



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos,
Canales y Puertos

Evaluación de la calidad de las predicciones hidrológicas del Sistema Europeo de Alerta Temprana ante Avenidas (European Flood Awareness System EFAS). Aplicación a los volúmenes trasvasables desde los embalses de Entrepeñas y Buendía.

Trabajo Fin de Máster

Máster Universitario en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos

AUTOR/A: Aris Hernández, Iván

Tutor/a: Pulido Velázquez, Manuel Augusto

Cotutor/a: Macián Sorribes, Héctor

CURSO ACADÉMICO: 2021/2022

ÍNDICE

Índice de figuras.....	4
Índice de tablas	7
Resumen.....	9
1. Introducción.....	10
2. Caso de estudio. El Traspase Tajo-Segura.....	14
2.1 Localización.....	14
2.2 Referencia histórica del Acueducto Tajo – Segura	16
2.3 Embalse de Bolarque	20
2.4 Embalses de Entrepeñas y Buendía.....	21
2.5 Regla de explotación actual del ATS	23
3. Métodos y materiales	27
3.1 Datos sobre el caudal de los ríos y datos históricos relacionados de GLoFAS 28	
3.2 Datos históricos sobre el caudal de los ríos y otros datos relacionados de EFAS 31	
3.3 Predicciones estacionales del pasado de caudal de los ríos y datos relacionados de EFAS	34
3.4 Datos históricos del anuario de aforos.....	37
3.5 Obtención de datos de EFAS para el caso de estudio	40
3.5.1 Descripción de la metodología seguida	41
3.6 Corrección de los datos hidrológicos de EFAS.....	43
3.7 Análisis de los datos históricos.....	45
3.7.1 Obtención de los datos. Generación del script de Python.....	45
3.7.2 Análisis de las series históricas de datos.....	45
3.8 Análisis de las predicciones estacionales del pasado de Caudal de EFAS47	
3.8.1 Obtención de datos. Generación del script de Python	47
3.8.2 Análisis y cálculo de los índices de calidad.....	48



3.9	Cálculo de la regla de operación.....	53
4.	Resultados y discusión.....	58
4.1	Análisis de los datos históricos	59
4.1.1	Discusión de resultados.....	63
4.2	Análisis de las predicciones estacionales del pasado de EFAS	67
4.2.1	Comparación de las predicciones de EFAS corregidas con los datos del anuario de aforos para el embalse de Buendía	69
4.2.2	Comparación de las predicciones de EFAS corregidas con los datos del anuario de aforos para el embalse de Entrepeñas	70
4.2.3	Comparación de las predicciones de EFAS corregidas con la serie histórica de EFAS corregida para el embalse de Buendía.....	71
4.2.4	Comparación de las predicciones de EFAS corregidas con la serie histórica de EFAS corregida para el embalse de Entrepeñas	72
4.2.5	Discusión de Resultados	72
4.3	Cálculo de la regla de operación para el modelo de gestión.....	78
4.3.1	Estudio de las series históricas de sueltas y volúmenes trasvasados	78
4.3.2	Regresión lineal múltiple para las sueltas al ATS y al Tajo	81
4.3.3	Índices de calidad (MAE) para las predicciones de sueltas y volúmenes	89
5.	Conclusiones	96
	Referencias.....	98

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de situación de los Embalses de Entrepeñas y Buendía. Fuente: Elaboración propia.....	14
Figura 2. Situación geográfica del ATS. Fuente: Confederación Hidrográfica del Segura.....	15
Figura 3. Perfil longitudinal del Acueducto Tajo-Segura. Fuente: Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico.....	19
Figura 4. Ficha técnica del embalse de Bolarque. Fuente: CEDEX	20
Figura 5. Ficha técnica del embalse de Entrepeñas. Fuente: CEDEX	21
Figura 14. Ficha técnica del embalse de Buendía. Fuente: CEDEX.....	22
Figura 7. Esquema en Aquatool del Trasvase Tajo-Segura. Fuente: Bibliografía de la asignatura “Water Resources Planning and Management “ (MICCP)	25
Figura 8. Diagrama de flujo de las fuentes y la metodología empleada en el presente trabajo. Fuente Elaboración propia.....	27
Figura 9. Esquema de los componentes clave en la producción del conjunto de datos de reanálisis de caudal GloFAS-ERA5. Fuente: (Harrigan et al., 2020b).....	28
Figura 10. Datos de caudal medio diario desde 1991 hasta 2019 para EFAS 4.0. Fuente: (Mazzetti et al., 2019).....	32
Figura 11. Extensión del dominio de EFAS. El color azul indica las áreas con datos (Harrigan et al., 2020a).....	35
Figura 12. Datos estadísticos sobre las reservas y las entradas al embalse de Entrepeñas. Fuente: CEDEX	38
Figura 13. Datos estadísticos sobre las reservas y las entradas al embalse de Buendía. Fuente: CEDEX.....	39
Figura 14. Malla de cálculo empleada en EFAS de la cual se han elegido los puntos de interés para el presente trabajo. Fuente: Elaboración propia	41
Figura 15. Ficha técnica de la estación foronómica número 8129 de la red ROEA. Fuente: Confederación Hidrográfica del Júcar.....	55
Figura 16. Gráfico de dispersión de las aportaciones al embalse de Buendía que predice EFAS frente a la serie histórica del anuario de aforos. Ajuste lineal, polinómico y exponencial con sus correspondientes ecuaciones. Fuente: Elaboración propia.....	59
Figura 17. Regresión lineal simple para los datos históricos del mes de abril para el embalse de Buendía. Fuente: Elaboración propia.	60



Figura 18. Regresión lineal simple para los datos históricos del mes de enero para el embalse de Entrepeñas. Fuente: Elaboración propia.	60
Figura 19. Datos históricos de las aportaciones al embalse de Entrepeñas vs predicciones del pasado de EFAS. Fuente: Elaboración propia	65
Figura 20. Datos históricos de las entradas al embalse de Buendía. Fuente: Elaboración propia.....	66
Figura 21. MAE para el embalse de Buendía cuando comparamos las predicciones de EFAS corregidas con los datos del anuario de aforos. Fuente: Elaboración propia..	69
Figura 22. MAE para el embalse de Entrepeñas cuando comparamos las predicciones de EFAS corregidas con los datos del anuario de aforos. Fuente: Elaboración propia..	70
Figura 23. MAE para el embalse de Buendía cuando comparamos modelo contra modelo tras sus respectivas correcciones. Fuente: Elaboración propia.....	71
Figura 24. MAE para el embalse de Entrepeñas cuando comparamos modelo contra modelo tras sus respectivas correcciones. Fuente: Elaboración propia.....	72
Figura 25. Gráfico temporal de los datos históricos referentes a las sueltas hacia el ATS y los volúmenes embalsados en Entrepeñas y Buendía. Fuente: Elaboración propia	79
Figura 26. Gráfico temporal de los datos históricos referentes a las sueltas hacia el ATS y la serie temporal de entradas corregidas aportada por EFAS, a los embalses de Entrepeñas y Buendía. Fuente: Elaboración propia.....	80
Figura 27. Regresión lineal simple entre el volumen embalsado y el volumen trasvasado para el nivel de explotación 2 en el mes de octubre. Fuente: Elaboración propia	84
Figura 28. Regresión lineal simple entre el volumen embalsado y el volumen trasvasado para el nivel de explotación 3 en el mes de octubre. Fuente: Elaboración propia	84
Figura 29. Regresión lineal simple entre el volumen embalsado y el volumen trasvasado para el nivel de explotación 4 en el mes de octubre. Fuente: Elaboración propia	85
Figura 30. Regresión lineal simple entre el volumen embalsado y el volumen trasvasado para el nivel de explotación 2 en el mes de julio. Fuente: Elaboración propia	86

Figura 31. Regresión lineal simple entre el volumen embalsado y el volumen trasvasado para el nivel de explotación 3 en el mes de julio. Fuente: Elaboración propia.....	86
Figura 32. Regresión lineal simple entre el volumen embalsado y el volumen trasvasado para el nivel de explotación 4 en el mes de julio. Fuente: Elaboración propia.....	87
Figura 33. MAE en hm^3 al comparar las predicciones obtenidas mediante la regla de operación generada con la serie histórica de sueltas al ATS. Fuente: Elaboración propia.....	89
Figura 34. MAE en % al comparar las predicciones obtenidas mediante la regla de operación generada con la serie histórica de sueltas al ATS. Fuente: Elaboración propia.....	90
Figura 35. MAE en (%) al comparar las predicciones obtenidas mediante la regla de operación generada con la serie histórica de sueltas al Tajo. Fuente: Elaboración propia.....	91
Figura 36. MAE en (hm^3) al comparar las predicciones obtenidas mediante la regla de operación generada con la serie histórica de volúmenes embalsados. Fuente: Elaboración propia.....	92
Figura 37. MAE al comparar las predicciones obtenidas mediante la regla de operación generada (empleando predicciones perfectas) con la serie histórica sueltas al ATS. Fuente: Elaboración propia.....	93
Figura 38. MAE al comparar las predicciones obtenidas mediante la regla de operación generada (empleando predicciones perfectas) con la serie histórica sueltas al Tajo. Fuente: Elaboración propia.....	94
Figura 39. MAE en (hm^3) al comparar las predicciones obtenidas mediante la regla de operación generada (empleando predicciones perfectas) con la serie histórica de volúmenes embalsados. Fuente: Elaboración propia.....	94

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Existencias conjuntas (hm ³) en Entrepeñas y Buendía que definen las situaciones hidrológicas excepcionales (Nivel 3). Fuente: CEDEX.	24
Tabla 2. Parámetros para la predicción plurimensual de aportaciones. Fuente: CEDEX.....	25
Tabla 3. Desembalses de referencia hacia la cuenca del Tajo (hm ³). Fuente: CEDEX.	26
Tabla 4. Descripción de las características principales de los datos referentes a GLoFAS. Fuente: (Harrigan et al., 2020b).....	29
Tabla 5. Variables principales del conjunto de datos de GLoFAS. Fuente: (Harrigan et al., 2020b).....	29
Tabla 6. Variables relacionadas del conjunto de datos. Fuente:(Harrigan et al., 2020b).....	30
Tabla 7. Descripción de las características generales de los datos históricos de EFAS. Fuente: (Mazzetti et al., 2019).....	32
Tabla 8. Descripción de las variables principales contenidas en los datos históricos de EFAS. Fuente: (Mazzetti et al., 2019).....	33
Tabla 9. Descripción de las características generales de las predicciones estacionales del pasado de EFAS. Fuente: (Arnal et al., 2018).....	36
Tabla 10. Descripción de las principales variables contenidas en las predicciones estacionales del pasado de EFAS. Fuente: (Arnal et al., 2018).....	36
Tabla 11. Tabla resumen de los estadísticos principales referentes a los datos históricos de EFAS para los diferentes puntos elegidos de la malla de cálculo. Fuente: elaboración propia.	45
Tabla 12. Coeficientes empleados para la corrección de acuerdo con la regresión lineal obtenida en el análisis de los datos históricos. Fuente: Elaboración propia.....	49
Tabla 13. Valores promedio de los datos históricos corregidos de EFAS empleados para la obtención del Error Medio Absoluto como índice de calidad de las previsiones de EFAS. Fuente: Elaboración propia.....	51
Tabla 14. Coeficientes de la regresión lineal entre los datos del anuario de aforos y los datos históricos de EFAS para cada uno de los meses en el embalse de Buendía. Fuente: Elaboración propia.....	61



Tabla 15. Coeficientes de la regresión lineal entre los datos del anuario de aforos y los datos históricos de EFAS para cada uno de los meses en el embalse de Entrepeñas. Fuente: Elaboración propia.....	62
Tabla 16. Valores promedio de entradas para los embalses estudiados. Datos históricos de EFAS y datos históricos del anuario de aforos. Fuente: Elaboración propia.	75
Tabla 17. Desviaciones típicas en los valores de las entradas para los embalses estudiados. Datos históricos de EFAS y datos históricos del anuario de aforos. Fuente: Elaboración propia.....	76
Tabla 18. Coeficientes mensuales de la regresión lineal múltiple para las sueltas hacia el ATS. Fuente: Elaboración propia.....	81
Tabla 19. Coeficientes mensuales de la regresión lineal múltiple para las sueltas hacia el Tajo. Fuente: Elaboración propia.	82



RESUMEN

Las reglas de operación de embalses podrían ser más adaptativas y flexibles ante cambios externos si se amplía la información utilizada en sus operaciones. Para ello se utilizan tradicionalmente modelos y previsiones de las condiciones hidroclimáticas y socioeconómicas futuras. Sin embargo, la identificación de predicciones y modelos inteligentes puede ser muy compleja cuando el sistema comprende varios procesos con dinámicas dispares. En nuestro caso, los volúmenes a trasvasar del Tajo al Segura, desde los embalses de Entrepeñas y Buendía, se determinan a día de hoy en base a observaciones pasadas y suponen un condicionante extra en su operación. Sin embargo, servicios como el *European Flood Awareness System* (EFAS) del programa europeo Copernicus ofrecen predicciones hidrológicas cuyo uso podría permitir tomar decisiones de forma anticipada, aunque dicho empleo requiere de una evaluación adecuada de su calidad.

Trabajando con datos de predicciones de EFAS a 7 meses vista en abierto, procedentes del programa Copernicus, así como con información en abierto de las redes ROEA y SAIH de Entrepeñas y Buendía se han comparado, en primer lugar, los caudales de EFAS con los observados para determinar su ajuste al caso de estudio. Después se han obtenido las predicciones de caudales de entrada a dichos embalses y se han empleado, junto con los datos de sus volúmenes, para la estimación de la calidad de la predicción de volúmenes trasvasables del Tajo al Segura. Con ello se ha evaluado la fiabilidad de EFAS y su potencial empleo para predecir volúmenes trasvasables con el modelo de gestión elaborado.

1. INTRODUCCIÓN

La mayoría de las reglas de funcionamiento de los embalses existentes están condicionadas a un conjunto de información simple, que incluye habitualmente el periodo del año y el almacenamiento y, en pocos casos, también el caudal de entrada reciente (Hejazi et al., 2008a). Estas reglas suelen estar diseñadas para funcionar bien en algunas condiciones límite de referencia, como un año hidrológico normal, una inundación con un determinado periodo de retorno o una demanda de agua determinada; pero pueden resultar ineficaces cuando no se cumplen estas condiciones. Esta situación es cada vez más frecuente debido a la creciente variabilidad e incertidumbre de los caudales de los embalses y/o de otras variables clave para las operaciones, como la demanda de agua o el precio de la energía, que repercuten negativamente en el rendimiento esperado del sistema (Denaro et al., 2017).

Una opción para aumentar la fiabilidad general de los sistemas de recursos hídricos es aprovechar mejor la flexibilidad de las operaciones condicionando las reglas de operación existentes a información adicional (por ejemplo (Galelli and Soncini-Sessa, 2010). Los estudios anteriores han investigado el papel de la información hidrológica en la gestión del agua teniendo en cuenta la aportación del período anterior (por ejemplo, (Giuliani et al., 2016) , la aportación del período actual (por ejemplo, (Stedinger et al., 1984), los escenarios futuros de entradas de agua (por ejemplo, (Castelletti et al., 2008), o índices más sofisticados (por ejemplo, el índice de gravedad de la sequía de Palmer (Hejazi et al., 2008b). Esta información exógena, es decir, variables observables, pero no empleadas en la formulación original del problema. Por lo tanto, no se modelan, es asimilada generalmente por un modelo de decisión como previsiones sobre las condiciones hidroclimáticas y de uso del agua futuras.

Las previsiones hidrometeorológicas inteligentes son una valiosa herramienta para mejorar la toma de decisiones, pero su valor operativo, es decir, la mejora real que se puede conseguir en el rendimiento del sistema, depende también de otros factores, como la propia calidad de las mismas, el objetivo principal de las decisiones y las características físicas del sistema controlado (p. ej., (Anghileri et al., 2016), y sus referencias). Por ejemplo, en el caso de un embalse operado para el control de inundaciones, la información clave para las operaciones es el tiempo necesario para crear un volumen de amortiguación para la inundación. Esto es relativamente fácil de identificar, ya que está relacionado con

las propiedades físicas del embalse (por ejemplo, la capacidad del embalse, la capacidad del vertedero) y las previsiones de flujo de agua con unas pocas horas/días de antelación podrían provocar operaciones anticipadas oportunas. En cambio, cuando el embalse se explota con reglas de operación a largo plazo, como en el caso del suministro de agua, no es sencillo entender qué variable prevista puede ser útil para diseñar reglas de regulación eficaces (por ejemplo, la previsión del caudal en un momento determinado en el futuro, los caudales acumulados durante un cierto tiempo de espera), y obtener una estimación precisa de dicha variable (por ejemplo, (Zhao et al., 2012)). De hecho, las previsiones suelen ser fiables a corto plazo (de horas a días), pero la previsibilidad tiende a disminuir a largo plazo. Los pronósticos estacionales pueden ser eficaces a lo largo de varios meses en algunas zonas específicas en las que la teleconexión climática, como El Niño-Oscilación del Sur (ENSO) (Zimmerman et al., 2016), o características hidrológicas particulares, como el predominio de la nieve (Koster et al., 2010), pueden permitir la predictibilidad en plazos más largos.

De acuerdo con estas últimas referencias, en el presente trabajo va a explorar el valor añadido del empleo de previsiones estacionales para elaborar un modelo que permita la gestión y operación de los embalses de Entrepeñas y Buendía con el fin de poder predecir los volúmenes trasvasables en el Acueducto Tajo-Segura.

En este sentido, las previsiones estacionales de los caudales predicen la probabilidad de una diferencia en las condiciones normales de los meses siguientes. A diferencia de las previsiones a corto plazo, que pretenden predecir eventos individuales, las previsiones de caudales estacionales pretenden predecir tendencias a largo plazo (es decir, de semanal a estacional). La previsibilidad en las previsiones de caudales estacionales se debe fundamentalmente a dos componentes del sistema terrestre: las condiciones hidrológicas iniciales (IHC; es decir, el manto de nieve, la humedad del suelo, el caudal y el nivel de los de los embalses, etc.) y los patrones climáticos a gran escala, como El Niño-Oscilación del Sur (ENSO), la Oscilación del Atlántico Norte (NAO) Atlántico Norte (NAO), el patrón Pacífico-Norteamericano (PNA) y el dipolo del océano Índico (DIO) (Yuan et al., 2015).

Junto con la comprensión física de los procesos de generación de caudales, se produjeron avances técnicos, como la creación de los primeros modelos hidrológicos y la adquisición de series temporales meteorológicas de observación más largas, que

condujeron a la creación del primer sistema operativo de previsión de caudales estacionales basado en modelos. Este sistema, denominado conjunto de predicciones de caudales (ESP, por sus siglas en inglés) fue desarrollado por el Servicio Meteorológico Nacional (NWS) de Estados Unidos en la década de 1970 (Twedt et al., 1977) Las previsiones ESP se producen forzando un modelo hidrológico, inicializado con la IHC actual, con las series temporales meteorológicas históricas observadas disponibles. El resultado es una previsión de caudales de conjunto (donde cada año de datos históricos es una traza de caudales) para la(s) estación(es) siguiente(s). La calidad de las previsiones del ESP puede ser alta en las cuencas o épocas del año en las que las IHC dominan el ciclo hidrológico de superficie durante varios meses (la calidad exacta de la previsión depende de la época del año y de las características fisiográficas de la cuenca; Wood y Lettenmaier, 2008).

En este trabajo se emplearán predicciones en abierto del programa europeo Copernicus, en particular las predicciones estacionales del *European Flood Awareness System* (EFAS), para estimar aportaciones y, mediante modelos de gestión, de volúmenes trasvasables del Acueducto Tajo – Segura y volúmenes almacenados en los embalses de Entrepeñas y Buendía. Los volúmenes a trasvasar del Tajo al Segura se determinan, a día de hoy, en base a observaciones pasadas. Sin embargo, servicios como EFAS ofrecen predicciones hidrológicas cuyo uso podría permitir tomar decisiones de forma anticipada (Brunner and Slater, 2022). No obstante, dicho empleo requiere de una evaluación adecuada de su calidad.

Para realizar esta evaluación se trabajará con datos de predicciones de EFAS a 7 meses vista en abierto (desde 1993 a 2021), procedentes del programa Copernicus, así como información en abierto de las redes ROEA y SAIH de los embalses de Entrepeñas y Buendía. En primer lugar, se realizará una comparación de los caudales históricos de EFAS (obtenidos empleado datos meteorológicos históricos) con los observados para determinar su ajuste al caso de estudio. Después se procederá a la obtención de las predicciones de caudales de entrada a Entrepeñas y Buendía, las cuales serán empleadas, junto con los volúmenes de ambos embalses, en la estimación de la calidad de la predicción de volúmenes trasvasables del Tajo al Segura. Con todo este proceso la fiabilidad de EFAS habrá sido evaluada y su potencial empleo para predecir volúmenes trasvasables será conocido.

En resumen, las etapas del presente trabajo se enuncian a continuación:

- a) Obtención de la información hidrológica, tanto series históricas como predicciones, de EFAS para la zona de estudio (Embalses de Entrepeñas y Buendía)
- b) Comparación de las series históricas de EFAS con los datos observados (ROEA, SIA, SAIH)
- c) En base a la comparación previa, determinación de la necesidad, y aplicación si fuera necesario, de algoritmos de post-proceso para mejorar el ajuste de EFAS al caso de estudio
- d) Análisis de la calidad de las predicciones hidrológicas de EFAS empleando índices de calidad estándar (MAESS)
- e) Definición de predicciones de volúmenes trasvasables a través del Acueducto Tajo-Segura en base a las predicciones de EFAS y a los datos observados en Entrepeñas y Buendía
- f) Análisis de la calidad de las predicciones de volúmenes trasvasables definidos a partir de EFAS mediante el empleo de los índices previamente mencionados

2. CASO DE ESTUDIO. EL TRASVASE TAJO-SEGURA

En el presente apartado se expondrá el caso de estudio donde se aplicará la metodología expuesta. Aunque en el apartado referente a la metodología ya se han presentado los diferentes elementos del caso de estudio, por facilidad para su descripción y comprensión, en esta sección se describirá de forma pormenorizada el caso de aplicación. En concreto, se realizará una referencia histórica necesaria para la comprensión de la problemática y estado actual del Trasvase Tajo-Segura.

2.1 LOCALIZACIÓN

Toda la metodología expuesta, como ya se ha introducido en dicho apartado, será aplicada a los embalses de la cabecera del Tajo, los de Entrepeñas y Buendía. Estos embalses son los que alimentan el trasvase Tajo-Segura y es por ello que fueron elegidos para la aplicación de la predicción propuesta en base a los pronósticos hidrológicos ofrecidos por EFAS. Con la siguiente figura se pretende contextualizar y situar geográficamente los embalses del caso de aplicación.

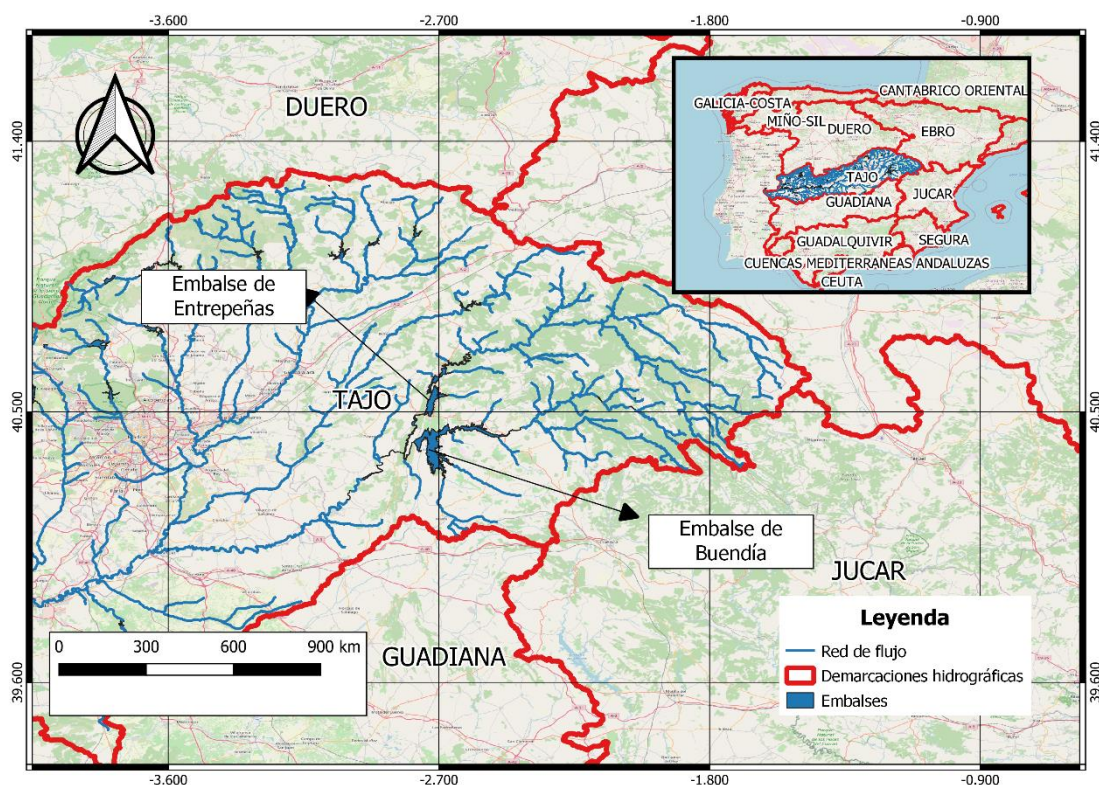


Figura 1. Mapa de situación de los Embalses de Entrepeñas y Buendía. Fuente: Elaboración propia.

A continuación se presenta una figura donde se puede visualizar la extensión geográfica del Acueducto Tajo-Segura con sus principales elementos. Aunque será descrito pormenorizadamente en el apartado siguiente, el ATS comienza en la cuenca hidrológica del Tajo y en su recorrido, hay ciertos tramos que se sitúan sobre la cuenca del río Guadiana y sobre la cuenca del río Júcar, para finalmente llegar al sureste español donde se sitúa la cuenca del río Segura.



Figura 2. Situación geográfica del ATS. Fuente: Confederación Hidrográfica del Segura



2.2 REFERENCIA HISTÓRICA DEL ACUEDUCTO TAJO – SEGURA

En la legislación española, los trasvases se fundamentan en el principio de que el agua se considera un recurso natural escaso perteneciente a la sociedad en su conjunto, por ello, debe ser, en principio, distribuido entre todos de forma equitativa. El Estado, como titular del dominio público de las aguas, es el que ostenta la competencia de planificar la utilización del recurso, cuya aplicación debe perseguir un beneficio que repercuta en la sociedad al completo (Morales Gil et al., 2005).

No fue una casualidad que las tierras del Levante fueran las destinatarias de los volúmenes del primer trasvase entre cuencas hidrológicas de la península Ibérica. El trasvase Tajo-Segura debe ser puesto en contexto en una situación donde la falta permanente de recursos hídricos se enlaza con el potencial que estos tienen para generar riqueza. La idea pretendía emplear los recursos para promocionar una agricultura de exportación que tuviera rendimientos sublimes y para desarrollar la actividad turística predominante del litoral mediterráneo. Manuel Lorenzo Pardo, ostentando el cargo de director del nuevo Centro de Estudios Hidrográficos en esa fecha, fue el primer defensor de la necesidad de ejecutar un trasvase entre cuencas como un propósito factible para enmendar los problemas que el déficit hídrico que padecía la zona de Levante generaba (de Lourdes Corral-Bermúdez and Landscape, 2019).

