

INSTITUTO EUROMEDITERRÁNEO DEL AGUA

**EL COMPORTAMIENTO
HIDROLÓGICO
DE LA CABECERA DEL
TAJO**

F.Cabezas, diciembre de 2021

EL COMPORTAMIENTO HIDROLÓGICO DE LA CABECERA DEL TAJO

El presente Informe ha sido elaborado en el Instituto Euromediterráneo del Agua en el marco de los trabajos de estudio para la planificación hidrológica. En su elaboración han participado los técnicos Francisco Gomariz y Ángel García.

INDICE BÁSICO

1. Introducción	13
2. Datos climáticos	15
2.1. <i>Introducción. Orígenes de datos.....</i>	<i>15</i>
2.2. <i>Redes de estaciones y datos disponibles</i>	<i>15</i>
3. Foronomía. Caudales observados.....	23
3.1. <i>Introducción</i>	<i>23</i>
3.2. <i>Información disponible</i>	<i>23</i>
3.3. <i>Análisis preliminares</i>	<i>30</i>
4. Restitución a régimen natural.....	109
4.1. <i>Introducción</i>	<i>109</i>
4.2. <i>Detracciones netas en cabecera</i>	<i>110</i>
4.3. <i>Caudales incrementales</i>	<i>113</i>
4.4. <i>Resultados</i>	<i>114</i>
5. Conclusiones.....	115
6. ANEXO I. Estaciones de aforo	117
7. ANEXO II. Embalses	153

INDICE DETALLADO

1.	Introducción	13
2.	Datos climáticos	15
2.1.	<i>Introducción. Orígenes de datos</i>	<i>15</i>
2.2.	<i>Redes de estaciones y datos disponibles.....</i>	<i>15</i>
2.2.1.	Red AEMET	16
2.2.1.1.	Precipitación.....	16
2.2.1.2.	Temperaturas.....	16
2.2.1.3.	Rejillas de datos climáticos	17
2.2.2.	Red SIAR	18
2.2.3.	Red evaporimétrica. Anuarios de Aforos	20
2.2.4.	Datos seleccionados.....	21
3.	Foronomía. Caudales observados.....	23
3.1.	<i>Introducción.....</i>	<i>23</i>
3.2.	<i>Información disponible.....</i>	<i>23</i>
3.2.1.	Redes y estaciones	23
3.2.2.	Datos utilizados.....	28
3.3.	<i>Análisis preliminares.....</i>	<i>30</i>
3.3.1.	Introducción. Fases de los análisis preliminares	30
3.3.2.	Examen y control de calidad de las series diarias en estaciones de aforo H-Q (fase 1)	32
3.3.2.1.	Inspección de las series. Disponibilidad de datos	32
3.3.2.2.	Controles de calidad básicos. Rangos y gradientes.....	37
3.3.2.3.	Completado de datos a partir de curvas de gasto	40
3.3.2.4.	Relleno de datos por interpolación en la serie.....	41
3.3.2.5.	Completado de datos con las series mensuales	42
3.3.3.	Balances en embalses (fase 2)	43
3.3.3.1.	Introducción	43
3.3.3.2.	Molino de Chincha.....	44
3.3.3.3.	Entrepeñas	45
3.3.3.4.	Buendía	46
3.3.3.5.	Túnel de conexión Entrepeñas-Buendía.....	47
3.3.3.6.	Sistema Bolarque-La Bujeda	52
3.3.3.7.	Zorita	56
3.3.3.8.	Almoguera.....	56
3.3.4.	Análisis de caudales por tramos (fase 3)	56
3.3.4.1.	Introducción	56
3.3.4.2.	Tramo Peralejos de las truchas-Trillo.....	57
3.3.4.3.	Tramo Trillo-Entrepeñas	66
3.3.4.4.	Río Guadiela	73
3.3.4.5.	Conjunto Entrepeñas-Buendía-Bolarque	83
3.3.4.6.	Tramo Bolarque-Almoguera	87
3.3.4.7.	Tramo Almoguera-Villarubia de Santiago.....	91
3.3.4.8.	Tramo Villarubia de Santiago-Aranjuez	93
3.3.5.	Formación de series de referencia (fase 4).....	96
3.3.6.	Contraste con los resultados de SIMPA	98
4.	Restitución a régimen natural.....	109
4.1.	<i>Introducción.....</i>	<i>109</i>
4.2.	<i>Detracciones netas en cabecera.....</i>	<i>110</i>
4.3.	<i>Caudales incrementales</i>	<i>113</i>
4.4.	<i>Resultados.....</i>	<i>114</i>
5.	Conclusiones.....	115
6.	ANEXO I. Estaciones de aforo.....	117
7.	ANEXO II. Embalses	153

