sido actualizada a cambio climático se extrae el cambio relativo entre ambas series (serie real futura y serie real en el periodo de control) y si no existe un cambio estacional, este cambio anual se aplica a cada uno de los meses correspondiente al año considerado, de esta forma se obtendrá una serie mensual de cambio climático para el modelo, escenario y periodo considerado. A continuación, se exponen los pasos a seguir y la formulación que es necesaria aplicar.

En primer lugar, se obtienen las variaciones en la media y en el coeficiente de variación a través de las siguientes expresiones:

$$\Delta\mu_f = \frac{\mu_f^{CM} - \mu_c^{CM}}{\mu_c^{CM}} \quad (11)$$

$$\Delta CV_f = \frac{CV_f^{CM} - CV_c^{CM}}{CV_c^{CM}} \quad (12)$$

Donde f representa al escenario futuro, c al periodo de control, μ_f^{CM} es la media de las series futuras de aportaciones, μ_c^{CM} es la media de las aportaciones en el período de control, CV_f^{CM} el coeficiente de variación de las series de aportaciones futuras y CV_c^{CM} es el coeficiente de variación de las series en el período de control. Como se ha comentado anteriormente, la serie de control se considera la simulada con los datos climáticos en el periodo histórico, o lo que es lo mismo, la obtenida tras calibrar los modelos de regresión o modelos hidrológicos.



El proceso comienza con la serie temporal considerada como real x_i en el período de control (serie de aportación anual), con media μ_c , desviación estándar σ_c . La aplicación de las alteraciones en la serie de aportaciones se realiza según:

1. Normalización de la serie real de aportaciones del período de control:

$$x_i^1 = \frac{x_i}{\mu_c} \quad (13)$$

donde i representa cada año de la serie analizada y x_i^1 la serie anual normalizada en el período de control.

2. Cambio de la media de la serie x_i^1 :

$$x_i^2 = x_i^1 - 1 = \frac{x_i}{\mu_c} - 1 \quad (14)$$

3. Modificación de la desviación estándar de la serie normalizada:

$$x_i^3 = [x_i^2(1 + \Delta CV_f)] = \left[\left(\frac{x_i}{\mu_c} - 1 \right) (1 + \Delta CV_f) \right] \quad (15)$$

donde, ΔCV_f es la variación del CV en el escenario futuro y x_i^3 la serie anual normalizada con una alteración igual a la desviación estándar.

4. Cambio de la media de la serie x_i^3 :

$$x_i^4 = x_i^3 + 1 = \left[\left(\frac{x_i}{\mu_c} - 1 \right) (1 + \Delta CV_f) \right] + 1 \quad (16)$$

5. Modificación de la media de la serie x_i^4 :

$$x_i^5 = x_i^4 \mu_c (1 + \Delta \mu_f) \quad (17)$$

donde, $\Delta \mu_f$ es la alteración de la media en el escenario futuro y x_i^5 es la serie anual de aportaciones futuras.

6. Si no hay variación estacional y se desea generar una serie mensual se aplica la siguiente expresión:

$$x_i^{5m} = x_i^m \frac{x_i^5}{x_i} \quad (18)$$

donde, x_i^{5m} es el valor de la aportación en el período futuro del mes m y año i y x_i^m es el valor mensual de la serie de aportaciones real en el período de control en el mes m y año i .

Cabe mencionar que, tras el estudio de casos realizado en esta guía, se observa que el cambio a lo largo del año no ocurre de la misma forma, es decir no en todos los meses se da una reducción en las aportaciones con respecto al periodo de control; por tanto, la expresión (18) no se debería aplicar en los casos en que se quiera analizar de forma detallada la escala mensual de las series, sino que se realizaría una perturbación del reparto mensual aplicando las siguientes expresiones:

$$R_m = \frac{\mu_{f,m}^{CM}}{\mu_{c,m}^{CM}} \quad (19)$$

$$d_i^m = \frac{x_i^m}{\sum_{m=1}^{m=12} x_i^m} \quad (20)$$

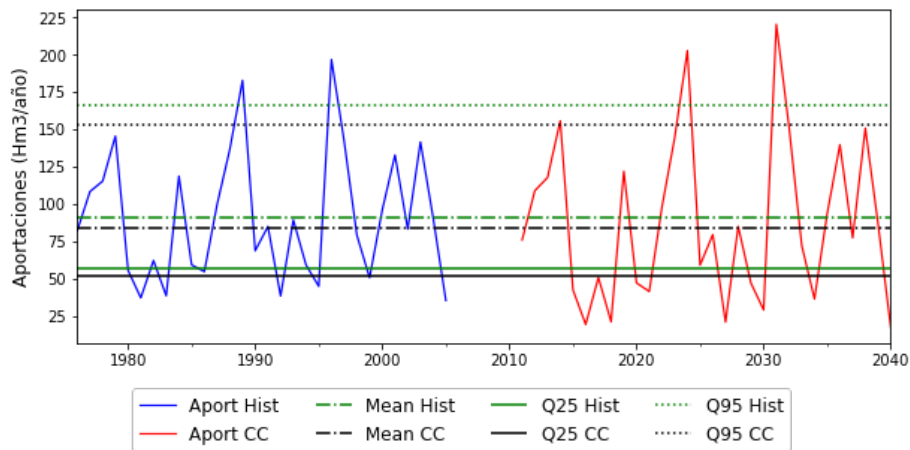
$$x_i^{5m} = d_i^m R_m \frac{1}{\sum_{m=1}^{m=12} d_i^m R_m} x_i^5 \quad (21)$$



Donde $\mu_{r,m}^{CM}$ es la media de cada mes del año de la serie aportaciones en escenarios de cambio climático, $\mu_{c,m}^{CM}$ la media de cada mes de las aportaciones del periodo de control, R_m es el cambio relativo de las medias mensuales, d_i^m es el reparto mensual de aportaciones en el año i de la serie de control y x_i^{5m} es el valor de la aportación en el período futuro del mes m y año i .

Es importante que el número de años de las series sea el mismo, de modo que se obtengan dichos cambios anuales y se aplique el mismo criterio de los periodos de años establecidos en la metodología descrita en esta guía. En la Figura 41 se muestra un ejemplo de la perturbación de una serie en el período histórico, a partir de la serie simulada de un modelo de cambio climático para el escenario RCP 4.5 en el periodo 2011-2040. Como se puede observar, no solo aparecen cambios en las medias, también en los eventos anuales máximo y mínimos.

Figura 41: Ejemplo de perturbación anual de la serie de aportaciones.



Fuente: Elaboración propia.

Dentro de la gestión adaptativa a los operadores de embalses les interesa conocer cómo va a ser la frecuencia de las sequías, qué duración podrían tener y cuál sería su severidad. En el apartado 7.3.3 se identificó el índice SSFI (OMM, 2016), que permite obtener periodos de sequía hidrológica y su severidad; a partir de estas dos características que definen el evento de sequía, es posible obtener la duración y la severidad para diferentes periodos de retorno. Según la definición, la duración de la sequía significa los meses consecutivos en los que el valor del SSFI es inferior a (-1). La gravedad de la sequía es el valor absoluto de los valores acumulados del SSFI en los períodos en los que los valores del SSFI son sistemáticamente inferiores a (-1). Para determinar las características de la sequía se pueden utilizar funciones de distribución, como la función de distribución log-normal, la función de distribución exponencial, la función de distribución gamma y la función de distribución Weibull. Además, como existen limitaciones relacionadas con la longitud de las series para obtener los periodos de retorno, se recurre al uso de cópulas (Motevali Bashi Naeini et al., 2021a) para generar eventos sintéticos, y con esto, calcular los periodos de retorno asociados a cada uno de los eventos de sequías u obtener los parámetros de una sequía para un período de retorno dado.

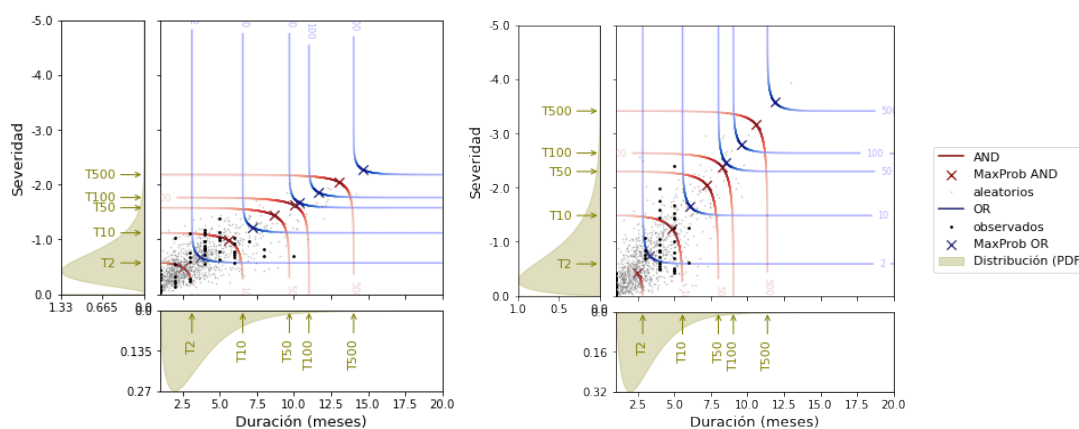
El cálculo del período de retorno en modo multivariante se realiza mediante dos operadores lógicos "y" y "o". El operador "y" indica los períodos de retorno en los que todas las variables son mayores o iguales a los valores especificados, y el operador "o" indica un estado en el que al menos una de las variables es mayor o igual a los valores especificados.

Al utilizar esta metodología es posible generar miles de eventos sintéticos que recojan la posible variabilidad de las sequías en la zona de estudio y así tener años suficientes para calcular un periodo de retorno asociado a la severidad, otro para la duración e incluso el periodo de retorno conjunto de ambas variables atendiendo a los escenarios considerados en la utilización de cópulas.



De la misma forma que se obtienen los periodos de retorno para el periodo de control, a partir de las series mensuales de SSFI actualizadas a cambio climático se pueden obtener los diversos periodos de retornos para los distintos modelos y escenarios analizados. De esta forma se pueden obtener unos valores de duración y severidad de las sequías que permitan diseñar medidas de adaptación que mitiguen los efectos de largos periodos de sequía y de extrema gravedad (Motevali Bashi Naeini et al., 2021b). En la Figura 42 se muestra un ejemplo de este tipo de análisis; en verde se muestran periodos de retorno univariados (es decir, como si se considerasen por separadas cada una de las características de la sequía y se realizara el análisis de extremo), las curvas azules representan los periodos de retorno del el escenario "o", las curvas rojas representan los periodos de retorno el escenario "y" y por último las cruces, que reflejan dentro de las curvas de periodo de retorno el valor más probable. Este análisis se lleva a cabo tanto para el período de control como para cada uno de los escenarios, modelos y periodos que estén considerados en el análisis para obtener las sequías extremas asociadas.

Figura 42: Ejemplo de aplicación de cópulas para determinar las características de la sequía extrema para diferentes periodos de retorno.



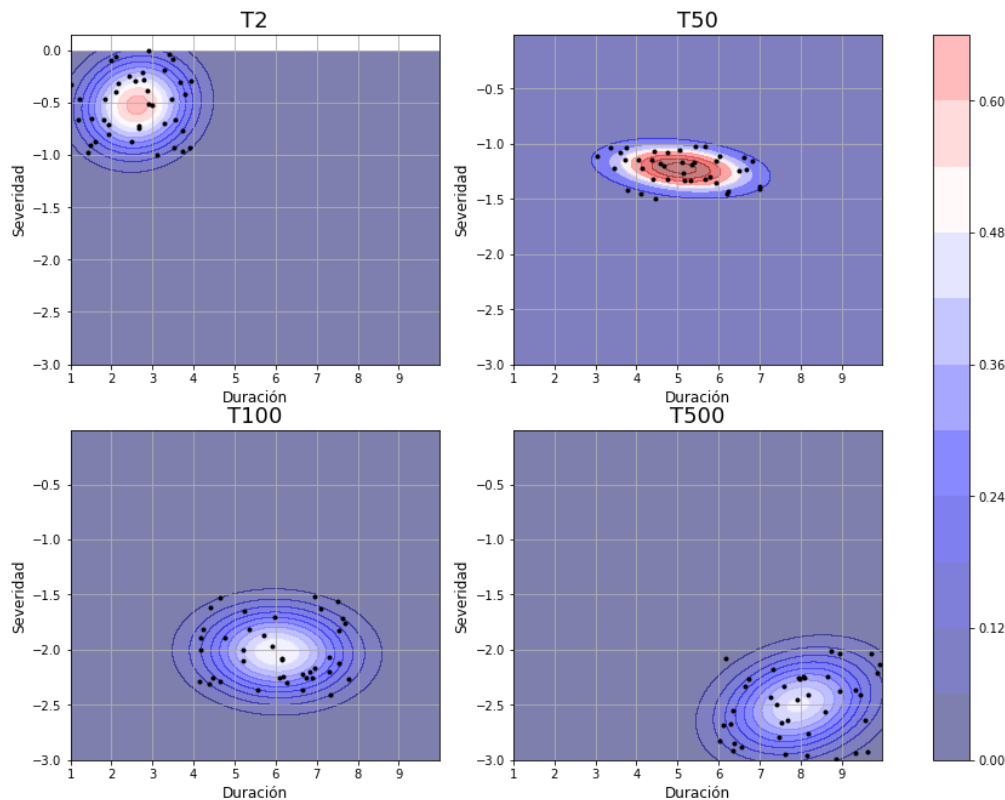
Fuente: Elaboración propia.

Nota: SSFI: en la figura de la izquierda se presenta el análisis realizado en el periodo de control, mientras que en el lado derecho aparece el análisis de las sequías para un modelo climático en el escenario RCP 4.5 en el periodo 2011-2040.

Calculados los periodos de retorno para cada escenario de cambio climático, cada uno de los modelos climáticos y los dos escenarios de la cópula en el periodo de tiempo establecido, es posible representar la envolvente de probabilidad a través de la distribución normal multivariada. De esta forma se puede identificar cuáles serían los valores de la severidad y duración de la sequía para cada período de retorno como puede observarse en la Figura 43.



Figura 43: Ejemplo la envolvente de probabilidad para cada uno de los periodos de retorno en el período 2011-2040.



Fuente: Elaboración propia.

8.3.2.2 Enfoque de la toma de decisiones basadas en probabilidad del riesgo.

Otra de las opciones que se recomiendan es reformular la incertidumbre de los diferentes modelos y escenarios en riesgo. En el caso de la evaluación de las aportaciones mínimas, el riesgo principal es el riesgo de desabastecimiento; por esta razón es necesario recurrir a metodologías como las que se exponen en (Chavez-Jimenez et al., 2013). La metodología trabaja bajo dos conceptos: sistema y región. Sistema es la unidad a través de la cual se puede modelar la explotación de los recursos hídricos como un conjunto de elementos relacionados dinámicamente que realizan una actividad, para cumplir con el objetivo de satisfacer la demanda. Dentro del sistema es posible definir el análisis de regiones (Figura 13), que permite identificar problemas de escasez de agua en los embalses.

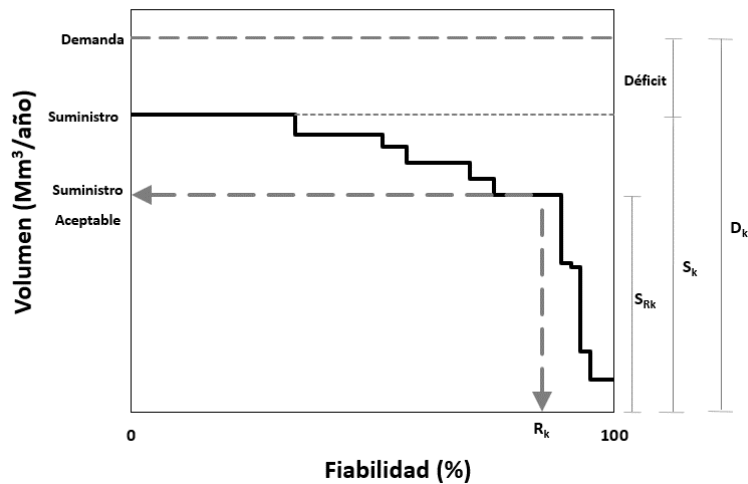
Con la aplicación de la metodología descrita en esta guía se obtienen series de aportaciones para los diferentes modelos y escenarios. Para evaluar el riesgo de no poder satisfacer las demandas del embalse, se deben traducir las series de aportaciones simuladas en series de suministro, tanto en el periodo histórico como las de los escenarios de cambio climático, a partir de los modelos de gestión con las reglas de operación existentes. Sin embargo, como se ha comentado en el apartado 8.1, en ocasiones existen diferencias entre los resultados simulados a través de modelos hidrológicos o modelos de regresión y las series reales e con las que están configuradas los modelos, por esta razón es necesario llevar a cabo una corrección de la serie real a través de perturbaciones en la media y en el coeficiente de variación aplicando la metodología descrita en el apartado anterior adaptada de (Chavez-Jimenez et al., 2013).

Además de las aportaciones, es necesario identificar las series de demanda anual y actualizarlas atendiendo a diversos criterios basados en las variables climáticas, como puede ser que un aumento del 1 % en la temperatura provocaría un aumento en la demanda de agua



residencial de entre el 0,02 % y el 3,8 %, y que una disminución del 1 % en la precipitación provocaría un aumento en la demanda residencial (Wang et al., 2016). En el caso de la demanda de riego, un aumento de temperatura de 1 a 2 °C provocaría un aumento en la evapotranspiración promedio anual de 45 a 91 mm, en relación con las condiciones climáticas actuales, lo que llevaría a un aumento en los requisitos de riego de 3,28 a 6,68 % (Wang et al., 2016). También debe considerarse la demanda ecológica de agua para mantener los caudales mínimos necesarios para la protección de las especies y los beneficios recreativos de un área, y la demanda industrial que del mismo modo tendrá una tendencia a ser mayor en el futuro.

Figura 44: Curva demanda fiabilidad.



Fuente: (Chavez-Jimenez et al., 2013)

A partir de las series de demandas y las series de suministro es posible elaborar curvas demanda-fiabilidad (Figura 44) para cada uno de los tipos de demanda (k) existentes o del conjunto de la demanda. En función de los parámetros definidos en (Chavez-Jimenez et al., 2013) que se obtienen de las curvas fiabilidad demanda es posible identificar los índices de eficiencia I_1 e I_2 y a su vez el riesgo de que el embalse tenga problemas para satisfacer la demanda.