De esta forma quedó reflejado en el Plan Nacional de Obras Hidráulicas (PNOH) de 1933. Durante la «Exposición General del Plan», Lorenzo Pardo llevó a cabo una presentación de los fundamentos que justificaban la construcción de un trasvase para solucionar la situación que se sufría en el Levante español. Empezó aludiendo a la existencia de los desequilibrios hidrológicos que existen en las cuencas peninsulares y especificando que la del Sureste era la que arrojaba “mayor penuria”. Continuó enumerando el conjunto de factores que transformaban a estas tierras en las propicias receptoras de los caudales del Tajo, entre ellos: “la concurrencia de condiciones edafoclimáticas muy favorables para el desarrollo de una agricultura muy competitiva”, sobre todo pensando en el comercio exterior, lo que no sucedía en otras zonas; a lo que había que añadir el hecho de que en la “zona mediterránea se conservan los usos más antiguos, las tradiciones más vivas, las instituciones de riego más firmes, las prácticas más sabias y la mayor y más generalizada experiencia”.



La correlación entre el trasvase y el comercio exterior de productos agrícolas de regadío ha sido una invariable en la larga historia del trasvase Tajo-Segura (Moreno, 2000), debido a que fue en este aspecto donde se hizo recaer el carácter nacional de este proyecto hidráulico, por las predecibles consecuencias que éste tendría sobre la balanza comercial española provocando un incremento notable en las exportaciones agrícolas, que no en vano suponían uno de los principales montos de ingresos sobre la economía nacional de aquella época (Requena and Martínez-Granados, 2012). En palabras del Ministro de Obras Públicas bajo el que se presentó el plan, el socialista Indalecio Prieto, “Nosotros vamos a acabar con las luchas, las peleas, con las pugnas y con las riñas facilitando agua a todos”, empleando para ello el Trasvase. Medio siglo más tarde, las disputas y las discusiones por el control del agua siguen vivas (Seguido and Amorós, 2018), aunque la construcción del Acueducto Tajo-Segura sirvió para solucionar algunos problemas del Levante según la CH Segura. Sin embargo, la tendencia actual, con nuevos estudios referentes a los recursos disponibles en el sureste español, aboga por recortar los volúmenes sustraídos de la cuenca del Tajo, ya que estos producen un detrimento económico en las poblaciones de la cabecera del Tajo, según la CH Tajo (Cabezas, 2013).

Volviendo a la trayectoria histórica, el trasvase Tajo-Segura se planteó inicialmente en el Plan Nacional de Obras Hidráulicas de 1933 y, tras un paréntesis de varias décadas, fue retomado posteriormente en el "Anteproyecto General de Aprovechamiento Conjunto de los Recursos Hídricos del Centro y Sureste de España". "Complejo Tajo-Segura" de 1967. Fue construido unos años más tarde y finalmente comenzó a utilizarse en 1979.

El acueducto Tajo-Segura conecta las cuencas del Tajo y del Segura, atravesando las cuencas del Guadiana y el Júcar, en las que utiliza como elemento de tránsito el embalse de Alarcón. Transporta agua procedente de la cabecera del Tajo que previamente ha sido regulada en los embalses de Entrepeñas y Buendía.

El volumen máximo que la Ley permite trasvasar es de 600 hm³/año, que se utiliza para abastecimiento y riego. La Ley también autoriza que se transfiera una cantidad adicional a la cuenca del Guadiana para abastecer de agua al Parque Nacional de las Tablas de Daimiel y a las poblaciones de la cuenca alta.



Además, el Júcar se ha servido del ATS para transportar agua a Albacete y para sustitución de bombeos en la Mancha Oriental, y también para abastecer a Alicante y la Marina Baja en situaciones de emergencia, a través del Segura y el Canal del Taibilla.

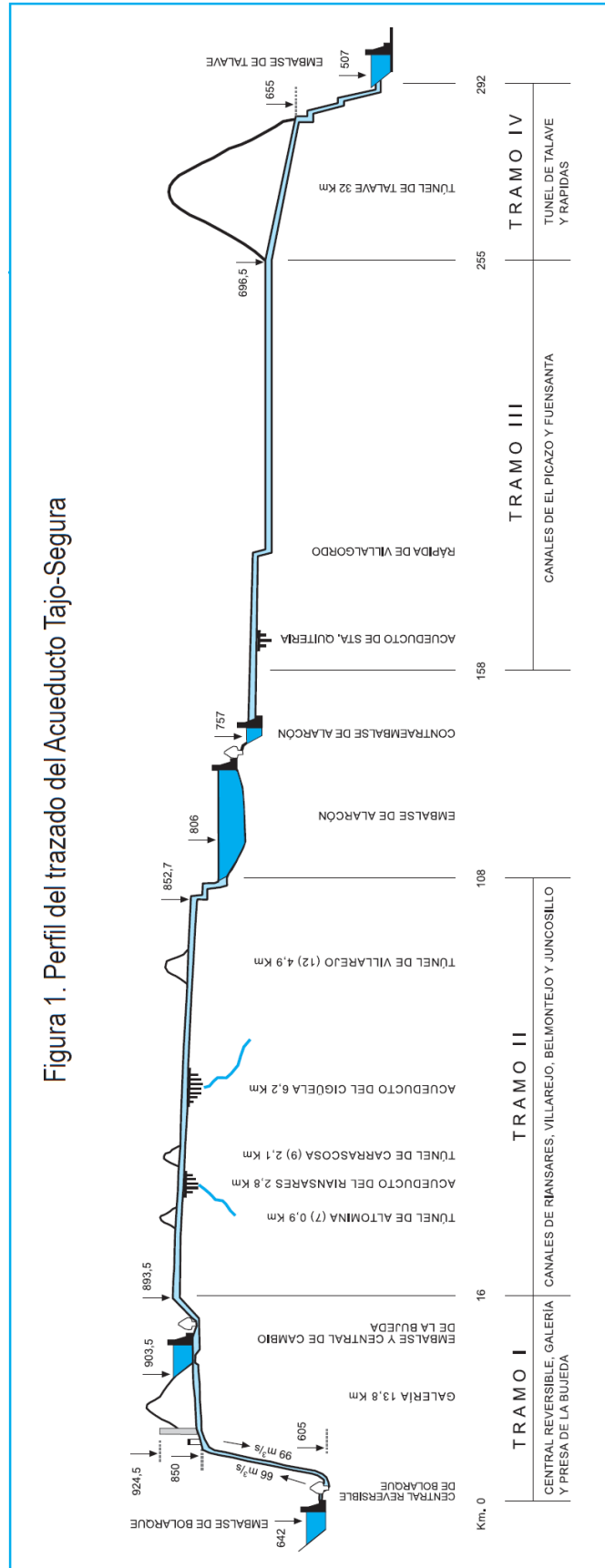


Figura 3. Perfil longitudinal del Acueducto Tajo-Segura. Fuente: Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico.

2.3 EMBALSE DE BOLARQUE

El embalse de Bolarque se encuentra sobre el río Tajo, aguas abajo de los embalses de Entrepeñas y Buendía, y es el punto de toma del trasvase Tajo-Segura. Dispone de una estación de bombeo reversible (la primera construida en España) que es capaz de enviar $66 \text{ m}^3/\text{s}$ al embalse de la Bujeda, el cual sirve como punto de regulación. En este punto los volúmenes trasvasados comienzan su viaje hacia las diferentes conducciones (túneles, canales, acueductos, sifones) que componen el Acueducto Tajo-Segura.

La relevancia de este embalse en el presente trabajo es que supone el punto de medida para conocer los volúmenes enviados hacia el trasvase y los volúmenes enviados hacia el río Tajo. Estos datos nos permitirán conocer las series históricas con las que abordar las correcciones y los cálculos de los índices de calidad de las predicciones propuestas. A continuación se muestra una imagen con las principales características de este embalse.

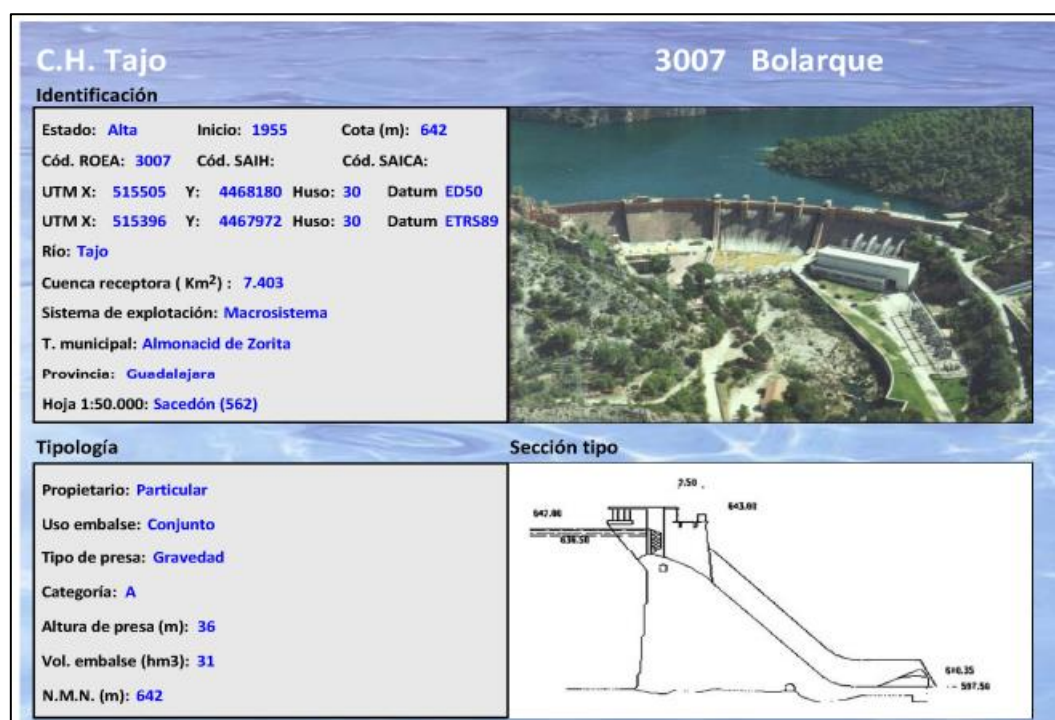


Figura 4. Ficha técnica del embalse de Bolarque. Fuente: CEDEX

2.4 EMBALSES DE ENTREPEÑAS Y BUENDÍA

El embalse de Entrepeñas se localiza en la cabecera del río Tajo y tiene una capacidad aproximada de 835 hm³. A continuación se presenta una figura resumen con las principales características de este embalse.

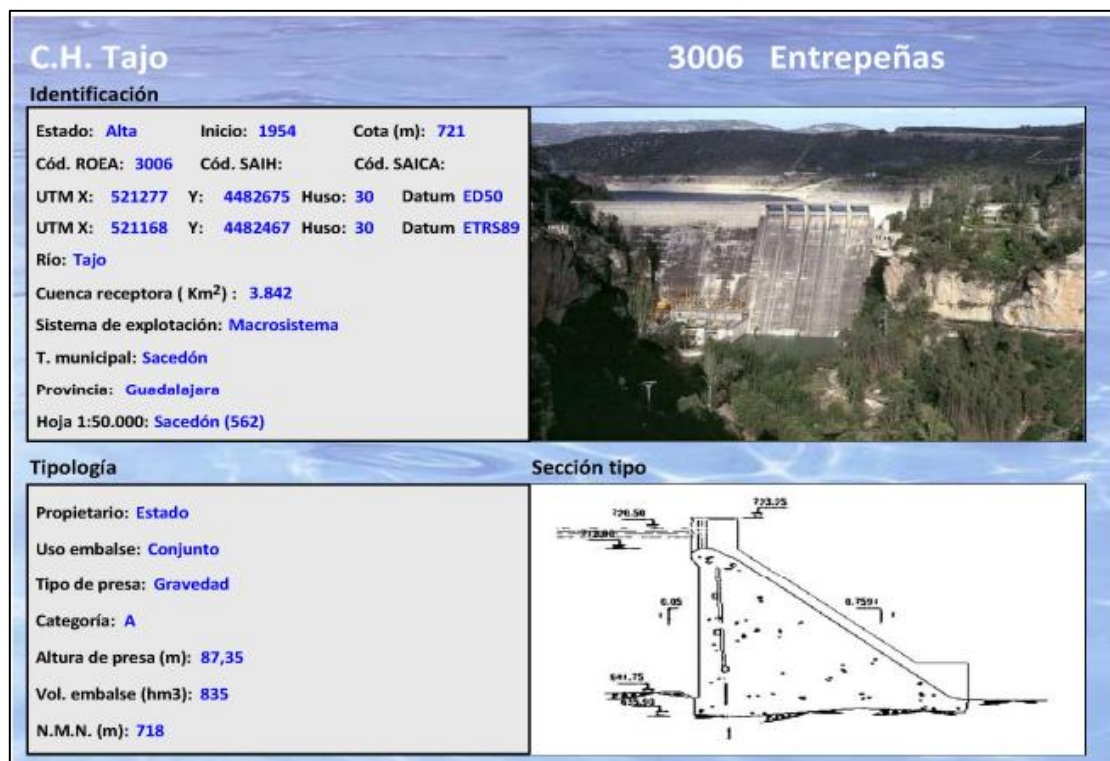


Figura 5. Ficha técnica del embalse de Entrepeñas. Fuente: CEDEX

Por su parte, el embalse de Buendía se sitúa también en la cabecera de la cuenca del río de Tajo, muy próximo al de Entrepeñas, y tiene una capacidad aproximada de 1639 hm³. Existe una conducción que conecta ambos embalses. Su ficha técnica se puede visualizar en la siguiente imagen:

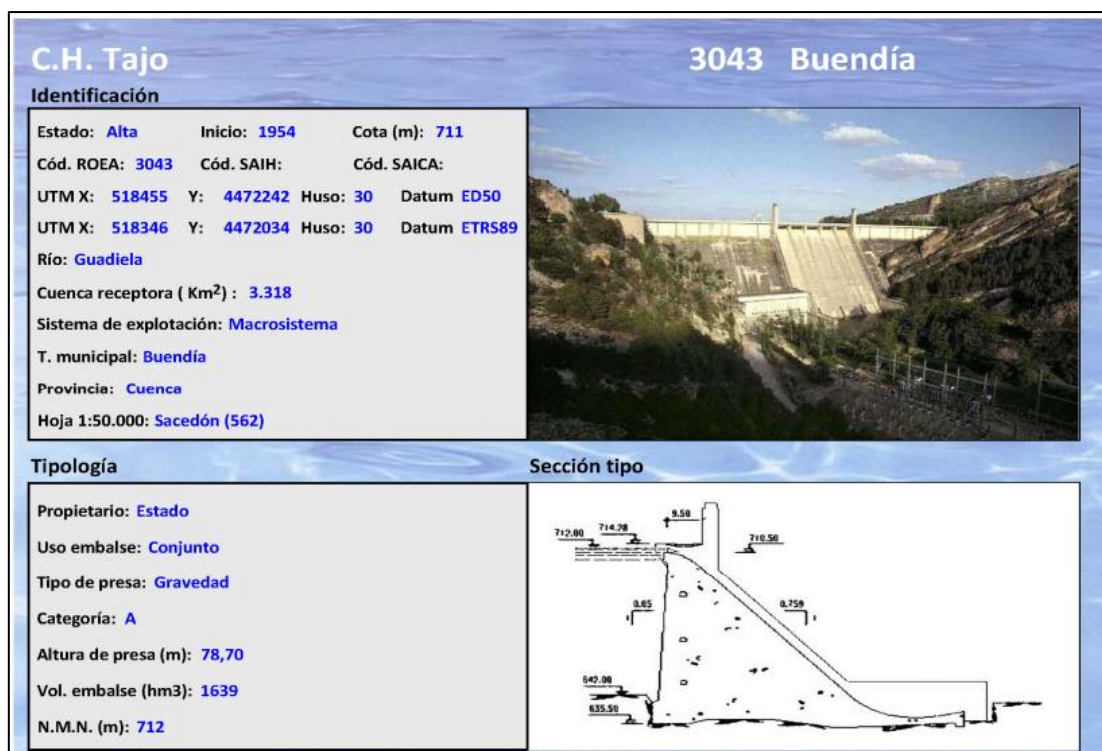


Figura 6. Ficha técnica del embalse de Buendía. Fuente: CEDEX

La importancia de estos embalses en el presente trabajo recae en que estos embalses componen el volumen embalsado empleado para la definición del Trasvase Tajo-Segura. En base a las aportaciones que reciben y al volumen que son capaces de almacenar, se erige la regla de explotación del trasvase, la cual determina los volúmenes trasvasables por la infraestructura mensualmente.

Teniendo en cuenta las predicciones hidrológicas que elabora EFAS para conocer sus aportaciones, y apoyándonos en los datos de las series históricas de aportaciones y reservas, se llevarán a cabo todos los procesos de cálculo expuestos en la metodología del presente trabajo. Con ello, se pretende generar un modelo de gestión y operación apoyado en las predicciones hidrológicas de EFAS que pueda pronosticar estacionalmente (a 7 meses) los volúmenes a trasvasar por la infraestructura al sureste español.



2.5 REGLA DE EXPLOTACIÓN ACTUAL DEL ATS

Toda la información contenida en este apartado ha sido tomada de la CH Tajo, del CEDEX y de legislación española vigente.

La Comisión Central de Explotación del Acueducto Tajo-Segura se constituyó en 1978, poco antes de que la ejecución de las obras del trasvase se hubiera concluido, con la función principal de ejercer la supervisión de su régimen de explotación y el control y la coordinación de las confederaciones hidrográficas encargadas de gestionar su explotación.

Actualmente, esta Comisión es la encargada de autorizar los volúmenes trasvasables en condiciones de normalidad hidrológica. No obstante, en el caso de presentarse circunstancias hidrológicas excepcionales, debe ser la Ministra para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico quien los autorice, previo informe de la Comisión. La autorización por parte de la Comisión se lleva a cabo preferentemente por semestres y en el caso de la Ministra preferentemente por trimestres, si bien en ambos casos se prevé la utilización justificada de plazos diferentes.

De acuerdo con el procedimiento aprobado por la propia Comisión, las confederaciones hidrográficas del Tajo, Guadiana, Júcar y Segura, la Mancomunidad de los Canales del Taibilla y la administración hidráulica competente en la demarcación hidrográfica de las Cuencas Mediterráneas Andaluzas, deben elaborar, antes de cada reunión de la Comisión, un documento de situación en el que se recojan los aspectos relevantes para el común conocimiento y la explotación del Acueducto Tajo-Segura. Con estos documentos de situación, la Dirección General del Agua debe elaborar un informe de situación integrado único, sintetizando las contribuciones recibidas junto con otros datos que se estime oportuno aportar e incluyendo un apartado específico de aplicación de la regla de explotación.

La regla de explotación que está vigente en la actualidad es una actualización de la regla aprobada en 1997 por la Comisión Central de Explotación del Acueducto Tajo-Segura, donde se han revisado los valores de sus magnitudes básicas definitorias. De acuerdo con lo establecido en la disposición adicional quinta de la Ley 21/2015 (González Iglesias, 2016) y en el artículo único del Real Decreto 638/2021, en función de las existencias conjuntas en los embalses de Entrepeñas y Buendía a comienzos de cada mes,

se establecen los siguientes niveles mensuales con arreglo a los que se acuerda la realización de los trasvases, con un máximo anual total de 650 hm³ en cada año hidrológico (600 para el Segura y 50 para el Guadiana):

- **Nivel 1.** Se da cuando las existencias conjuntas en Entrepeñas y Buendía son iguales o mayores que 1300 hm³ o cuando las aportaciones conjuntas entrantes a estos embalses en los últimos doce meses son iguales o mayores que 1400 hm³.
 - En estas circunstancias, la Comisión podrá autorizar un trasvase mensual de 60 hm³ hasta el máximo anual mencionado anteriormente.
- **Nivel 2.** Se da cuando las existencias conjuntas de Entrepeñas y Buendía son inferiores a 1300 hm³, sin llegar a los niveles previstos en el Nivel 3, y las aportaciones conjuntas registradas en los últimos doce meses son inferiores a 1400 hm³.
 - En estas circunstancias un trasvase mensual de 27 hm³ será autorizado por la Comisión, hasta el máximo anual anteriormente indicado.
- **Nivel 3.** Se da cuando las existencias conjuntas en Entrepeñas y Buendía no superan, a comienzos de mes, los valores mostrados en la tabla inferior.
 - En este nivel, denominado situación hidrológica excepcional, la Ministra podrá autorizar discrecionalmente y de forma motivada un trasvase de 20 hm³/mes como máximo.

Tabla 1. Existencias conjuntas (hm³) en Entrepeñas y Buendía que definen las situaciones hidrológicas excepcionales (Nivel 3). Fuente: CEDEX.

Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep
613	609	605	602	597	591	586	645	673	688	661	631

- **Nivel 4.** Se refiere a la situación en la que las existencias conjuntas en Entrepeñas y Buendía son inferiores a 400 hm³, en cuya circunstancia no cabe aprobar trasvase alguno.

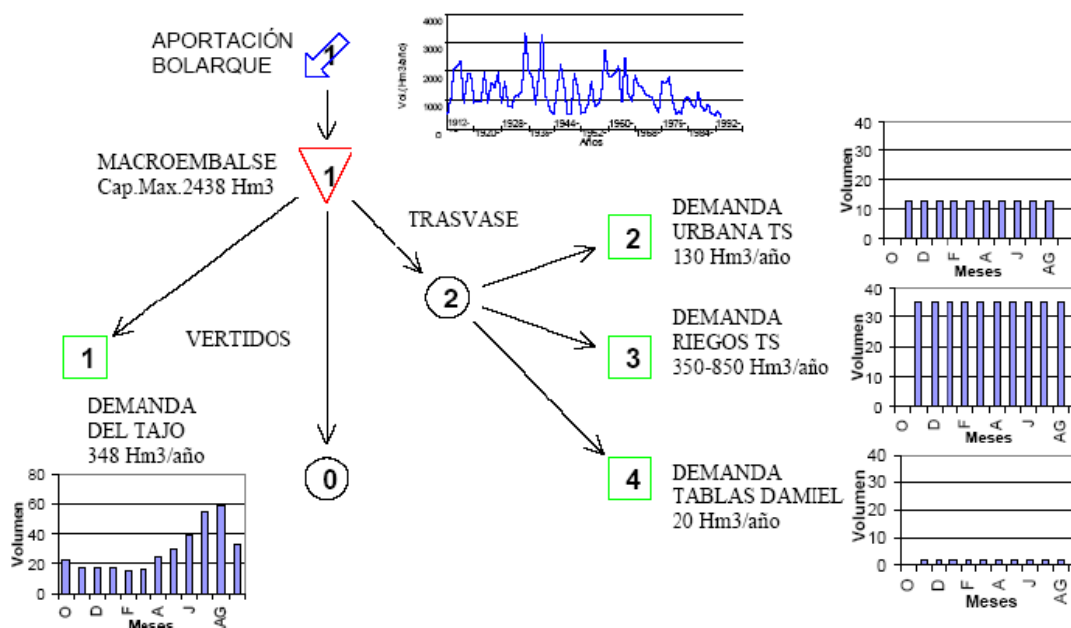


Figura 7. Esquema en Aquatool del Trasvase Tajo-Segura. Fuente: Bibliografía de la asignatura “Water Resources Planning and Management “ (MICCP)

El artículo 2 del Real Decreto 773/2014 indica el procedimiento a seguir para la predicción de las aportaciones mensuales futuras en la aplicación plurimensual de la regla. El procedimiento parte de la aportación registrada o estimada en el mes anterior al de comienzo de la predicción y utiliza 3 parámetros mensuales.

Tabla 2. Parámetros para la predicción plurimensual de aportaciones. Fuente: CEDEX

Mes actual	b	a2	a5
Enero	0,971	0,825	1,301
Febrero	0,631	2,997	4,454
Marzo	0,638	3,410	4,832
Abril	0,629	3,933	5,319
Mayo	0,718	2,416	3,257
Junio	0,714	1,911	2,564
Julio	0,562	3,379	4,242
Agosto	0,587	3,049	3,664
Setiembre	0,687	2,228	2,651
Octubre	0,794	1,983	2,399
Noviembre	0,933	1,178	1,504
Diciembre	1,012	0,996	1,400

Las previsiones de aportaciones se realizan para periodos no superiores a 6 meses, salvo que la situación en el mes inicial sea de nivel 3 o 4, en cuyo caso las previsiones se realizan a lo sumo cada 3 meses.

El artículo 4 del mismo Real Decreto fija los desembalses de referencia a efectuar desde la presa de Bolarque para la satisfacción de las necesidades ambientales y socioeconómicas de la cuenca del Tajo, que son los indicados en la tabla siguiente.

Tabla 3. Desembalses de referencia hacia la cuenca del Tajo (hm³). Fuente: CEDEX.

Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Total
25	18	19	19	18	23	23	31	42	60	51	36	365

3. MÉTODOS Y MATERIALES

El proceso metodológico seguido en este trabajo se presenta en la siguiente figura. Mediante un diagrama de flujo de procesos han representado todas las etapas seguidas en el trabajo.

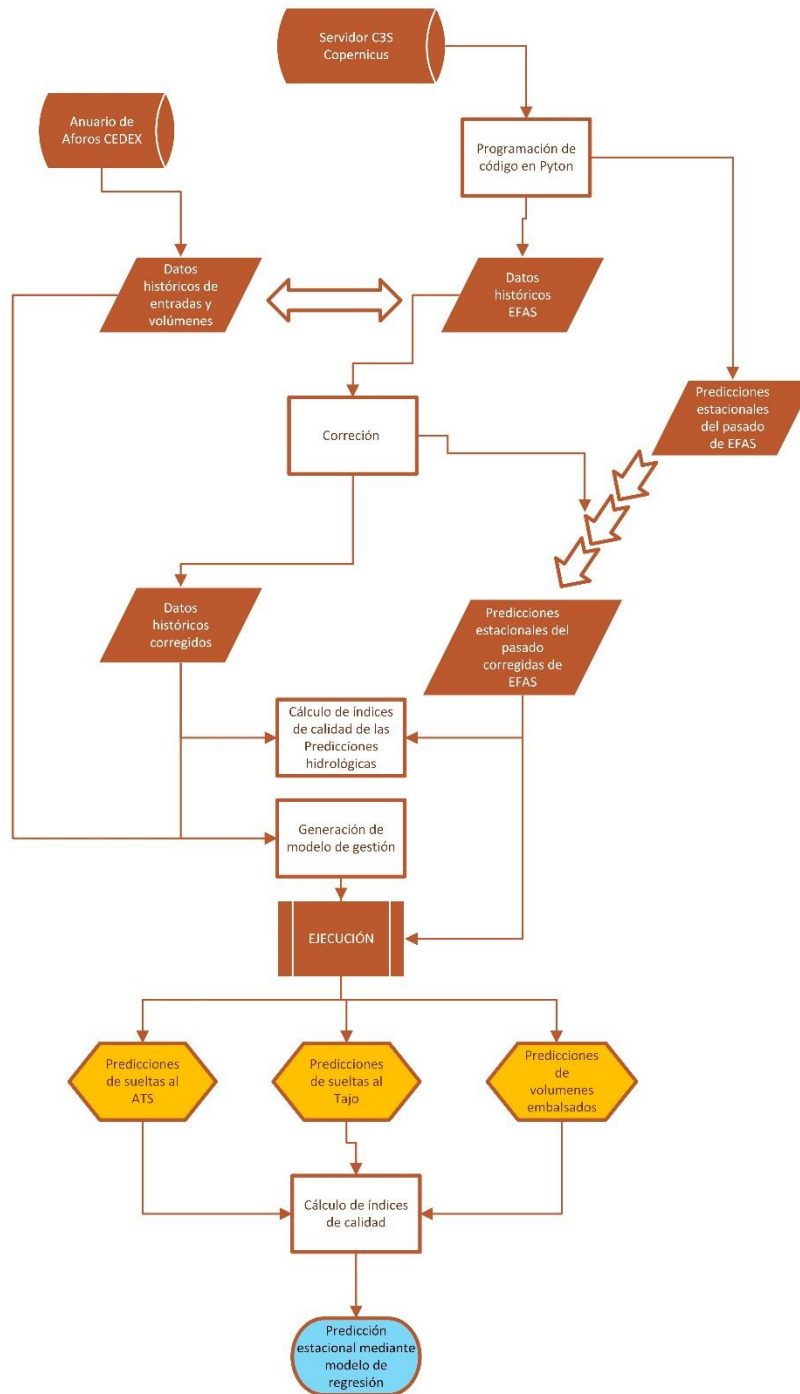


Figura 8. Diagrama de flujo de las fuentes y la metodología empleada en el presente trabajo. Fuente Elaboración propia



3.1 DATOS SOBRE EL CAUDAL DE LOS RÍOS Y DATOS HISTÓRICOS RELACIONADOS DE GLOFAS

Este conjunto de datos contiene datos diarios modelizados globales de la descarga de los ríos para el periodo histórico procedentes del *Global Flood Awareness System* (GLOFAS), que forma parte del *Copernicus Emergency Management Service* (CEMS). El caudal de un río, o flujo fluvial como también se le conoce, se define como la cantidad de agua que fluye a través de una sección del río en un momento determinado.