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Mapa básico de la zona considerada.....	14
Figura 2. Localización de estaciones de precipitación AEMET.....	16
Figura 3. Localización de estaciones de temperatura AEMET.....	17
Figura 4. Rejilla AEMET proyectada a UTM-30N y superpuesta al área de cabecera	18
Figura 5. Localización de estaciones SIAR.....	19
Figura 6. Estaciones evaporimétricas	21
Figura 7. Mapa de estaciones de aforo ROEA consideradas.....	24
Figura 8. Mapa de estaciones de aforo ROEA consideradas (detalle de cabecera)	25
Figura 9. Mapa de estaciones de aforo ROEA consideradas (detalle del curso inferior).....	25
Figura 10. Serie con la evolución del número total de datos de aforo.....	34
Figura 11. Presencia/ausencia de datos en las estaciones de aforo.....	35
Figura 12. Series de caudales en las estaciones de aforo	36
Figura 13. Aportación circulante por el túnel (hm3/día).....	47
Figura 14. Episodios de activación del túnel y existencias embalsadas en Entrepeñas y en Buendía (hm3).....	48
Figura 15. Relación entre existencias embalsadas en Entrepeñas y flujos por el túnel.....	48
Figura 16. Detalles de los episodios de activación del túnel.....	51
Figura 21. Flujo de salidas de La Bujeda al ATS (detalle)	55
Figura 22. Histograma de los caudales de salida de La Bujeda al ATS	55
Figura 23. Esquema del tramo Peralejos de las Truchas-Trillo	58
Figura 24. Aportaciones anuales en las estaciones de cabecera del Alto Tajo.....	59
Figura 25. Correlación de aportaciones anuales en estaciones de cabecera del Alto Tajo	60
Figura 26. Correlación de aportaciones mensuales en estaciones de cabecera del Alto Tajo.....	61
Figura 27. Estimación de 3268 en función de 3001 y 3030 a escala anual	61
Figura 28. Estimación de 3268 en función de 3001 y 3030 a escala mensual	62
Figura 29. Hidrogramas diarios representativos.....	62
Figura 30. Aportaciones anuales incremental de Trillo y suma de cabeceras del Alto Tajo	63
Figura 31. Aportaciones en Trillo y suma de las estaciones 3001 y 3030.....	64
Figura 32. Aportaciones incrementales en Trillo relativas a las 3001 y 3030.....	64
Figura 33. Caudales diarios en cabecera. Periodo 1-1-1975 a 31-12-1976.....	65
Figura 34. Caudales diarios en cabecera. Periodo 1-1-1990 a 31-12-1992.....	65
Figura 35. Esquema del tramo Trillo-Entrepeñas	66
Figura 36. Series básicas del tramo Trillo-Entrepeñas.....	67
Figura 37. Series de afluentes del tramo Trillo-Entrepeñas.....	67
Figura 38. Series de aportaciones incrementales mensuales 3005-3006.....	68
Figura 39. Series anuales en Entrepeñas	68
Figura 40. Ventanas temporales de caudales diarios en 3005 (Trillo) y 3006 (Entrepeñas).....	70
Figura 41. Aportaciones anuales en 3005 (Trillo) y 3006c (Entrepeñas compuesta) e incremental	71
Figura 42. Aportaciones diarias en Trillo y Entrepeñas en 1990-91	72
Figura 43. Caudales diarios en Peralejo de las Truchas y Trillo (1958/59 – 1960/61).....	73
Figura 44. Esquema de la cuenca del Guadiela.....	74
Figura 45. Correlación de aportaciones anuales en estaciones de cabecera del Guadiela	75
Figura 46. Correlación de aportaciones mensuales en estaciones de cabecera del Guadiela.....	75
Figura 47. Series anuales de cabecera del Guadiela.....	76
Figura 48. Series diarias en el Molino de Chinchá	77
Figura 49. Series incrementales diarias y anuales en Alcantud	78
Figura 50. Series anuales en la cuenca del Escabas	79
Figura 51. Series anuales en la cuenca del Mayor	79
Figura 52. Series anuales en Buendía	80
Figura 53. Caudales diarios en Las Juntas y Buendía en diferentes periodos temporales	81
Figura 54. Series de aportaciones diarias en Alcocer y Buendía (1912 a 1914). Escalas ordinaria y semilogarítmica	82
Figura 55. Gráfico de dispersión de las aportaciones diarias en Alcocer y Buendía (1912 a 1914).....	83
Figura 56. Esquema del conjunto Entrepeñas-Buendía-Bolarque.....	84
Figura 57. Series anuales de entradas a los embalses de Entrepeñas y Buendía.....	84
Figura 58. Series anuales de salidas de Entrepeñas y Buendía y entradas a Bolarque	85