El indicador I_1 se obtiene como media ponderada de los indicadores de cada clase de demanda, (k), tal como se expresa en la ecuación (22). Para el cálculo de I_1 se utilizan dos pesos: el peso relativo y la relevancia del peso. El peso relativo para cada clase de demanda k , α_k , se expresa mediante la expresión (24). La relevancia del peso, β_k , se asigna de forma subjetiva, en función de los objetivos de la política de cuenca. La clase de demanda que se considera más importante en la gestión de la cuenca debe tener el valor β_k más alto. Este valor se asigna con la restricción de que el peso relativo total y la relevancia del peso de todas las clases de demanda del sistema deben ser uno (25) y se expresa como:

$$I_{1k} = \frac{S_k}{D_k} \quad (22)$$

$$I_1 = \sum_{k=1}^K \alpha_k \beta_k I_{1k} \quad (23)$$

$$\alpha_k = \frac{D_k}{\sum_{k=1}^K D_k} \quad (24)$$



$$\sum_{k=1}^K \alpha_k \beta_k = 1 \quad (25)$$

El indicador I_2 cuantifica la fiabilidad del sistema para satisfacer la demanda; la estimación requiere la identificación de los indicadores de fiabilidad para cada clase de demanda k , I_{2k} , dados por la ecuación (26) y expresados como:

$$I_{2k} = \frac{AR_k}{ADR_k} \quad (26)$$

donde I_{2k} es el índice de demanda-fiabilidad bajo el cambio climático para el uso del agua k ; AR_k el área por debajo de la curva demanda-fiabilidad para la fiabilidad que va de 0 % a R_k ; y ADR_k el producto de la demanda D_k por la fiabilidad aceptable R_k para el uso del agua k .

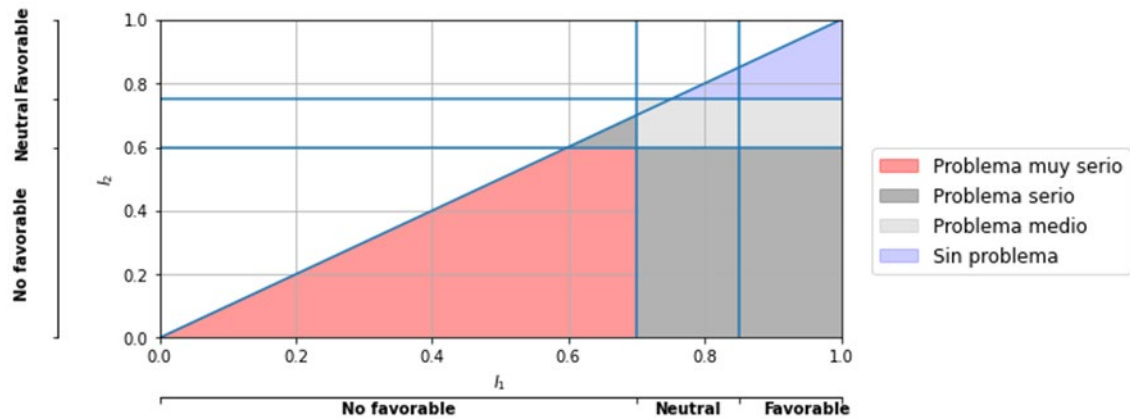
$$I_{2k} = \frac{AR_k}{ADR_k} \quad (27)$$

El indicador I_2 se obtiene a través de:

$$I_2 = \sum_{k=1}^K \alpha_k \beta_k I_{2k} \quad (28)$$

Una vez obtenidos los índices de fiabilidad es posible determinar el riesgo a través de 4 niveles como los que aparecen en la Figura 46 atendiendo a los criterios definidos en (Chavez-Jimenez et al., 2013).

Figura 45: Análisis de riesgo de demanda en embalses.

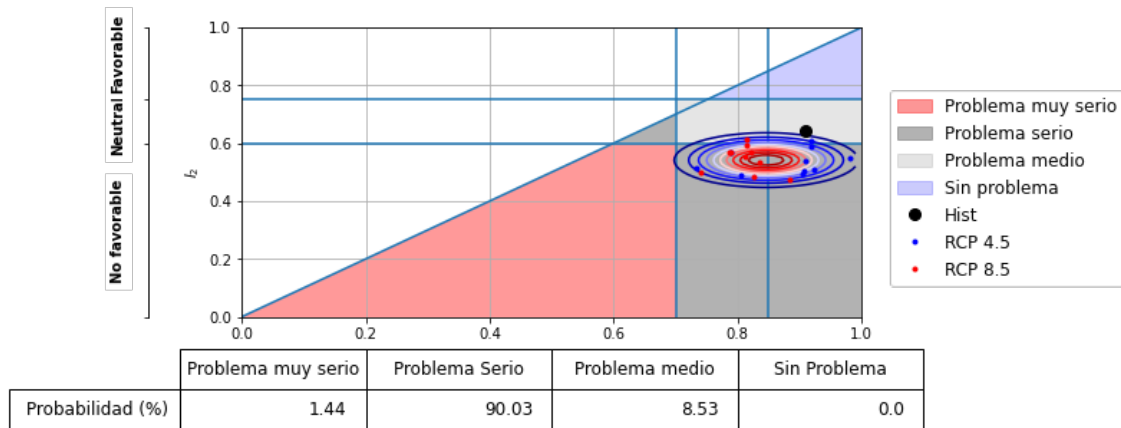


Fuente: Elaboración propia. Adaptada de (Chavez-Jimenez et al., 2013).

Como se ha comentado anteriormente el resultado del análisis planteado en esta guía permite obtener series de aportaciones futuras, y a partir de los modelos de gestión, convertirlas en series de suministros dependientes de la demanda para diferentes escenarios de cambio climático. Con las series de suministros se pueden identificar los índices de fiabilidad, y a su vez, el riesgo asociado para el escenario de cambio climático y modelo considerado. A partir de estos datos se puede elaborar una envolvente de probabilidad a través de la distribución normal multivariada asociada a un periodo de tiempo establecido, por ejemplo 2041-2070, y calcular la probabilidad de que el embalse pueda tener cada uno de los tipos de problema definidos (ver Figura 46).



Figura 46: Análisis de probabilidad del riesgo de demanda en embalses.



Fuente: Elaboración propia. Adaptada de (Chavez-Jimenez et al., 2013).

Este tipo de análisis, junto con el modelo de gestión de embalses que se disponga, permite plantear medidas de adaptación que reduzcan el riesgo de presentar problemas serios y muy serios, simulando cada una de ellas junto con las series de aportaciones obtenidas a través de la metodología propuesta en esta guía. En este caso las medidas que pueden plantearse pueden ser más “duras”, por ejemplo, realizar recrecimientos de embalses, establecer nuevas reglas de operación de los embalses o realizar una reordenación de las demandas.



9 Conclusiones

Las conclusiones fundamentales del análisis del cambio climático a las que se ha llegado a través del estudio de los diferentes embalses son las siguientes:

- La metodología desarrollada e implementada en la librería y aplicación SIMPCCe que acompañan a esta guía permiten analizar las aportaciones mínimas a embalses a través de la generación de series temporales de aportaciones que reproducen adecuadamente el régimen medio y las persistencias temporales. Las aportaciones mínimas que pueden generar impactos en la operativa de los embalses no corresponden a los extremos puntuales -de un mes concreto-, sino a las secuencias de aportaciones bajas que persisten en el tiempo. La metodología permite analizar estas aportaciones bajas persistentes -que darán lugar a las aportaciones mínimas acumuladas en largos periodos de tiempo- a través del análisis de los cuantiles más bajos de las series de aportaciones generadas sintéticamente.
- La utilización de modelos de regresión permite reproducir de forma fidedigna las aportaciones en régimen natural obtenidas a través de modelado hidrológico; en el caso de este estudio las del modelo SIMPA.
- Las redes neuronales (ANN) son la mejor técnica para reproducir aportaciones mensuales a partir de datos climáticos y de modelado hidrológico. De hecho, su comportamiento es más fiable para reproducir los resultados de un modelado anterior que intentar calibrar el modelo hidrológico original.
- El uso de redes neuronales para predecir aportaciones naturalizadas se comporta mejor que los modelos hidrológicos principalmente si se evalúa el sesgo existente entre la aportación real y la simulada, aunque los modelos hidrológicos reproducen ligeramente mejor la variabilidad temporal. No obstante, las redes neuronales requieren de una base de datos previa, mientras que los modelos hidrológicos pueden generarla *ex novo*, tan sólo utilizando información climática y de usos del suelo.
- La información climática distribuida en el espacio presenta importantes correlaciones, por lo que es necesario reducir la cantidad de información que se aporta al modelo para reducir los sobreajustes, utilizando técnicas de reducción de la dimensionalidad.
- Durante el proceso de toma de decisiones para mitigar los efectos del cambio climático es necesario valorar todos los resultados obtenidos del estudio de cambio climático de igual forma, ya que no existe un modelo o escenario que tenga mayor probabilidad de ocurrencia.
- En el caso de plantear medidas blandas para mitigar los efectos del cambio climático es necesario trabajar con el escenario más pesimista ya que son medidas que pueden ser utilizadas en cualquier tipo de escenario. Si las medidas son estructurales es necesario tener en cuenta la envolvente de probabilidad que contiene a todos los escenarios y modelos posibles para determinar un único valor con el que diseñar, siempre del lado de la seguridad.

En cuanto a las conclusiones sobre la afección del cambio climático en las aportaciones mínimas:

- El uso de técnicas de mapeo de cuantiles para la reducción de escala de los pronósticos de los modelos regionales (RCM) o globales (GCM) de cambio climático permite utilizar la información de todos los modelos de forma independiente para actualizar las dinámicas hidrológicas y evaluar así los efectos pronosticados por cada modelo para cada escenario de cambio climático. Asimismo, esta forma de proceder permite cuantificar las incertidumbres asociadas a los pronósticos de cambio climático en su conjunto y las asociadas a cada modelo.



- El uso de la técnica de corrección de sesgo SDM (*Scale Distribution Mapping*) posibilita capturar posibles cambios en la estacionalidad predicha por los modelos climáticos, característica que la diferencia del resto de las técnicas analizadas.
- Los modelos climáticos no proveen predicciones detalladas sino pronósticos generales para grandes áreas. Estos pronósticos presentan incertidumbres mayores cuanto menor sea la escala de análisis.
- Al evaluar los posibles cambios de las aportaciones en el futuro, se debe tener en cuenta los pronósticos de varios modelos para capturar la incertidumbre sobre la variabilidad del clima.
- El análisis técnico de los efectos producidos por el cambio climático utilizando varios modelos tiene un marcado carácter estadístico. Por ello, si se quiere trabajar con escenarios o un número reducido de situaciones plausibles, es necesario establecer criterios y ligarlos a valores estadísticos. Por ejemplo, generar una situación optimista ligada al percentil del 5%, que correspondería a los cambios menores, o una pesimista ligada al percentil del 95%, que representaría la situación de los cambios más importantes.
- Cuando los índices de calidad del ajuste de los modelos hidrológicos o de regresión se alejan de los estándares de calidad ampliamente aceptados, los pronósticos pueden presentar sesgos importantes. En estos casos, la utilización de técnicas de perturbación de las series reales puede proporcionar resultados más robustos.
- Los efectos del cambio climático son complejos y no lineales, por lo que el análisis de los cambios sobre estadísticos agregados puede no dar una imagen fidedigna de los cambios realmente esperables. Un aumento de la temperatura media anual no tiene por qué suponer que la acumulación de nieve vaya a reducirse en invierno, lo mismo que una reducción de la precipitación media anual no implica automáticamente una reducción en la intensidad de los mayores temporales. Por ello es importante analizar las características concretas de las series que controlan los efectos que se estén estudiando.
- El cambio climático afecta en gran medida a las aportaciones medias, dando lugar a una reducción de estas.
- Una reducción de las aportaciones medias anuales no indica una reducción a nivel mensual a lo largo del año, pueden existir meses donde las aportaciones se incrementen de forma considerable.
- Las aportaciones mínimas también se ven afectadas por el cambio climático, lo que se traduce en un incremento del número de meses donde la aportación se sitúa por debajo de umbrales establecidos en el período histórico.
- La sequía hidrológica tiende a aumentar, tanto en su severidad como en su duración.



10 Bibliografía

- Amblar-Francés, P., Casado-Calle, M. J., Pastor-Saavedra, M. A., Ramos-Calzado, P., & Rodríguez-Camino, E. (2017). *Guía de escenarios regionalizados de cambio climático sobre España a partir de los resultados del IPCC-AR5*.
- Barranco, L. M., Dimas, M., & Estrada, A. J. F. (2018). *Nueva evaluación del impacto futuro del cambio climático en los recursos hídricos en España A New Assessment of the Future Effect of Climate Change on Water*.
- Bosshard, T., Carambia, M., Goergen, K., Kotlarski, S., Krahe, P., Zappa, M., & Schär, C. (2013). Quantifying uncertainty sources in an ensemble of hydrological climate-impact projections. *Water Resources Research*, 49(3), 1523–1536. <https://doi.org/10.1029/2011WR011533>
- Bovolo, C., Blenkinsop, S., Majone, B., Zambrano-Bigiarini, M., Fowler, H., Bellin, A., ... Barth, J. (2010). *Climate Change, Water Resources and Pollution in the Ebro Basin: Towards an Integrated Approach*. https://doi.org/10.1007/698_2010_86
- Buendia, C., Batalla, R. J., Sabater, S., Palau, A., & Marcé, R. (2016). Runoff Trends Driven by Climate and Afforestation in a Pyrenean Basin. *Land Degradation and Development*, 27(3), 823–838. <https://doi.org/10.1002/ldr.2384>
- Candela, L., Tamoh, K., Olivares, G., & Gomez, M. (2012). Modelling impacts of climate change on water resources in ungauged and data-scarce watersheds. Application to the Siurana catchment (NE Spain). *Science of the Total Environment*, 440, 253–260. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.06.062>
- Cannon, A. J., Sobie, S. R., & Murdock, T. Q. (2015). Bias correction of GCM precipitation by quantile mapping: How well do methods preserve changes in quantiles and extremes? *Journal of Climate*, 28(17), 6938–6959. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-14-00754.1>
- CEDEX. (2017a). *Evaluación del impacto del Cambio Climático en los recursos hídricos y sequías en España*. 320.
- CEDEX. (2017b). *Evaluación del impacto del Cambio Climático en los recursos hídricos y sequías en España*. 320.
- CEDEX. (2019a). *Evaluación de recursos hídricos en régimen natural en España (1940/41-2017/18)*. 157.
- CEDEX. (2019b). *Evaluación de recursos hídricos en régimen natural en España (1940/41-2017/18)*. 157.
- Chavez-Jimenez, A., Lama, B., Garrote, L., Martin-Carrasco, F., Sordo-Ward, A., & Mediero, L. (2013). Characterisation of the Sensitivity of Water Resources Systems to Climate Change. *Water Resources Management*, 27(12), 4237–4258. <https://doi.org/10.1007/s11269-013-0404-2>
- Ciscar, J. C., Feyen, L., & Ibarreta, D. (2018). *Climate impacts in Europe Final report of the JRC*. <https://doi.org/10.2760/93257>
- Copernicus Climate Change. (2021). *Hydrology related climate impact indicators from 1970 to 2100 derived from bias adjusted European climate projections C3S _ 424 _ SMHI Operational Water Service*. (April).



- Corzo. (2013). *PLAN DE ADAPTACIÓN AL Recursos hídricos*.
- D. N. Moriasi, J. G. Arnold, M. W. Van Liew, R. L. Bingner, R. D. Harmel, & T. L. Veith. (2007). Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885–900. <https://doi.org/10.13031/2013.23153>
- Donnelly, C., Andersson, J. C. M., & Arheimer, B. (2016). Using flow signatures and catchment similarities to evaluate the E-HYPE multi-basin model across Europe. *Hydrological Sciences Journal*, 61(2), 255–273. <https://doi.org/10.1080/02626667.2015.1027710>
- Escriva-Bou, A., Pulido-Velazquez, M., & Pulido-Velazquez, D. (2017). Economic Value of Climate Change Adaptation Strategies for Water Management in Spain's Jucar Basin. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 143(5), 04017005. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)wr.1943-5452.0000735](https://doi.org/10.1061/(asce)wr.1943-5452.0000735)
- Esteve, P., Varela-Ortega, C., Blanco-Gutiérrez, I., & Downing, T. E. (2015). A hydro-economic model for the assessment of climate change impacts and adaptation in irrigated agriculture. *Ecological Economics*, 120, 49–58. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2015.09.017>
- Estrela, T., Pérez-Martin, M. A., & Vargas, E. (2012). Impacts of climate change on water resources in Spain. *Hydrological Sciences Journal*, 57(6), 1154–1167. <https://doi.org/10.1080/02626667.2012.702213>
- Fortes, P., Roebeling, P., Robaina-Alves, M., Teotónio, C., & Rodriguez, M. (2017). Assessing the impacts of climate change on hydropower generation and the power sector in Portugal: A partial equilibrium approach. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 74(September 2016), 788–799. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.002>
- Garijo, C., Mediero, L., & Garrote, L. (2018a). Utilidad de las proyecciones climáticas generadas por AEMET para estudios de impacto del cambio climático sobre avenidas a escala nacional. *Ingeniería Del Agua*, 22(3), 153. <https://doi.org/10.4995/ia.2018.9312>
- Garijo, C., Mediero, L., & Garrote, L. (2018b). Utilidad de las proyecciones climáticas generadas por AEMET para estudios de impacto del cambio climático sobre avenidas a escala nacional. *Ingeniería Del Agua*, 22(3), 153. <https://doi.org/10.4995/ia.2018.9312>
- Garijo, Carlos, & Mediero, L. (2018). *Quantification of the expected changes in annual maximum daily precipitation quantiles under climate change in the Iberian Peninsula*. 5819. <https://doi.org/10.3390/ecws-3-05819>
- Garrote, L., Sordo-Ward, Á., & Iglesias, A. (2020). *Eventos hidrológicos extremos y cambio climático*.
- Gómez, G., Cabos, W. D., Liguori, G., Sein, D., Lozano-Galeana, S., Fita, L., ... Gaertner, M. Á. (2016). Characterization of the wind speed variability and future change in the Iberian Peninsula and the Balearic Islands. *Wind Energy*, 19(7), 1223–1237. <https://doi.org/10.1002/we.1893>
- Gómez-Navarro, J., Montávez, J., Jimenez-Guerrero, P., Jerez, S., Garcia-Valero, J., & González Rouco, J. F. (2010). Warming patterns in regional climate change projections over the Iberian Peninsula. *Meteorologische Zeitschrift*, 19, 275–285. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2010/0351>
- Gonçalves, M., Barrera-Escoda, A., Guerreiro, D., Baldasano, J. M., & Cunillera, J. (2014). Seasonal to yearly assessment of temperature and precipitation trends in the North Western Mediterranean Basin by dynamical downscaling of climate scenarios at high resolution (1971–2050). *Climatic Change*, 122(1–2), 243–256. <https://doi.org/10.1007/s10584-013-0994-y>