Respecto a GLOFAS, (Pappenberger et al., 2010) demostraron por primera vez que era posible lograr predicciones útiles de la descarga de los ríos acoplando un esquema de cálculo de caudales de ríos con el modelo de superficie terrestre del sistema global de predicciones numérica del tiempo (NWP) del ECMWF. El sitio web GloFAS-ERA5 utiliza este concepto y se produce acoplando el componente 100 de escorrentía del modelo de superficie terrestre del reanálisis global ERA5 del ECMWF (Hersbach et al., 2018) con el modelo hidrológico distribuido LISFLOOD (Van Der Knijff et al., 2010). En ERA5 la escorrentía (m/d) de una celda no está conectada a las celdas vecinas, por lo que no es posible estimar el caudal del río (m³/s) a escala de la cuenca. El acoplamiento de la escorrentía de ERA5 con LISFLOOD permite la conectividad lateral de las celdas de la cuadrícula con la escorrentía dirigida a través del canal del río para producir la descarga del río. Un esquema de los componentes clave en la producción del reanálisis GloFAS-ERA5 se proporciona en la **Figura 9**.

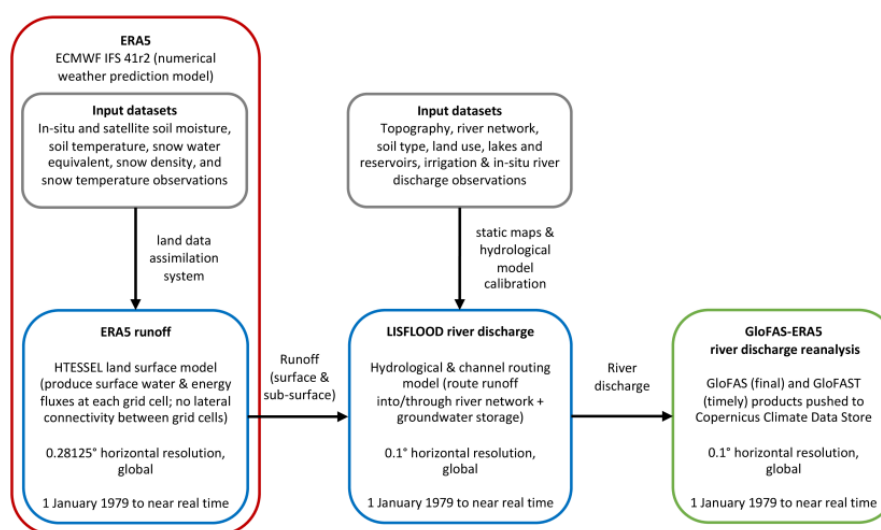


Figura 9. Esquema de los componentes clave en la producción del conjunto de datos de reanálisis de caudal GloFAS-ERA5. Fuente: (Harrigan et al., 2020b)

Este conjunto de datos se simula forzando una cadena de modelización hidrológica con entradas procedentes de un reanálisis (reconstrucción del pasado usando un modelo matemático) meteorológico global. Los datos disponibles para la simulación histórica van desde el 1 de enero de 1979 hasta casi el tiempo real.

Tabla 4. Descripción de las características principales de los datos referentes a GLoFAS. Fuente: (Harrigan et al., 2020b)

DESCRIPCIÓN DE DATOS	
Tipo de datos	Mallado
Cobertura horizontal	Global excepto para Antártida (90N-60S, 180W-180E)
Resolución horizontal	0.1° x 0.1°
Resolución vertical	Nivel de la superficie para el caudal
Cobertura temporal	1 de enero de 1979 a tiempo casi real para la versión más reciente
Resolución temporal	Datos diarios
Formato de archivo	GRIB2
Convenciones	WMO estándares para GRIB2
Versiones	Versión actual - GLoFAS v3.1 publicado el 2021-05-26
Frecuencia de actualización	Con cada actualización importante del sistema GLoFAS se publicará un nuevo reanálisis de caudales. La última versión será siempre la utilizada en las operaciones.

Tabla 5. Variables principales del conjunto de datos de GLoFAS. Fuente: (Harrigan et al., 2020b)

PRINCIPALES VARIABLES		
Nombre	Unidades	Descripción
Caudal en las últimas 24 horas	m ³ /s	Tasa de volumen del flujo de agua, incluidos los sedimentos y el material químico y biológico, en el canal del río promediada en un paso de tiempo a través de una sección transversal. El valor es una media de un período de 24 horas.

Tabla 6. Variables relacionadas del conjunto de datos. Fuente:(Harrigan et al., 2020b)

VARIABLES RELACIONADAS		
Nombre	Unidades	Descripción
Área de cabecera	m ²	Un archivo estático (glofas_upArea.nc). El área total aguas arriba de cada píxel del río. Se define como el área de captación de cada segmento de río, es decir, el área total que contribuye con agua al río en el punto específico de la cuadrícula. El área aguas arriba siempre incluye el área del píxel



3.2 DATOS HISTÓRICOS SOBRE EL CAUDAL DE LOS RÍOS Y OTROS DATOS RELACIONADOS DE EFAS

Este conjunto de datos proporciona series temporales hidrológicas diarias y subdiarias modelizadas y forzadas con observaciones meteorológicas, de forma semejante a GloFAS pero centradas en el continente europeo. El conjunto de datos es una representación coherente de las variables hidrológicas más importantes en el ámbito del Sistema Europeo de Información sobre Inundaciones (EFAS). El periodo temporal es de hasta 30 años de series temporales modelizadas de:

- El caudal de los ríos
- Humedad del suelo para tres capas de suelo
- Equivalente de agua de nieve

También se proporcionan datos auxiliares (invariantes en el tiempo) para ayudar a la interpretación de los datos de la descarga del río y de la humedad del suelo. Estos datos auxiliares son el área aguas arriba, la elevación, la profundidad del suelo, la capacidad de marchitamiento y la capacidad de campo. Estos tres últimos se proporcionan en tres niveles de suelo, uno para cada una de las tres capas de suelo representadas en LISFLOOD.

Este conjunto de datos se elaboró forzando el modelo hidrológico LISFLOOD con datos de observación cuadrículados de la precipitación y la temperatura a una resolución de 5x5 km en el dominio EFAS. La versión más reciente utiliza un paso temporal de 6 horas, mientras que las versiones más antiguas utilizan un paso temporal de 24 horas. Está disponible desde el 1 de enero de 1991 hasta casi tiempo real, con un retraso de 6 días. Los datos en tiempo real sólo están disponibles para los socios del EFAS (gobiernos nacionales y regionales, protección civil, organismos de cuenca, etc).

Los conjuntos de datos complementarios, también disponibles a través del CDS, son predicciones para trabajos que necesitan previsiones de medio alcance, predicciones del pasado para la investigación, la evaluación de la capacidad local y el post procesamiento, y predicciones y predicciones del pasado estacionales para los casos en los que se buscan previsiones a largo plazo. Para las situaciones que necesitan datos hidrológicos globales, nos referimos a las previsiones y simulaciones históricas del Global Flood Awareness



System (GloFAS). Todos estos conjuntos de datos forman parte de la previsión operativa de inundaciones dentro del Servicio de Gestión de Emergencias de Copernicus (CEMS).

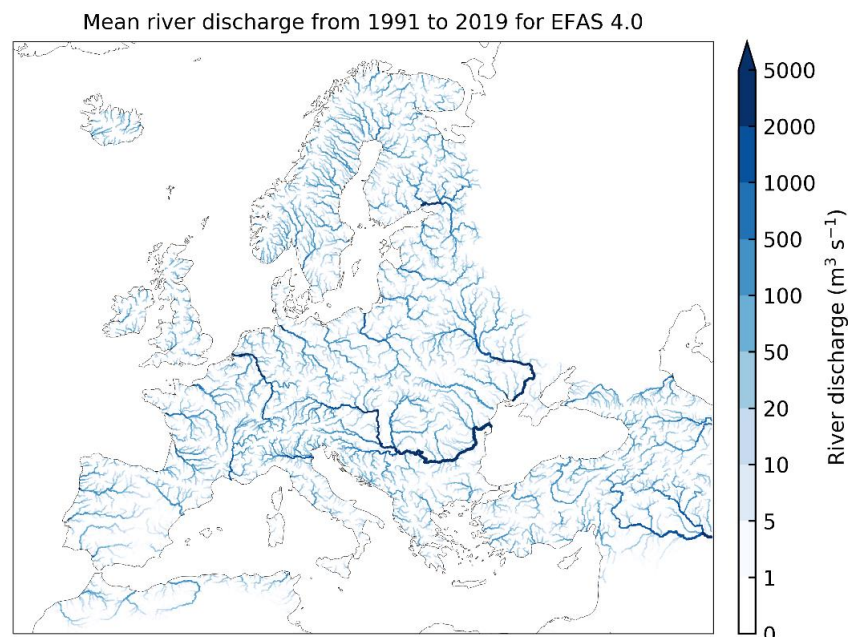


Figura 10. Datos de caudal medio diario desde 1991 hasta 2019 para EFAS 4.0. Fuente: (Mazzetti et al., 2019)

A continuación se presenta una tabla resumen con las principales características de los datos empleados así como de las principales variables que estos datos emplean.

Tabla 7. Descripción de las características generales de los datos históricos de EFAS. Fuente: (Mazzetti et al., 2019)

DESCRIPCIÓN DE LOS DATOS	
Tipo de datos	Mallado - La proyección geográfica es el Sistema de Referencia de Coordenadas de Área Equivalente Lambert Azimutal ETRS89 (ETRS-LAEA) que cumple con INSPIRE.
Cobertura horizontal	Europa - El dominio se extiende desde el norte de África hasta el extremo norte de Escandinavia. En el oeste se extiende hasta el Océano Atlántico y en el este hasta el Mar Caspio.
Resolución horizontal	5x5km
Resolución vertical	3 niveles para la humedad del suelo; nivel de superficie para la descarga del río y el equivalente de agua de la profundidad de la nieve.
Cobertura temporal	Del 1 de enero de 1991 a tiempo casi real (6 días de retraso) para la versión más reciente.
Resolución temporal	6 horas a partir de la versión 4, 24 horas para las versiones anteriores.
Formato de archivo	GRIB2 y NetCDF-4

Versiones	Versión actual - EFAS v4.0 liberado 2020-10-14.
Frecuencia de actualización	Los nuevos datos se añaden continuamente con un retraso mínimo de 1 mes respecto a la fecha real de la última versión.

Tabla 8. Descripción de las variables principales contenidas en los datos históricos de EFAS.
Fuente: (Mazzetti et al., 2019)

PRINCIPALES VARIABLES		
Nombre	Unidades	Descripción
Caudal en las últimas 24 horas	m ³ /s	Tasa de caudal de agua, incluidos los sedimentos y el material químico y biológico, en el canal del río, promediada en un paso de tiempo a través de una sección transversal. El valor es un promedio de cada paso de tiempo de 24 horas.
Caudal en las últimas 6 horas	m ³ /s	Tasa de caudal de agua, incluidos los sedimentos y el material químico y biológico, en el canal del río, promediada en un paso de tiempo a través de una sección transversal. El valor es un promedio de cada paso de tiempo de 6 horas.
Equivalencia de agua en la masa de nieve	Kg/m ²	El valor representa la masa de agua por metro cuadrado si se derritiera toda la nieve en la caja de la malla. El valor es instantáneo, lo que significa que es válido para el último paso de tiempo de la integración en el paso de tiempo del modelo emitido.
Humedad volumétrica del suelo	m ³ /m ³	Cantidad de agua en un metro cúbico de suelo válida para la malla de celdas en la capa de suelo correspondiente. El valor es instantáneo, lo que significa que es válido para el último paso de tiempo de la integración en el paso de tiempo del modelo emitido.



3.3 PREDICCIONES ESTACIONALES DEL PASADO DE CAUDAL DE LOS RÍOS Y DATOS RELACIONADOS DE EFAS

Este conjunto de datos proporciona series temporales hidrológicas diarias modelizadas y forzadas con pronósticos meteorológicos estacionales. El conjunto de datos es una representación coherente de las variables hidrológicas más importantes en todo el ámbito del Sistema Europeo de Alerta de Inundaciones (EFAS). La resolución temporal es de previsiones diarias inicializadas una vez al mes a lo largo del periodo de previsión (1991-2020) de:

- El caudal de los ríos
- Humedad del suelo para tres capas de suelo
- Equivalente de agua de nieve

También se proporcionan datos auxiliares (invariantes en el tiempo) para ayudar a la interpretación de los datos de descarga fluvial y humedad del suelo. Estos datos auxiliares son el área aguas arriba, la elevación, la profundidad del suelo, la capacidad de marchitamiento y la capacidad de campo. Estos tres últimos se proporcionan en tres niveles de suelo, uno para cada una de las tres capas de suelo representadas en LISFLOOD (Barnard et al., 2020).

Este conjunto de datos se ha producido forzando el modelo hidrológico LISFLOOD con una resolución cuadrículada de 5x5 km con pronósticos meteorológicos conjuntos estacionales. Las predicciones del pasado son previsiones realizadas en fechas pasadas, y se utilizan para evaluar la capacidad de un sistema de previsión o para desarrollar herramientas de corrección de errores estadísticos de las previsiones. Las predicciones del pasado se inician el primer día de cada mes con un plazo de 215 días en pasos de 24 horas. Los datos meteorológicos de partidas son las predicciones del pasado estacionales del sistema SEAS5 del Centro Europeo de Previsiones Meteorológicas a Medio Plazo (ECMWF), que consta de 25 miembros del conjunto (*ensembles*) hasta diciembre de 2016, y después de 51 miembros. Las previsiones hidrometeorológicas están disponibles desde el 1 de enero de 1991 hasta el 1 de octubre de 2020.

Los conjuntos de datos complementarios, también disponibles a través del Almacén de Datos Climáticos (CDS), son previsiones estacionales, para las que las predicciones del pasado pueden ser útiles para la evaluación de la habilidad local y el post

procesamiento de las previsiones estacionales. Para los casos en los que se busquen rangos temporales más cortos, existen previsiones y predicciones del pasado de medio alcance, así como simulaciones históricas que pueden utilizarse para derivar el comportamiento hidrológico. Para los usuarios que buscan datos hidrológicos globales, nos remitimos a las previsiones y simulaciones históricas de (GLoFAS) ya descritos anteriormente. Todos estos conjuntos de datos forman parte de la previsión operativa de inundaciones dentro del Servicio de Gestión de Emergencias de Copernicus (CEMS).

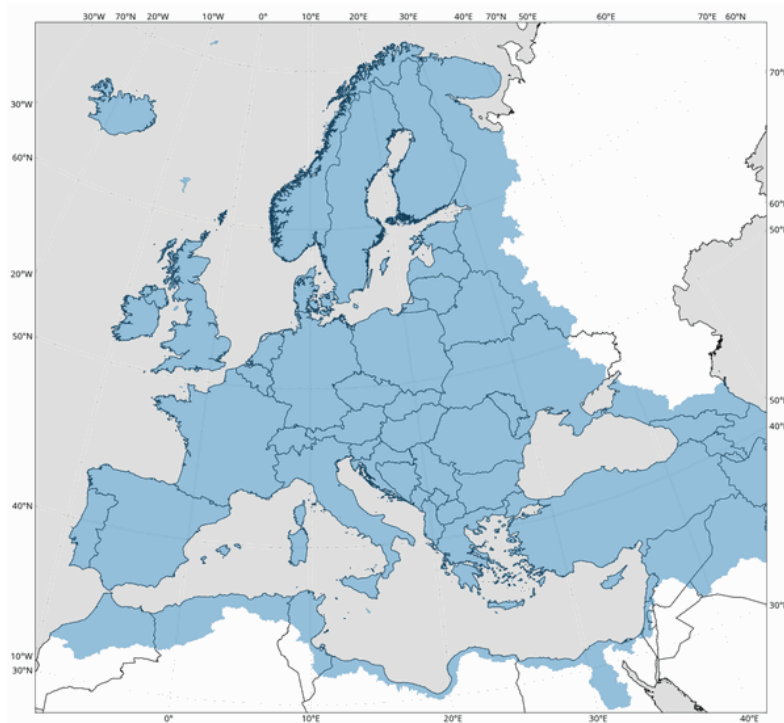


Figura 11. Extensión del dominio de EFAS. El color azul indica las áreas con datos (Harrigan et al., 2020a)

A continuación se presenta una tabla resumen (Arnal et al., 2018) con las principales características de los datos empleados así como de las principales variables que estos datos emplean.

Tabla 9. Descripción de las características generales de las predicciones estacionales del pasado de EFAS. Fuente: (Arnal et al., 2018)

DESCRIPCIÓN DE DATOS	
Tipo de datos	Mallado - La proyección geográfica es el Sistema de Referencia de Coordenadas de Área Equivalente Lambert Azimutal ETRS89 (ETRS-LAEA) que cumple con INSPIRE.
Cobertura horizontal	Global excepto para Antártida (90N-60S, 180W-180E)
Resolución horizontal	5x5km
Resolución vertical	3 niveles para la humedad del suelo; nivel de superficie para la descarga del río y el equivalente de agua de la profundidad de la nieve.
Cobertura temporal	Del 1 de enero de 1991 al 1 de octubre de 2020.
Resolución temporal	Las predicciones del pasado se inicializan a las 00 UTC del primer día de cada mes con un paso temporal de 24 horas y con un lapso de tiempo de 215 días.
Formato de archivo	GRIB2 y NetCDF-4
Versiones	Versión actual - EFAS v4.0 liberado 2020-10-14
Frecuencia de actualización	Las predicciones del pasado se actualizarán cuando haya una nueva versión de la previsión estacional o del sistema EFAS

Tabla 10. Descripción de las principales variables contenidas en las predicciones estacionales del pasado de EFAS. Fuente: (Arnal et al., 2018)

PRINCIPALES VARIABLES		
Nombre	Unidades	Descripción
Caudal en las últimas 24 horas	m ³ /s	Tasa de volumen del flujo de agua, incluidos los sedimentos y el material químico y biológico, en el canal del río promediada en un paso de tiempo a través de una sección transversal. El valor es una media de un período de 24 horas.
Equivalencia de agua en la masa de nieve	kg /m ²	El valor representa la masa de agua por metro cuadrado si se derritiera toda la nieve en la caja de la malla. El valor es instantáneo, lo que significa que es válido para el último paso de tiempo de la integración en el paso de tiempo del modelo emitido.
Humedad volumétrica del suelo	m ³ /m ³	Cantidad de agua en un metro cúbico de suelo válida para la malla de celdas en la capa de suelo correspondiente. El valor es instantáneo, lo que significa que es válido para el último paso de tiempo de la integración en el paso de tiempo del modelo emitido.

3.4 DATOS HISTÓRICOS DEL ANUARIO DE AFOROS

Accediendo a la base de datos del anuario de aforos del Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX) se han obtenidos los datos de las series históricas de entradas, volúmenes almacenados y sueltas para los embalses de Entrepeñas y Buendía. En las siguientes imágenes se pueden ver los principales datos estadísticos de estas series de datos para cada uno de los embalses.

Los archivos descargados del anuario de aforos con los datos de las entradas y las reservas de los embalses contienen las siguientes variables:

- **ref_cch:** Identificador del embalse
- **fecha:** Fecha (día/mes/año) en la que se toma el dato
- **reserva:** Reserva diaria (hm^3)
- **salida:** Salida media diaria (m^3/s)
- **tipo:** Identificador del tipo de medida (1 o 2).
 - Tipo 1: La reserva se mide al final del día, por lo que al hacer el balance, la reserva del día siguiente se obtiene sumando a la reserva las entradas del día siguiente y restando las salidas del día siguiente:

$$R(DIA\ 2) = R(DIA\ 1) + E(DIA\ 2) - S(DIA\ 2)$$

- Tipo 2: La reserva se mide al comienzo del día, de manera que la reserva del día siguiente se obtiene sumando a la reserva las entradas del mismo día y restando las salidas del mismo día:

$$R(DIA\ 2) = R(DIA\ 1) + E(DIA\ 1) - S(DIA\ 1)$$

De dichos archivos han sido extraídos los datos correspondientes a las reservas y a las entradas de todo el registro histórico que va desde octubre de 1991 a septiembre de 2019.



3.5 OBTENCIÓN DE DATOS DE EFAS PARA EL CASO DE ESTUDIO

Aunque el caso de estudio será descrito pormenorizadamente en el apartado dedicado a ello, conviene hacer una pequeña introducción que ayude a la comprensión de la metodología y los materiales utilizados.

El caso de estudio se centra en los embalses de Entrepeñas y Buendía, situados en la cabecera del río Tajo. De estos embalses se detraen los volúmenes trasvasables por el Acueducto Tajo Segura. Los volúmenes enviados a través de esta infraestructura hacia la cuenca del Segura dependen, fundamentalmente, de las aportaciones y los volúmenes embalsados en estos dos embalses. Es por ello que, los conjuntos de datos presentados anteriormente, se centrarán en los datos concretos para estos dos embalses y se obtendrán de acorde a lo expuesto en el presente apartado.

Conocido lo anterior, se sabe que los datos climáticos de Copernicus se suelen facilitar en archivos multidimensionales (grib, netcdf). Los archivos multidimensionales son útiles para almacenar elementos multidimensionales y son eficientes en cuanto al espacio usado. Además, permiten empaquetar datos científicos en un único archivo. Sin embargo, no permiten extraer datos de forma inmediata. Es necesario recurrir a software avanzado y construir un pequeño código de programación para extraer los datos.

Los pasos a seguir para leer y extraer datos de un archivo multidimensional de extensión .nc son:

- Inspección el archivo .nc
- Extracción de la malla de cálculo de cada escenario
- Extracción los datos de los puntos de la malla elegidos

Resulta necesario siempre leer el archivo .nc en primera instancia para averiguar qué variables hay, saber qué nombre tienen las variables, conocer las variables que dependen de otras y en qué orden y por último, determinar sus unidades y si es oportuno hacer correcciones.

Para la proyección de la malla de datos se procede extrayendo las coordenadas de la malla directamente desde el archivo .nc mediante un archivo .csv y proyectándolas después en un GIS. La ventaja de este proceso reside en que se pueden extraer las

coordenadas no rotadas y simultáneamente la numeración interna de cada punto. No obstante, este proceso ha requerido programar un código en Python para resolverlo de forma eficiente.

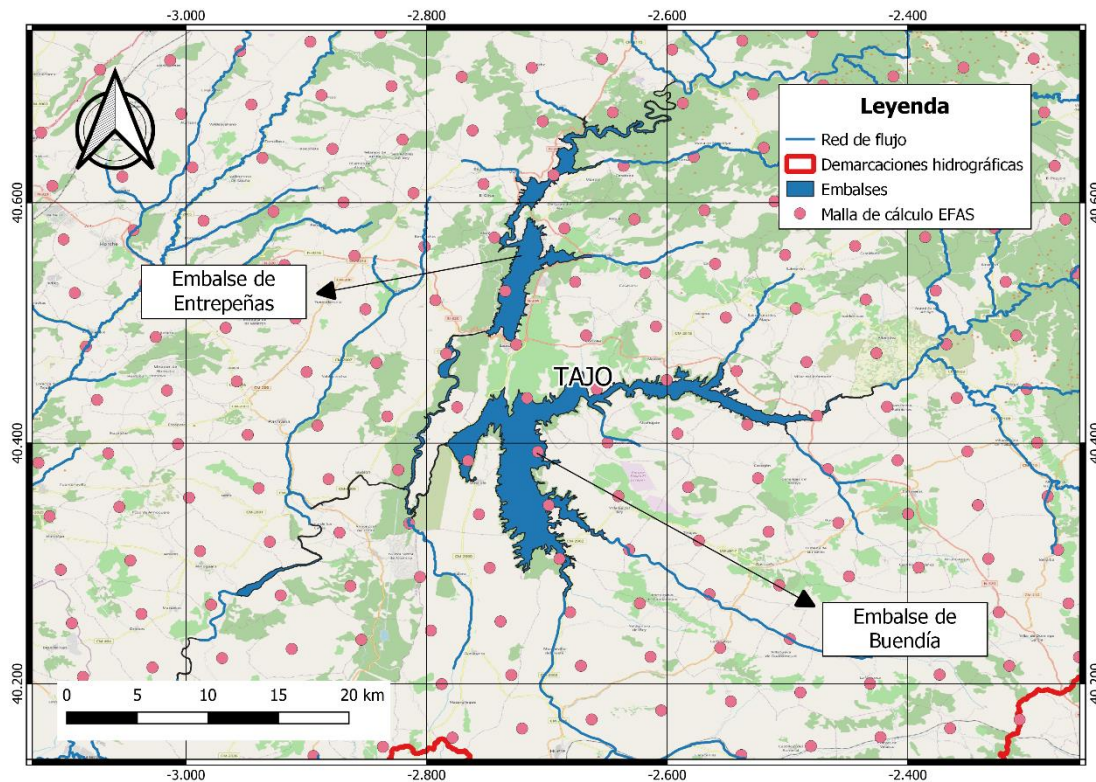


Figura 14. Malla de cálculo empleada en EFAS de la cual se han elegido los puntos de interés para el presente trabajo. Fuente: Elaboración propia

3.5.1 DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA SEGUIDA

En primer lugar, ha sido necesario la elaboración y escritura de un script de Python para acceder y descargar los datos históricos de EFAS del servidor C3S de Copernicus. Se ha descargado la extensión temporal completa de este conjunto de datos, que como se ha expuesto anteriormente ocupa el periodo de tiempo comprendido entre enero del año 1991 a diciembre del año 2019.

Los archivos descargados estaban organizados de tal manera que cada uno de ellos contenía los datos de caudal de un mes completo para todos los puntos de la malla de cálculo que comprende todo el continente europeo. El siguiente paso ha sido leer uno de los archivos generados tras la descarga con el fin de identificar las variables contenidas en el mismo, y el mallado utilizado. Es necesario destacar que los archivos contenían los datos de todo el modelo europeo, por lo que se debían identificar los puntos localizados



sobre las entradas de los embalses estudiados para poder extraer únicamente los valores de los caudales en esos puntos concretos. El resto de la información contenida en los archivos no ha sido necesaria, pero no se podía prescindir de ella en las opciones de descarga de datos de EFAS ya que el C3S de Copernicus no disponía, a día de descarga de datos, de la opción de recortar parte del dominio de EFAS.

Se ha representado la malla utilizada en los datos de EFAS en un visor de GIS, donde se han superpuesto las capas de embalses y de ríos de la CH Tajo para localizar los puntos de este mallado que mejor se ajustaban a las entradas de los embalses.