- Guerreiro, S. B., Dawson, R. J., Kilsby, C., Lewis, E., & Ford, A. (2018). Future heat-waves, droughts and floods in 571 European cities. *Environmental Research Letters*, 13(3), 34009. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aaaad3>
- Gutiérrez, J. M., San-Martín, D., Brands, S., Manzanas, R., & Herrera, S. (2013). Reassessing statistical downscaling techniques for their robust application under climate change conditions. *Journal of Climate*, 26(1), 171–188. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-11-00687.1>
- Haro-Monteagudo, D., Solera, A., & Andreu, J. (2017). Drought early warning based on optimal risk forecasts in regulated river systems: Application to the Jucar River Basin (Spain). *Journal of Hydrology*, 544, 36–45. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.11.022>
- Herrera, S., Gutiérrez, J. M., Ancell, R., Pons, M. R., Frías, M. D., & Fernández, J. (2012a). Development and analysis of a 50-year high-resolution daily gridded precipitation dataset over Spain (Spain02). *International Journal of Climatology*, 32(1), 74–85. <https://doi.org/10.1002/joc.2256>
- Herrera, S., Gutiérrez, J. M., Ancell, R., Pons, M. R., Frías, M. D., & Fernández, J. (2012b). Development and analysis of a 50-year high-resolution daily gridded precipitation dataset over Spain (Spain02). *International Journal of Climatology*, 32(1), 74–85. <https://doi.org/10.1002/joc.2256>
- Hijmans, R. J., Cameron, S. E., Parra, J. L., Jones, P. G., & Jarvis, A. (2005). Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 25(15), 1965–1978. <https://doi.org/10.1002/joc.1276>
- Ines, A. V. M., & Hansen, J. W. (2006). Bias correction of daily GCM rainfall for crop simulation studies. *Agricultural and Forest Meteorology*, 138(1–4), 44–53. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2006.03.009>
- IPCC. (2007). *Climate change 2007: the physical science basis: contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
- IPCC. (2014). *Climate change 2014: synthesis report*.
- Jacob, D., Petersen, J., Eggert, B., Alias, A., Christensen, O. B., Bouwer, L. M., ... Yiou, P. (2014). EURO-CORDEX: New high-resolution climate change projections for European impact research. *Regional Environmental Change*, 14(2), 563–578. <https://doi.org/10.1007/s10113-013-0499-2>
- Junta de Andalucía. (2012). *Estudio Básico de Adaptación al Cambio Climático Sector Agricultura*.
- Kilsby, C. G., Tellier, S. S., Fowler, H. J., & Howels, T. K. (2007). Hydrological impacts of climate change on the Tejo and Guadiana Rivers. *Hydrology and Earth System Sciences*, 11(3), 1175–1189. <https://doi.org/10.5194/hess-11-1175-2007>
- López-Franca, N., Sánchez, E., Losada, T., Domínguez, M., Romera, R., & Gaertner, M. Á. (2015). Markovian characteristics of dry spells over the Iberian Peninsula under present and future conditions using ESCENA ensemble of regional climate models. *Climate Dynamics*, 45(3), 661–677. <https://doi.org/10.1007/s00382-014-2280-8>
- Lorenzo-Lacruz, J., Vicente-Serrano, S. M., López-Moreno, J. I., Beguería, S., García-Ruiz, J. M., & Cuadrat, J. M. (2010). The impact of droughts and water management on various hydrological systems in the headwaters of the Tagus River (central Spain). *Journal of Hydrology*, 386(1), 13–26. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.01.001>



- Maraun, D., Widmann, M., Gutiérrez, J. M., Kotlarski, S., Chandler, R. E., Hertig, E., ... Wilcke, R. A. I. (2015). VALUE: A framework to validate downscaling approaches for climate change studies. *Earth's Future*, 3(1), 1–14. <https://doi.org/10.1002/2014EF000259>
- 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. <https://doi.org/10.4995/ia.2017.6361>
- Mazzetti, C., Decremer, D., Barnard, C., Blick, M., Carton de Wiart, C., Wetterhall F., Prudhomme, C. (2020). *River discharge and related historical data from the European Flood Awareness System, v4.0, Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS)*.
- Melton, F. (2015). NASA Earth Exchange Global Daily Downscaled Projections (NEX-GDDP) 1 . Intent of This Document and POC. *Guide*, 1–8.
- Montávez, J. P., Fernández, J., Casanueva, A., Gutiérrez, J. M., & Sánchez, E. (2017). Regional climate projections over Spain: Atmosphere. Present climate evaluation. *CLIVAR Exchanges No. 73*, (November), 39–44.
- Motevali Bashi Naeini, E., Akhoond-Ali, A. M., Radmanesh, F., Koupai, J. A., & Soltaninia, S. (2021a). Comparison of the Calculated Drought Return Periods Using Tri-variate and Bivariate Copula Functions Under Climate Change Condition. *Water Resources Management*, 35(14), 4855–4875. <https://doi.org/10.1007/s11269-021-02965-6>
- Motevali Bashi Naeini, E., Akhoond-Ali, A. M., Radmanesh, F., Koupai, J. A., & Soltaninia, S. (2021b). Comparison of the Calculated Drought Return Periods Using Tri-variate and Bivariate Copula Functions Under Climate Change Condition. *Water Resources Management*, 35(14), 4855–4875. <https://doi.org/10.1007/s11269-021-02965-6>
- OMM. (2016). *Aspirar a un mundo con seguridad hídrica TIEMPO CLIMA AGUA Programa de gestión integrada de sequías Manual de indicadores e índices de sequía*. Retrieved from www.droughtmanagement.info
- Osca, J., Romero, R., & Alonso, S. (2013). Precipitation projections for Spain by means of a weather typing statistical method. *Global and Planetary Change*, 109, 46–63. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2013.08.001>
- Parisouj, P., Mohebzadeh, H., & Lee, T. (2020). Employing Machine Learning Algorithms for Streamflow Prediction: A Case Study of Four River Basins with Different Climatic Zones in the United States. *Water Resources Management*, 34(13), 4113–4131. <https://doi.org/10.1007/s11269-020-02659-5>
- Pascual, D., Pla, E., Lopez-Bustins, J. A., Retana, J., & Terradas, J. (2015). Impacts of climate change on water resources in the Mediterranean Basin: a case study in Catalonia, Spain. *Hydrological Sciences Journal*, 60(12), 2132–2147. <https://doi.org/10.1080/02626667.2014.947290>
- Peral García, C., Navascués Fernández-Victorio, B., & Ramos Calzado, P. (2017). Serie de precipitación diaria en rejilla con fines climáticos. *Serie de Precipitación Diaria En Rejilla Con Fines Climáticos*. <https://doi.org/10.31978/014-17-009-5>
- Pons, M. R., Herrera, S., & Gutiérrez, J. M. (2016). Future trends of snowfall days in northern Spain from ENSEMBLES regional climate projections. *Climate Dynamics*, 46(11–12), 3645–3655. <https://doi.org/10.1007/s00382-015-2793-9>



- Pulido-Velazquez, D., Collados-Lara, A. J., & Alcalá, F. J. (2018). Assessing impacts of future potential climate change scenarios on aquifer recharge in continental Spain. *Journal of Hydrology*, 567, 803–819. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.10.077>
- Pulido-Velazquez, D., García-Aróstegui, J. L., Molina, J. L., & Pulido-Velazquez, M. (2015). Assessment of future groundwater recharge in semi-arid regions under climate change scenarios (Serral-Salinas aquifer, SE Spain). Could increased rainfall variability increase the recharge rate? *Hydrological Processes*, 29(6), 828–844. <https://doi.org/10.1002/hyp.10191>
- Quiroga, S., Garrote, L., Iglesias, A., Fernández-Haddad, Z., Schlickerrieder, J., de Lama, B., ... Sánchez-Arcilla, A. (2011). The economic value of drought information for water management under climate change: a case study in the Ebro basin. *Natural Hazards and Earth System Science*, 11(3), 643–657. <https://doi.org/10.5194/nhess-11-643-2011>
- Ramirez-Villegas, J., & Jarvis, A. (2010). Downscaling Global Circulation Model Outputs: The Delta Method Decision and Policy Analysis Working Paper No. 1. *Policy Analysis*, (1), 18. <https://doi.org/citeulike-article-id:12801153>
- Ribalaygua, J., Pino, M. R., Pórtoles, J., Roldán, E., Gaitán, E., Chinarro, D., & Torres, L. (2013). Climate change scenarios for temperature and precipitation in Aragón (Spain). *Science of The Total Environment*, 463–464, 1015–1030. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.06.089>
- Richter, B. D., Baumgartner, J. V., Powell, J., & Braun, D. P. (1996). A Method for Assessing Hydrologic Alteration within Ecosystems. *Conservation Biology*, 10(4), 1163–1174. <https://doi.org/https://doi.org/10.1046/j.1523-1739.1996.10041163.x>
- Ruti, P. M., Somot, S., Giorgi, F., Dubois, C., Flaounas, E., Obermann, A., ... Vervatis, V. (2016). Med-CORDEX Initiative for Mediterranean Climate Studies. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 97(7), 1187–1208. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-14-00176.1>
- Sánchez-Arcilla, A., Gracia, V., Sierra, J. P., García-León, M., & Mösso, C. (2016). *Tercer informe sobre el canvi climàtic a Catalunya: 8. Sistemes Costaners i Dinàmica Litoral*.
- San-Martín, D., Manzanas, R., Brands, S., Herrera, S., & Gutiérrez, J. M. (2017). Reassessing Model Uncertainty for Regional Projections of Precipitation with an Ensemble of Statistical Downscaling Methods. *Journal of Climate*, 30(1), 203–223. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0366.1>
- Sheridan, S., & Lee, C. C. (2012). Synoptic climatology and the analysis of atmospheric teleconnections. *Progress in Physical Geography*, 36(4), 548–557. <https://doi.org/10.1177/0309133312447935>
- Switaneck, B. M., Troch, A. P., Castro, L. C., Leuprecht, A., Chang, H. I., Mukherjee, R., & Demaria, M. C. E. (2017). Scaled distribution mapping: A bias correction method that preserves raw climate model projected changes. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(6), 2649–2666. <https://doi.org/10.5194/hess-21-2649-2017>
- Telesca, L., Lovallo, M., Lopez-Moreno, I., & Vicente-Serrano, S. (2012). Investigation of scaling properties in monthly streamflow and Standardized Streamflow Index (SSI) time series in the Ebro basin (Spain). *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 391(4), 1662–1678. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2011.10.023>
- The Nature Conservancy. (2011). *Indicadores de alteración hidrológica*. 89.



- Themeßl, M. J., Gobiet, A., & Heinrich, G. (2012). Empirical-statistical downscaling and error correction of regional climate models and its impact on the climate change signal. *Climatic Change*, 112(2), 449–468. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0224-4>
- Touhami, I., Chirino, E., Andreu, J. M., Sánchez, J. R., Moutahir, H., & Bellot, J. (2015). Assessment of climate change impacts on soil water balance and aquifer recharge in a semiarid region in south east Spain. *Journal of Hydrology*, 527, 619–629. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.05.012>
- Turco, M., Sanna, A., Herrera García, S., Llasat, M., & Gutiérrez, J. (2015). *Evaluation of the ENSEMBLES Transient RCM Simulations Over Spain: Present Climate Performance and Future Projections*. 199–203. https://doi.org/10.1007/978-3-319-09300-0_38
- Vicente-Serrano, S. M., Zabalza-Martínez, J., Borràs, G., López-Moreno, J. I., Pla, E., Pascual, D., ... Tomas-Burquera, M. (2017). Effect of reservoirs on streamflow and river regimes in a heavily regulated river basin of Northeast Spain. *CATENA*, 149, 727–741. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.03.042>
- Wang, X. jun, Zhang, J. yun, Shahid, S., Guan, E. hong, Wu, Y. xiang, Gao, J., & He, R. min. (2016). Adaptation to climate change impacts on water demand. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 21(1), 81–99. <https://doi.org/10.1007/s11027-014-9571-6>
- Zabalza-Martínez, J., Vicente-Serrano, S. M., Savé, R., Peña-Gallardo, M., Martín-Hernández, N., López-Moreno, J. I., ... Tomas-Burquera, M. (2016). Effect of reservoirs on streamflow and river regimes in a heavily regulated river basin of Northeast Spain. *Catena*, 149, 727–741. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.03.042>
- Zambrano-Bigiarini, M., Majone, B., Bellin, A., Bovolo, C., Blenkinsop, S., & Fowler, H. (2010). *Hydrological Impacts of Climate Change on the Ebro River Basin*. https://doi.org/10.1007/698_2010_85



ANEXO A. TÉRMINOS Y CONCEPTOS CLAVE



<p>Adaptación</p>	<p>Proceso de ajuste al clima real o proyectado y sus efectos. En los sistemas humanos, la adaptación trata de moderar o evitar los daños o aprovechar las oportunidades beneficiosas. En algunos sistemas naturales, la intervención humana puede facilitar el ajuste al clima proyectado y a sus efectos.</p> <p>Transformación: Cambio en los atributos fundamentales de los sistemas naturales y humanos. En este resumen, la transformación podría reflejar paradigmas, objetivos o valores reforzados, alterados o armonizados dirigidos a promover la adaptación en pro del desarrollo sostenible, en particular la reducción de la pobreza.</p>
<p>AEMET</p>	<p>Agencia Estatal de Meteorología de España es una agencia estatal, cuyo objetivo básico es la prestación de servicios meteorológicos, que sean competencia del Estado.</p>
<p>Anomalía</p>	<p>La definición estándar es "Algo que se desvía de lo que es estándar, normal o esperado".</p> <p>Al referirse a los conjuntos de datos de salida de los modelos climáticos:</p> <p>Las anomalías son los cambios de esa variable con respecto a un valor de referencia, por lo que los pronósticos pueden presentarse como el cambio de temperatura en relación con una climatología de referencia que podría ser 1971-2000, por ejemplo, en lugar del valor absoluto.</p>
<p>ANN</p>	<p>Modelo computacional que consiste en un conjunto de unidades, llamadas neuronas artificiales, conectadas entre sí para transmitirse señales. La información de entrada atraviesa la red neuronal (donde se somete a diversas operaciones) produciendo unos valores de salida. Se trata de un método de aprendizaje automático</p>
<p>ANOVA</p>	<p>Técnica estadística que permite comparar grupos de medidas y que normalmente se emplea para establecer semejanzas y diferencias entre grupos distintos.</p>
<p>AR4</p>	<p>Cuarto informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. El cuarto de una serie de informes del IPCC.</p>
<p>AR5</p>	<p>5º Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Se publicó en 2014. Es el mayor y más detallado resumen de la situación del cambio climático, se compone de 4 secciones principales: La base científica física; Impactos, Adaptación y Vulnerabilidad; Mitigación del Cambio Climático; El Informe de Síntesis.</p>
<p>AR6</p>	<p>6º Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Se publicó en 2021. El informe de síntesis será publicado en septiembre de 2022</p>



Sesgo (BIAS)	Parámetro que mide la «exactitud» del sistema de medición y representa al error sistemático del sistema. Es la contribución al error total debido a los efectos combinados de todas las fuentes de variación, conocidas o desconocidas.
CAMREC	Aplicación informática que facilita la consulta y análisis de los mapas que resumen los resultados del estudio "Evaluación del impacto del cambio climático en los recursos hídricos y sequías en España".
CDF	Función de distribución acumulada (en inglés <i>Cummulative Distribution Function</i>). La forma acumulativa de una función de densidad de probabilidad que describe el carácter estadístico de una variable
Climatologías	Al referirse a los conjuntos de datos de salida de los modelos climáticos: Las climatologías son variables promedio a lo largo de un periodo largo –Por ejemplo, pueden ser 20 o 30 años de las precipitaciones de enero, para un período centrado en 2085.
CMIP3	Proyecto de intercomparación de modelos acoplados 3.
CMIP5	Proyecto de Intercomparación de modelos acoplados 5.
CMIP6	Proyecto de Intercomparación de modelos acoplados 6. El último proyecto de modelización del clima mundial que se utilizará para redactar el próximo 6º Informe de Evaluación del IPCC. Informe de Evaluación del IPCC.
CORDEX	<i>Co-Ordinated Regional climate Downscaling Experiment</i> CORDEX es un marco destinado a mejorar la coordinación de los esfuerzos internacionales en la investigación de la reducción del clima regional. El sitio web albergará los conjuntos de datos de salida de los MCR de todo el mundo.
Reducción de escala (Downscaling)	En la modelización numérica, el downscaling es un proceso que toma los resultados de un modelo e información a resoluciones espaciales o temporales más pequeñas que la escala de malla o el paso del modelo.
Reducción de escala (Downscaling) dinámica	El cambio climático se define como el método en el que los resultados de los GCMs son utilizados como condiciones de contorno de los modelos de circulación regional capaces de capturar efectos locales al aumentar la resolución espacial y temporal, y ajustar sus parametrizaciones.
Reducción de escala (Downscaling) estadística	El cambio climático se define como el método que utiliza un modelo estadístico utilizando variables atmosféricas como predictores, y las variables de interés en el periodo presente como predictandos.
EFAS	<i>European Flood Awareness System</i> . El objetivo del Sistema Europeo de Información sobre Inundaciones (EFAS) es apoyar las medidas de preparación antes de que se produzcan grandes inundaciones, especialmente en las grandes cuencas fluviales transnacionales y en toda Europa en general.



ENSEMBLES	ENSEMBLES Nombre del proyecto europeo para recopilar varias ejecuciones de modelos climáticos GCM/RCM. Base de datos de resultados almacenados en su sitio web para la investigación.
Ensemble	Una colección de ejecuciones para el mismo período de tiempo, pero demandando diferentes modelos para permitir la comparación de los resultados.
EPSG	EPSG es el acrónimo de <i>European Petroleum Survey Group</i> , organización relacionada con la industria petrolera en Europa. Este organismo desarrolló un repositorio de parámetros geodésicos que contiene información sobre sistemas (marcos) de referencia antiguos y modernos (geocéntricos), pronósticos cartográficas y elipsoides de todo el mundo.
ESCENA	Generación de escenarios regionalizados de cambio climático en España con modelos de alta resolución. El objetivo general de ESCENA es la generación de escenarios regionalizados de cambio climático sobre España con muy alta resolución, mediante la aplicación de cuatro modelos regionales de clima sobre un dominio que incluye todo el territorio español (península y archipiélagos).
ESTCENA	Programa coordinado para la generación de escenarios regionalizados de cambio climático: Regionalización estadística
EURO-CORDEX	Euro-CORDEX es la rama europea de la iniciativa internacional CORDEX (Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment; https://cordex.org), que coordina la producción de escenarios regionales de Cambio Climático en todo el planeta utilizando modelos regionales del clima. Aunque la resolución estándar de CORDEX son 44 km, en el caso de Euro-CORDEX se han realizado proyecciones a mayor resolución (11 km)
Estacionalidad	Variación estacional de una serie temporal es la variación periódica y predecible de la misma con un periodo inferior o igual a un año. Es una de las componentes de las series temporales, y se contrapone a la tendencia y a la variación cíclica.
Estacionariedad	El concepto se refiere a que las propiedades de la serie no varían con respecto al tiempo. En otras palabras, significa que su variación (la forma en la que cambia) no cambia en función del tiempo.
ETP	Evapotranspiración potencial, se define como la máxima cantidad de agua que una superficie totalmente cubierta de vegetación, y que no padece de falta de agua, puede liberar a la atmósfera en las condiciones atmosféricas del momento en que se realiza el cálculo.
ETR	Evapotranspiración real, se define como la cantidad de agua realmente consumida por un terreno cultivado de acuerdo con las disponibilidades de agua.
Exposición	La presencia de personas; medios de subsistencia; especies o ecosistemas; funciones, servicios y recursos ambientales; infraestructura; o activos económicos, sociales o culturales en lugares y entornos que podrían verse afectados negativamente.