A continuación, se han escogido 4 puntos diferentes de la malla de EFAS para cada uno de los embalses, puesto que a priori no es posible identificar el punto que mejor se ajusta a la realidad al no estar disponible en abierto la conceptualización del modelo. Es decir, es necesario obtener varios, comparar los datos de ese punto con los datos históricos del anuario de aforos y entonces seleccionar aquel punto que realmente se localiza en el cauce y da valores representativos del caudal.

Para el caso de los datos históricos de EFAS, los datos descargados arrojan valores de caudal cada 6 horas como se ha descrito en la información de los productos de EFAS utilizados. Por ello, después ha sido necesario promediarlos para obtener valores diarios.

Finalmente, resulta necesario remarcar que el volumen de información que se ha manejado en este proceso de obtención de datos ha sido realmente elevado. Es por ello que el empleo de Python ha sido una forma excelente de poder gestionar y resolver óptimamente este proceso. Los diferentes scripts generados han sido capaces de sincronizar y reenviar datos a una nube del almacenamiento de forma secuencial. También mediante estos scripts se ha podido organizar la enorme cantidad de datos en elementos de programación como los “dataframe”, lo que ha permitido operar con ellos en primera instancia y gestionarlos para exportarlos en un formato adecuado para su posterior análisis en una hoja de cálculo convencional.

3.6 CORRECCIÓN DE LOS DATOS HIDROLÓGICOS DE EFAS

Los pronósticos hidrológicos pueden presentar sesgos por varios motivos. El primero de ellos es el empleo de modelos climáticos a escala global o europea que a veces no reproducen bien los fenómenos hidrológicos locales. En según lugar, el empleo de fuentes de datos cuyo detalle o ajuste local puede no ser adecuado. Finalmente, la utilización de una malla de cálculo demasiado grande para el objetivo que queremos perseguir con el análisis.

En definitiva, para poder usar las proyecciones hidrológicas con el detalle necesario hay que corregir dichos sesgos y esta corrección requiere comparar los datos obtenidos por el modelo hidrológico con los datos históricos para un periodo común a ambos, denominado periodo de control (Giuliani et al., 2020).

Existe una amplia variedad de métodos de corrección del sesgo (*bias correction* en la literatura inglesa) con sus variantes:

- Corrección basada en la media y/o la desviación típica (*delta change method*)
- Corrección por cuantiles (*quantile mapping*)
- Regresión
- Inteligencia artificial (artificial intelligence o machine learning)
- Etc.

En el presente trabajo se ha optado por emplear la regresión como metodología para la corrección del sesgo, debido a su sencillez y al hecho de que, como se apreciará posteriormente, el rendimiento del mismo ha sido adecuado, por lo que no ha sido necesario recurrir a métodos más complejos. Cabe destacar que cada método presenta sus ventajas e inconvenientes; sin embargo, se debe tener muy presente que un método más complejo no significa necesariamente un ajuste mejor, además de que algunos de ellos son muy complejos de implementar.

Adicionalmente, resulta necesario mencionar que el método de corrección aquí empleado no es el más popular en *forecasting*. Normalmente lo que se lleva a cabo es un cálculo de las distribuciones de probabilidad acumulada de las predicciones, posteriormente una comparación con las de los datos históricos y finalmente se realiza el ajuste a partir de esas distribuciones (mapeo de cuantiles). La razón por la que en el presente trabajo se emplea un método basado en datos históricos es porque en este caso



están disponibles (lo que no suele ser habitual) y, además, porque de esta forma se corrige dato a dato, lo que permite evaluar mejor los sesgos del modelo: en una corrección de función de probabilidad no es posible conocer a priori cuándo se han producido los percentiles.

Esto se apoya en el artículo que se publicó en 2020, donde se realizó una comparativa entre ambos métodos de corrección con el modelo E-HYPE y el resultado arrojó una mejor corrección con el método que se ha empleado en el presente trabajo (Macian-Sorribes et al., 2020). Sin embargo, hacer una comparación de métodos de corrección queda fuera del alcance de este trabajo.

Por último, señalar dos aspectos relevantes: no siempre resulta posible llevar a cabo la corrección puesto que los datos del modelo hidrológico deben presentar similitud, aunque remotamente, a los datos históricos y, la corrección no arregla todos los sesgos que pueda tener el modelo ya que siguen quedando incertidumbres.

3.7 ANÁLISIS DE LOS DATOS HISTÓRICOS

El objetivo de este apartado es analizar los datos históricos de entradas a Entrepeñas y Buendía arrojados por EFAS y compararlos con los datos históricos del anuario de aforos del CEDEX para el mismo periodo histórico. En función de su ajuste a los aforos se llevará a cabo la corrección correspondiente.

3.7.1 OBTENCIÓN DE LOS DATOS. GENERACIÓN DEL SCRIPT DE PYTHON

Los datos para este análisis han sido descargados del anuario de aforos del CEDEX y del servidor C3S de Copernicus. Para estos últimos, ha sido necesario escribir un código empleado Python, de acuerdo con lo expuesto en la metodología de obtención de datos, que ha permitido descargar y procesar la enorme cantidad de datos manejada con el fin de extraer únicamente los datos de EFAS necesarios para este análisis.

3.7.2 ANÁLISIS DE LAS SERIES HISTÓRICAS DE DATOS

Los datos diarios de cada uno de los puntos se han promediado para obtener valores mensuales. Una vez obtenidos estos valores mensuales se han calculado los estadísticos principales para analizar la serie de datos (media, desviación típica, asimetría, etc) y además se ha calculado el coeficiente de correlación con los datos de los mensuales del anuario de aforos del CEDEX para el mismo periodo histórico.

Tabla 11. Tabla resumen de los estadísticos principales referentes a los datos históricos de EFAS para los diferentes puntos elegidos de la malla de cálculo. Fuente: elaboración propia.

ESTADÍSTICOS PRINCIPALES DATOS HISTÓRICOS DE EFAS [hm ³ /mes]								
	Entrepeñas_1	Entrepeñas_2	Entrepeñas_3	Entrepeñas_4	Buendía_1	Buendía_2	Buendía_3	Buendía_4
Correlación	0.411	0.503	0.483	0.498	0.087	0.389	0.385	0.283
Media	11.221	11.671	11.657	11.824	2.734	2.489	2.464	0.221
Desviación típica	9.115	11.300	10.781	11.232	1.278	6.225	6.204	0.527
Asimetría	2.727	1.696	1.603	1.684	-0.807	4.447	4.441	4.329

Este análisis estadístico previo ha permitido la selección de un único punto, aquel que aportaba los datos más certeros y de mayor calidad para los posteriores análisis y cálculos. En ambos casos, tanto para el embalse de Entrepeñas como para el embalse de Buendía se ha elegido el denominado punto número 2 que respectivamente tienen las posiciones (694,148) y (696,148) referidas a la malla de EFAS.

Las series de datos empleadas se han representado en varios gráficos con el fin de mostrar visualmente la similitud y disparidad de los datos obtenidos de EFAS con los datos históricos obtenidos del anuario de aforos para cada uno de los embalses. En primera instancia, se planteó la posibilidad de intentar calcular una regresión directa entre la serie completa del anuario de aforos y la serie completa obtenida de EFAS, sin distinción de meses. Tras varios intentos, se descartó finalmente por la imposibilidad de encontrar una función que ajustara óptimamente los dos conjuntos de datos.

Debido a lo expuesto en el anterior párrafo, el siguiente paso ha sido realizar una regresión lineal empleando los datos históricos de los conjuntos de datos a relacionar, pero llevándolo a cabo mes a mes. Los coeficientes de estas regresiones mensuales serán empleados posteriormente para corregir los datos históricos de EFAS.

Finalmente, a la vista del rendimiento obtenido en ambas alternativas, para corregir los datos históricos de EFAS el proceso seguido ha sido:

- Clasificación de los datos mensualmente
- Localización del dato histórico del anuario de aforos correspondiente a cada uno de los datos de EFAS
- Aplicación de la siguiente corrección de acuerdo con el mes correspondiente al dato de entradas:

$$\text{Entrada EFAS}_{\text{corregido}} = \text{Entrada EFAS}_{\text{histórico}} * m_{\text{según mes}} + n_{\text{según mes}}$$

donde m representa la pendiente y n la ordenada en el origen

Los resultados obtenidos han sido graficados según un eje temporal mostrando conjuntamente las series históricas correspondientes a los datos históricos del anuario de aforos, los datos históricos de EFAS y los datos históricos corregidos de EFAS tras el ajuste. El motivo de esta forma de presentación de resultados es que los todos los conjuntos de datos comparten el mismo eje temporal. Además, el resultado de este análisis, es decir, la serie histórica de entradas arrojada por EFAS tras haber sido corregida empleando los datos del anuario de aforos, será empleada para llevar a cabo el cálculo de los índices de calidad de las predicciones estacionales del pasado de EFAS. Este último conjunto de datos también comparte el eje temporal y será analizado según lo expuesto en el siguiente apartado.



3.8 ANÁLISIS DE LAS PREDICCIONES ESTACIONALES DEL PASADO DE CAUDAL DE EFAS

En este apartado se va a describir el proceso seguido para realizar el análisis de las predicciones estacionales del pasado arrojados por EFAS para las aportaciones de los embalses de Entrepeñas y Buendía.

En concreto, en este análisis se realizará el cálculo de índices de calidad (en inglés *skill*) de las predicciones. Para ello se llevará a cabo una comparación estadística de los valores históricos de EFAS corregidos frente a los valores de las predicciones estacionales del pasado de EFAS. Adicionalmente, también se llevará a cabo la comparación de estas predicciones de EFAS con los datos históricos del anuario aforos.

Además, la comparación con valores de EFAS corregidos permitirá establecer la capacidad predictiva de EFAS, independientemente de su ajuste a la zona de estudio, mientras que la comparación con el anuario de aforos permitirá establecer la calidad que EFAS para predecir en la práctica las aportaciones a Entrepeñas y Buendía

3.8.1 OBTENCIÓN DE DATOS. GENERACIÓN DEL SCRIPT DE PYTHON

En primer lugar, como ocurría en el análisis anterior, para la obtención de los datos del servidor C3S de Copernicus ha sido necesario escribir un código en Python con el que poder acceder a los datos y generar la descargar. El volumen de datos tiene tanta entidad que emplear un lenguaje de programación como Python se hace imprescindible además de que la tarea se resuelve de la forma más óptima posible.

De igual forma que en el anterior análisis, los archivos NetCDF4 descargados del servidor con extensión .nc contienen los datos de caudal por cada mes de registro. En consecuencia, es necesario leer uno de ellos, examinar las variables que contiene y comprobar el mallado para corroborar que los puntos elegidos para el otro conjunto de datos de EFAS comparten coordenadas con este nuevo conjunto de datos. Aunque lo habitual es que las mallas coincidan, esta comprobación es necesaria porque, al ser productos diferentes de Copernicus, es posible que el proceso de adquisición de los datos genere una malla diferente.

Se comprobó que el mallado era el mismo por lo que se escribió el script para leer todos los archivos y extraer de ellos únicamente los datos para los dos puntos de interés puesto que como ocurría anteriormente, los archivos contienen los datos para todos los puntos de la malla de cálculo que cubre todo el continente europeo.

Con el script de Python se extrajo únicamente la variable de interés, el caudal diario en m³/s de los puntos de interés, y se organizaron los datos de forma que se pudo generar un archivo en formato .csv para realizar posteriormente su análisis empleando una hoja de cálculo.

El resultado de este proceso han sido los datos de caudal de los 25 *ensembles* para los puntos deseados durante el periodo de estudio. Es decir, se extrajeron las 25 trayectorias de las predicciones a 7 meses para cada uno de los meses de los años comprendidos entre 1991 y 2020.

3.8.2 ANÁLISIS Y CÁLCULO DE LOS ÍNDICES DE CALIDAD

En primer lugar ha sido necesario obtener tanto el año y el mes hidrológico como el mes natural de cada una de las predicciones de EFAS. El motivo de este cálculo recae en que para la corrección de estas predicciones es necesario emplear los coeficientes correctores de las regresiones realizadas con las series históricas de EFAS y, ya que estos coeficientes han sido obtenidos para los meses hidrológicos, resultó necesario establecer la relación entre ellos para que su empleo fuera unívoco.

Una vez obtenidos estos índices para cada una de las predicciones de EFAS con sus 25 trayectorias, se realizó su corrección empleando la siguiente regresión lineal (donde las predicciones son las predicciones de entradas a los embalses):

$$\text{Forecast EFAS}_{\text{corregido}} = \text{Forecast EFAS} * m_{\text{según mes}} + n_{\text{según mes}}$$

donde m representa la pendiente y n la ordenada en el origen

Los coeficientes m y n empleados se presentan en la siguiente tabla:



Tabla 12. Coeficientes empleados para la corrección de acuerdo con la regresión lineal obtenida en el análisis de los datos históricos. Fuente: Elaboración propia.

Coeficientes de corrección tras regresión lineal				
$y = m \cdot x + n$				
	Entrepeñas		Buendía	
	m	n	m	n
Octubre	0.260	12.626	0.861	12.383
Noviembre	0.254	15.383	0.283	17.021
Diciembre	0.956	8.820	2.251	21.100
Enero	1.251	9.861	1.644	28.466
Febrero	0.699	20.819	0.739	28.764
Marzo	0.707	26.140	0.856	29.400
Abril	0.596	23.242	0.562	28.715
Mayo	0.630	13.285	0.595	27.460
Junio	0.445	11.924	1.108	18.752
Julio	0.309	12.748	0.651	15.640
Agosto	0.135	13.111	1.180	13.296
Septiembre	0.098	13.631	1.388	10.345

Todo el proceso aquí descrito empleado para el embalse de Entrepeñas ha sido análogo para el embalse de Buendía, teniendo en cuenta los oportunos coeficientes y datos referentes exclusivamente a cada embalse.

Cuando se han obtenido las correcciones de las predicciones para cada una de las 25 trayectorias, el siguiente paso ha sido promediarlas con el fin de poder iniciar el análisis de la calidad de las predicciones mediante el cálculo de índices.

Respecto a los índices de calidad, cuando se examinan las capacidades relativas de un modelo, encontramos dos índices estadísticos adimensionales -el error cuadrático medio (RMSE, por sus siglas en inglés) y el error medio absoluto (MAE, por sus siglas en inglés)- para describir el error medio de rendimiento del modelo. El RMSE resulta

especialmente interesante porque está muy extendido en la literatura climática, hidrológica y medioambiental; sin embargo, es una medida inadecuada y mal interpretada del error medio.

Sin embargo, el uso del RMSE en este caso es inapropiado porque es una función de 3 características de un conjunto de errores, en lugar de una (el error medio). El RMSE varía con la variabilidad dentro de la distribución de las magnitudes de error y con la raíz cuadrada del número de errores ($n^{1/2}$), así como con la magnitud del error medio (MAE). En consecuencia, se demuestra que el MAE es una medida más natural del error medio y (a diferencia del RMSE) no es ambigua (Willmott and Matsuura, 2005). Por lo tanto, las evaluaciones dimensionales y las comparaciones entre los errores medios de rendimiento de los modelos, como en este caso, deben basarse en el MAE:

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |F_i - O_i|$$

El MAE oscila entre 0 y un límite superior definido por la variabilidad del sistema, con una puntuación perfecta de 0, e indica la magnitud media de los errores de previsión. Donde F_i es la media del conjunto y O_i es el caudal observado para el mismo tiempo. N es el tamaño de la muestra, es el número total de predicciones realizadas para el mismo mes objetivo y con el mismo tiempo de espera y tipo de agregación temporal. Esta puntuación no indica la dirección de las desviaciones de las predicciones, que se calcularán mediante el Error Medio (EM) (Mariani et al., 2008).

Resumiendo, el cálculo de la calidad de las predicciones de EFAS mediante el cálculo de índices (MAE) se ha organizado de la siguiente forma:

- Cálculo del MAE comparando las predicciones de EFAS corregidas con los datos del anuario de aforos para cada embalse

$$MAE = \frac{|x - y|}{\bar{y}} \quad \text{donde,}$$

$x = \text{EFAS}_{\text{predicciones}} \text{ corregido}$, $y = \text{Dato Anuario de Aforos e}$

$\bar{y} = \text{Promedio de los valores del anuario de aforos para cada mes}$

- Cálculo del MAE comparando las predicciones de EFAS corregidas con la serie histórica de EFAS corregida

$$MAE = \frac{|x - y|}{\bar{y}} \quad \text{donde,}$$

x = EFAS_{predicciones} corregido, y =EFAS_{histórico} corregido e

\bar{y} =Promedio de los valores de la serie histórica de EFAS para cada mes

Tabla 13. Valores promedio de los datos históricos corregidos de EFAS empleados para la obtención del Error Medio Absoluto como índice de calidad de las previsiones de EFAS. Fuente: Elaboración propia

Valores promedio EFAS_histórico corregido [hm ³ /mes]			
	Mes natural	Buendía	Entrepeñas
Octubre	10	13.975	18.944
Noviembre	11	17.943	24.247
Diciembre	12	31.314	37.653
Enero	1	46.264	52.928
Febrero	2	38.168	42.604
Marzo	3	42.614	50.938
Abril	4	39.118	51.154
Mayo	5	32.225	43.349
Junio	6	21.414	28.911
Julio	7	16.168	18.439
Agosto	8	13.939	14.397
Septiembre	9	11.221	14.893

A continuación, para presentar los resultados finales, ha sido necesario promediar los MAE de las 1940 predicciones que componen el registro del periodo estudiado. Este



promedio se ha hecho en base al mes de inicio de las predicciones de EFAS y al mes de predicción para los promedios de las predicciones de EFAS corregidos.

3.9 CÁLCULO DE LA REGLA DE OPERACIÓN

Una vez que tenemos todos los datos corregidos y conocemos la calidad de las predicciones de aportaciones procedentes de EFAS, es el momento de plantear el modelo de gestión de los embalses de Entrepeñas – Buendía – Bolarque, que permitirá convertir las predicciones de aportaciones en predicciones de volúmenes y sueltas.

El embalse de Bolarque se encuentra inmediatamente aguas abajo de los embalses de Entrepeñas y Buendía y, dada su escasa cuenca vertiente, sus aportaciones no juegan un papel determinante en la operación del sistema. A efectos de determinar la regla de operación, se ha considerado que Bolarque simplemente sirve como punto de toma para los volúmenes que se envían hacia el Acueducto Tajo-Segura (ATS); no se consideran sus aportaciones para la actual regla de explotación del Trasvase. En el presente trabajo, el embalse de Bolarque también será empleado para el cálculo de los volúmenes que se derivan hacía el cauce del Tajo, lo que nos permitirá conocer el balance completo del sistema planteado.

Señalar que, a efectos de la regla de operación, además de despreciar las aportaciones a Bolarque se han considerado los tres embalses como uno solo. Esto es así porque están en paralelo (Entrepeñas y Buendía), muy cerca, y hay una conducción que une Entrepeñas con Buendía. Además, la capacidad de Bolarque es muy pequeña en comparación, por lo que considerar que son uno sólo es suficiente para el objeto del estudio.

En resumen, en el sistema se modelarán los tres embalses como si fueran un único embalse con:

- una única aportación, que se corresponde con la suma de las entradas a Entrepeñas y a Buendía
- una capacidad, igual a la suma de las capacidades individuales de los tres embalses (Por simplicidad en los cálculos, se ha decidido despreciar el embalse de Bolarque en el cálculo del volumen total puesto que su capacidad (30.7 hm^3) es exigua frente a la capacidad de los embalses de Entrepeñas y Buendía en conjunto (2525 hm^3))

- unas salidas, iguales a las del embalse de Bolarque (que incluye los volúmenes trasvasados al ATS, los cuales serán diferenciados de las sueltas al Tajo).

El objetivo final será ajustar una regla de operación lineal con la siguiente ecuación:

$$\text{Salida} = a + b * \text{Volumen} + c * \text{Aportaciones}$$

para cada uno de los meses, donde el volumen se refiere al volumen embalsado conjuntamente en los embalses de Entrepeñas y Buendía y las aportaciones son las predicciones corregidas de EFAS que pronostican las entradas a estos embalses. El proceso de ajuste de los parámetros es similar a lo realizado en la corrección aplicada sobre los datos históricos y las predicciones de EFAS.

En definitiva, la idea principal supone seleccionar:

- las series mensuales de salidas de Bolarque (diferenciando lo soltado al Tajo y lo enviado al Segura a través del ATS)
- la serie correspondiente a la suma de volúmenes de Entrepeñas y Buendía
- la serie de datos correspondiente a la suma de aportaciones de Entrepeñas y Buendía

y a partir de estos conjuntos de datos realizar sendas regresiones para cada mes, una para las sueltas al Tajo y otra para los volúmenes enviados al ATS.

Como se puede observar la metodología es coherente con la corrección que se ha realizado para los caudales, comenzando en primer lugar graficando para cada mes la suma de volúmenes frente a las sueltas al Tajo y al ATS con la finalidad de encontrar patrones de comportamiento. Los datos históricos de los volúmenes trasvasados mensualmente a través del ATS no están abiertos al público y además, la serie histórica de salidas del embalse de Bolarque publicada en el anuario de aforos del CEDEX incluye tanto las sueltas al Tajo como las sueltas al ATS sin diferenciarlo. Este hecho se ha corroborado mediante la búsqueda de los registros históricos de una estación de aforo justo aguas abajo del embalse de Bolarque para compararlos con las sueltas históricas del embalse Bolarque, constatando que los volúmenes aguas abajo eran cuantiosamente inferiores a los volúmenes liberados en el embalse de Bolarque.

En consecuencia, esta información resulta insuficiente, puesto que se necesita conocer lo enviado al ATS y lo soltado hacía el río Tajo, no teniendo acceso a una fuente de datos que permita conocer de forma directa el caudal mensual circulante por el ATS. Ha sido necesario por tanto estimar el caudal trasvasado de forma indirecta. En este sentido se sabe que el ATS tiene la toma en Bolarque y, en su camino al Segura, descarga en el embalse de Alarcón, en la cuenca del río Júcar. Por lo tanto, siguiendo la misma estrategia que antes se ha procedido a la búsqueda de los registros históricos de una estación de aforo justo aguas arriba del embalse de Alarcón, ya que conocidos estos y conocida la serie histórica de sueltas del embalse de Alarcón, se puede obtener el volumen que circular por el ATS mediante una diferencia. La estación de aforos elegida para realizar este cálculo ha sido la estación de aforos “El picazo”.

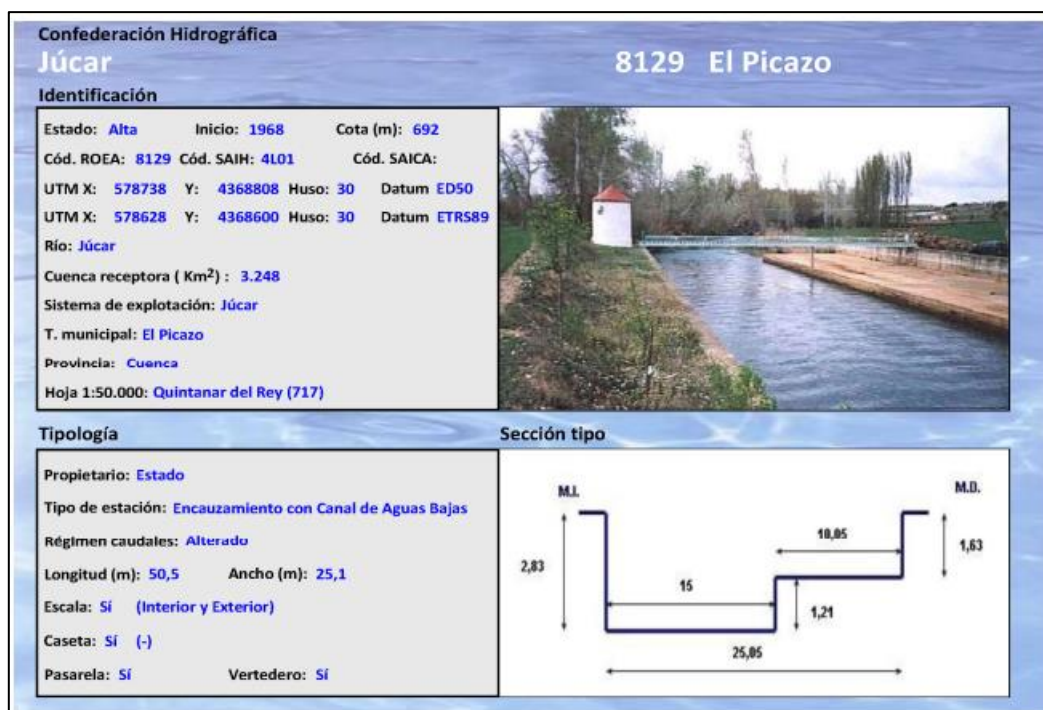


Figura 15. Ficha técnica de la estación foronómica número 8129 de la red ROEA. Fuente: Confederación Hidrográfica del Júcar.

El siguiente paso es llevar a cabo las regresiones lineales múltiples que predecirán las sueltas al ATS y para las sueltas al Tajo, componiendo la regla de operación (Lund, 1996):

$$Sue\lts_{ATS} = a + b * Volumen + c * Entradas$$

$$Sue\lts_{Tajo} = a + b * Volumen + c * Entradas$$



Donde el volumen se refiere a la serie histórica suma de volúmenes embalsados en Entrepeñas y Buendía y las entradas se refieren a las predicciones estacionales del pasado corregidas de EFAS provenientes del análisis anterior. Se empleará cada predicción por separado y se obtendrán 25 trayectorias de sueltas (al Tajo y al ATS) donde además se precisa realizar el balance mes a mes para cada trayectoria por separado. Es decir, con lo soltado al Tajo y lo enviado al ATS se debe recalcular el volumen embalsado mediante la ecuación de balance para poder definir la siguiente predicción correctamente.

En resumen, se el proceso de cálculo se constituye de las siguientes etapas:

1. Obtención de las sueltas al Tajo y las sueltas al ATS en función del volumen embalsado inicialmente y la aportación prevista a los embalses por las predicciones del pasado de EFAS mediante la regresión planteada
2. Cálculo del volumen final aplicando la ecuación de balance hídrico entre las sueltas anteriores, la aportación prevista y el volumen inicial
3. Repetición del cálculo anterior para cada uno de los 7 meses de predicción usando el volumen final como inicial del mes siguiente

Finalmente se tendrán 25 trayectorias de caudales soltados al Tajo, 25 trayectorias de caudales enviados por el ATS y 25 trayectorias de predicción del volumen embalsado en Entrepeñas y Buendía para 7 meses.

Conviene enfatizar que para ajustar el modelo de gestión no se utilizan las predicciones del pasado, ya que intervienen sólo los datos históricos de aportaciones, y ese modelo después se emplea para, con las predicciones estacionales del pasado, predecir volúmenes embalsados, sueltas al Tajo y sueltas al ATS. Sucede lo mismo con la corrección y las predicciones: la corrección no usa las predicciones, pero se emplea para después corregir dichas correcciones.

Para evaluar la calidad de las predicciones, al igual que se procedió anteriormente con las predicciones de caudal de EFAS, se realizará el cálculo del MAE comparando el valor previsto con el histórico. En concreto se emplearán los datos históricos, obtenidos de las fuentes previamente indicadas, referentes a las sueltas al Tajo y a las sueltas al ATS, como valor de comparación con las predicciones obtenidas mediante la regresión; y se obtendrá su error medio absoluto. Posteriormente se llevará a cabo el cálculo de los



promedios del MAE según el mes de predicción y el mes de inicio de la predicción y, se representarán gráficamente las trayectorias obtenidas.

Como se puede comprobar, la metodología expuesta en este apartado para la evaluación de la calidad de las predicciones es coherente con la metodología expuesta para el anterior análisis de la calidad de las predicciones de EFAS. La forma de presentación de los resultados es también análoga mediante la misma tipología de gráficas, pues su sencillez y versatilidad permitirán realizar una excelente interpretación de los resultados.