FDC	Curva de Caudales Clasificados (en inglés <i>Flow Duration Curve</i> , FDC) representa el porcentaje del tiempo durante el cual los caudales han sido igualados o excedidos.
FR	El forzamiento radiativo o forzamiento climático es la diferencia entre la insolación (luz solar) absorbida por la Tierra y la energía irradiada de vuelta al espacio.
GCM	Modelo climático global / Modelo de circulación general.
HIRLAM	El sistema de predicción HIRLAM (<i>High Resolution Limited Area Model</i>) es un Código de asimilación de datos y de predicción climática.
IHA	<i>Indicators of Hydrologic Alteration (IHA)</i> . Metodología que se utiliza para evaluar el grado de desviación del régimen natural de caudales debido a las presas y al cambio climático proyectado.
Incertidumbre	La incertidumbre se refiere a anomalías epistémicas que implican información imperfecta o desconocida. Se aplica a las predicciones de eventos futuros, a las mediciones físicas que ya se han realizado o a lo desconocido.
Impacto	Efecto en los sistemas naturales y humanos. En el presente informe, el término impacto se emplea principalmente para describir los efectos sobre los sistemas naturales y humanos de episodios meteorológicos y climáticos extremos y del cambio climático. Los impactos generalmente se refieren a efectos en las vidas, medios de subsistencia, salud, ecosistemas, economías, sociedades, culturas, servicios e infraestructuras debido a la interacción de los cambios climáticos o fenómenos climáticos peligrosos que ocurren en un lapso de tiempo específico y a la vulnerabilidad de las sociedades o los sistemas expuestos a ellos. Los impactos también se denominan consecuencias y resultados. Los impactos del cambio climático sobre los sistemas geofísicos, incluidas las inundaciones, las sequías y la elevación del nivel del mar, son un subconjunto de los impactos denominados impactos físicos.
IPCC	Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Órgano científico de las Naciones Unidas, líder internacional en la evaluación del cambio climático, albergado por la OMM.
NEX-GDDP	Conjunto de datos de Pronósticos de escala reducida diarias globales de <i>NASA Earth Exchange</i> que se compone de escenarios climáticos reducidos para el mundo que se derivan de las ejecuciones del Modelo de circulación general (GCM)
NSE	El coeficiente de eficiencia Nash–Sutcliffe es uno de los más usados en hidrología para la comprobación de que los ajustes simulados son aceptables.
OMM	La Organización Meteorológica Mundial es una organización internacional creada en 1950 en el seno de la ONU cuyo objetivo es asegurar y facilitar la cooperación entre los servicios meteorológicos nacionales, promover y unificar los instrumentos de medida y los métodos de observación.



Overfitting	El sobreajuste u overfitting, es el efecto de sobreentrenar un algoritmo de aprendizaje con unos ciertos datos para los que se conoce el resultado deseado. El algoritmo de aprendizaje debe alcanzar un estado en el que será capaz de predecir el resultado en otros casos a partir de lo aprendido con los datos de entrenamiento, generalizando para poder resolver situaciones distintas a las acaecidas durante el entrenamiento. Sin embargo, cuando un sistema se entrena demasiado (se sobreentrena) o se entrena con datos extraños, el algoritmo de aprendizaje puede quedar ajustado a unas características muy específicas de los datos de entrenamiento que no tienen relación causal con la función objetivo. Durante la fase de sobreajuste el éxito al responder las muestras de entrenamiento sigue incrementándose, mientras que su actuación con muestras nuevas va empeorando.
Sesgo Porcentual (PBIAS)	Expresa de forma porcentual la relación entre el volumen del hidrograma observado y el simulado.
PCA	<i>Principal Component Analysis</i> (PCA) es un método estadístico que permite simplificar la complejidad de espacios muestrales con muchas dimensiones a la vez que conserva su información.
Peligrosidad	Acaecimiento potencial de un suceso o tendencia físico de origen natural o humano, o un impacto físico, que puede causar pérdidas de vidas, lesiones u otros efectos negativos sobre la salud, así como daños y pérdidas en propiedades, infraestructuras, medios de subsistencia, prestaciones de servicios, ecosistemas y recursos ambientales. En el presente informe, el término peligro se refiere generalmente a sucesos o tendencias físicos relacionados con el clima o los impactos físicos de este.
PES	Planes Especiales de Sequía (PES)
PESETA	Proyecto PESETA (<i>Projection of Economic impacts of climate change in Sectors of the European Union based on bottom-up Analysis</i>) es contribuir a una mejor comprensión de los posibles efectos físicos y económicos provocados por el cambio climático en Europa y evaluar los impactos.
PNACC	Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático. Constituye el instrumento de planificación básico para promover la acción coordinada frente a los efectos del cambio climático en España. Tiene como principal objetivo evitar o reducir los daños presentes y futuros derivados del cambio climático y construir una economía y una sociedad más resilientes.
PRUDENCE	Una base de datos de MCR que funciona en Europa desde 2004. El predecesor de ENSEMBLES.
QDM	Mapeo de delta cuantiles (QDM).
QM	Mapeo de cuantiles.
R²	En estadística, el coeficiente de determinación, denominado R ² es un estadístico usado en el contexto de un modelo estadístico cuyo principal propósito es predecir futuros resultados o probar una hipótesis.



Resiliencia	Capacidad de los sistemas sociales, económicos y ambientales de afrontar un suceso, tendencia o perturbación peligroso respondiendo o reorganizándose de modo que mantengan su función esencial, su identidad y su estructura, y conservando al mismo tiempo la capacidad de adaptación, aprendizaje y transformación.
RCM	Son modelos climáticos de un área limitada, como puede ser una región (p.e. El Mediterráneo), y pueden llegar a tener resoluciones de entre 50 km y pocos Km. Estos modelos son alimentados en cuanto a las condiciones de contorno y de inicialización con datos de modelos globales.
RCP	Vía de concentración representativa. Un escenario futuro de concentración de gases de efecto invernadero atmosférico utilizado para definir posibles futuros en la modelización climática CMIP5.
Riesgo	Potencial de consecuencias en que algo de valor está en peligro con un desenlace incierto, reconociendo la diversidad de valores. A menudo el riesgo se representa como la probabilidad de acaecimiento de sucesos o tendencias peligrosos multiplicada por los impactos en caso de que ocurran tales sucesos o tendencias. Los riesgos resultan de la interacción de la vulnerabilidad, la exposición y el peligro (véase la figura 1). En el presente informe, el término riesgo se utiliza principalmente en referencia a los riesgos de impactos del cambio climático.
SAIH	Sistemas Automáticos de Información Hidrológica (SAIH) constituyen una potente herramienta para las Confederaciones Hidrográficas (CCHH), tanto para la gestión de recursos hídricos como para la previsión y control de avenidas en coordinación con los organismos de protección civil de las diferentes Comunidades Autónomas y del Estado.
SDM	Mapeo de distribución a escala.
SIMPA	SIMPA (Sistema Integrado de Modelación Precipitación-Aportación) es un modelo con el que se realiza en España la evaluación de los recursos hídricos en régimen natural.
SPAIN 02	El conjunto de datos Spain02 corresponde a una rejilla de 20 km que cubre la España peninsular y Baleares, en la que se han interpolado los datos diarios de precipitación de más de 2000 estaciones de la Agencia Estatal de Meteorología.
SPI	El índice SPI se define como un valor numérico que representa el número de desviaciones estándar de la precipitación caída a lo largo del período de acumulación de que se trate, respecto de la media, una vez que la distribución original de la precipitación ha sido transformada a una distribución normal. De este modo se define una escala de valores que se agrupa en tramos relacionados con el carácter de la precipitación.
SRES	Informe especial sobre escenarios de emisiones Informe del IPCC de 2008 en el que se describen los escenarios de emisiones que se utilizaron en la modelización del 4º Informe de Evaluación (CMIP3).



SSFI	Índice normalizado de los caudales fluviales (SSFI). Este índice similar al SPI, caracteriza las sequías mediante la cuantificación del déficit de aportaciones en diferentes períodos de tiempo.
SVR	<i>Support Vector Regression (SVR)</i> es un modelo que se utiliza como un esquema de regresión para predecir valores.
Vulnerabilidad	Propensión o predisposición a ser afectado negativamente. La vulnerabilidad comprende una variedad de conceptos y elementos que incluyen la sensibilidad o susceptibilidad al daño y la falta de capacidad de respuesta y adaptación.



ANEXO B. RESULTADOS PRINCIPALES DEL ESTUDIO



1 Análisis anual

Tabla 15. Resultados de aportaciones medias anuales (hm³) período 2011-2040 para el escenario RCP 4.5.

	HIST	2011-2040							
		RCP 4.5				RCP 8.5			
	mean	mean	var	Q95	Q25	mean	var	Q95	Q25
Embalse 1	161,88	156,12	16,32	170,52	155,4	154,32	5,88	163,32	148,44
Embalse 2	101,04	99,6	10,2	111,6	97,68	96	3,84	105,48	90,48
Embalse 3	19,32	18,24	0,48	20,4	18,24	17,64	0,24	20,64	16,32
Embalse 4	62,4	59,28	4,2	66,72	57,12	58,08	2,64	66,36	54,84

Tabla 16. Resultados de aportaciones medias anuales (hm³) período 2041-2070 para el escenario RCP 4.5.

	HIST	2041-2070							
		RCP 4.5				RCP 8.5			
	mean	mean	var	Q95	Q25	mean	var	Q95	Q25
Embalse 1	161,88	146,88	14,76	164,76	141,36	138,96	10,56	151,56	129,84
Embalse 2	101,04	93	10,68	109,32	87,12	84,48	8,16	95,04	77,52
Embalse 3	19,32	16,8	0,6	20,52	14,64	15	0,48	17,52	12,6
Embalse 4	62,4	54,96	4,44	66,36	50,16	49,68	3,6	56,64	43,08

Tabla 17. Resultados de aportaciones medias anuales (hm³) período 2041-2070 para el escenario RCP 8.5.

	HIST	2071-2100							
		RCP 4.5				RCP 8.5			
	mean	mean	var	Q95	Q25	mean	var	Q95	Q25
Embalse 1	161,88	143,52	7,08	156,84	134,88	123,72	17,88	141,6	110,4
Embalse 2	101,04	90,84	8,64	103,08	84,72	74,52	10,32	85,44	64,2
Embalse 3	19,32	16,44	0,36	18,6	14,88	12,96	0,36	15,12	11,04
Embalse 4	62,4	53,88	3,24	60,84	48,48	42,72	4,08	49,68	37,44

Nota: **mean**: media mensual de la media del conjunto de los modelos; **var**: varianza de la media mensual del conjunto de los modelos, **Q95**: cuantil del 95% de la media mensual del conjunto de los modelos, **Q25**: cuantil del 25% de la media mensual del conjunto de los modelos. En el caso del período histórico **mean** es la media mensual de las aportaciones.



Tabla 18. Resultados de indicadores para el período 2011-2040 en el escenario RCP 4.5.

2011 - 2040									
RCP 4.5									
	Nº de meses con aportaciones < Q25			Nº de meses consecutivos con aportaciones < Q25			SSFI		
	Mean	Max	Min	Mean	Max	Min	Mean	Max	Min
Embalse 1	92	111	76	4	6	3	-0,02	0,14	-0,19
Embalse 2	91	110	73	5	7	3	-0,05	0,08	-0,18
Embalse 3	96	116	84	4	6	4	-0,09	-0,02	-0,28
Embalse 4	92	122	74	5	6	4	0,02	0,12	-0,20

Tabla 19. Resultados de indicadores para el período 2011-2040 en el escenario RCP 8.5.

2011 - 2040									
RCP 8.5									
	Nº de meses con aportaciones < Q25			Nº de meses consecutivos con aportaciones < Q25			SSFI		
	Mean	Max	Min	Mean	Max	Min	Mean	Max	Min
Embalse 1	93	119	74	5	7	4	-0,05	0,07	-0,28
Embalse 2	93	113	78	5	6	4	-0,09	0,06	-0,27
Embalse 3	104	117	95	5	7	4	-0,13	-0,01	-0,24
Embalse 4	98	122	78	5	7	4	-0,02	0,09	-0,18

Nota: **Mean**: valor medio del indicador para el conjunto de los modelos; **Max**: valor máximo del indicador para el conjunto de los modelos. **Min**: valor mínimo del indicador para el conjunto de los modelos. **SSFI**: Índice normalizado de los caudales fluviales. Valor medio mensual.



Tabla 20. Resultados de indicadores para el período 2041-2070 en el escenario RCP 4.5.

2041 - 2070									
RCP 4.5									
	Nº de meses con aportaciones < Q25			Nº de meses consecutivos con aportaciones < Q25			SSFI		
	Mean	Max	Min	Mean	Max	Min	Mean	Max	Min
Embalse 1	107	126	90	5	7	4	-0,17	0,00	-0,60
Embalse 2	102	122	85	5	6	5	-0,24	-0,05	-0,56
Embalse 3	111	129	98	5	6	4	-0,15	-0,03	-0,31
Embalse 4	108	138	88	5	6	4	-0,15	0,02	-0,37

Tabla 21. Resultados de indicadores para el período 2041-2070 en el escenario RCP 8.5.

2041 - 2070									
RCP 8.5									
	Nº de meses con aportaciones < Q25			Nº de meses consecutivos con aportaciones < Q25			SSFI		
	Mean	Max	Min	Mean	Max	Min	Mean	Max	Min
Embalse 1	115	140	90	5	7	4	-0,31	0,01	-0,85
Embalse 2	111	137	78	5	6	5	-0,45	-0,12	-0,78
Embalse 3	123	140	103	6	7	5	-0,22	-0,12	-0,36
Embalse 4	120	144	98	5	7	5	-0,29	-0,04	-0,54

Nota: **Mean**: valor medio del indicador para el conjunto de los modelos; **Max**: valor máximo del indicador para el conjunto de los modelos. **Min**: valor mínimo del indicador para el conjunto de los modelos. **SSFI**: Índice normalizado de los caudales fluviales. Valor medio mensual.



Tabla 22. Resultados de indicadores para el período 2071-2100 en el escenario RCP 4.5.

2071 - 2100									
RCP 4.5									
	Nº de meses con aportaciones < Q25			Nº de meses consecutivos con aportaciones < Q25			SSFI		
	Mean	Max	Min	Mean	Max	Min	Mean	Max	Min
Embalse 1	105	135	87	5	7	5	-0,24	0,04	-0,69
Embalse 2	105	125	86	5	6	4	-0,36	-0,13	-0,66
Embalse 3	112	137	95	5	7	4	-0,18	-0,06	-0,29
Embalse 4	111	152	96	5	7	4	-0,21	0,00	-0,46

Tabla 23. Resultados de indicadores para el período 2071-2100 en el escenario RCP 8.5.

2071 - 2100									
RCP 8.5									
	Nº de meses con aportaciones < Q25			Nº de meses consecutivos con aportaciones < Q25			SSFI		
	Mean	Max	Min	Mean	Max	Min	Mean	Max	Min
Embalse 1	138	165	103	7	8	5	-0,64	-0,13	-1,23
Embalse 2	133	162	99	6	7	5	-0,78	-0,36	-1,15
Embalse 3	145	172	123	6	8	6	-0,39	-0,25	-0,60
Embalse 4	142	164	113	6	8	5	-0,57	-0,28	-0,91

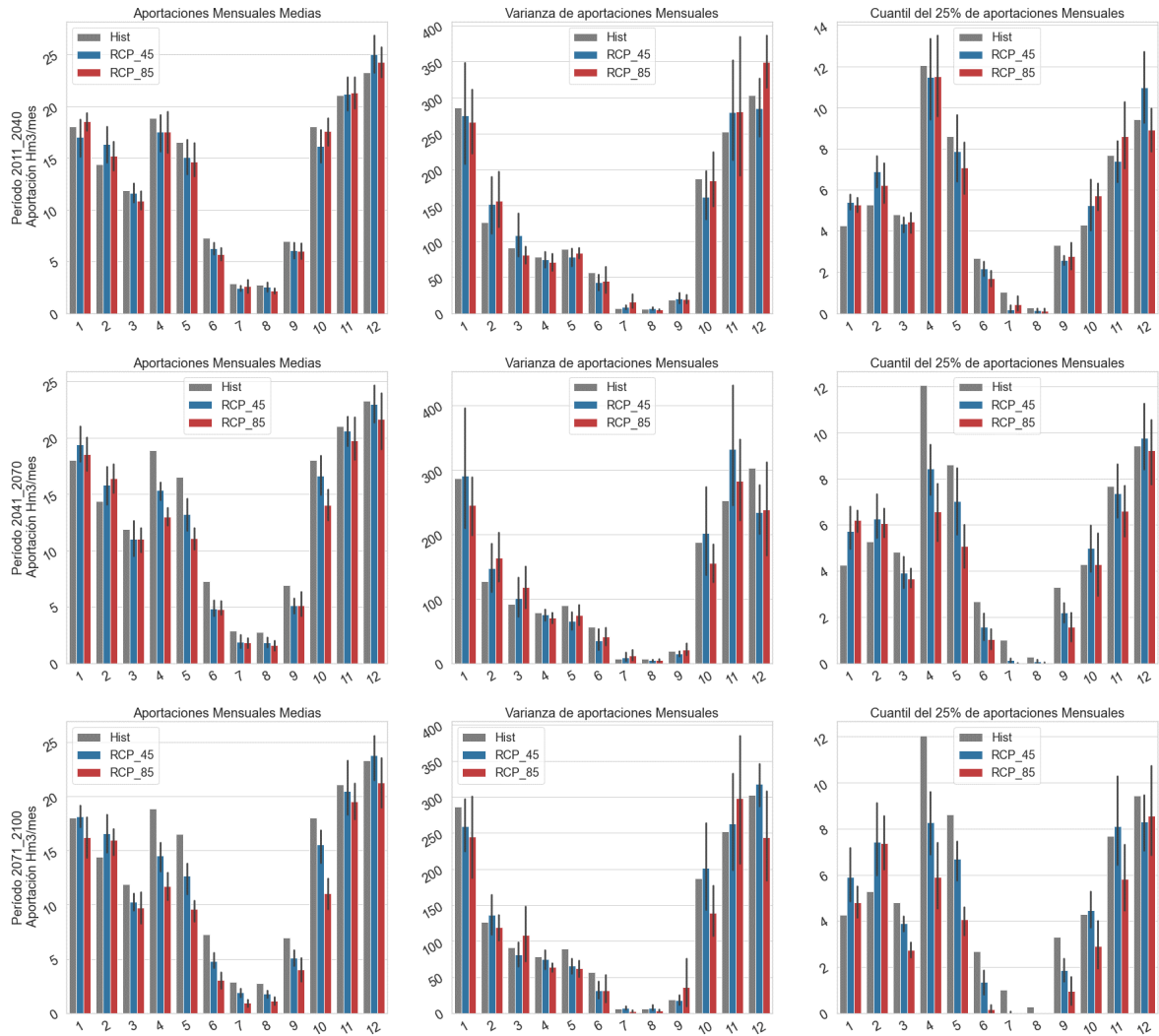
Nota: **Mean**: valor medio del indicador para el conjunto de los modelos; **Max**: valor máximo del indicador para el conjunto de los modelos. **Min**: valor mínimo del indicador para el conjunto de los modelos. **SSFI**: Índice normalizado de los caudales fluviales. Valor medio mensual.



2 Análisis mensual

2.1 Figuras

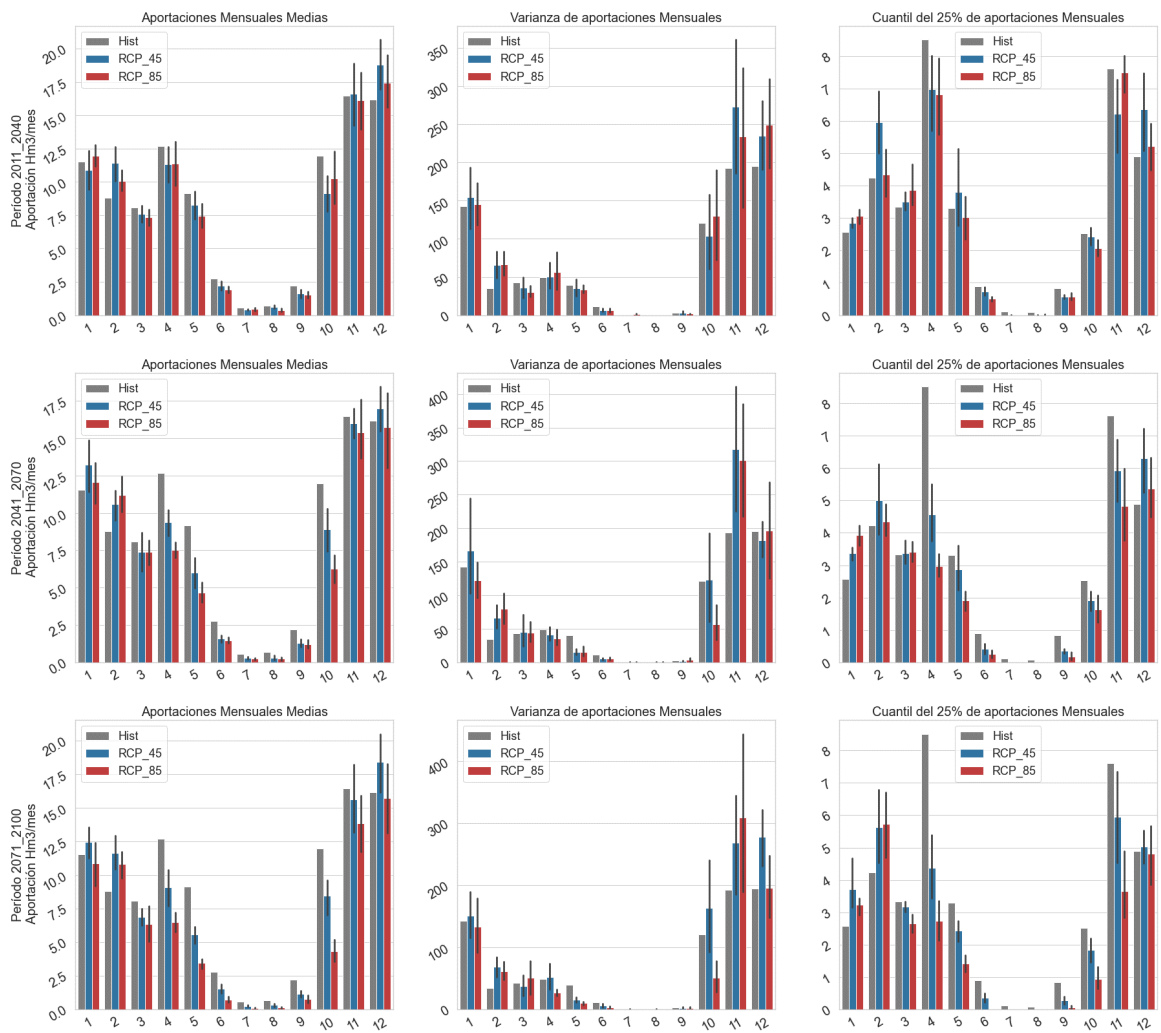
Figura 47: Análisis mensual de las aportaciones medias en el Embalse 1.



Fuente: Elaboración propia.



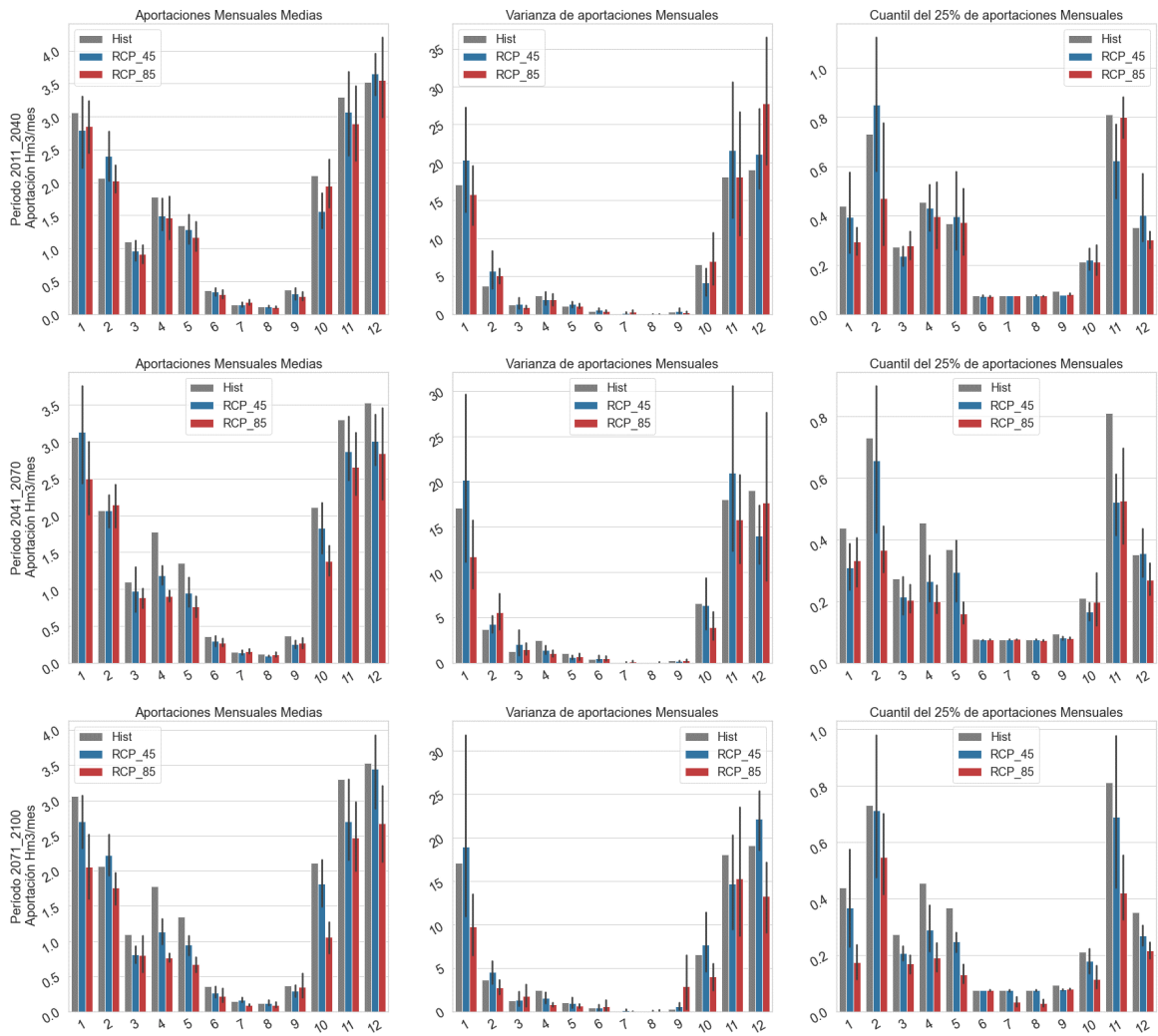
Figura 48: Análisis mensual de las aportaciones medias en el Embalse 2.



Fuente: Elaboración propia.



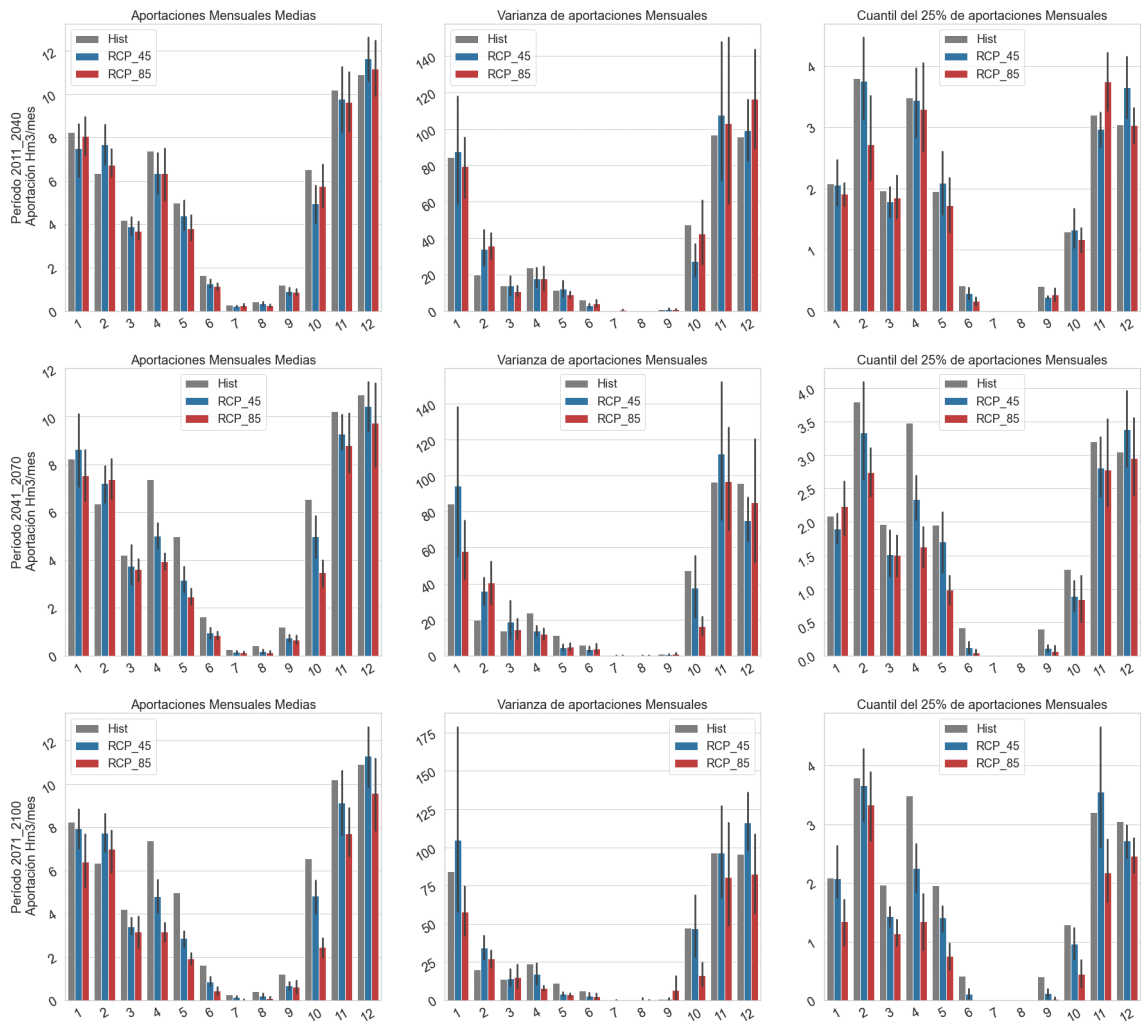
Figura 49: Análisis mensual de las aportaciones medias en el Embalse 3.



Fuente: Elaboración propia.



Figura 50: Análisis mensual de las aportaciones medias en el Embalse 4.



Fuente: Elaboración propia.



2.2 Tablas

Tabla 24. Análisis mensual de aportaciones en el Embalse 1.

	2011-2040							2041-2070						2071-2100					
	Hist	RCP 4.5			RCP 8.5			RCP 4.5			RCP 8.5			RCP 4.5			RCP 8.5		
	Mean	Mean	var	Q25	Mean	var	Q25	Mean	var	Q25	Mean	var	Q25	Mean	var	Q25	Mean	var	Q25
1	18,02	20,00	12,63	17,82	21,64	10,76	18,58	23,00	19,97	20,58	22,23	11,73	21,03	20,81	11,66	19,15	18,14	23,74	14,54
2	14,39	16,99	11,45	14,15	15,49	5,01	14,03	16,33	8,71	13,93	17,38	7,73	15,35	17,16	6,41	14,92	16,93	9,69	15,01
3	11,90	16,90	8,80	14,90	15,49	4,89	14,18	15,71	13,27	12,70	15,89	8,36	14,03	14,94	9,74	13,43	14,37	14,62	11,13
4	18,88	15,91	13,50	13,95	15,98	16,33	13,80	13,79	3,89	13,51	11,43	2,38	11,06	12,98	6,43	11,03	10,39	2,91	9,32
5	16,52	12,89	15,73	11,41	12,52	20,08	10,29	11,15	15,35	9,36	9,53	11,85	8,43	10,89	13,21	10,76	8,32	6,68	7,37
6	7,25	7,45	3,52	6,18	6,64	4,15	5,15	5,61	2,91	4,18	5,75	3,80	4,58	5,65	3,35	4,67	3,60	3,01	2,60
7	2,85	2,22	2,29	1,18	2,46	2,76	1,31	1,88	1,84	1,02	1,67	1,39	0,71	1,92	2,20	0,65	1,02	0,72	0,17
8	2,74	2,53	1,25	2,19	2,10	0,98	1,26	1,89	1,93	1,11	1,74	1,11	1,05	1,83	1,07	0,87	1,34	1,57	0,53
9	6,94	5,57	2,81	4,41	5,66	3,41	4,42	4,69	2,30	3,89	5,02	5,10	3,78	4,64	2,40	3,72	3,88	3,79	3,00
10	18,02	13,40	6,87	11,85	14,96	5,69	13,99	13,84	11,63	11,99	11,49	7,35	9,27	13,00	6,42	12,21	8,75	6,79	7,16
11	21,05	18,59	9,50	15,20	18,97	5,66	17,45	18,24	7,43	16,75	17,49	5,33	15,55	18,00	5,56	16,51	17,26	6,10	15,49
12	23,27	22,97	27,87	19,31	21,89	6,29	21,02	20,73	11,44	18,09	19,18	19,01	15,42	21,99	9,66	20,33	19,60	9,89	17,14

Nota: **mean**: media mensual de la media del conjunto de los modelos; **var**: varianza de la media mensual del conjunto de los modelos, **Q95**: cuantil del 95% de la media mensual del conjunto de los modelos, **Q25**: cuantil del 25% de la media mensual del conjunto de los modelos. En el caso del período histórico **mean** es la media mensual de las aportaciones



Tabla 25. Análisis mensual de aportaciones en el Embalse 2.

	2011-2040				2041_2070						2071_2100								
	Hist	RCP 4.5			RCP 8.5			RCP 4.5			RCP 8.5			RCP 4.5			RCP 8.5		
	Mean	Mean	var	Q25	Mean	var	Q25	Mean	var	Q25	Mean	var	Q25	Mean	var	Q25	Mean	var	Q25
1	11,54	13,15	7,28	10,82	14,39	7,71	12,10	15,74	14,73	13,77	14,35	7,72	13,52	14,73	8,98	13,43	12,55	12,05	10,35
2	8,78	12,03	6,04	9,53	10,33	3,33	9,57	11,05	5,04	9,36	12,02	4,96	10,37	12,22	6,56	10,09	11,44	5,17	9,75
3	8,07	11,63	7,96	9,79	10,67	3,57	9,39	11,29	10,60	9,31	11,18	6,27	9,58	10,63	8,45	9,08	10,24	13,92	7,08
4	12,66	10,66	9,37	8,94	10,46	8,95	8,67	8,66	2,54	7,76	6,88	0,82	6,33	8,27	5,70	7,28	5,65	1,07	4,86
5	9,15	6,87	5,78	5,55	6,11	4,34	4,52	4,95	3,49	4,14	3,81	1,04	3,51	4,54	1,61	4,35	3,07	0,88	2,91
6	2,77	2,32	0,33	1,76	1,96	0,31	1,55	1,68	0,11	1,42	1,50	0,26	1,03	1,55	0,41	1,05	0,76	0,13	0,47
7	0,56	0,44	0,10	0,23	0,49	0,15	0,27	0,34	0,08	0,14	0,23	0,03	0,08	0,34	0,09	0,07	0,13	0,02	0,00
8	0,69	0,58	0,09	0,44	0,45	0,05	0,26	0,34	0,11	0,14	0,28	0,04	0,13	0,30	0,03	0,19	0,13	0,02	0,05
9	2,21	1,96	0,37	1,49	1,89	0,59	1,36	1,66	0,40	1,39	1,55	0,35	1,20	1,43	0,23	1,26	0,92	0,30	0,58
10	11,98	8,05	5,52	6,25	9,04	6,45	7,10	8,25	7,66	6,42	5,43	2,94	4,11	7,54	3,55	7,15	3,54	1,60	2,90
11	16,45	14,58	11,39	11,20	14,00	5,37	12,39	14,10	6,21	12,78	13,19	5,44	12,80	13,12	5,05	11,52	11,55	4,43	10,44
12	16,16	16,75	18,63	13,44	15,88	9,00	13,05	15,14	9,65	12,28	13,99	15,93	11,43	16,54	9,30	14,21	14,44	10,06	11,40

Nota: **mean**: media mensual de la media del conjunto de los modelos; **var**: varianza de la media mensual del conjunto de los modelos, **Q95**: cuantil del 95% de la media mensual del conjunto de los modelos, **Q25**: cuantil del 25% de la media mensual del conjunto de los modelos. En el caso del período histórico **mean** es la media mensual de las aportaciones



Tabla 26. Análisis mensual de aportaciones en el Embalse 3.