4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Este apartado está dedicado a la ilustración y discusión detallada de los resultados obtenidos mediante la aplicación rigurosa de la metodología descrita en el apartado 2. El orden de presentación de los resultados sigue el del apartado 3, para lograr una mayor legibilidad y claridad. Los resultados se muestran con la ayuda de tablas, figuras y gráficos para poder hacer una lectura crítica de los mismos.

Tras la obtención y preparación de los datos, la primera etapa, se ha optado por llevar a cabo el procedimiento con Microsoft Excel, dada la relativa sencillez de las operaciones realizadas una vez que la enorme cantidad de datos de partida ha sido descargada, tratada y preparada para su posterior análisis mediante códigos de programación en Python. Se ha seleccionado una parte del conjunto de datos, desde el 01/10/1991 hasta el 01/09/2019, para los embalses de Entrepeñas y Buendía y el resto de datos, puesto que este eje temporal es la intersección de los ejes temporales de todos los conjuntos de datos disponibles.



4.1 ANÁLISIS DE LOS DATOS HISTÓRICOS

Las series de datos empleadas se han representado en varios gráficos con el fin de mostrar visualmente la similitud y disparidad de los datos obtenidos de EFAS con los datos históricos obtenidos del anuario de aforos para cada uno de los embalses. Cabe señalar que también se ha aprovechado este gráfico para implementar la serie de datos históricos de EFAS tras la corrección llevada a cabo en el análisis que se describió en el apartado de métodos. Es decir, el resultado del análisis se muestra conjuntamente con las series históricas empleadas de partida.

En primera instancia, se planteó la posibilidad de intentar calcular una regresión directa entre la serie completa del anuario de aforos y la serie completa obtenida de EFAS. Tras varios intentos, se descartó finalmente por la imposibilidad de encontrar una función que ajustara óptimamente los dos conjuntos de datos. Se presenta a continuación, únicamente la representación gráfica de los dos conjuntos de datos correspondientes al embalse de Buendía, así como las ecuaciones y coeficientes R² de ajuste, que son en todos los casos muy bajos. Con los conjuntos de datos de Entrepeñas ocurre algo muy similar por lo que la gráfica es casi idéntica.

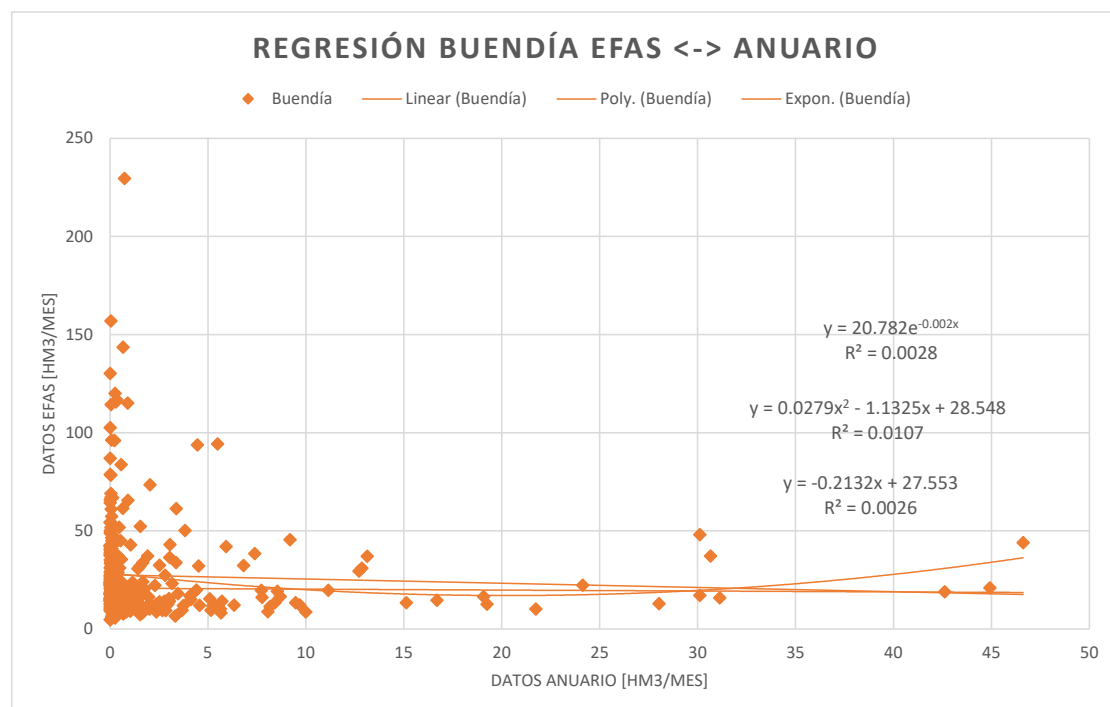


Figura 16. Gráfico de dispersión de las aportaciones al embalse de Buendía que predice EFAS frente a la serie histórica del anuario de aforos. Ajuste lineal, polinómico y exponencial con sus correspondientes ecuaciones. Fuente: Elaboración propia.

El siguiente paso ha sido realizar una regresión lineal separando los datos mes a mes. Los resultados de este ajuste han mejorado notablemente si nos referimos al valor de R^2 . Como ejemplo se muestra a continuación una de las gráficas de dispersión para cada embalse empleadas para realizar la regresión lineal:

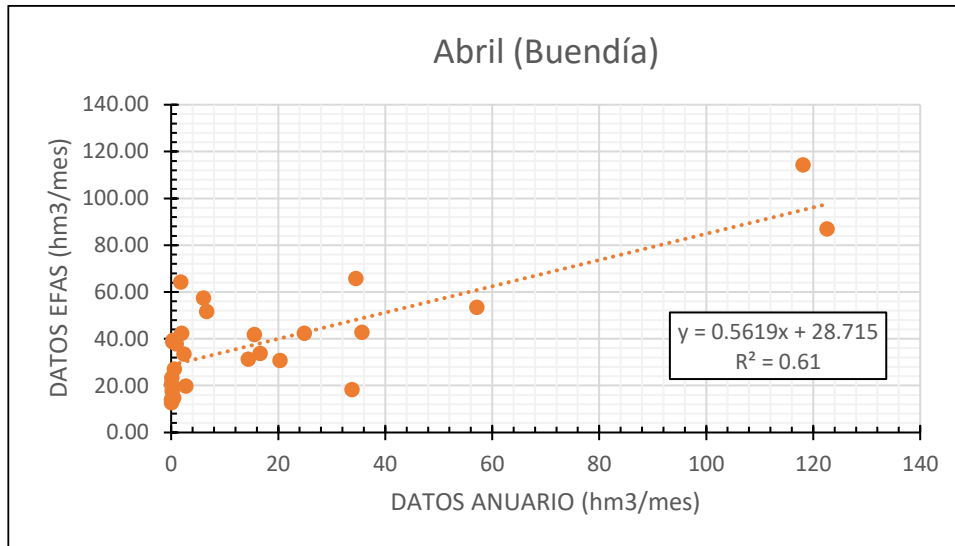


Figura 17. Regresión lineal simple para los datos históricos del mes de abril para el embalse de Buendía. Fuente: Elaboración propia.

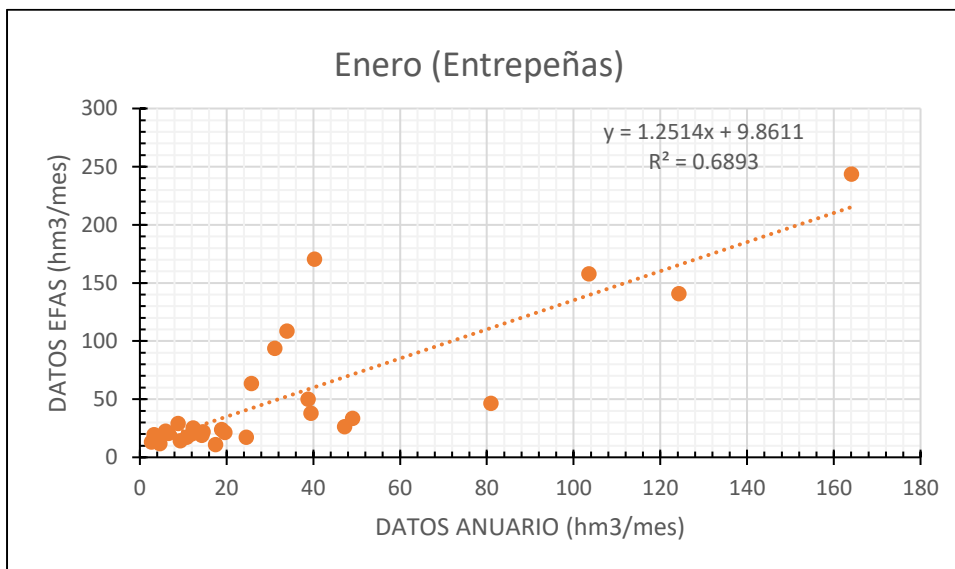


Figura 18. Regresión lineal simple para los datos históricos del mes de enero para el embalse de Entrepeñas. Fuente: Elaboración propia.

Como tabla resumen de resultados se exponen a continuación, para cada embalse, los valores de los coeficientes de la regresión para cada mes. Estos valores representan la



pendiente y la ordenada en el origen de la recta del ajuste y son los coeficientes que se emplearán para la corrección de los datos obtenidos del modelo de EFAS.

Tabla 14. Coeficientes de la regresión lineal entre los datos del anuario de aforos y los datos históricos de EFAS para cada uno de los meses en el embalse de Buendía. Fuente: Elaboración propia.

Coeficientes de corrección tras regresión lineal $y = mx + n$ (Buendía)		
	Pendiente	Ordenada en el origen
Octubre	0.861	12.383
Noviembre	0.283	17.021
Diciembre	2.251	21.100
Enero	1.644	28.466
Febrero	0.739	28.764
Marzo	0.856	29.400
Abril	0.562	28.715
Mayo	0.595	27.460
Junio	1.108	18.752
Julio	0.651	15.640
Agosto	1.180	13.296
Septiembre	1.388	10.345



Tabla 15. Coeficientes de la regresión lineal entre los datos del anuario de aforos y los datos históricos de EFAS para cada uno de los meses en el embalse de Entrepeñas. Fuente: Elaboración propia.

Coeficientes de corrección tras regresión lineal $y = mx + n$ (Entrepeñas)		
	Pendiente	Ordenada en el origen
Octubre	0.260	12.626
Noviembre	0.254	15.383
Diciembre	0.956	8.820
Enero	1.251	9.861
Febrero	0.699	20.819
Marzo	0.707	26.140
Abril	0.596	23.242
Mayo	0.630	13.285
Junio	0.445	11.924
Julio	0.309	12.748
Agosto	0.135	13.111
Septiembre	0.098	13.631

Finalmente, los resultados de este análisis son las series históricas de EFAS corregidas tras el ajuste para cada uno de los embalses. Estas series históricas se han representado junto con las series históricas correspondientes al anuario de aforos y con los datos históricos de EFAS de partida. Se puede observar cómo los datos originales de EFAS para el embalse de Entrepeñas presentan una similitud bastante mayor a los datos históricos del anuario que en el caso del embalse de Buendía, para el que existe una gran disparidad al comparar los datos originales. Tras el ajuste, se aprecia como la serie de datos de EFAS se acopla en mejor medida a los datos de la serie histórica del anuario para

ambos embalses, especialmente en los máximo y mínimos que muestra la serie de datos. El resultado de este análisis, es decir, la serie histórica de entradas arrojada por EFAS tras haber sido corregida empleando los datos del anuario de aforos, será empleada para llevar a cabo el cálculo de los índices de calidad de las predicciones estacionales del pasado aportados también por EFAS que van a ser analizados en el siguiente apartado.

4.1.1 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Para el caso del embalse de Entrepeñas, se puede ver como los datos históricos de EFAS se ajustaban bastante bien a los datos históricos del anuario de aforos antes de haberlos corregido. Sí es cierto que se puede apreciar que no representaban fielmente los picos de caudal que encontramos en los datos del anuario, sobrepasando los valores en algunos de ellos o quedándose por debajo de ellos en otros (**Figura 19**). Sin embargo, sí que se puede ver como el modelo de EFAS reacciona a los picos de caudal, que quizás sea lo más difícil de predecir con exactitud.

Ahora bien, posteriormente a la corrección, es fácil observar como el ajuste propuesto, aunque técnicamente simple, ha surtido un efecto positivo en la precisión de los datos de EFAS respecto a los del anuario. Vemos como los picos están mejor reproducidos y las diferencias con los valores reales se han hecho cuantiosamente más pequeñas. Es decir, con una corrección lineal del estilo a la empleada, conseguimos achatar los picos y disminuir las desviaciones típicas de los datos del modelo, logrando un efecto positivo en nuestro caso.

Para el caso de los datos históricos del embalse de Buendía, se puede observar cómo los datos obtenidos de EFAS no representan correctamente la realidad representada por los datos del anuario de aforos. Principalmente se observan valores muy bajos, próximos a ser nulos, sobre todo al inicio de la serie histórica de EFAS (**Figura 20**). Estos valores difieren bastante de los valores aportados por el anuario, donde las entradas están lejos de ser nulas. Sin embargo, si podemos ver como en los últimos años de la serie histórica, los valores de EFAS se ajustan con mayor precisión a los datos del anuario, especialmente en los picos de caudal. Resulta llamativo que la tendencia de los datos de EFAS en estos últimos años de registro sea también próxima a dar valores nulos, pero a la vez es capaz de representar con bastante precisión los picos de caudal que vemos en los datos del anuario.



No obstante, tras la corrección aplicada mediante el ajuste lineal, los datos corregidos presentan un muy buen comportamiento, reproduciendo con bastante rigor tanto los picos de caudal como los valores de la tendencia general. Si es cierto que los mayores picos de caudal registrados en el anuario no son bien reproducidos por los datos corregidos de EFAS (**Figura 20**). Ahora bien, debemos tener en cuenta que la corrección aplicada achata los picos y hace que las desviaciones típicas disminuyan respecto de la que presentan los registros históricos. Es decir, las desviaciones típicas de los datos corregidos son bastante menores que la que presentan los datos históricos.

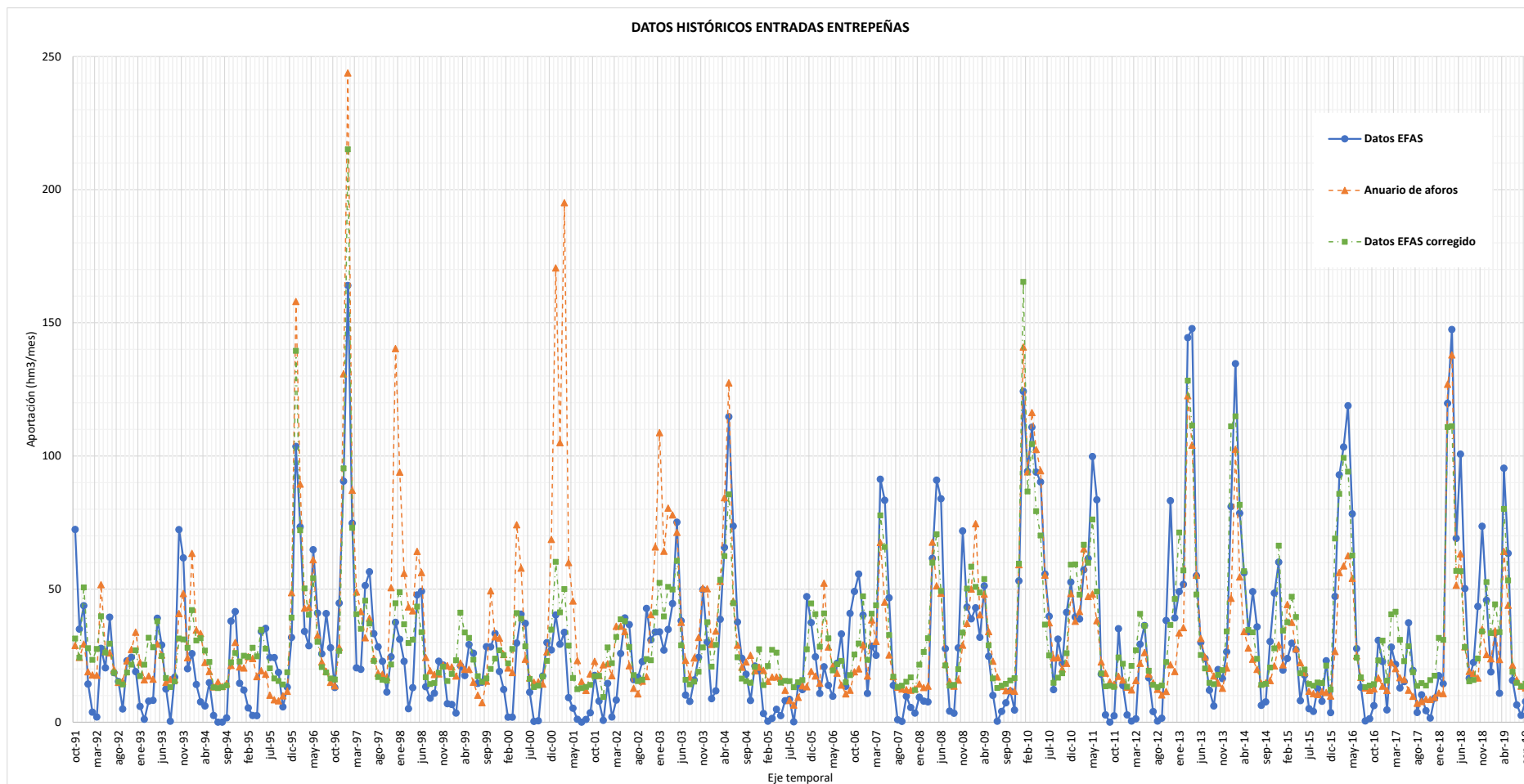


Figura 19. Datos históricos de las aportaciones al embalse de Entrepeñas vs predicciones del pasado de EFAS. Fuente: Elaboración propia

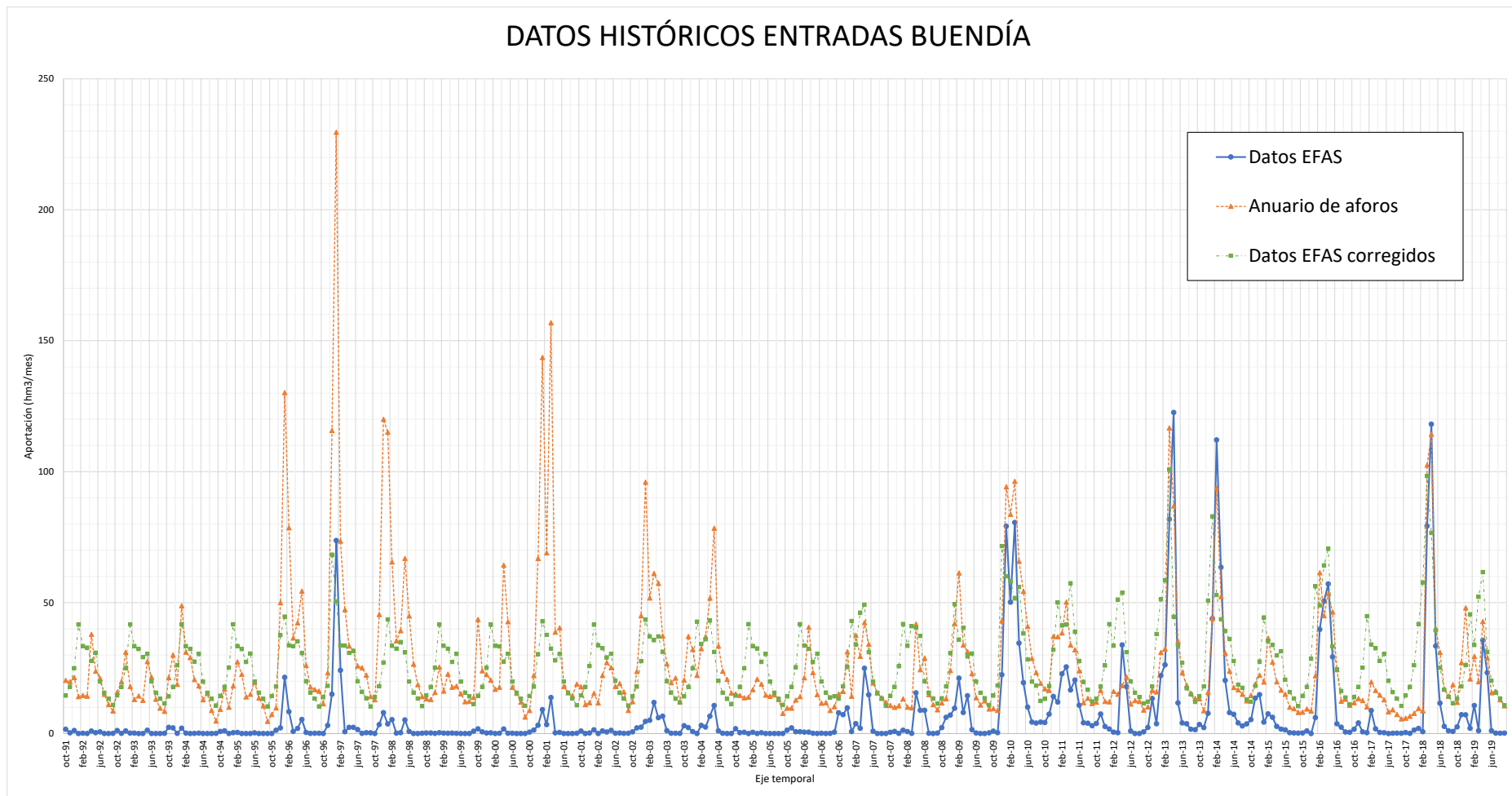


Figura 20. Datos históricos de las entradas al embalse de Buendía. Fuente: Elaboración propia



4.2 ANÁLISIS DE LAS PREDICCIONES ESTACIONALES DEL PASADO DE EFAS

En este apartado se mostrarán los resultados obtenidos de los cálculos del índice de calidad (MAE) para las diferentes comparaciones que se expusieron en el apartado de métodos. Es decir, se mostrarán dos gráficas para Entrepeñas y dos para Buendía donde se comparará las predicciones de EFAS frente a los datos históricos de EFAS y frente a los datos del anuario de aforos. Como se ha comentado anteriormente, estos resultados permitirán evaluar la capacidad predictiva de las aportaciones de EFAS tanto a nivel teórico (comparando con los datos corregidos, lo que ignora el ajuste de EFAS al área de estudio), tanto a nivel práctico (comparando con el anuario de aforos, lo que supone evaluar cómo de adecuadas serían si se emplearan en la realidad. El método elegido para la representación de los resultados ha sido tomado de (Arnal et al., 2019) ya que supone una excelente forma de aunar en una sola gráfica la ingente cantidad de datos manejados en este análisis. Además, la facilidad de su interpretación es notable frente a otras alternativas.

Como era de esperar, el ajuste del modelo supone un impacto negativo en la calidad de los resultados, lo que indica que el ajuste al caso de estudio, aún después de la corrección, es mejorable. Sin embargo, aunque se conoce la existencia de otros métodos para realizar la corrección como se ha comentado anteriormente (mediante inteligencia artificial, por ejemplo), no se ha explorado esa vía puesto que estos métodos alternativos son avanzados e implican una dificultad técnica notable. Además, ningún método alternativo podría garantizar a priori un mejor ajuste de EFAS a la zona de estudio. Alternativamente a la mejora de la corrección, otra opción es mejorar la calibración de EFAS para la zona de estudio, aunque ello queda totalmente fuera del estudio. Los valores del MAE se han programado para poder clasificarlos por año y por mes de predicción con el objetivo de poder conocer el de un año o un mes determinados y así poder establecer si la capacidad de predicción de EFAS depende del ciclo hidrológico intra anual, o si depende de las condiciones hidrológicas del año en cuestión. Finalmente, para su representación se ha hecho el promedio por meses y se ha graficado 1 línea por mes que va desde el mes inicial al mes final, un total de 7 meses.



Es decir, por este motivo encontramos que en el eje X hay 18 meses, ya que como se puede observar en ellos, el primer dato empieza en enero (mes 1) y acaba un junio (mes 18), que es el mes final para las predicciones realizadas desde diciembre (12+6).

Las discusiones y hallazgos sobre estos gráficos se mostrarán en el siguiente apartado.



4.2.1 COMPARACIÓN DE LAS PREDICCIONES DE EFAS CORREGIDAS CON LOS DATOS DEL ANUARIO DE AFOROS PARA EL EMBALSE DE BUENDÍA

Para el caso de las entradas al embalse de Buendía, cuando comparamos los datos de las predicciones estacionales del EFAS con los datos históricos y calculamos su error absoluto medio en tanto por ciento obtenemos la siguiente gráfica:

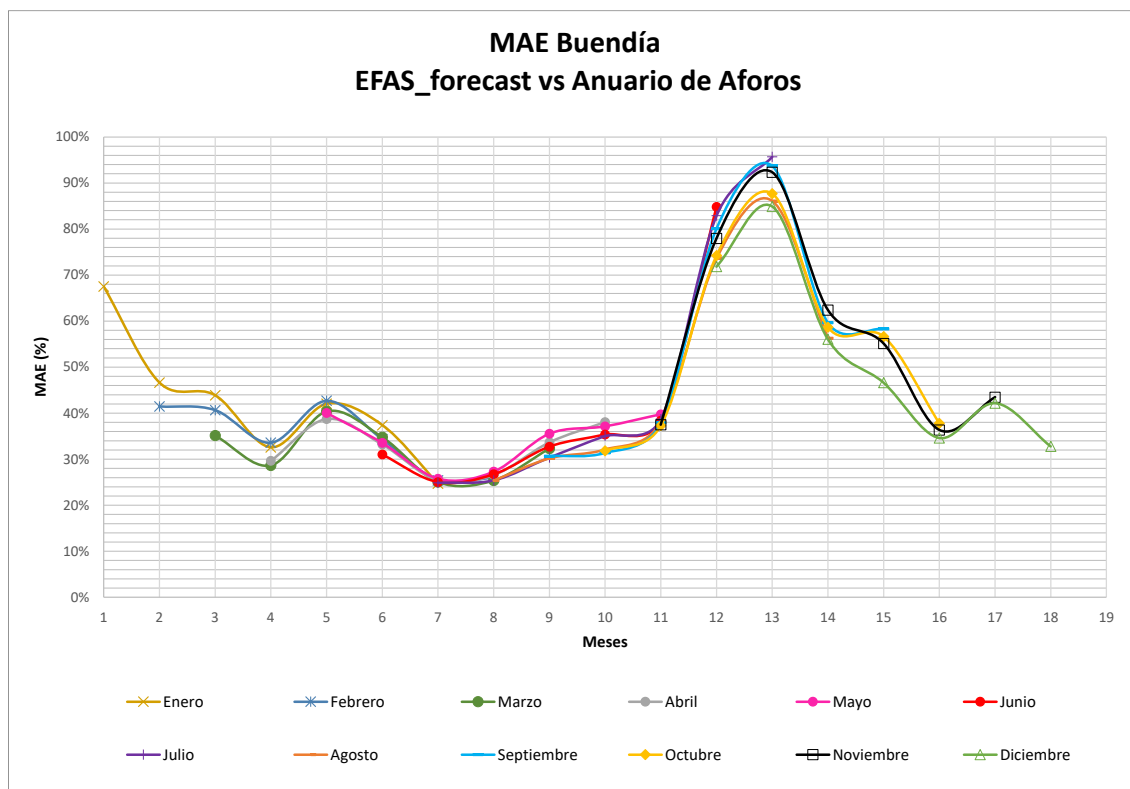


Figura 21. MAE para el embalse de Buendía cuando comparamos las predicciones de EFAS corregidas con los datos del anuario de aforos. Fuente: Elaboración propia.