	2011-2040				2041-2070						2071-2100								
	Hist	RCP 4.5			RCP 8.5			RCP 4.5			RCP 8.5			RCP 4.5			RCP 8.5		
	Mean	Mean	var	Q25	Mean	var	Q25	Mean	var	Q25	Mean	var	Q25	Mean	var	Q25	Mean	var	Q25
1	3,06	3,15	0,69	2,72	3,33	0,44	2,76	3,67	1,41	2,61	2,93	0,42	2,43	3,15	0,97	2,74	2,30	0,84	1,58
2	2,07	2,46	0,39	2,08	2,12	0,47	1,60	2,07	0,32	1,62	2,24	0,39	1,80	2,32	0,64	1,64	1,80	0,29	1,27
3	1,10	1,77	0,43	1,17	1,63	0,29	1,39	1,78	0,60	1,32	1,64	0,34	1,28	1,56	0,46	1,05	1,53	0,56	0,86
4	1,78	1,38	0,23	1,11	1,39	0,37	0,99	1,10	0,07	0,98	0,81	0,01	0,74	1,04	0,12	0,88	0,69	0,01	0,60
5	1,35	0,91	0,13	0,70	0,87	0,19	0,56	0,69	0,13	0,43	0,55	0,04	0,44	0,71	0,09	0,56	0,53	0,05	0,42
6	0,36	0,36	0,02	0,28	0,34	0,03	0,20	0,29	0,01	0,23	0,29	0,02	0,20	0,27	0,01	0,18	0,24	0,04	0,11
7	0,15	0,10	0,00	0,08	0,12	0,00	0,10	0,11	0,00	0,09	0,10	0,00	0,09	0,12	0,00	0,09	0,07	0,00	0,06
8	0,12	0,13	0,00	0,09	0,11	0,00	0,08	0,11	0,00	0,08	0,13	0,01	0,08	0,12	0,00	0,09	0,09	0,00	0,07
9	0,37	0,33	0,03	0,19	0,31	0,04	0,18	0,29	0,02	0,17	0,32	0,03	0,20	0,33	0,03	0,23	0,41	0,09	0,17
10	2,11	1,23	0,21	0,92	1,58	0,31	1,24	1,47	0,32	0,93	1,09	0,13	0,92	1,48	0,20	1,42	0,80	0,13	0,63
11	3,30	2,42	0,49	1,77	2,25	0,25	1,74	2,31	0,29	2,09	2,16	0,16	1,98	2,06	0,13	1,90	1,97	0,22	1,67
12	3,53	3,66	1,00	3,00	3,49	0,87	2,90	2,96	0,42	2,66	2,73	1,11	1,82	3,39	0,56	2,85	2,57	0,63	1,88

Nota: **mean**: media mensual de la media del conjunto de los modelos; **var**: varianza de la media mensual del conjunto de los modelos, **Q95**: cuantil del 95% de la media mensual del conjunto de los modelos, **Q25**: cuantil del 25% de la media mensual del conjunto de los modelos. En el caso del período histórico **mean** es la media mensual de las aportaciones



Tabla 27. Análisis mensual de aportaciones en el Embalse 4.

	2011-2040				2041-2070						2071-2100								
	Hist	RCP 4.5			RCP 8.5			RCP 4.5			RCP 8.5			RCP 4.5			RCP 8.5		
	Mean	Mean	var	Q25	Mean	var	Q25	Mean	var	Q25	Mean	var	Q25	Mean	var	Q25	Mean	var	Q25
1	8,24	8,92	5,13	6,86	9,76	4,59	8,14	10,33	7,51	8,66	9,21	4,85	7,50	9,51	6,63	8,55	7,40	6,13	5,76
2	6,34	7,45	3,13	6,14	6,67	2,27	5,65	6,96	2,50	5,47	7,30	3,18	6,38	7,47	4,02	5,92	6,56	2,26	5,55
3	4,20	6,62	3,58	5,24	6,11	2,18	5,17	6,29	4,07	5,45	6,09	2,95	5,12	5,95	3,71	4,51	5,51	4,56	3,67
4	7,38	5,79	3,34	4,79	5,77	3,45	4,37	4,55	0,62	4,24	3,55	0,26	3,16	4,41	1,72	3,91	2,86	0,28	2,35
5	4,98	3,51	1,12	3,01	3,14	1,30	2,61	2,62	1,12	2,08	2,05	0,42	1,92	2,44	0,76	2,17	1,67	0,31	1,59
6	1,63	1,30	0,27	1,00	1,11	0,14	0,77	0,90	0,12	0,69	0,85	0,18	0,50	0,86	0,17	0,48	0,45	0,11	0,17
7	0,27	0,22	0,02	0,08	0,25	0,04	0,13	0,18	0,03	0,03	0,13	0,02	0,04	0,18	0,03	0,03	0,05	0,00	0,01
8	0,43	0,31	0,03	0,19	0,24	0,03	0,15	0,19	0,05	0,04	0,19	0,06	0,04	0,22	0,04	0,05	0,10	0,02	0,02
9	1,21	1,07	0,19	0,73	1,09	0,34	0,75	0,91	0,24	0,60	0,89	0,24	0,58	0,79	0,11	0,71	0,77	0,30	0,41
10	6,54	4,34	1,81	3,45	5,12	2,41	4,22	4,43	2,32	3,21	3,09	1,09	2,33	4,39	1,70	4,05	2,13	0,59	1,63
11	10,21	8,55	3,36	6,84	8,47	1,53	7,58	8,16	2,12	7,09	7,57	1,24	7,01	7,82	1,89	6,89	6,52	1,00	5,81
12	10,91	10,73	8,40	9,33	10,23	5,18	9,12	9,53	3,82	8,53	8,67	8,08	6,31	10,21	3,72	8,83	8,70	4,72	7,16

Nota: **mean**: media mensual de la media del conjunto de los modelos; **var**: varianza de la media mensual del conjunto de los modelos, **Q95**: cuantil del 95% de la media mensual del conjunto de los modelos, **Q25**: cuantil del 25% de la media mensual del conjunto de los modelos. En el caso del período histórico **mean** es la media mensual de las aportaciones



ANEXO C. MANUAL APLICACIÓN **SIMPCCe**



1 Introducción

En este documento se presenta el manual para el uso de la aplicación SIMPCCe que permite reproducir la metodología de la guía en cualquier punto de la red fluvial del territorio peninsular. La idea fundamental de la aplicación es el uso complementario a la guía; por tanto, para su utilización es necesario que el usuario conozca la metodología descrita en la guía para evitar un uso incorrecto.

Es necesario tener en cuenta que la aplicación no cuenta con servicio de soporte ni mantenimiento.³¹

A continuación, se describe el proceso de análisis de aportaciones mínimas a embalses y su evaluación ante escenarios de cambio climático en cualquier punto de la red hídrica.

Como ejemplo de uso de la aplicación se analizará en uno de los casos de estudio definidos en la guía (Embalse 2).

El uso de esta aplicación requiere de un equipo con unas características determinadas, principalmente en cuanto a capacidad de almacenamiento y capacidad de procesamiento.

Requisitos del sistema.

- Disco duro: mayor de 50 gb
- Memoria RAM; mayor de 8gb
- Tener instalado un programa de descompresión de ficheros. Se recomienda el siguiente software libre: <https://www.7-zip.org/>

La memoria RAM no es limitante, simplemente se recomienda que tenga más de 8 gb para garantizar un proceso fluido; sin embargo, la capacidad de almacenamiento sí lo es, ya que para realizar el análisis se necesita una elevada cantidad de información de partida y además se generan ficheros de resultados con un tamaño elevado.

La aplicación consta de una interfaz con diferentes módulos, los cuales se corresponden con cada uno de los procesos metodológicos descritos en la guía. Al inicio de la aplicación todos los bloques metodológicos están desactivados para evitar que el usuario siga de forma incorrecta la metodología. En la Figura 51 se muestra la ventana principal de la aplicación.

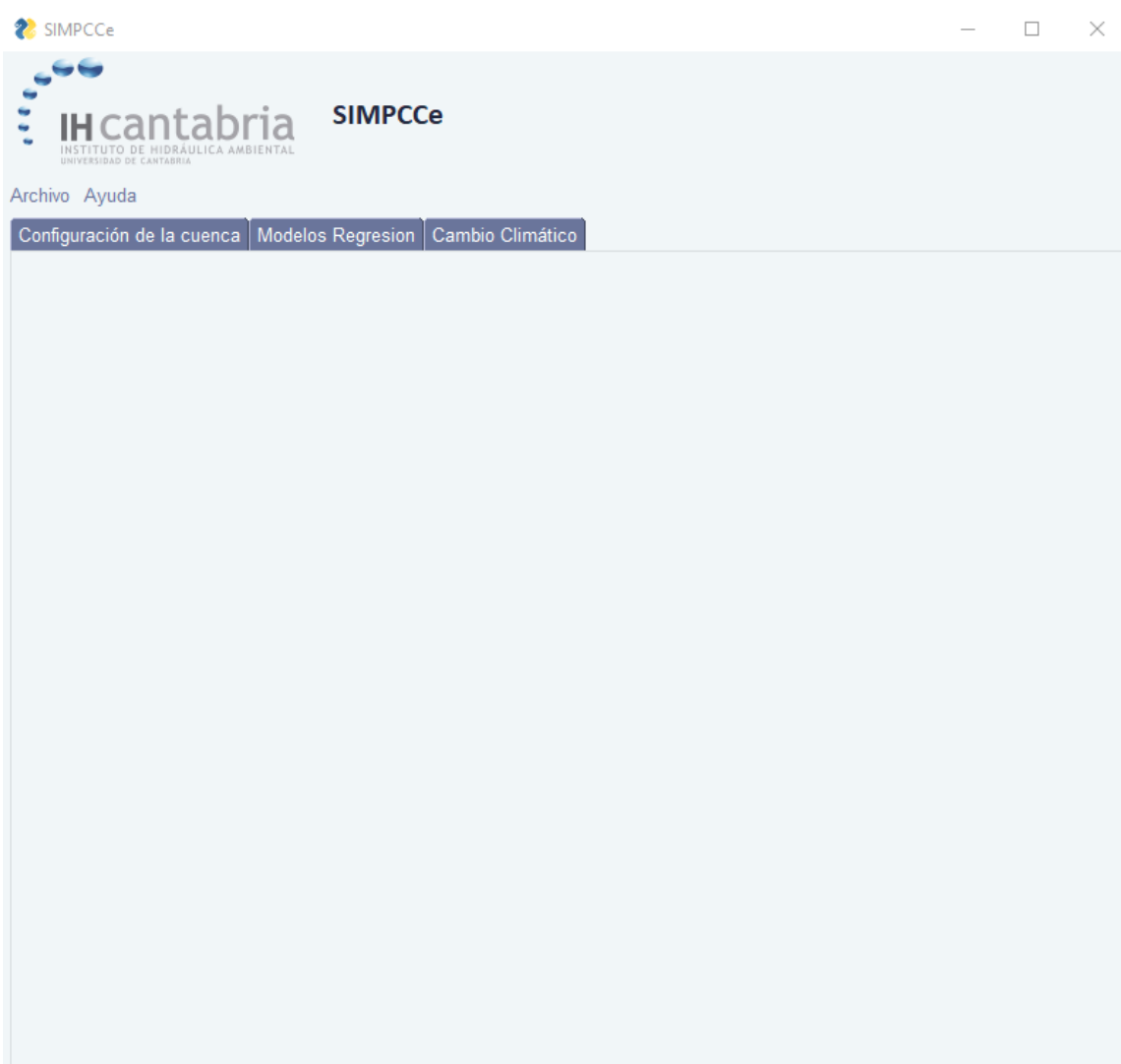
A continuación, en los siguientes apartados se definen cuáles son los pasos a seguir para realizar el análisis.

³¹ La aplicación informática SIMPCCe ha sido desarrollada por el Instituto de Hidráulica ambiental de Cantabria (IHC) como herramienta complementaria a esta guía. Está vinculada al encargo recibido de la Fundación Canal para el desarrollo de esta guía, pero fuera de su alcance. En consecuencia, la Fundación Canal no ostenta respecto de la misma ninguna titularidad, atribución, ni ningún tipo de responsabilidad.

El IHC permite el acceso a esta aplicación con el fin de facilitar la utilización práctica de la guía, si bien no otorga, respecto de la misma, garantía de ningún tipo, en particular, sobre su funcionamiento ni los resultados que genere. La aplicación no va a ser objeto de soporte ni de mantenimiento. En atención a lo expuesto, el desarrollador declina toda responsabilidad sobre la información que la aplicación pueda generar y el uso para el que ésta pudiera utilizarse.



Figura 51. Interfaz.

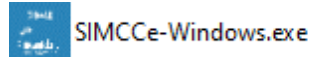




2 Inicio de la aplicación

La aplicación SIMPCCe se encuentra desarrollada mediante código en lenguaje de Python y ha sido compilada en un fichero .exe para poder ser ejecutada en cualquier sistema operativo (la versión beta solo en Windows).

Para iniciar la aplicación simplemente es necesario realizar doble clic sobre el fichero .exe.

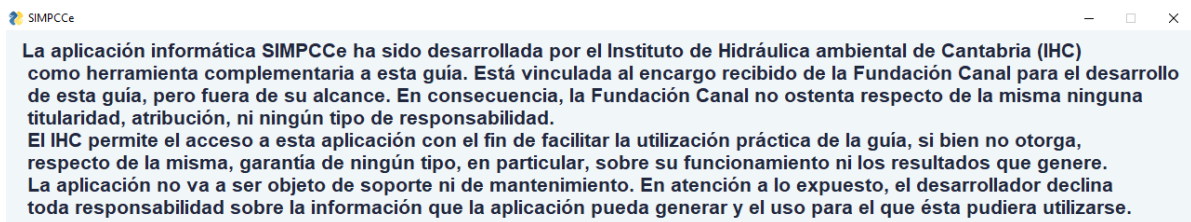


Una vez que se ha realizado doble clic se lanzará la aplicación y comenzará a realizar el proceso de descompresión en el equipo y se iniciará.

Antes de iniciar la interfaz de la aplicación saltará un mensaje como el que aparece en la Figura 52, donde se advierte que esta aplicación se distribuye sin ningún tipo de garantía. El desarrollador declina toda responsabilidad sobre la información que la aplicación pueda generar y el uso para la que el usuario la utilice. El usuario final es responsable de la información que proporcione a la aplicación y por tanto de los resultados que esta genere.

Una vez leída dicha advertencia se cierra la ventana y aparece la interfaz de la aplicación como en la Figura 51.

Figura 52. Advertencia a usuarios.





3 Nuevo Proyecto

En el menú superior se encuentran dos botones que son Archivo y Ayuda.



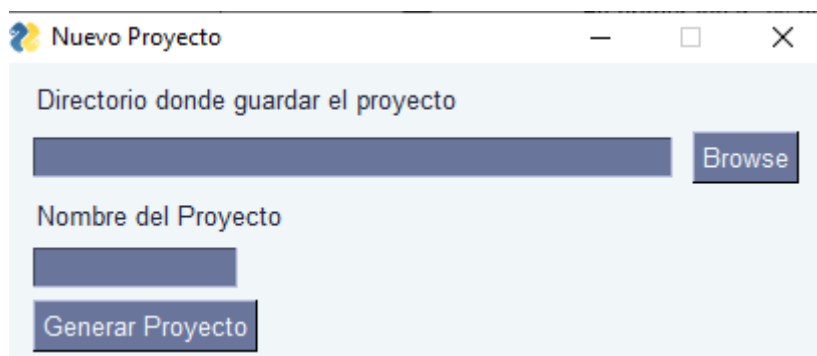
Si se pulsa ayuda aparecerá un botón que dirigirá al usuario a una ventana web con el manual de la aplicación.

Si se realiza clic sobre el botón archivo aparecen a su vez otras dos opciones que son:

- Nuevo Proyecto
- Abrir Proyecto

En primer lugar, es necesario crear un proyecto nuevo. Si se pulsa *Nuevo Proyecto* aparece una ventana como la de la Figura 53. Para crear un nuevo proyecto se debe definir el directorio donde se va a guardar e introducir el nombre del proyecto. Una vez cumplimentados ambos campos se pulsa *Generar Proyecto*. Dentro de la carpeta definida se crearán las distintas carpetas donde se guardan los ficheros del análisis. Adicionalmente, se crea un fichero *ymf* donde se va configurando el modelo progresivamente, a medida que se aplica la metodología.

Figura 53. Nuevo proyecto.



Las carpetas que se crean dentro del directorio establecido son las que aparecen en la Figura 54. Además, como se dijo anteriormente se crea un fichero *.ymf* con el nombre que se ha definido del proyecto. Se aconseja no modificar este fichero, ya que en él se guarda las diferentes configuraciones metodológicas que el usuario especifica. Al guardarse la información en este fichero, se facilita que el usuario no repita procesos y pueda seguir el análisis donde lo dejó.



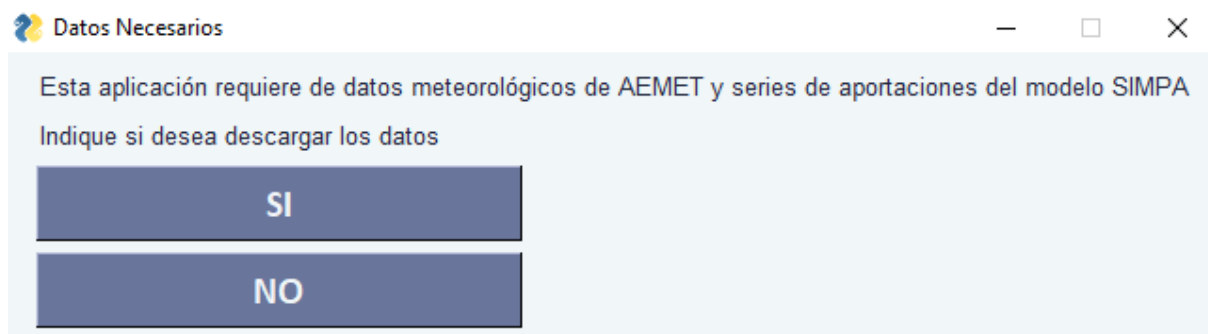
Figura 54. Carpetas del proyecto.

- 01_CLIMA
- 02_GIS
- 03_APORTACIONES
- 04_REGRESION
- 05_CAMBIO_CLIMATICO
- 06_ANALISIS_RESULTADOS
- 07_INFORME

En cada una de estas carpetas se irán almacenando los diferentes ficheros del análisis.

Cuando el usuario define un nuevo proyecto, la aplicación preguntará si las diferentes fuentes de datos necesarias han sido descargadas (Figura 55).

Figura 55. Selección descarga de datos.



Si se define que **NO** el usuario debe introducir el directorio donde guarda los datos de AEMET y SIMPA y pulsar cargar como aparece en la Figura 56.

Figura 56. Fuentes de datos ya descargadas.



Si por el contrario se define que **SI** saldrá una ventana como la que aparece en la Figura 57. En dicha ventana el usuario introducirá el directorio pulsando *Browse* y posteriormente pulsando "Descargar". Al pulsar "Descargar" e iniciarse el proceso, la ventana principal de la aplicación se cerrará para evitar posibles conflictos si el usuario interactúa con la aplicación mientras se realiza la descarga.

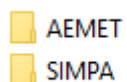


Figura 57. Descarga de datos.



A continuación, se iniciará la descarga de datos ordenados en la siguiente estructura de carpetas.

Figura 58. Directorio fuentes de datos.



Tras descargar los datos la aplicación se reiniciará de forma automática. Como se ha comentado anteriormente sólo es necesario descargar los datos una sola vez para sucesivos proyectos. Si durante la descarga la ventana es cerrada por el usuario, automáticamente la aplicación se reinicia.