4.2.2 COMPARACIÓN DE LAS PREDICCIONES DE EFAS CORREGIDAS CON LOS DATOS DEL ANUARIO DE AFOROS PARA EL EMBALSE DE ENTREPEÑAS

Para el caso de las entradas al embalse de Entrepeñas, cuando comparamos los datos de las predicciones estacionales del EFAS con los datos históricos y calculamos su error absoluto medio en tanto por ciento obtenemos la siguiente gráfica:

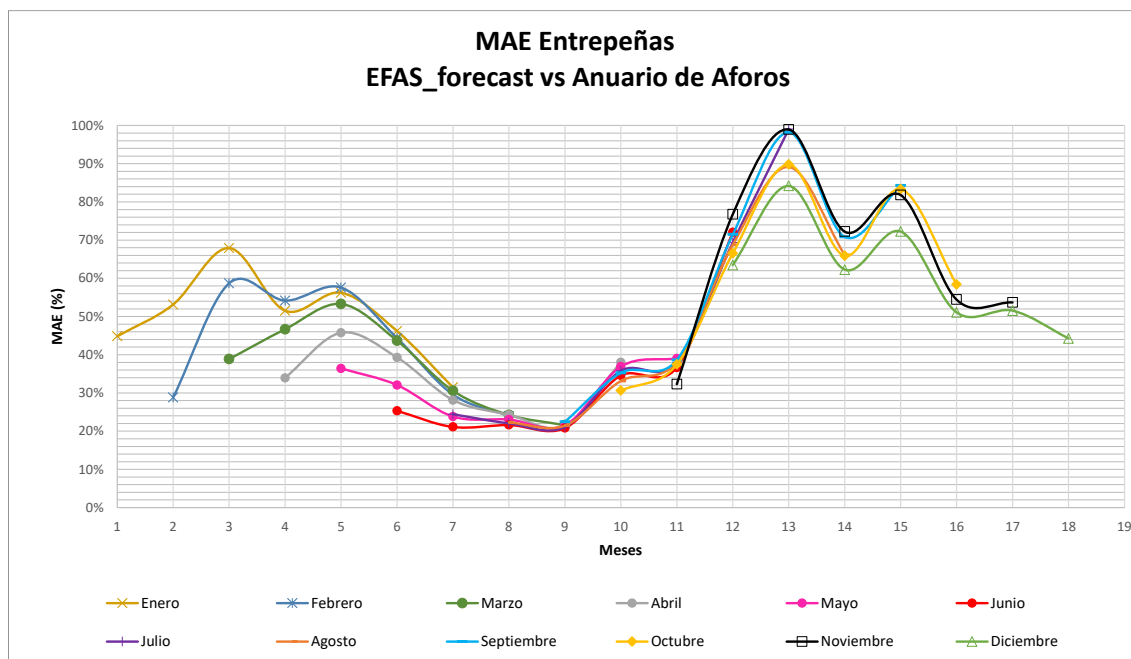


Figura 22. MAE para el embalse de Entrepeñas cuando comparamos las predicciones de EFAS corregidas con los datos del anuario de aforos. Fuente: Elaboración propia.

4.2.3 COMPARACIÓN DE LAS PREDICCIONES DE EFAS CORREGIDAS CON LA SERIE HISTÓRICA DE EFAS CORREGIDA PARA EL EMBALSE DE BUENDÍA

Para el caso de las entradas al embalse de Entrepeñas, cuando comparamos los datos de las predicciones estacionales del EFAS con las series históricas de EFAS tras su corrección y, calculamos su error absoluto medio en tanto por ciento, obtenemos la siguiente gráfica:

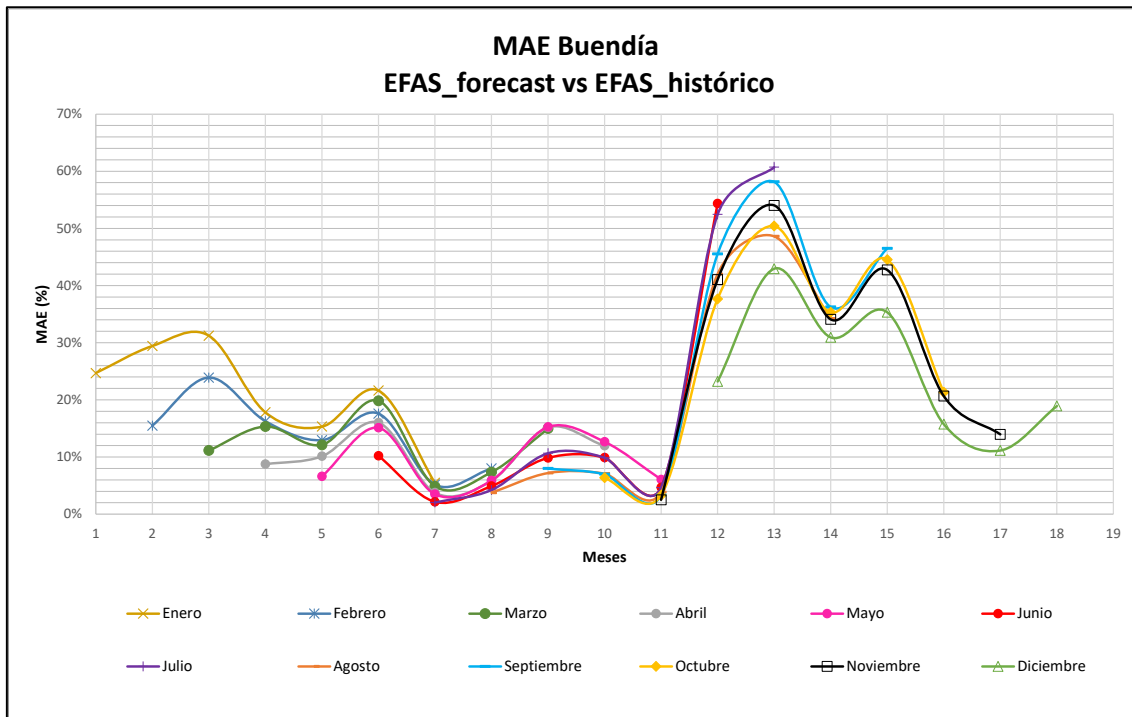


Figura 23. MAE para el embalse de Buendía cuando comparamos modelo contra modelo tras sus respectivas correcciones. Fuente: Elaboración propia



4.2.4 COMPARACIÓN DE LAS PREDICCIONES DE EFAS CORREGIDAS CON LA SERIE HISTÓRICA DE EFAS CORREGIDA PARA EL EMBALSE DE ENTREPEÑAS

Para el caso de las entradas al embalse de Entrepeñas, cuando comparamos los datos de las predicciones estacionales del EFAS con las series históricas de EFAS tras su corrección y, calculamos su error absoluto medio en tanto por ciento, obtenemos la siguiente gráfica:

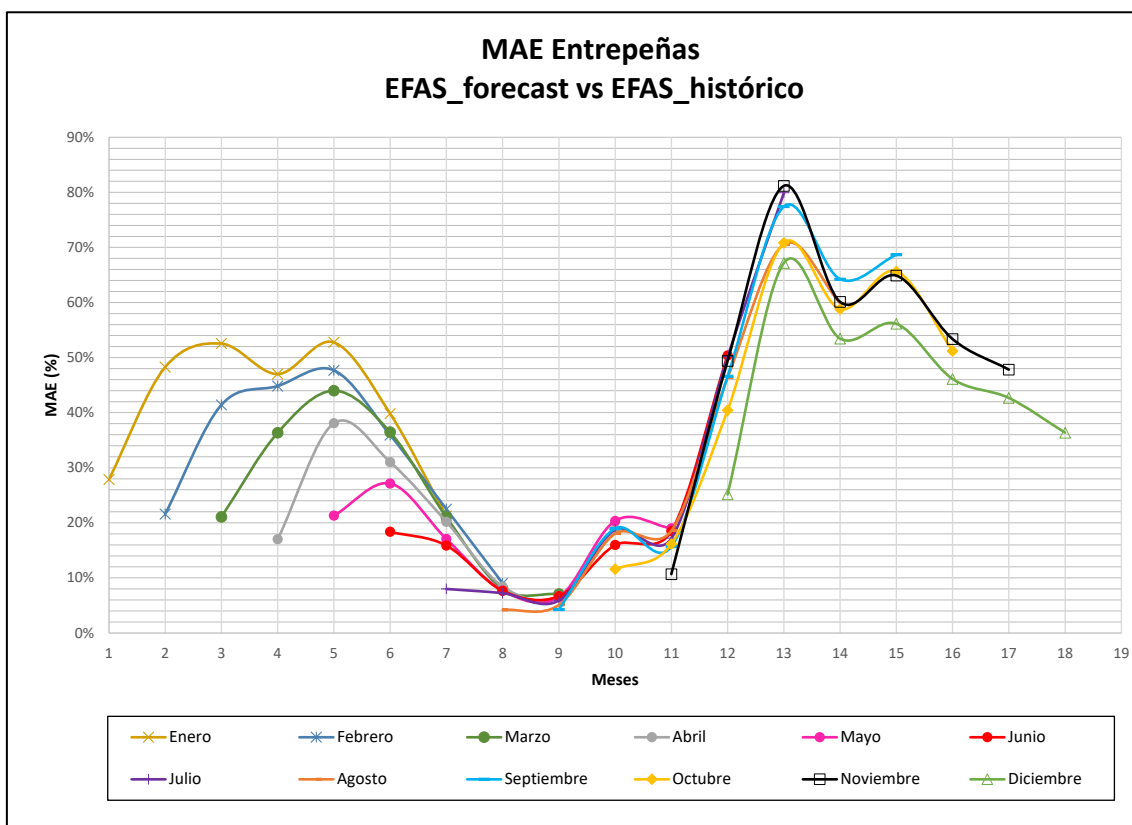


Figura 24. MAE para el embalse de Entrepeñas cuando comparamos modelo contra modelo tras sus respectivas correcciones. Fuente: Elaboración propia

4.2.5 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En los gráficos presentados podemos evaluar la calidad del ajuste del modelo y por otro lado la dificultad de predecir el fenómeno hidrológico. Al analizar el error medio absoluto respecto a los datos de EFAS históricos corregido frente a los datos del anuario de aforos podemos evaluar el error del ajuste modelo empleado y además el error de la propia predictibilidad. Sin embargo, si se compara modelo contra modelo, provocamos que no se tenga el ajuste y se puede visualizar el error proveniente de la dificultad de

predecir el fenómeno hidrológico. Esto nos permite evaluar de dónde viene el error en la predicción con mayor exactitud: de un ajuste mejorable del modelo o de la corrección, o simplemente de la dificultad inherente a la predicción hidrológica.

Para el embalse de Buendía, cuando comparamos modelo frente a datos históricos, se puede ver como los valores de los errores convergen hacia un mismo valor independientemente del mes de predicción o del horizonte de predicción (**Figura 21**). Es decir, el error no aumenta al aumentar el horizonte de predicción para las diferentes trayectorias. Esto quiere decir que el error está influenciado principalmente por los valores empleados de EFAS y no por el ajuste aquí calculado. Esto se evalúa comparando la gráfica contra datos históricos con la gráfica contra EFAS corregido. De hecho, que pase eso puede deberse a la corrección, y es un indicio de que el ajuste de EFAS es mejorable (bien por mejor corrección o por recalibración del modelo).

Observamos un pico muy llamativo en los meses 12 y 13 donde el error aumenta considerablemente y, posteriormente, disminuye hasta situarse en valores que podríamos considerar aceptables (**Figura 21**). Este pico afecta a todas las predicciones, independientemente del mes de inicio de la predicción y no representa una tendencia ascendente pues posteriormente disminuye bruscamente al igual que ascendió. Por este motivo, es probable que este error tan alto puntual se deba principalmente al propio ajuste del modelo de EFAS, que puede que no esté bien calibrado en esta zona en concreto para los meses indicados.

Para el caso del embalse de Entrepeñas, al comparar modelo contra datos históricos, vemos como el error inicialmente aumenta al aumentar el horizonte de predicción, para las diferentes trayectorias, pero hasta 3 o 4 meses vista, donde entonces empieza a descender (**Figura 22**). Todas las trayectorias disminuyen su error convergiendo en un mismo valor en el mes 9, previsiblemente porque al contrario de lo que ocurría en el anterior caso, los valores de EFAS representan idóneamente lo que ocurre en ese mes en esa zona del modelo.

Lo normal sería que las trayectorias no convergieran en un mismo valor, ya que el mes de inicio es diferente para cada una de ellas y por tanto, la incertidumbre en los diferentes horizontes de predicción es también diferente. Esto nos hace pensar que el ajuste lineal propuesto para la corrección de los datos es adecuado y su funcionamiento



esta principalmente influenciado por los propios datos y el ajuste del propio modelo de EFAS (Crochemore et al., 2016): También pudiera ser que esas convergencias puedan deberse a características inherentes de la hidrología de la zona.

Para el caso del embalse de Buendía, cuando comparamos modelo contra modelo, podemos asignar el error a la dificultad que existe en la predicción del fenómeno hidrológico. En este caso podemos ver como para el mes 6, las diferentes trayectorias tienen valores superiores del error según el mes de inicio de la predicción, es decir la predicción iniciada en enero tiene un mayor error que la predicción iniciada en mayo (**Figura 23**). Este se debe a que el horizonte de predicción para la predicción iniciada en enero es de 6 meses mientras que la predicción iniciada en mayo el horizonte es solo un mes. Este hecho ocurre en general para el resto de los meses, aunque se observan claras particularidades como el mínimo que encontramos en el mes 11 seguido del valor máximo del error en los meses 12 y 13. Este pico coincide con el encontrado cuando comparamos modelo contra datos reales, lo que nos hace ver que las diferencias entre los valores aportados por los modelos difieren cuantiosamente entre sí y además también difieren considerablemente con los datos reales.

En consecuencia, podemos afirmar que el modelo de EFAS presenta dificultades para reproducir con fidelidad la realidad hidrológica de la zona de estudio en los meses donde encontramos estos picos de error. Análisis posteriores deberían llevarse a cabo para solventar este error mediante correcciones más potentes en el caso de emplear estos datos para las predicciones de volúmenes trasvasables. Alternativamente se podría recalibrar EFAS para la zona de estudio aprovechando los datos históricos de aportaciones al embalse disponibles, aunque ello queda fuera de nuestro control. Otra alternativa sería el uso de un modelo particular para el caso de estudio, forzado con las mismas predicciones estacionales que EFAS.

Cuando comparamos modelo contra modelo para el caso del volumen de Entrepeñas, podemos apreciar unas características similares a lo expuesto para el caso de Buendía. Inicialmente el error de las predicciones aumenta con el horizonte de predicción y es menor en un mismo mes para la trayectoria que se ha iniciado más próximamente (**Figura 24**). Sin embargo, el valor del error hace algo parecido y también converge hacia un mismo valor para obtener un pico mínimo de error. Este es seguido por otro pico de error que representa el máximo, donde todas las trayectorias convergen independientemente



del mes de inicio de la predicción. Una vez más, aquí podemos que el error es grande para estos meses (12 y 13) lo que hace patente la dificultad de predecir el fenómeno hidrológico en estos meses para esta zona.

- **Análisis estadístico para argumentar los picos encontrados en los anteriores gráficos:**

Finalmente, se ha considerado oportuno llevar a cabo unos cálculos estadísticos básicos para tratar de dar explicación a los hallazgos expuestos arriba. En las siguientes tablas podemos comprobar como las correcciones aplicadas a los datos históricos de EFAS han achatado los picos de la serie histórica, pues las desviaciones típicas calculadas son cuantiosamente menores que para las series históricas del anuario. Además, se puede comprobar como la corrección aplicando una regresión lineal simple consigue, en la media, que los valores mensuales coincidan. Esta corrección funciona óptimamente para corregir errores groseros en series históricas provenientes de modelos con cierta incertidumbre espacial como lo es el modelo hidrológico de EFAS, de extensión europea.

Tabla 16. Valores promedio de entradas para los embalses estudiados. Datos históricos de EFAS y datos históricos del anuario de aforos. Fuente: Elaboración propia.

VALORES PROMEDIO [hm3]				
	Entradas Entrepeñas+Buendía EFAS_histórico corregido	Entradas Buendía Anuario	Entradas Entrepeñas Anuario	Entradas totales Anuario
Octubre	32.919	13.975	18.943	32.918
Noviembre	42.190	17.943	24.246	42.189
Diciembre	68.967	31.314	37.654	68.968
Enero	99.193	46.264	52.929	99.193
Febrero	80.773	38.168	42.604	80.771
Marzo	93.552	42.614	50.939	93.554
Abril	90.272	39.118	51.154	90.271
Mayo	75.574	32.225	43.350	75.575
Junio	50.326	21.414	28.911	50.325

Julio	34.606	16.168	18.439	34.607
Agosto	28.336	13.939	14.396	28.336
Septiembre	26.114	11.221	14.893	26.114

Tabla 17. Desviaciones típicas en los valores de las entradas para los embalses estudiados. Datos históricos de EFAS y datos históricos del anuario de aforos. Fuente: Elaboración propia.

DESVIACIÓN TÍPICA [hm³]				
	Entradas anuario Buendía	Entradas EFAS_histórico_corregido Buendía	Entradas anuario Entrepeñas	Entradas EFAS_histórico_corregido Entrepeñas
Octubre	7.020	1.539	9.284	4.755
Noviembre	8.991	1.050	11.915	5.328
Diciembre	28.626	13.057	32.082	18.783
Enero	52.769	33.644	58.945	48.056
Febrero	25.365	16.972	30.188	23.455
Marzo	35.110	23.158	42.535	27.656
Abril	23.215	17.805	30.712	24.780
Mayo	16.325	5.685	25.297	19.275
Junio	8.682	4.003	14.018	10.862
Julio	4.898	0.963	6.722	3.981
Agosto	4.174	1.339	4.474	1.363
Septiembre	4.076	1.558	4.265	1.054

Es por ello que se justifica que estas alteraciones visibles en la calidad de las predicciones propuestas provengan de las predicciones estacionales del pasado tomadas de EFAS. Es probable que el modelo no se haya calibrado bien en la zona de estudio



empleada en el presente trabajo y para el propósito propuesto se necesite emplear datos de un modelo más preciso en el área de estudio.

A las incertidumbres de las propias predicciones EFAS se suman las incertidumbres existentes en las dos regresiones llevadas a cabo, también las existentes en la corrección aplicada a los propios datos de EFAS y por último la incertidumbre que existe en la predicción hidrológico por la dificultad de reproducción de los procesos hidrológicos.

4.3 CÁLCULO DE LA REGLA DE OPERACIÓN PARA EL MODELO DE GESTIÓN

En el presente apartado se presentarán los resultados referentes a los procedimientos de cálculo expuestos en la sección de metodología.

4.3.1 ESTUDIO DE LAS SERIES HISTÓRICAS DE SUELTAS Y VOLÚMENES TRASVASADOS

En el siguiente gráfico podemos ver representados los datos referentes a las series históricas de los volúmenes embalsados en Entrepeñas y Buendía con los volúmenes enviados al ATS. Los valores representados corresponden al dato recogido el primer día de cada mes.

Se pretende poder visualizar patrones de comportamiento o reconocer anomalías que permitan analizar los resultados posteriormente con mayor objetividad y criterio. En principio parece reconocerse una buena relación de los volúmenes enviados al ATS de acuerdo con la época del año hidrológico y los volúmenes embalsados.

Adicionalmente se han graficado también los valores corregidos de la serie histórica de EFAS junto con las salidas hacia el ATS y hacia el Tajo ya que lo es posible visualizar en esta representación será de importante relevancia a la hora de discutir los resultados sobre la calidad de las predicciones.

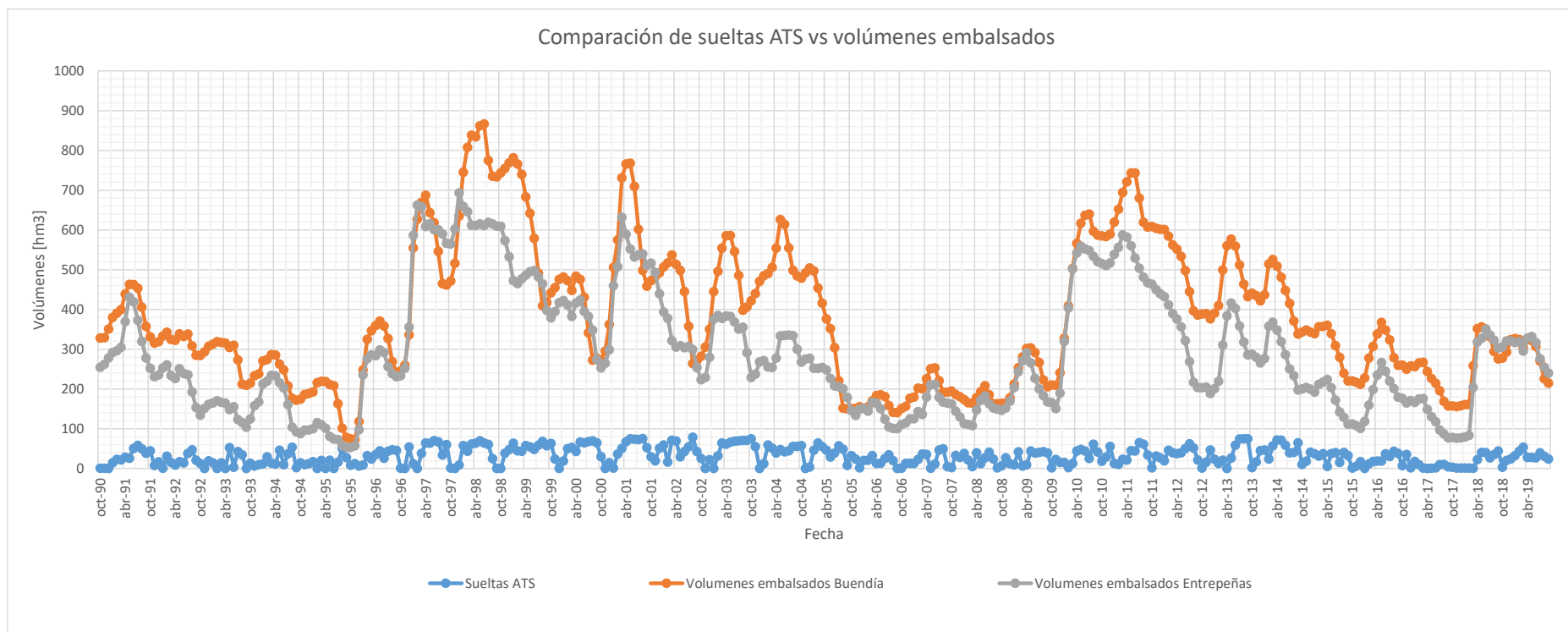


Figura 25. Gráfico temporal de los datos históricos referentes a las sueltas hacia el ATS y los volúmenes embalsados en Entrepeñas y Buendía. Fuente: Elaboración propia

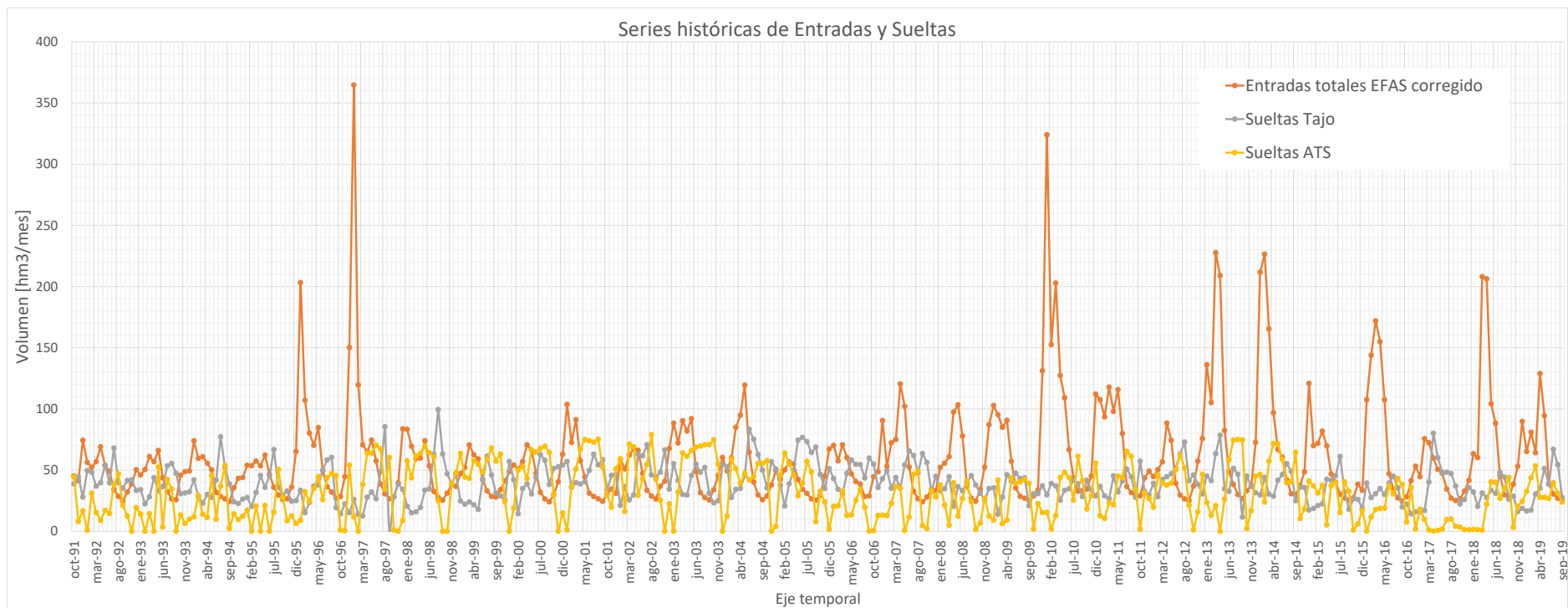


Figura 26. Gráfico temporal de los datos históricos referentes a las sueltas hacia el ATS y la serie temporal de entradas corregidas aportada por EFAS, a los embalses de Entrepeñas y Buendía. Fuente: Elaboración propia

4.3.2 REGRESIÓN LINEAL MÚLTIPLE PARA LAS SUELTAS AL ATS Y AL TAJO

A continuación se muestran los coeficientes obtenidos para las regresiones lineales múltiples presentadas en el apartado de metodología. Estas regresiones conforman las reglas de operación para obtener los caudales liberados hacia el río Tajo y hacia el ATS. Sin embargo, conviene aclarar que estas reglas de operación son parte del modelo de gestión desarrollado, que aúna todos los elementos presentados:

- Reglas de operación
- Predicciones estacionales de entradas
- Ecuación de balance
- Etc.

Tabla 18. Coeficientes mensuales de la regresión lineal múltiple para las sueltas hacia el ATS.
Fuente: Elaboración propia.

Regresión lineal múltiple			
SueLTas_ATS = a + b*Volumen + c*Entradas			
	b	c	a
Octubre	0.010	0.527	-6.514
Noviembre	0.013	0.345	-5.110
Diciembre	0.023	0.181	-5.165
Enero	0.026	-0.052	9.652
Febrero	0.018	-0.151	25.863
Marzo	0.033	-0.132	20.952
Abril	0.046	-0.107	6.925
Mayo	0.048	-0.213	18.331
Junio	0.053	-0.171	7.913
Julio	0.038	-1.413	69.050
Agosto	0.020	0.023	35.280
Septiembre	0.027	1.789	-28.969



**Tabla 19. Coeficientes mensuales de la regresión lineal múltiple para las sueltas hacia el Tajo.
Fuente: Elaboración propia.**

Regresión lineal múltiple			
Sueltas_Tajo = a + b*Volumen + c*Entradas			
	b	c	a
Octubre	0.009	0.380	19.114
Noviembre	0.010	-0.364	43.540
Diciembre	0.009	-0.156	40.153
Enero	-0.003	-0.016	38.630
Febrero	-0.003	0.062	24.551
Marzo	-0.009	0.072	32.493
Abril	-0.012	0.037	44.382
Mayo	-0.012	-0.100	58.667
Junio	-0.006	-0.208	61.085
Julio	-0.001	-0.859	88.155
Agosto	0.030	-2.685	110.040
Septiembre	0.001	-2.029	88.152

Aunque la regla de operación actual diferencia varios niveles según los volúmenes embalsados, se ha optado por hacer una regresión sin separar los datos por nivel. El motivo de esta decisión recae en que, tras estudiar las regresiones según estos escalones, los coeficientes de correlación eran menores. Principalmente esto se debe a que los datos históricos de los volúmenes trasvasados tienen un problema y es que, aunque el volumen a trasvasar se autorice en un determinado mes según las condiciones existentes en ese determinado momento, ese volumen autorizado a trasvasar se puede enviar al Segura en otro momento diferente. Esto provoca que los registros históricos de volúmenes trasvasados no sean a veces coherentes con el nivel y el volumen que se podría trasvasar

ese mes, al poder corresponder a trasvases autorizados previamente y que quedan en espera.

4.3.2.1 Discusión de resultados

En primer lugar se debe hacer referencia a los resultados obtenidos para las regresiones propuestas que predicen los caudales enviados hacia el Tajo y hacia el ATS. Con la finalidad de obtener una regresión lo más fiable posible, se trató de escalonar las predicciones de acuerdo con los volúmenes embalsados, tal y como establece actualmente la regla de operación que emplea el Ministerio. Es por ello que se trató de establecer una regresión para cada uno de los niveles que establece el ATS en vez de realizar una única regresión sin tener en cuenta los escalones de volúmenes. Sin embargo, los resultados obtenidos no fueron satisfactorios.

Se comenzó realizando una prueba con el mes de octubre, obteniéndose lo siguiente:

- Para el nivel 1 solo existe un dato por lo cual no hay opción de regresión alguna. Se ha comprobado que este hecho prácticamente ocurre en el resto de meses.
- Para el nivel 2 se encuentra que la regresión resulta negativa, algo que carece de todo sentido, en ningún momento en la regla se expone que a mayor volumen embalsado en el Tajo, menor volumen trasvasado.

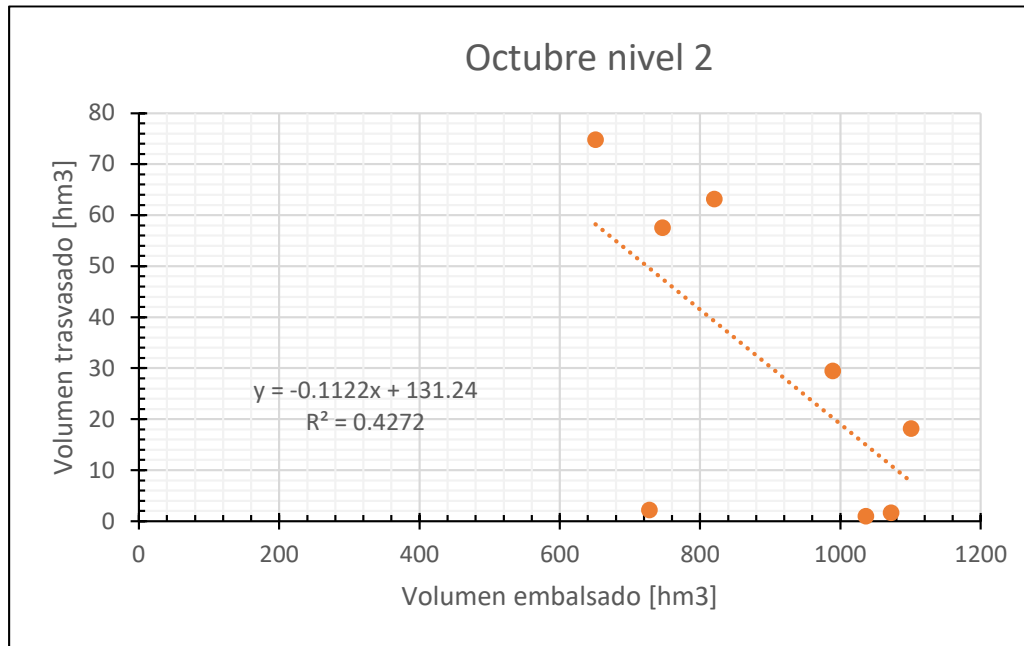


Figura 27. Regresión lineal simple entre el volumen embalsado y el volumen trasvasado para el nivel de explotación 2 en el mes de octubre. Fuente: Elaboración propia

- En el nivel 3 se halla lo siguiente: un coeficiente de correlación de 0.0043, infinitamente menor al obtenido para la regresión completa sin escalones. Se considera pues, un grave error intentar emplear esta nueva regresión.

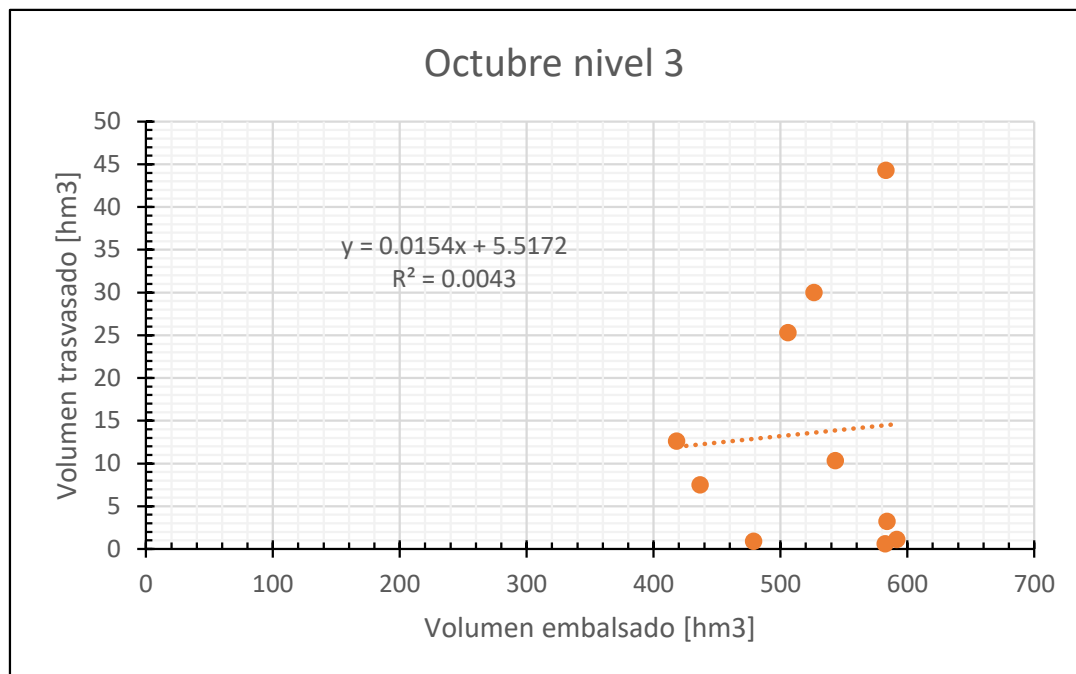


Figura 28. Regresión lineal simple entre el volumen embalsado y el volumen trasvasado para el nivel de explotación 3 en el mes de octubre. Fuente: Elaboración propia

- En el nivel 4, en el que según la regla no se debería trasvasar nada en absoluto, se halla lo siguiente: volúmenes trasvasados de hasta 30 hm³ y de nuevo una regresión negativa. En consecuencia, se concluye de nuevo que emplear esta regresión sería un absoluto error.

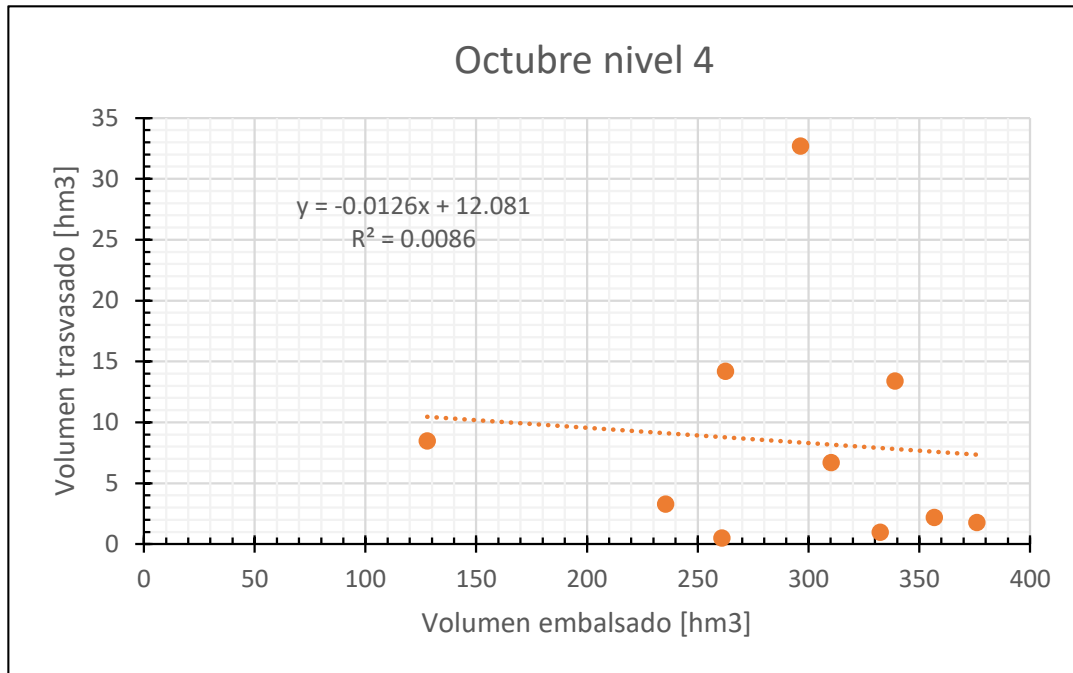


Figura 29. Regresión lineal simple entre el volumen embalsado y el volumen trasvasado para el nivel de explotación 4 en el mes de octubre. Fuente: Elaboración propia

Siguiendo el razonamiento expuesto, se intentó realizarlo para un mes del periodo estival y se halló lo siguiente: de nuevo una regresión negativa, un ajuste con un coeficiente de correlación exiguo y totalmente inferior al obtenido para la regresión sin escalones; y, por último, en el nivel 4 aparece la única regresión que tiene sentido, donde a mayor volumen embalsado, mayor volumen trasvasado, con un coeficiente de correlación bastante aceptable. Sin embargo, sorprende que esto suceda en el Nivel 4, donde no se debería realizar trasvase alguno de acuerdo con la regla de explotación previamente referida en el presente trabajo.

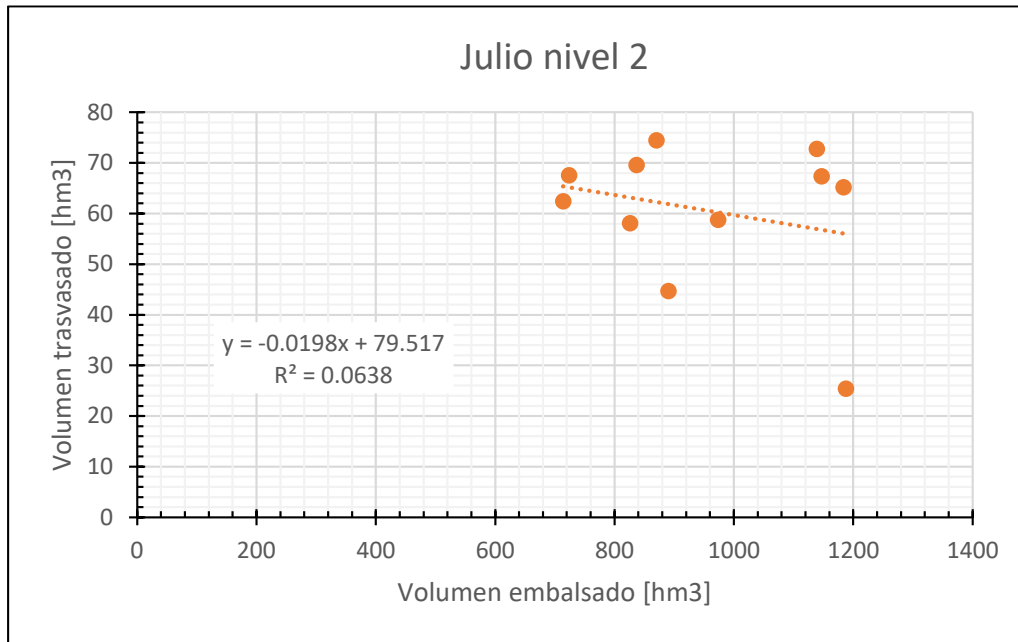


Figura 30. Regresión lineal simple entre el volumen embalsado y el volumen trasvasado para el nivel de explotación 2 en el mes de julio. Fuente: Elaboración propia

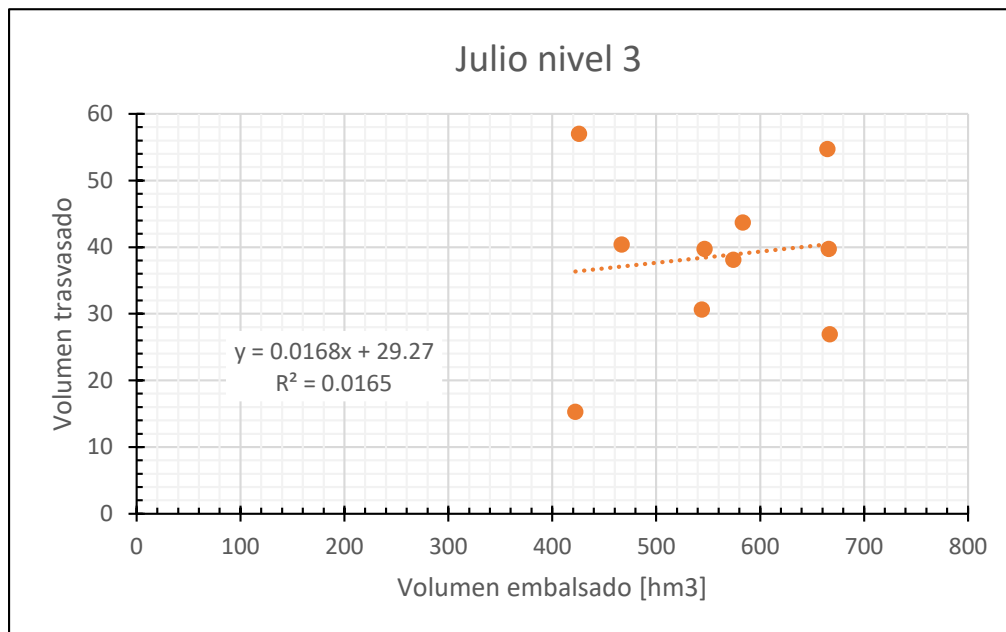


Figura 31. Regresión lineal simple entre el volumen embalsado y el volumen trasvasado para el nivel de explotación 3 en el mes de julio. Fuente: Elaboración propia

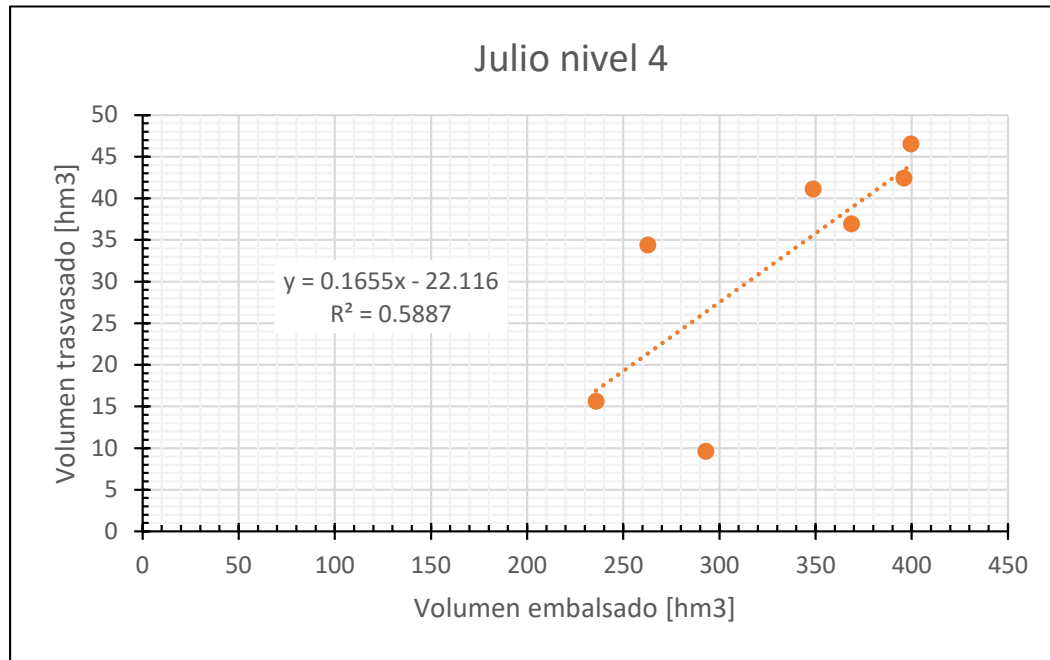


Figura 32. Regresión lineal simple entre el volumen embalsado y el volumen trasvasado para el nivel de explotación 4 en el mes de julio. Fuente: Elaboración propia.

En consecuencia, no se ha considerado oportuno continuar por esta vía en base a la argumentación expuesta y como alternativa, se ha decidido y demostrado que la aplicación de una regresión sin diferenciación en los escalones de los volúmenes funciona de mejor forma.

Como se ha expuesto anteriormente, aunque la regla de operación actual diferencia varios niveles según los volúmenes embalsados, se ha demostrado que, tras estudiar las regresiones según estos escalones, los coeficientes de correlación eran menores que empleando una única regresión. Principalmente esto se debe a que los datos históricos de los volúmenes trasvasados tienen un problema y es que, aunque el volumen a trasvasar se autorice en un determinado momento según las condiciones existentes en ese determinado momento, ese volumen autorizado a trasvasar generalmente se trasvasa en otro momento diferente, permaneciendo hasta ese momento en los embalses de Entrepeñas y Buendía. Las reglas de explotación se refieren a volúmenes trasvasables, mientras que los datos históricos se refieren a volúmenes trasvasados, por lo que la aplicación de los niveles de volúmenes trasvasables a los trasvasados no es garantía de un mejor ajuste, como se aprecia.

Es necesario añadir que, además, existen muchas otras circunstancias que influyen en la determinación del volumen trasvasado y del momento en el que este se realiza,



siendo el volumen embalsado en ciertas ocasiones el parámetro con menor importancia para determinar el momento del trasvase. Son los propios regantes de la cuenca del Segura quienes deciden cuándo se trasvasa el agua en función de cuándo necesitan más el agua para sus demandas y en función de como se sea la situación hidrológica de su propia cuenca en ese momento, que no se ha tenido en cuenta en el presente trabajo debido a la gran complejidad resultante que se obtendría si se aplicara.

En cuanto a los índices de calidad del modelo de gestión, haremos referencia a los gráficos del MAE expuestos en el apartado de resultados.



4.3.3 ÍNDICES DE CALIDAD (MAE) PARA LAS PREDICCIÓNES SDE SUELTAS Y VOLÚMENES

En este apartado se presentarán los diferentes gráficos para poder evaluar la calidad de las reglas de operación, es decir la calidad de las predicciones obtenidas con las regresiones planteadas, tanto para las sueltas hacia el Tajo y hacia el ATS. En ellos podremos ver representado el MAE para los horizontes de predicción desde cada mes de predicción, tal y como se ha mostrado previamente para las aportaciones de EFAS (Arnal et al., 2019).

En este primer gráfico se ve representado el error absoluto medio al comparar las series históricas de las sueltas hacia el ATS con los pronósticos obtenidos empleando las predicciones estacionales del pasado de EFAS como valores de entradas a los embalses.

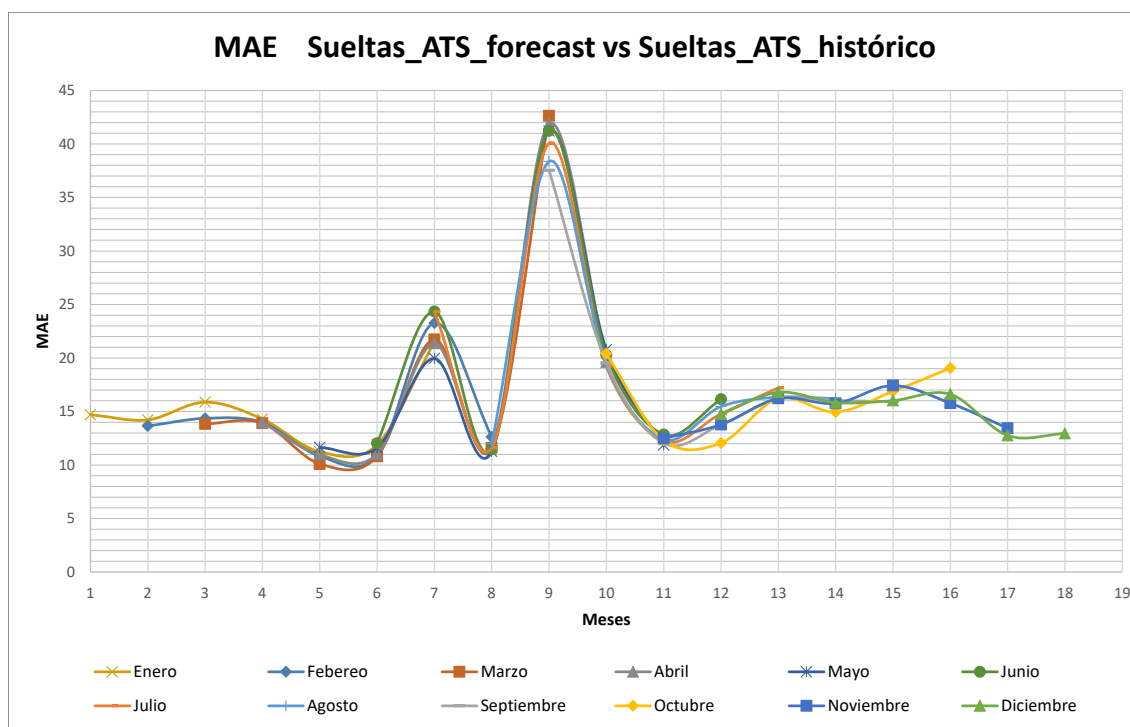


Figura 33. MAE en hm^3 al comparar las predicciones obtenidas mediante la regla de operación generada con la serie histórica de sueltas al ATS. Fuente: Elaboración propia.

Se presenta a continuación el mismo gráfico, pero representando el MAE en porcentaje con la finalidad de poder visualizar si los valores del error expresados en volumen, representan o no, una gran diferencia con los valores de comparación.

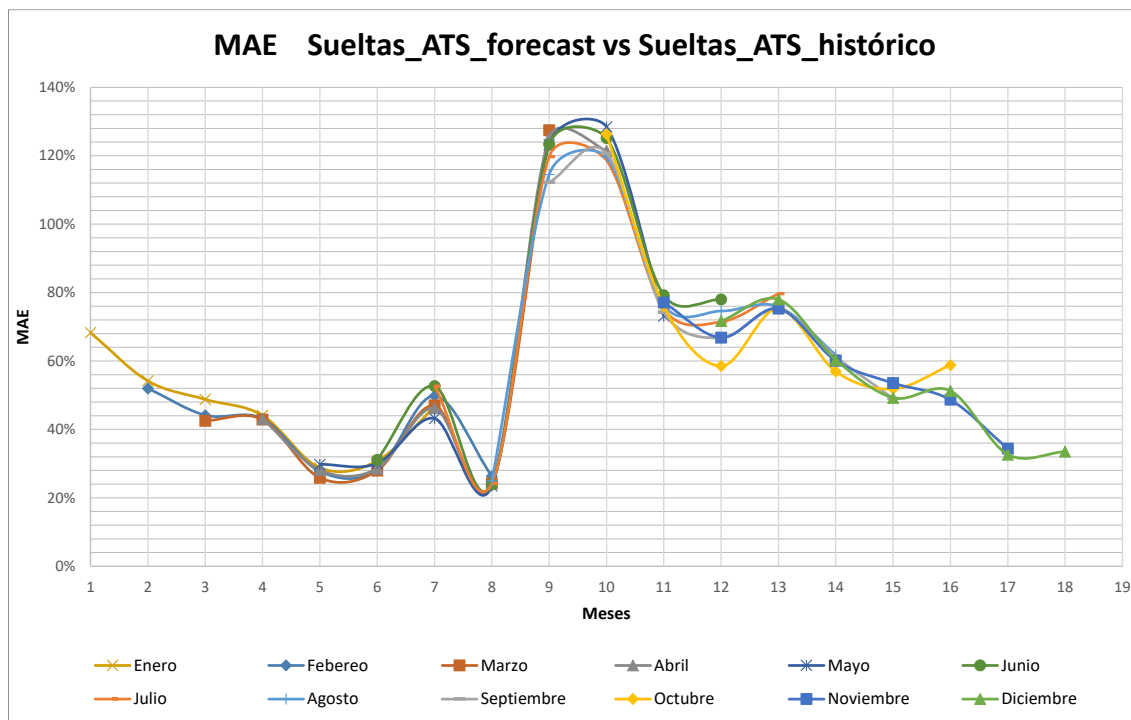


Figura 34. MAE en % al comparar las predicciones obtenidas mediante la regla de operación generada con la serie histórica de sueltas al ATS. Fuente: Elaboración propia.

- **MAE Seltas ATS *forecast* vs Seltas ATS histórico:**

En primer lugar, lo más llamativo en este gráfico son los picos que observamos en los meses 7 y 9 (**Figura 33**). Estos errores de gran magnitud nos indican que el error se ve afectado por las predicciones en un mes concreto, no por la pérdida de calidad de las predicciones al aumentar el tiempo de predicción, puesto que son picos puntuales en dos meses que no representan ninguna tendencia. Sin embargo, los errores de las predicciones lanzadas desde los meses iniciales del año presentan incluso una reducción a varios meses vista (exceptuando los picos comentados), lo cual es buen indicador.

Por otro lado, las predicciones lanzadas en los últimos meses del año presentan el comportamiento que podríamos denominar normal, es decir, el error aumenta a medida que aumenta el tiempo de predicción (**Figura 34**). No obstante, la medida en la que aumenta el error no es para nada importante, siendo más bien despreciable, indicando que la calidad de la predicción es también buena para esta época.

En la siguiente figura podemos visualizar el MAE obtenido, en tanto por ciento en este caso, al comparar las predicciones de sueltas hacia el Tajo, empleando la regla de operación desarrollada, con los valores históricos.