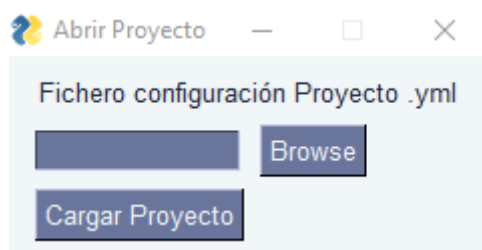
Una vez que la aplicación se ha reiniciado, abra el proyecto en el que estaba o cree uno nuevo sin necesidad de volver a descargar la información de partida.



4 Abrir Proyecto

Para abrir un proyecto que se ha estado analizando anteriormente, simplemente es necesario ir al botón Archivo y Abrir Proyecto. La ventana que saldrá será como la que aparece en la Figura 59.

Figura 59. Abrir Proyecto.



Para buscar un proyecto se debe pulsar "Browse"; dentro de la carpeta del proyecto seleccionar el fichero .yaml y posteriormente pulsar "Cargar Proyecto".

Dependiendo de los análisis que ya se hayan realizado, se habilitarán cada una de las tres pestañas de análisis y se pulsará sobre aquella donde se desee continuar el análisis.

Una vez que los datos han sido descargados y se ha abierto el proyecto o definido el directorio donde se encuentran los datos ya descargados, se activará la primera de las pestañas del análisis. Para acceder al análisis simplemente es necesario pulsar la pestaña **Configuración de la cuenca**.

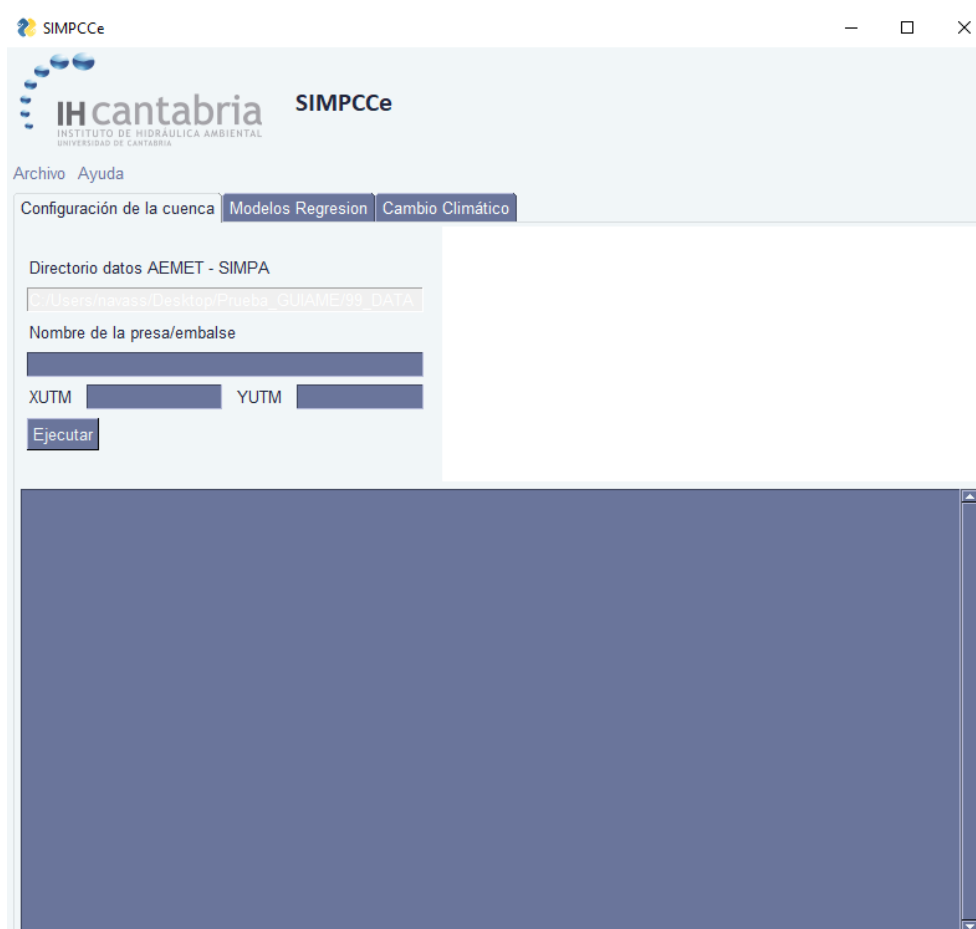


5 Configuración de la cuenca

En este apartado se realiza la configuración de la cuenca, es decir, a partir de las coordenadas en sistema de referencia el **EPSG:25830 (ETRS89 / UTM zona 30N)**³² del punto donde se localiza el embalse o puntos de estudio, se extrae la cuenca vertiente, los datos climáticos distribuidos en la cuenca y las aportaciones que proporciona SIMPA en dicho punto.

La ventana que aparece una vez que se ha pulsado sobre la pestaña **Configuración de la cuenca** es como la que aparece en la Figura 60. En esta ventana es necesario introducir el nombre del punto de estudio y las coordenadas del punto en el sistema de referencia definido anteriormente. Una vez que se han añadido estos datos se pulsa ejecutar, el botón aparecerá en rojo y comienza el proceso.

Figura 60. Configuración de la cuenca.

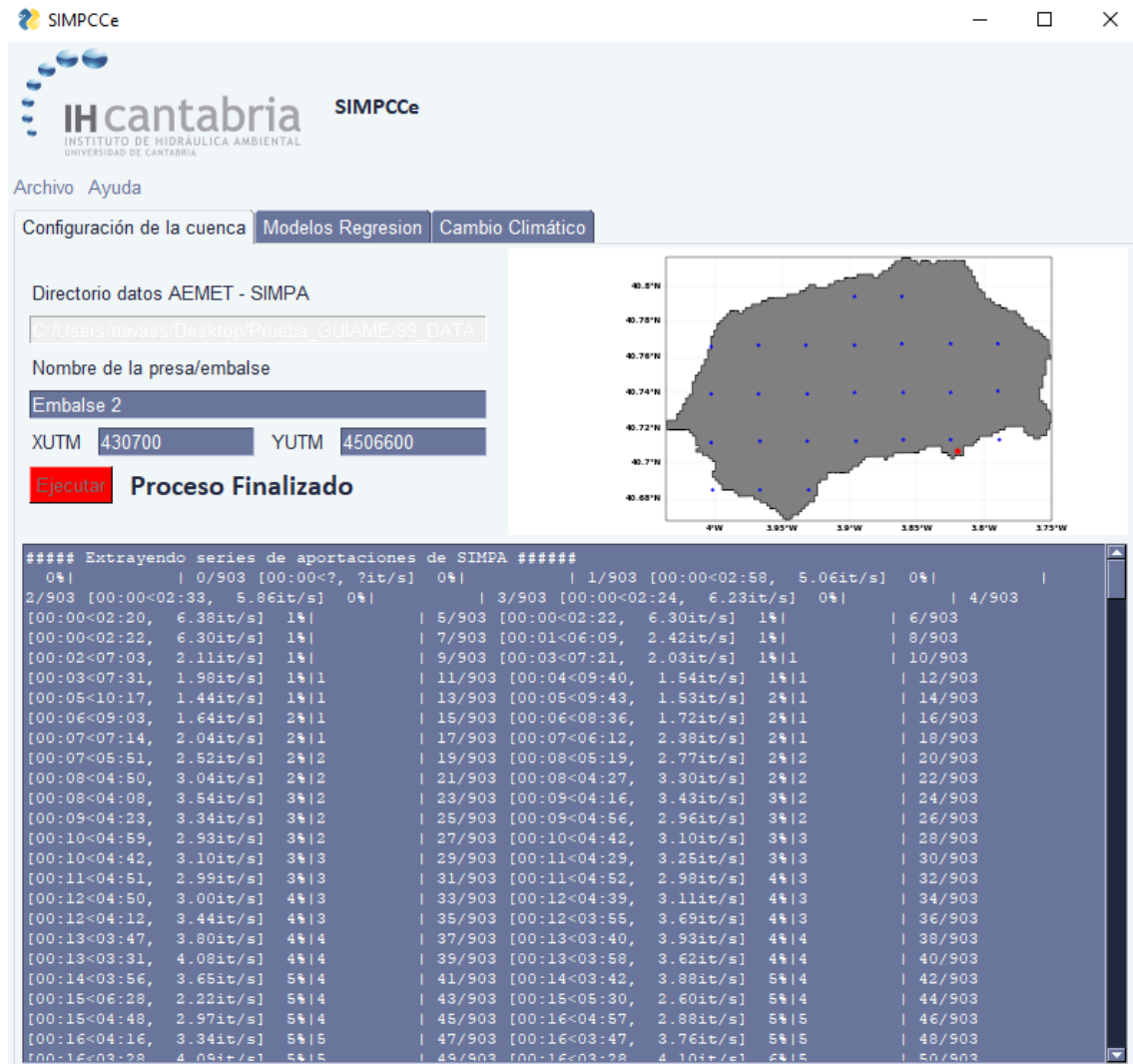


Cuando el proceso haya finalizado aparecerá en la ventana un mensaje de "Proceso Finalizado", y en la ventana se mostrará la cuenca vertiente y los puntos distribuidos donde se han extraído los datos climáticos. Además, dentro del fichero .yaml del proyecto quedará especificado que este proceso ha sido realizado, por lo que, si se cierra la aplicación y vuelve a abrirse en otro momento este proceso, no es necesario volver a realizarlo.

³² <https://spatialreference.org/ref/epsg/25830/>



Figura 61. Ejemplo configuración cuenca.



Este proceso guarda toda la información en:

- Carpeta **01_CLIMA**, donde se encuentran las coordenadas de los puntos y las series de precipitación y temperatura.
 - o Precipitacion.csv
 - o Puntos_Cuenca.csv
 - o Temperatura_Maxima.csv
 - o Temperatura_Minima.csv
- Carpeta **02_GIS**, donde se guarda el contorno de la cuenca en formato *shapefile* (.shp)
 - o catchment.shp
- Carpeta **03_APORTACIONES** donde se guarda la serie de aportaciones extraídas en las coordenadas definidas:
 - o Aportaciones.csv

Aunque el usuario defina su serie de caudales en régimen natural, la aplicación extraerá de forma automática las aportaciones de SIMPA.

Finalizado el proceso se activa la pestaña de **Modelos de regresión**.



6 Modelos de regresión

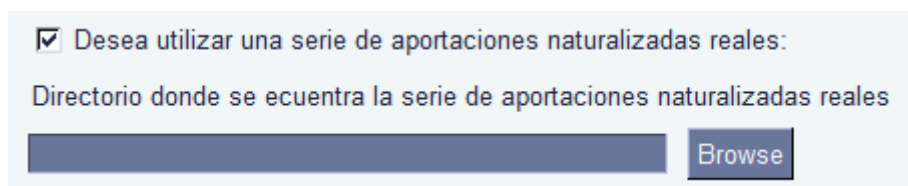
Una vez concluido el proceso anterior se activa la pestaña **Modelos Regresión**, por lo que haciendo clic sobre dicha pestaña se abre una ventana como la que aparece en la Figura 62.

Figura 62. Modelos regresión.



En esta ventana debe definirse si se desea utilizar una serie distinta a la serie extraída de SIMPA en el paso anterior, en ese caso se activará el campo para introducir el fichero que contiene la serie, tal como se observa en la Figura 63. Si, por el contrario, se desea utilizar una serie de SIMPA definida por el usuario, este campo no debe activarse; si se activa y no se introduce el fichero, la aplicación dará error.

Figura 63. Serie de aportaciones definida por el usuario.



El formato del fichero de aportaciones definido por el usuario tiene que ser en formato .csv delimitado por comas con la estructura mostrada en la Figura 64. Si la estructura no es correcta la aplicación dará un error.



Figura 64. Estructura fichero aportaciones.

```
, Embalse 2
1940-10-31, 21.71669
1940-11-30, 22.36793
1940-12-31, 0.8419851
1941-01-31, 24.989883
1941-02-28, 41.306255
1941-03-31, 28.823507
```

Por otro lado, si se desea ejecutar tanto el ajuste del modelo de regresión y la actualización de las series de aportaciones ante escenarios de cambio climático, es necesario activar esta opción como se indica en la Figura 65.

Figura 65. Opción de ejecución continua.

Desea ejecutar conjuntamente el proceso de ajuste del modelo de regresión y la actualización de las series de aportaciones ante escenarios de cambio climático:

Al activar la opción anterior, el botón "Ejecutar" se bloqueará y se activará el botón contiguo.

Figura 66. Activación botón ejecución continua.

Desea ejecutar conjuntamente el proceso de ajuste del modelo de regresión y la actualización de las series de aportaciones ante escenarios de cambio climático:

Número de procesadores:

Otro de los campos que el usuario necesita definir es el número de procesadores con los que realizar el proceso de ajuste de la red neuronal. Se recomienda no usar el máximo de procesadores ya que es posible que el ordenador deje de funcionar con fluidez. El número de procesadores recomendado es la mitad de los disponibles en el equipo.

Tras finalizar el proceso de ajuste de la red neuronal aparecerá en la ventana el análisis de validación, tal como en la Figura 67. Este análisis de validación consta de un gráfico de regresión donde se muestran los diferentes coeficientes definidos en la guía, y además aparece la comparativa entre la serie de SIMPA considerada como la real y la serie simulada a través de redes neuronales.

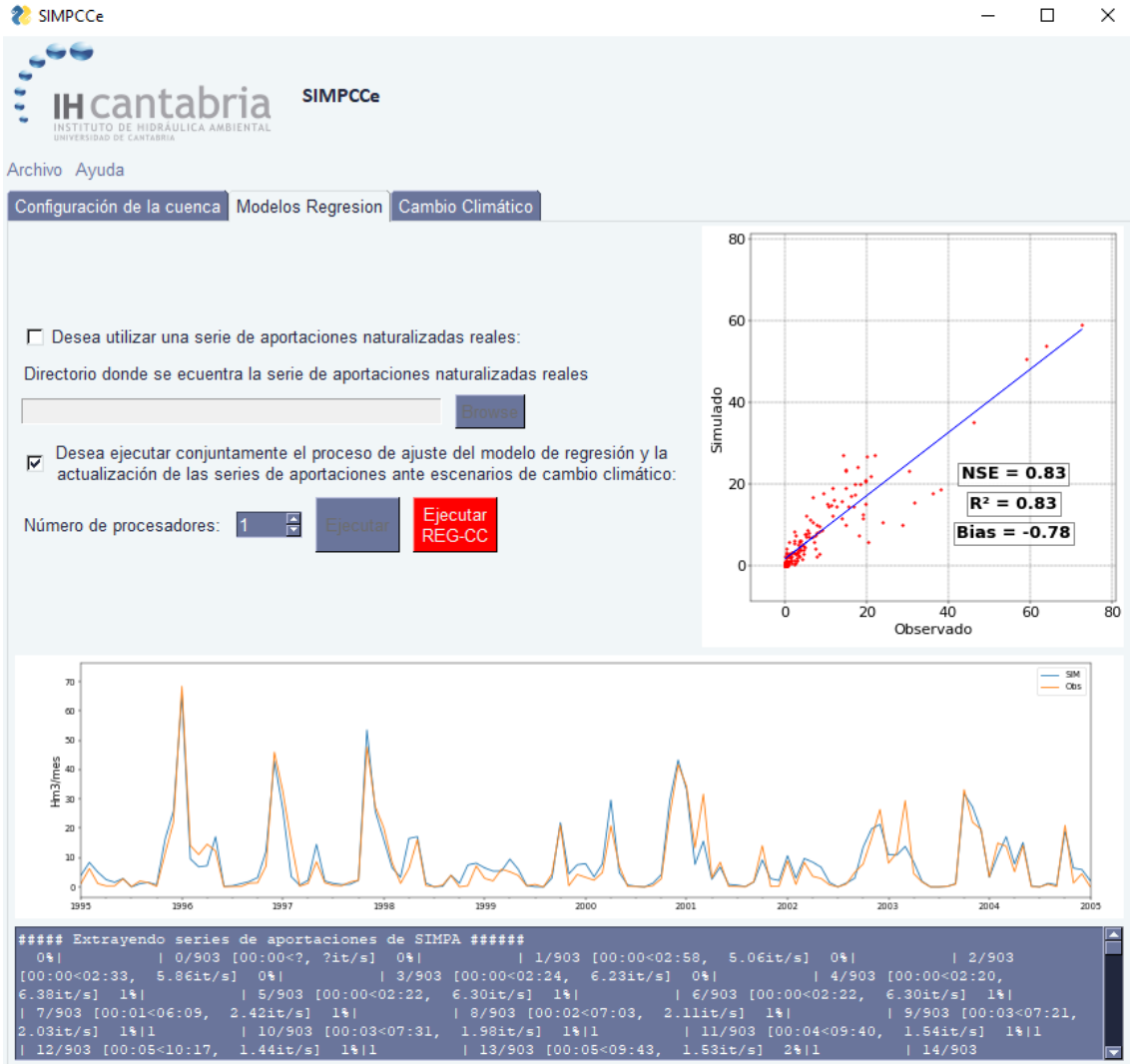
Una vez concluidos estos procedimientos, la aplicación guarda los ajustes³³ en la carpeta **04_REGRESION** en ficheros .sav para que puedan ser utilizados posteriormente, sin necesidad de volver a realizar el ajuste de la red neuronal. Además de guardar los ajustes, finalizado el proceso se activa la pestaña **Cambio Climático**.

Además, tras configurar el modelo en la carpeta **03_APORTACIONES**, se guarda la serie de aportaciones simulada con los datos climáticos desde 1950 a 2015. El fichero recibe el nombre de Aportaciones_Sim.csv ya sea utilizando los datos de SIMPA para calibrar el modelo o la serie definida por el usuario. Esta serie, acotada entre 1976 y 2005, será considerada como la serie de control o referencia para evaluar los impactos producidos por el cambio climático en las aportaciones. Es necesario aclarar que en dicha carpeta siempre se generarán los ficheros Aportaciones.csv correspondientes a los datos extraídos de SIMPA y Aportaciones_Sim.csv que se corresponde con la serie simulada a partir de redes neuronales entrenadas con datos de SIMPA o datos reales introducidos por el usuario.

³³ Debido a la aleatoriedad en la selección de los datos de entrenamiento y validación, es posible que los parámetros ajustados de la red neuronal varíen de una ejecución a otra, por lo que cambiarán ligeramente los valores de las métricas que miden la bondad del ajuste.



Figura 67. Validación modelo redes neuronales.

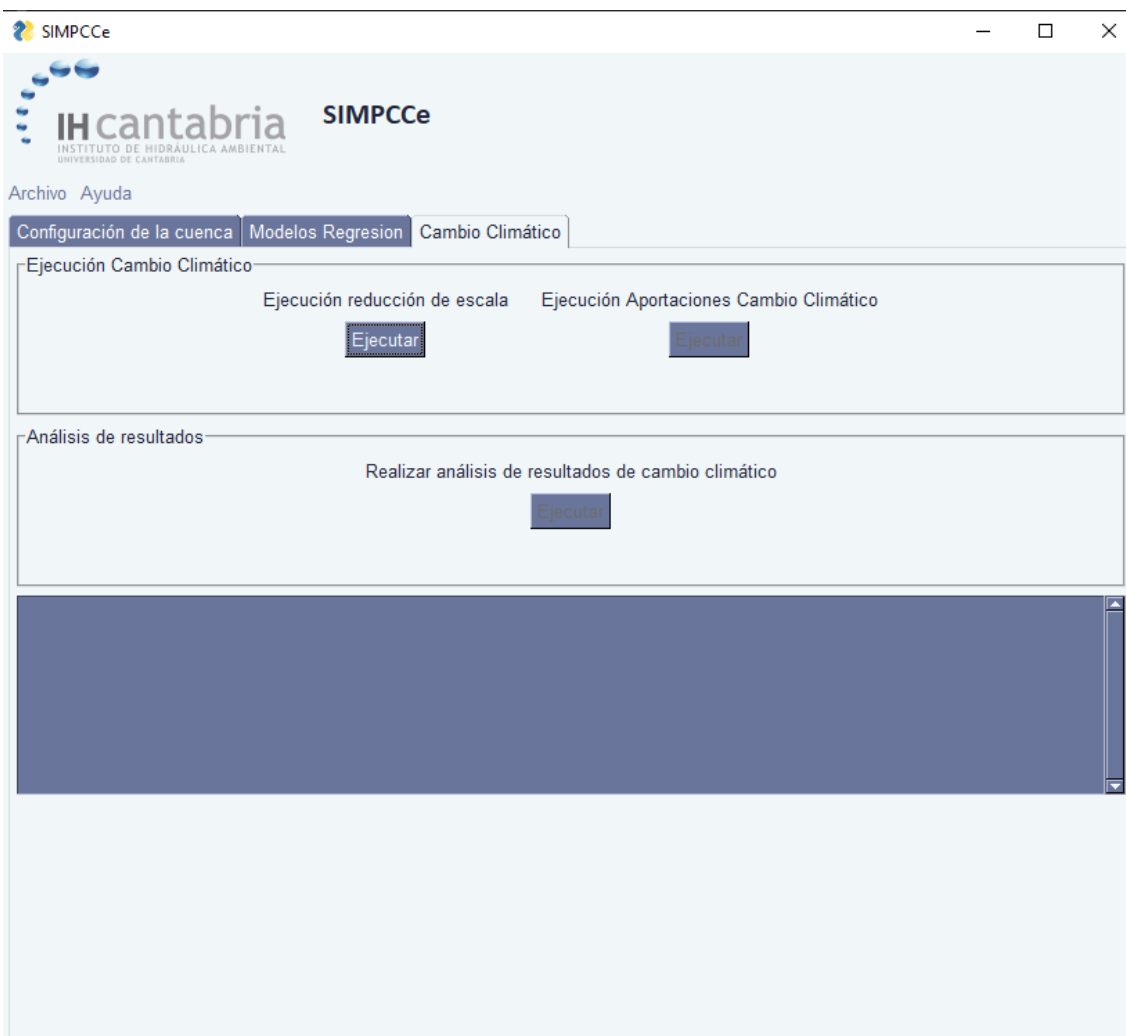




7 Cambio Climático

Como se indicó, una vez concluido el proceso anterior se activa la pestaña **Cambio Climático en el caso en el que no se ejecute de forma continua**; al hacer clic sobre dicha pestaña se abre una ventana como la que aparece en la Figura 68.

Figura 68. Cambio climático.



En esta pestaña la aplicación realiza todo el análisis de cambio climático, desde la reducción de escala de los modelos climáticos de CORDEX a la cuenca de estudio, hasta el análisis de los resultados en formato de fichas.

En primer lugar, el usuario tiene que pulsar el botón de Ejecutar que se encuentra debajo de Ejecución de reducción de escala. Comenzará el proceso de reducción de escala y una vez finalizado en la propia ventana aparecerá un mensaje de "Proceso Finalizado" y se activará el siguiente botón de ejecutar que se sitúa debajo de Ejecución Aportaciones Cambio Climático. El usuario pulsará dicho botón para iniciar el proceso de simulación de aportaciones tomando como input las variables climáticas actualizadas ante escenarios de cambio climático. Finalizadas las simulaciones saldrá de nuevo otro mensaje debajo del segundo botón de "Proceso Finalizado" y se activará el botón de ejecutar, situado en el apartado de análisis de resultados. Al pulsar este último botón comenzará el proceso de análisis y la obtención de las fichas de análisis.

El análisis de cambio climático genera diferentes ficheros que el usuario puede utilizar para sus propios propósitos:



- En la carpeta **05_CAMBIO_CLIMATICO** se almacenan los resultados de cambio climático para los diferentes modelos y escenarios (carpeta **01_CLIMA**) y las aportaciones asociadas a cada escenario y modelo de cambio climático (carpeta **02_APORTACIONES**). En la carpeta **01_CLIMA** se encuentran los resultados de la reducción de escala de los modelos climáticos para cada uno de los escenarios climáticos (carpeta **CORDEX_BIAS_CORRECTED**) y los resultados brutos extraídos de los datos de CORDEX para cada uno de los puntos distribuidos en la cuenca (carpeta **CORDEX**). Cada variable climática se guarda en su carpeta correspondiente. Además, se generan dos ficheros .pickle, donde se guardan en formato diccionario todas las series para posteriormente realizar el análisis.
- En la carpeta **06_ANALISIS_RESULTADOS** se guarda el análisis mensual de incertidumbre de aportaciones para los escenarios de cambio climático y las aportaciones medias en el período histórico. En el fichero "Análisis_mensual_CC.xlsx", se analiza el valor medio de aportaciones de todos los modelos, la varianza del valor medio que proporcionan los modelos para cada mes y el cuantil del 25%; de esta forma se puede observar la incertidumbre existente entre modelos para cada uno de los escenarios y períodos de análisis (2011-2040, 2041-2070 y 2071-2100). Dentro de los ficheros "Indicadores_CC.xlsx" y "Indicadores_CC.xlsx" se analizan los indicadores más representativos para evaluar las aportaciones mínimas, tanto en el periodo de control como en los escenarios de cambio climático. En el caso del análisis a futuro se presentan los valores máximos y mínimos de los resultados que proporcionan todos los modelos además de la media. Otra serie de ficheros que se localizan en esta carpeta son las series anuales de SSFI para cada uno de los periodos analizados y escenarios de cambio climático.

Una vez que las fichas han sido elaboradas y los ficheros xlsx han sido creados aparecerá un mensaje de "Proceso Finalizado".

- En la carpeta **07_INFORME** se localizan las fichas de análisis generadas. En la Ficha 1 se analiza el clima en el período histórico y la validación del modelo de redes neuronales ajustado. En la Ficha 2 se analiza la precipitación y temperatura ante los escenarios de cambio climático a escala anual y temporal, además del índice de sequía SPI. Por último, en la Ficha 3 se analizan las aportaciones del punto de estudio ante escenarios de cambio climático. En la subcarpeta Figuras se encuentran todas las figuras generadas que son utilizadas para elaborar las fichas.



Figura 69. Ficha 1.

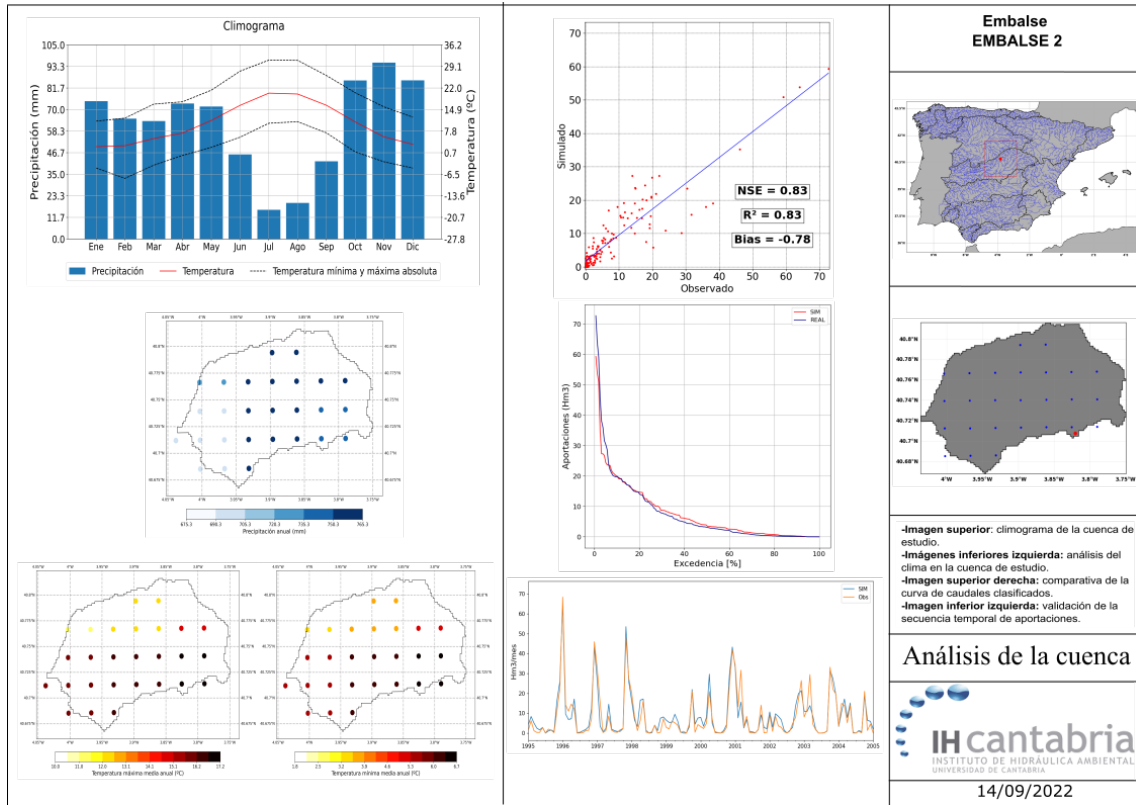


Figura 70. Ficha 2.

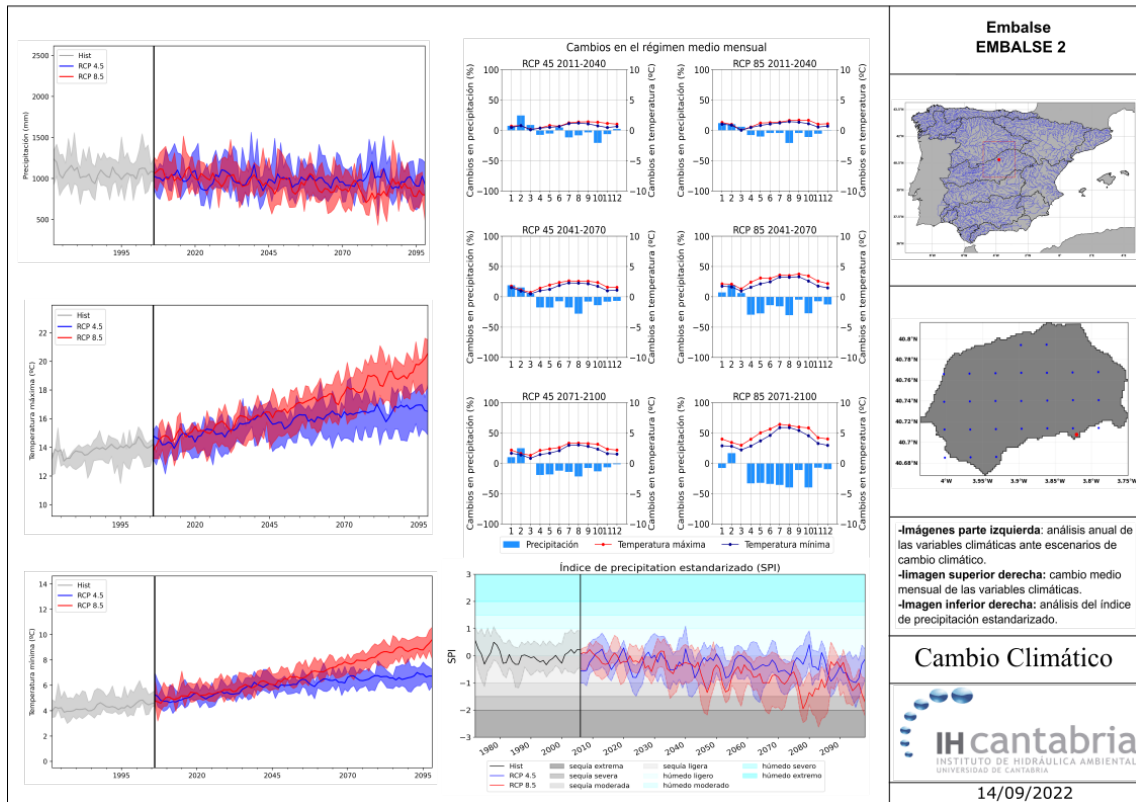
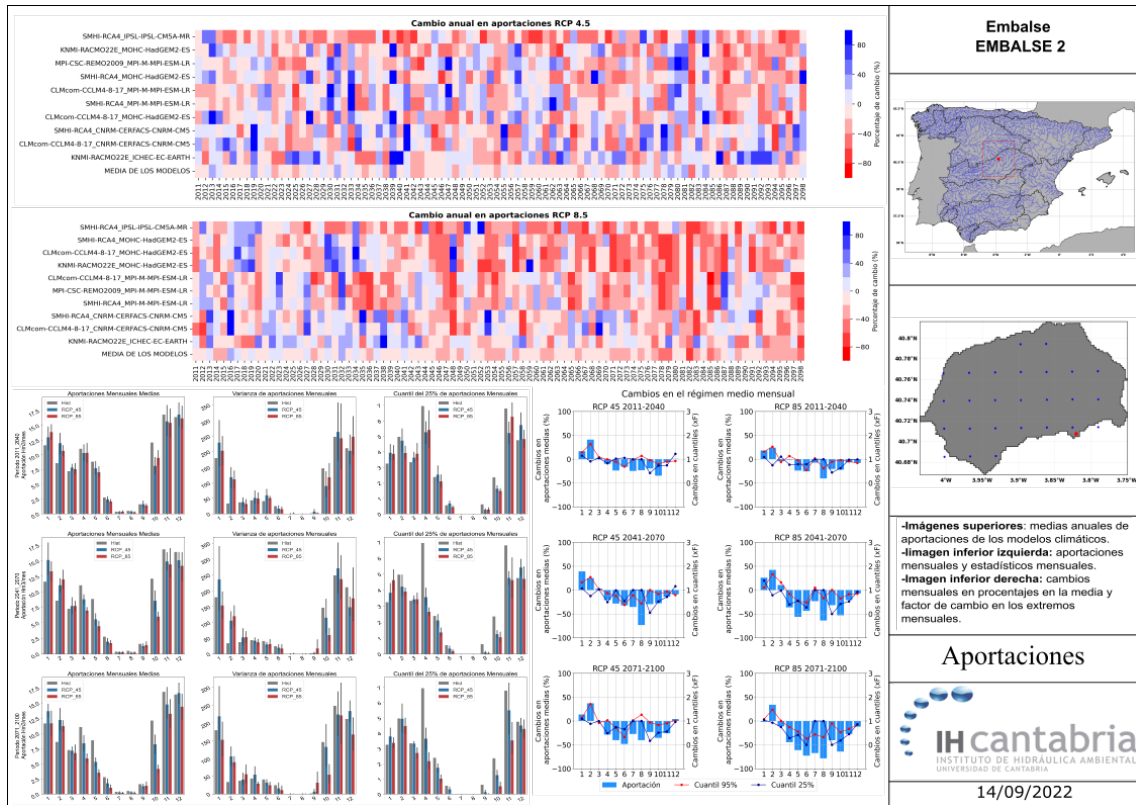




Figura 71. Ficha 3.





8 Tiempos de ejecución y recomendaciones

En este apartado se exponen de forma aproximada los tiempos de ejecución para cada uno de los procesos de análisis que se llevan a cabo mediante la aplicación, además de especificar una serie de recomendaciones para el buen uso. **Es necesario destacar que todo el análisis con un equipo normal puede requerir hasta decenas de horas dependiendo de la cuenca y la capacidad computacional del equipo.**

El equipo utilizado para realizar el análisis de la cuenca del Embalse 2 tiene las siguientes especificaciones:

- Sistema operativo: Windows 10
- Procesador: Intel Core i7-6700k 4GHz
- RAM Instalada: 32 Gb

Los tiempos obtenidos son los siguientes:

- **Proceso de descarga de datos:** 40 minutos, depende del ancho de banda de la que disponga el usuario. Sólo es necesario realizar la descarga una sola vez. Para siguientes proyectos se utiliza la misma información descargada.
- **Configuración de la cuenca:** 15 minutos. El tiempo de este proceso dependerá del tamaño de la cuenca.
- **Modelos de regresión:** utilizando 4 procesadores de los 8 disponibles el tiempo requerido han sido 40 minutos. El tiempo de este proceso dependerá del tamaño de la cuenca y del procesador del equipo utilizado.
- **Cambio climático:** el proceso de reducción de extracción de datos de CORDEX y la reducción de escala es el que más tarda, alrededor de 50 minutos. El proceso de simulación de aportaciones y el análisis tarda menos de 2 minutos. Por tanto, el tiempo total necesario han sido 52 minutos. El tiempo de este proceso se incrementa a medida que aumenta el tamaño de la cuenca.

El tiempo total de análisis fueron 2h y 27 minutos teniendo en cuenta el proceso de descarga, y sin incluir el proceso de descarga 1h y 47 minutos.

Las recomendaciones que se establecen para el buen uso de la aplicación son las siguientes:

- En el nombre del directorio no utilizar tildes, espacios o caracteres especiales, se recomienda usar "_" en lugar de espacios.
- En la introducción de las coordenadas del punto de estudio utilizar "." como símbolo decimal.
- No utilizar una misma carpeta para crear varios proyectos, ya que la aplicación está preparada para generar una serie de carpetas dentro del directorio que el usuario defina.
- Disponer de una alta capacidad de almacenamiento en el equipo.
- Utilizar equipos que puedan mantenerse varias horas ejecutando, principalmente cuando se analicen cuencas grandes.
- Utilizar equipos con unidades de procesamiento con más de 4 núcleos para minimizar el tiempo de procesamiento.
- Mantener la aplicación abierta en todo momento para evitar fallos en el procesamiento.
- Seguir los pasos establecidos en este manual.



- Es importante saber que si se utilizan series de aportaciones definidas por el usuario no se garantiza que los resultados de validación de la red neuronal sea de la misma calidad que los obtenidos mediante el entrenamiento con las series de SIMPA.
- Los botones de ejecución sólo es necesario pulsarlos una vez, pulsarlos varias veces puede dar lugar a errores en la aplicación.
- Visualizar las ventanas donde se muestran los mensajes para identificar posibles errores.
- Tener especial cuidado al cumplimentar los campos necesarios, ya que si se dejan vacíos o no se introducen correctamente la aplicación dará error.
- Si se ha finalizado un proyecto y se quiere iniciar otro, se recomienda cerrar la aplicación y volverla abrir.
- La aplicación no cuenta con servicio de soporte y mantenimiento.

FUNDACIÓN CANAL



fundacioncanal.com

Mateo Inurria, 2. 28036 Madrid

Canal 
de Isabel II



FUNDACIÓN CANAL
Canal de Isabel II