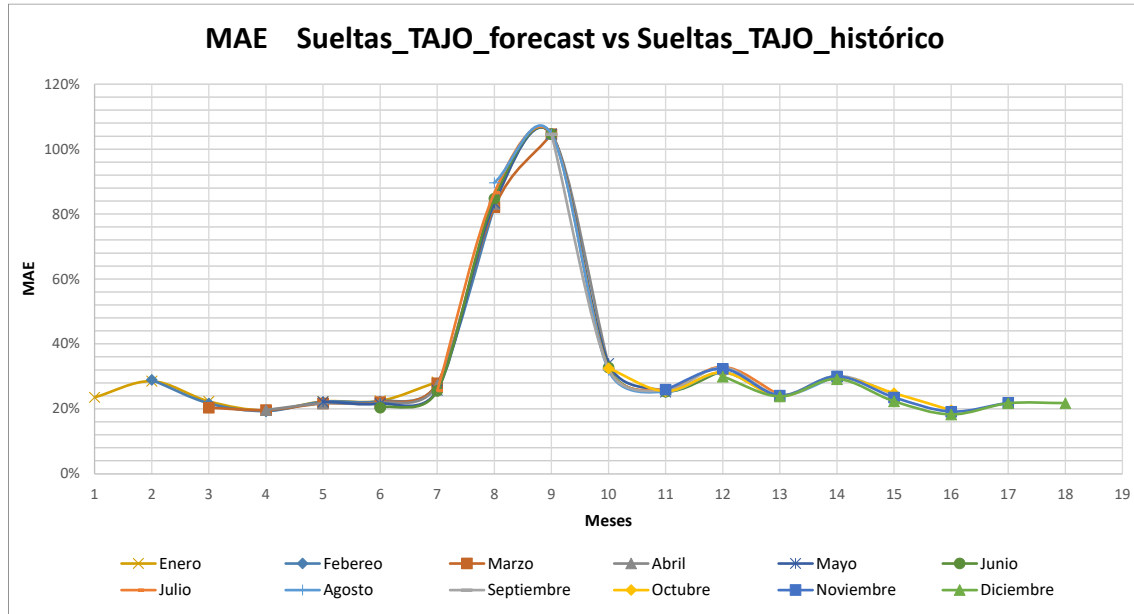


Figura 35. MAE en (%) al comparar las predicciones obtenidas mediante la regla de operación generada con la serie histórica de sueltas al Tajo. Fuente: Elaboración propia.

Finalmente se pueden observar en este último gráfico, los MAE, en unidades de la variable (hm^3), para el cálculo de los volúmenes embalsados tras hacer el balance, es decir comparando los volúmenes embalsados predichos mediante la regla de operación con los volúmenes embalsados históricos.

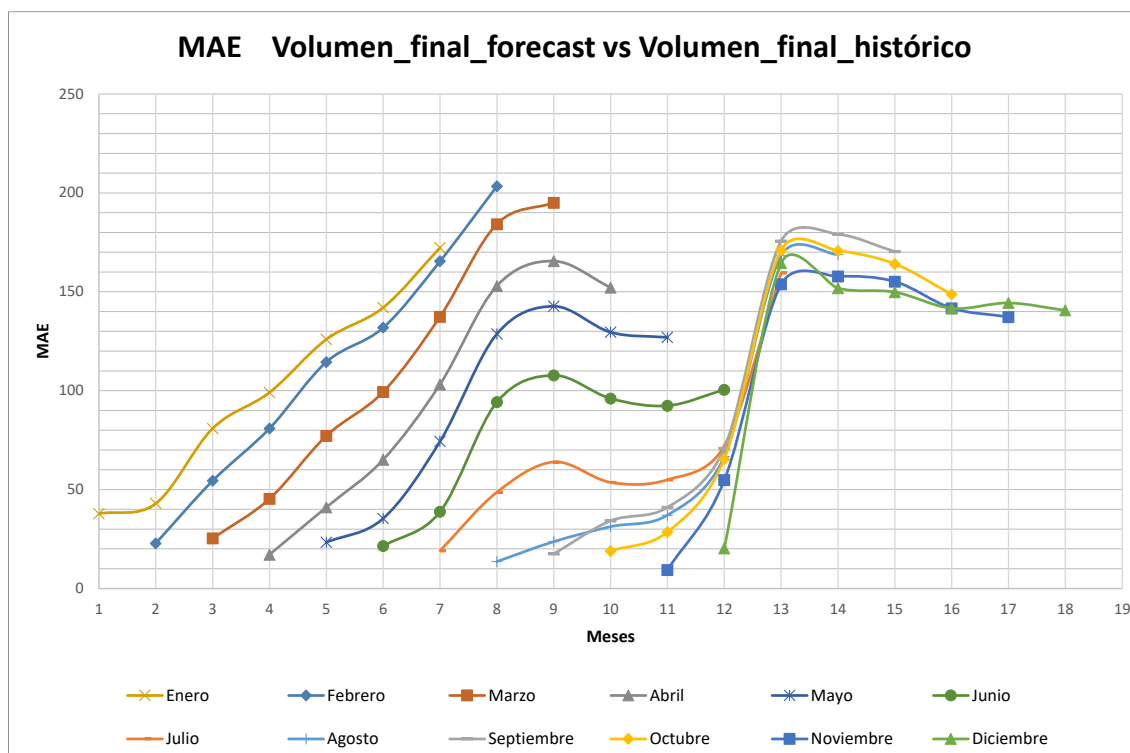


Figura 36. MAE en (hm³) al comparar las predicciones obtenidas mediante la regla de operación generada con la serie histórica de volúmenes embalsados. Fuente: Elaboración propia.

- **MAE Volumen final forecast vs Volumen final histórico**

En el gráfico del MAE referente a los volúmenes embalsados podemos apreciar claramente como el error aumenta al aumentar el horizonte de predicción (**Figura 36**). Este hallazgo es el hallazgo más común cuando se trabaja con predicciones estacionales debido a las fuentes de incertidumbre que existen, pues como es lógico, éstas aumentan al aumentar el horizonte de predicción, es decir, es más difícil reproducir con exactitud las condiciones futuras a medida que aumenta el tiempo de predicción.

Sin embargo, también aquí es posible ver la influencia que tiene el problema de ajuste de EFAS en los meses 8 y 9 y también en el 13 (**Figura 36**) como veíamos en las sueltas hacia el ATS. Aunque el modelo de EFAS no predice explícitamente volúmenes, sus predicciones de caudal afectan al volumen embalsado tras aplicar la ecuación de balance hidrológico del sistema que estamos trabajando.

Finalmente se ha realizado otra prueba: reemplazar todas las predicciones por predicciones perfectas; es decir, por los datos históricos de los meses correspondientes, y evaluar cómo cambian los valores del MAE. Esto permite evaluar la calidad de predicción asociada a la regla de operación del ATS y del Tajo implementada de forma aislada de la

calidad de predicción asociada a las aportaciones. Si al cambiar la predicción por una perfecta el ajuste mejora mucho y se obtienen valores inferiores del MAE, es que la predicción (los valores estaciones del pasado arrojados por EFAS) es la responsable del error. De lo contrario, el responsable del error es el ajuste de las reglas. Aunque esto es una derivada del objetivo del presente trabajo, se ha considerado beneficioso llevar a cabo esta prueba para poder realizar una mejor discusión de los resultados.

Los siguientes gráficos son análogos a los expuestos al inicio de este apartado, pero con la particularidad aquí explicada. Se expondrán en el mismo orden para poder visualizar una mejor comparación.

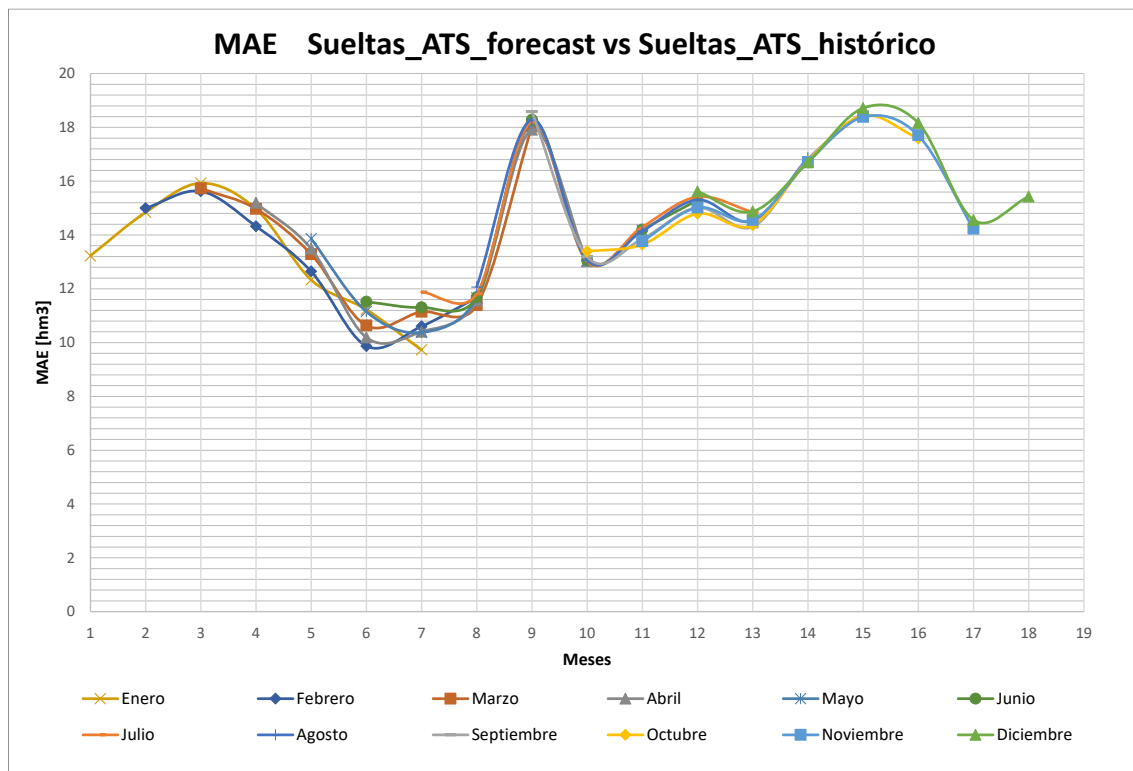


Figura 37. MAE al comparar las predicciones obtenidas mediante la regla de operación generada (empleando predicciones perfectas) con la serie histórica sueltas al ATS. Fuente: Elaboración propia.

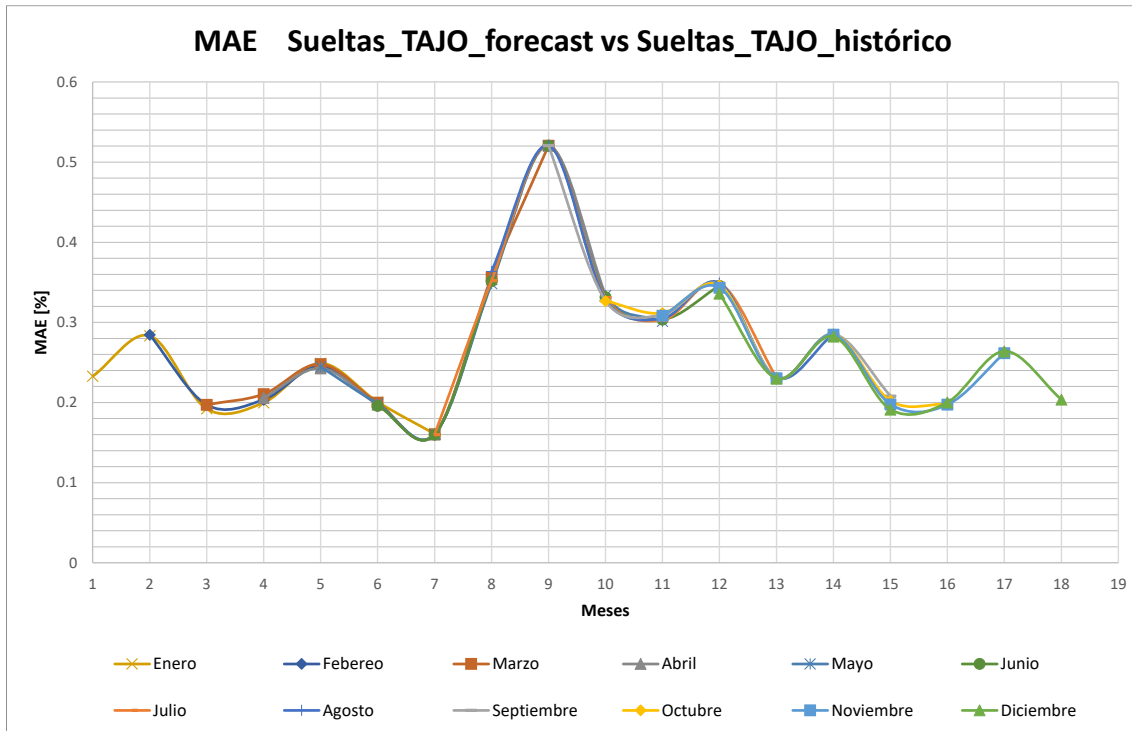


Figura 38. MAE al comparar las predicciones obtenidas mediante la regla de operación generada (empleando predicciones perfectas) con la serie histórica sueltas al Tajo. Fuente: Elaboración propia.

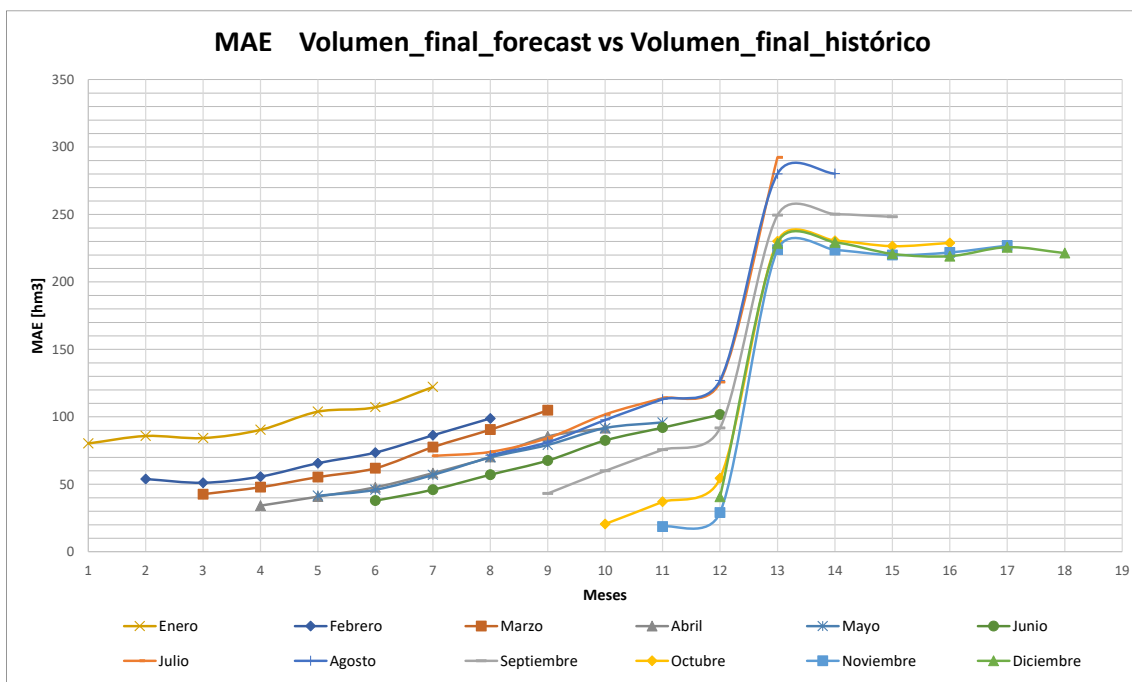


Figura 39. MAE en (hm^3) al comparar las predicciones obtenidas mediante la regla de operación generada (empleando predicciones perfectas) con la serie histórica de volúmenes embalsados. Fuente: Elaboración propia.

- **Empleo de las predicciones perfectas en la regla de operación:**

Al emplear las predicciones perfectas se puede observar como el volumen incluso empeora en algunos meses, sin embargo, se ve como las sueltas al ATS y al Tajo mejoran, aunque la mejora tampoco es relevante (**Figura 37, Figura 38, Figura 39**). Resultaría apropiado, en continuaciones del presente trabajo, evaluar si algún ajuste de mayor complejidad (no lineal, inteligencia artificial, etc.) mejora las sueltas Tajo en los meses de verano.

Comentar también que se graficó de nuevo el MAE para las sueltas al Tajo, pero en %, ya que existía la necesidad de valorar si esos 50 hm³ que resultan como error son sobre un valor más grande y en % se difumina. Sin embargo, esto no sucede (**Figura 35**), el valor en tanto por ciento demuestra que el error es relativamente elevado en los meses de verano. El hecho de que no mejore mucho es un buen indicador en el sentido de la calidad del *forescat*, es decir, significa que el ajuste es adecuado para el propósito, es decir la regla de operación propuesta dentro del modelo de gestión proporciona resultados más que aceptables.

5. CONCLUSIONES

En el presente trabajo, utilizamos la información disponible en el programa europeo Copernicus, en particular las predicciones hidrológicas estacionales de EFAS. Evaluamos la calidad de las predicciones estacionales y las ponemos en valor para complementar los sistemas de información básica y mejorar los modelos de gestión de embalses. Consideramos el Trasvase Tajo-Segura y sus embalses de cabecera, Entrepeñas y Buendía, como caso de estudio. Construimos unas reglas de operación en base a esta información y evaluamos la calidad de la misma para componer un modelo de gestión completo capaz de predecir volúmenes trasvasados, soltados hacia el Tajo y almacenados en embalses estacionalmente (a 7 meses).

Los resultados presentados y analizados en los anteriores apartados nos permiten establecer las siguientes conclusiones:

- El acceso a información hidrológica estacional procedente de bases de datos a gran escala como Copernicus, ha supuesto una competencia adquirida determinante en el presente trabajo. Ser capaces de manejar eficientemente grandes cantidades de datos y poder adquirirlos de forma automatizada, mediante programación en lenguaje Python es, actualmente, fundamental, y su importancia se verá incrementada en el futuro por el hecho de que su empleo supone grandes mejoras en el campo de la predicción hidrológica, así como en otros campos de la ciencia (predicción de olas de calor, riesgo de incendios, producción eólica, etc.).
- Se demuestra que poder disponer de datos hidroclimáticos provenientes de sistemas de predicción estacional, como EFAS, con índices de calidad elevados para las zonas de estudio, es esencial para poder desarrollar posteriormente modelos de gestión que los incorporen en predicciones de recursos hídricos. De acuerdo con lo expuesto, desarrollar metodologías de corrección que permitan conseguir esos elevados índices de calidad, mediante inteligencia artificial, por ejemplo, será una vía de investigación en auge en el futuro más próximo.
- Aunque la corrección empleada (regresión lineal) en este trabajo no es la más popular entre los estudios que emplean predicciones como datos de partida, al disponer de datos históricos reales se ha optado por esta corrección, pudiendo

evaluar el sesgo dato a dato y se pone de manifiesto que los datos corregidos reproducen con mayor precisión la realidad del fenómeno hidrológico.

- Respecto a las regresiones empleadas para construir las reglas de operación, se concluye que, disponiendo de los datos de volúmenes trasvasados ajustados temporalmente al momento de autorización, se podría llevar a cabo una predicción por escalones de acuerdo con la actual regla de operación. Sin embargo, con los datos actuales, se demuestra que una predicción sin tener en cuenta los niveles para los diferentes volúmenes embalsados aporta un pronóstico relativamente bueno de volúmenes trasvasados, de acuerdo a los índices de calidad obtenidos.
- En general, las predicciones son adecuadas respecto al MAE salvo casos concretos, con rangos de confianza que permitirían su uso como información de apoyo para la toma de decisiones.
- De acuerdo con los estudios más recientes acerca de los efectos del cambio climático sobre la reducción de las aportaciones en las cuencas del Segura y del río Tajo (Oliva Cañizares et al., 2022), poder conocer el volumen trasvasable y trasvasado con un horizonte de predicción estacional será crucial para poder desarrollar una planificación hidrológica a la altura de las actuales condiciones climatológicas. En este sentido, la metodología propuesta en este trabajo mediante el empleo de predicciones hidrológicas estacionales puede jugar un papel clave en la planificación hidrológica y en la gestión de recursos hídricos.



REFERENCIAS

Anghileri, D., Voisin, N., Castelletti, A., Pianosi, F., Nijssen, B. y Lettenmaier, D.P.J.W.R.R. (2016): Value of long-term streamflow forecasts to reservoir operations for water supply in snow-dominated river catchments. *52(6)*: 4209-4225.

Arnal, L., Cloke, H.L., Stephens, E., Wetterhall, F., Prudhomme, C., Neumann, J., Krzeminski, B. y Pappenberger, F. (2018): Skilful seasonal forecasts of streamflow over Europe. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, *22(4)*: 2057-2072.

Arnal, L., Cloke, H., Magnusson, L., Klein, B., Meissner, D., de Tomas, A., Hunink, J., Pechlivanidis, I., Crochemore, L. y Suarez, S. (2019): The sensitivity of sub-seasonal to seasonal streamflow forecasts to meteorological forcing quality, modelled hydrology and the initial hydrological conditions, IRSTEA.

Barnard, C., Krzeminski, B., Mazzetti, C., Decremet, D., Carton de Wiart, C., Harrigan, S., Blick, M., Ferrario, I., Wetterhall, F.P. y Prudhomme, C.J.C.C.C.S.C.D.S. (2020): C.: Reforecasts of river discharge and related data by the European Flood Awareness System, version 4.0. 10.

Brunner, M.I. y Slater, L.J. (2022): Extreme floods in Europe: going beyond observations using reforecast ensemble pooling. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, *26(2)*: 469-482.

Cabezas, F.J.A.t.C.p.d.R. (2013): El sistema de cabecera del Tajo y el trasvase Tajo-Segura.

Castelletti, A., Pianosi, F. y Soncini-Sessa, R. (2008): Receding horizon control for water resources management. *Applied Mathematics and Computation*, *204(2)*: 621-631.

Crochemore, L., Ramos, M.-H., Pappenberger, F.J.H. y Sciences, E.S. (2016): Bias correcting precipitation forecasts to improve the skill of seasonal streamflow forecasts. *20(9)*: 3601-3618.

de Lourdes Corral-Bermúdez, M.J.A.y.T.W. y Landscape (2019): Gómez Espín, José María, 2017 (Coordinador), El Trasvase Tajo-Segura. Propuestas para su continuidad y futuro, Saarbrücken, Alemania, Editorial Académica Española, 233 págs. ISBN: 978-3-639-71704-4. (13): 121-122.

Denaro, S., Anghileri, D., Giuliani, M. y Castelletti, A. (2017): Informing the operations of water reservoirs over multiple temporal scales by direct use of hydro-meteorological data. *Advances in Water Resources*, 103: 51-63.

Galelli, S. y Soncini-Sessa, R. (2010): Combining metamodelling and stochastic dynamic programming for the design of reservoir release policies. *Environmental Modelling & Software*, 25(2): 209-222.

Giuliani, M., Castelletti, A., Pianosi, F., Mason, E. y Reed Patrick, M. (2016): Curses, Tradeoffs, and Scalable Management: Advancing Evolutionary Multiobjective Direct Policy Search to Improve Water Reservoir Operations. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 142(2): 04015050.

Giuliani, M., Crochemore, L., Pechlivanidis, I., Castelletti, A.J.H. y Sciences, E.S. (2020): From skill to value: isolating the influence of end user behavior on seasonal forecast assessment. 24(12): 5891-5902.

González Iglesias, M.Á. (2016): Ley 21/2015, de 20 de julio, por la que se modifica la Ley 43/2003, de 21 de noviembre, de Montes [BOE n.º 173, de 21-VII-2015].

Harrigan, S., Zoster, E., Cloke, H., Salamon, P., Prudhomme, C.J.H. y Discussions, E.S.S. (2020a): Daily ensemble river discharge reforecasts and real-time forecasts from the operational Global Flood Awareness System. 1-22.

Harrigan, S., Zsoter, E., Alfieri, L., Prudhomme, C., Salamon, P., Wetterhall, F., Barnard, C., Cloke, H. y Pappenberger, F.J.E.S.S.D. (2020b): GloFAS-ERA5 operational global river discharge reanalysis 1979–present. 12(3): 2043-2060.

Hejazi, M.I., Cai, X. y Ruddell, B.L.J.A.i.w.r. (2008a): The role of hydrologic information in reservoir operation—learning from historical releases. 31(12): 1636-1650.

Hejazi, M.I., Cai, X. y Ruddell, B.L. (2008b): The role of hydrologic information in reservoir operation – Learning from historical releases. *Advances in Water Resources*, 31(12): 1636-1650.

Hersbach, H., de Rosnay, P. y Bell, B. (2018): Operational global reanalysis: progress, future directions and synergies with NWP. European Centre for Medium Range Weather Forecasts.

Koster, R.D., Mahanama, S.P.P., Livneh, B., Lettenmaier, D.P. y Reichle, R.H. (2010): Skill in streamflow forecasts derived from large-scale estimates of soil moisture and snow. *Nature Geoscience*, 3(9): 613-616.

Lund, J.R. (1996): Developing seasonal and long-term reservoir system operation plans using HEC-PRM, HYDROLOGIC ENGINEERING CENTER DAVIS CA.

Macian-Sorribes, H., Pechlivanidis, I., Crochemore, L. y Pulido-Velazquez, M.J.J.o.H. (2020): Fuzzy postprocessing to advance the quality of continental seasonal hydrological forecasts for river basin management. 21(10): 2375-2389.

Mariani, S., Casaioli, M. y Calza, M. (2008): Forecast verification: a summary of common approaches, and examples of application. Univ. degli Studi di Trento, Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale.

Mazzetti, C., Krzeminski, B., Barnard, C., Wetterhall, F. y Prudhomme, C. (2019): River discharge and related historical data from the European Flood Awareness System, v3. 0, Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). ECMWF. doi.

Morales Gil, A., Rico, A. y Hernández-Hernández, M. (2005): El trasvase Tajo-Segura.

Moreno, J.M.J.I.G. (2000): Balance económico del trasvase Tajo-Segura. (24): 69-95.

Oliva Cañizares, A., Olcina, J. y Baños Castiñeira, C.J. (2022): The Effects of Climate Change on the Tagus–Segura Transfer: Diagnosis of the Water Balance in the Vega Baja del Segura (Alicante, Spain).

Pappenberger, F., Cloke, H., Balsamo, G., Ngo-Duc, T. y Oki, T.J.I.J.o.C. (2010): Global runoff routing with the hydrological component of the ECMWF NWP system. 30(14): 2155-2174.

Requena, J.C. y Martínez-Granados, D.J.E.A.y.R.N. (2012): El valor del uso del agua en el regadío de la cuenca del Segura y en las zonas regables del trasvase Tajo-Segura. 12(1): 5-32.



Seguido, Á.F.M. y Amorós, A.M.R. (2018): Perspectivas de funcionamiento del trasvase Tajo-Segura (España): efectos de las nuevas reglas de explotación e impulso de la desalinización como recurso sustitutivo. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*(79).

Stedinger, J.R., Sule, B.F. y Loucks, D.P. (1984): Stochastic dynamic programming models for reservoir operation optimization. *Water Resources Research*, 20(11): 1499-1505.

Twedt, T.M., Schaake Jr, J.C. y Peck, E.L. (1977): National Weather Service extended streamflow prediction [USA], Proceedings Western Snow Conference.

Van Der Knijff, J.M., Younis, J. y De Roo, A.P.J. (2010): LISFLOOD: a GIS-based distributed model for river basin scale water balance and flood simulation. *International Journal of Geographical Information Science*, 24(2): 189-212.

Willmott, C.J. y Matsuura, K.J.C.r. (2005): Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance. 30(1): 79-82.

Yuan, X., Wood, E.F. y Ma, Z. (2015): A review on climate-model-based seasonal hydrologic forecasting: physical understanding and system development. 2(5): 523-536.

Zhao, T., Yang, D., Cai, X., Zhao, J. y Wang, H.J.W.R.R. (2012): Identifying effective forecast horizon for real-time reservoir operation under a limited inflow forecast. 48(1).

Zimmerman, B.G., Vimont, D.J. y Block, P.J. (2016): Utilizing the state of ENSO as a means for season-ahead predictor selection. 52(5): 3761-3774.