Figura 59. Series anuales de flujos en Bolarque	86
Figura 60. Serie de derivaciones del Acueducto Tajo-Segura en La Bujeda (hm ³ /año).....	86
Figura 61. Series de entradas y salidas de Bolarque	87
Figura 62. Esquema del tramo Bolarque-Almoguera	88
Figura 63. Series del tramo Bolarque-Almoguera en gráficos separados	89
Figura 64. Series del tramo Bolarque-Almoguera en gráfico único	90
Figura 65. Series del tramo Bolarque-Almoguera. Detalles	90
Figura 66. Flujos incrementales Almoguera-Zorita	91
Figura 67. Tramo Almoguera-Villarrubia de Santiago	92
Figura 68. Series anuales en el tramo Almoguera-Villarrubia de Santiago	92
Figura 69. Esquema del tramo Villarrubia de Santiago-Aranjuez.....	93
Figura 70. Series anuales de caudales en el tramo Villarrubia de Santiago-Aranjuez	93
Figura 71. Contraste de series diarias en Valdajos y Aranjuez.....	94
Figura 72. Series anuales de los canales en el tramo Almoguera-Aranjuez	95
Figura 73. Series anuales de aportaciones en la confluencia con el Jarama.....	96
Figura 74. Mapa de subcuencas de referencia.....	98
Figura 75. Series anuales observadas y calculadas	103
Figura 76. Serie de aportaciones anuales en Bolarque estimadas por SIMPA y por Sacramento	104
Figura 77. Comparación SIMPA-SIMPA ajustado.....	105
Figura 78. Series de caudales medios anuales observados y calculados en Entrepeñas-Buendía	107
Figura 79. Series de caudales medios anuales observados y calculados en Entrepeñas-Buendía. Detalle.....	107
Figura 80. Esquema de detracciones para cálculos de restitución	111
Figura 81. Distribución estacional de los consumos netos para cálculos de restitución	112

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Estaciones climatológicas SIAR	20
Tabla 2. Estaciones evaporimétricas	21
Tabla 3. Estaciones de aforo en ríos	27
Tabla 4. Estaciones de aforo en canales	27
Tabla 5. Estaciones de embalses.....	27
Tabla 6. Datos de embalses.....	29
Tabla 7. Características de los datos de aforo diarios registrados en las diferentes estaciones	33
Tabla 8. Ventanas temporales para relleno de datos mediante las curvas de gasto.....	41
Tabla 9. Estaciones de aforo con series mensuales más largas que las diarias	43
Tabla 10. Estaciones de embalses. Periodos de datos diarios y mensuales.....	44
Tabla 11. Teselación hidrográfica de referencia	97
Tabla 12. Diferencias relativas de los caudales por subcuencas de referencia.....	106
Tabla 13. Caudales medios mensuales en Entrepeñas-Buendía	108

1. INTRODUCCIÓN

El objeto del presente informe es la realización de un primer análisis del comportamiento hidrológico del sistema de cabecera del río Tajo, entendiendo por tal toda su cuenca fluvial hasta Aranjuez, y centrando la atención en el contraste y validación de los datos disponibles.

Para este análisis se emplearán diferentes fuentes de información hidroclimática e hidrológica disponible, a distintas escalas temporales, verificando la consistencia de los datos básicos, sus posibles errores y correcciones, y la coherencia global de todo el conjunto.

Depurados y validados los datos, se crearán distintas colecciones de series hidrológicas de referencia, y se construirán modelos hidrológicos a diferentes escalas temporales (diarios, mensuales, anuales e hiperanuales) que puedan reproducirlas satisfactoriamente, permitiendo así el conocimiento contrastado de alternativas y escenarios futuros.

El análisis muestra los datos meteorológicos existentes pertinentes para el análisis hidrológico, tras lo que se realiza una revisión detallada de toda la información foronómica y de embalses existente en la zona y procedente de las redes oficiales.

Tras esta asimilación de datos hidrológicos se procede a su contraste y análisis a diferentes escalas temporales, incluyendo la validación de caudales y su restitución a régimen natural. Esa restitución se completará en el futuro con la aplicación de modelos hidrológicos de lluvia-escorrentía en la zona de estudio, complementarios al modelo SIMPA-2018 utilizado de forma estándar en la planificación hidrológica de las distintas demarcaciones.

Tras todos estos procesos, y cuando se culminen en el futuro las fases de modelación, se dispondrá de un conocimiento contrastado del comportamiento hidrológico de la cabecera, coherente con todas las observaciones disponibles, y un modelo de comportamiento que permitirá investigar la explicación de fenómenos como el efecto 80 o los caudales futuros esperables como consecuencia del cambio climático o cambio global. El presente informe es un primer paso en esa dirección.

Los análisis realizados concluyen con la síntesis de principales resultados obtenidos y la extracción de conclusiones relevantes para la planificación hidrológica afectada.

La figura adjunta muestra un mapa básico de la zona de estudio considerada, con los cauces y las subcuencas principales representadas sobre el mapa de elevaciones del terreno.

Como puede verse, el sector de cabeceras aguas arriba de Bolarque, que podría denominarse como Alto Tajo, presenta una red ramificada convencional desarrollada en torno a los ríos Tajo y Guadiela, mientras que el sector aguas abajo, entre Bolarque y Aranjuez, consta de un tramo fluvial largo, sin apenas afluentes ni ramificaciones.

Como se verá, los recursos hídricos naturales se generan en las subcuencas del Alto Tajo, mientras que el cauce inferior actúa básicamente como elemento de transporte, sin ganancias significativas de caudal.

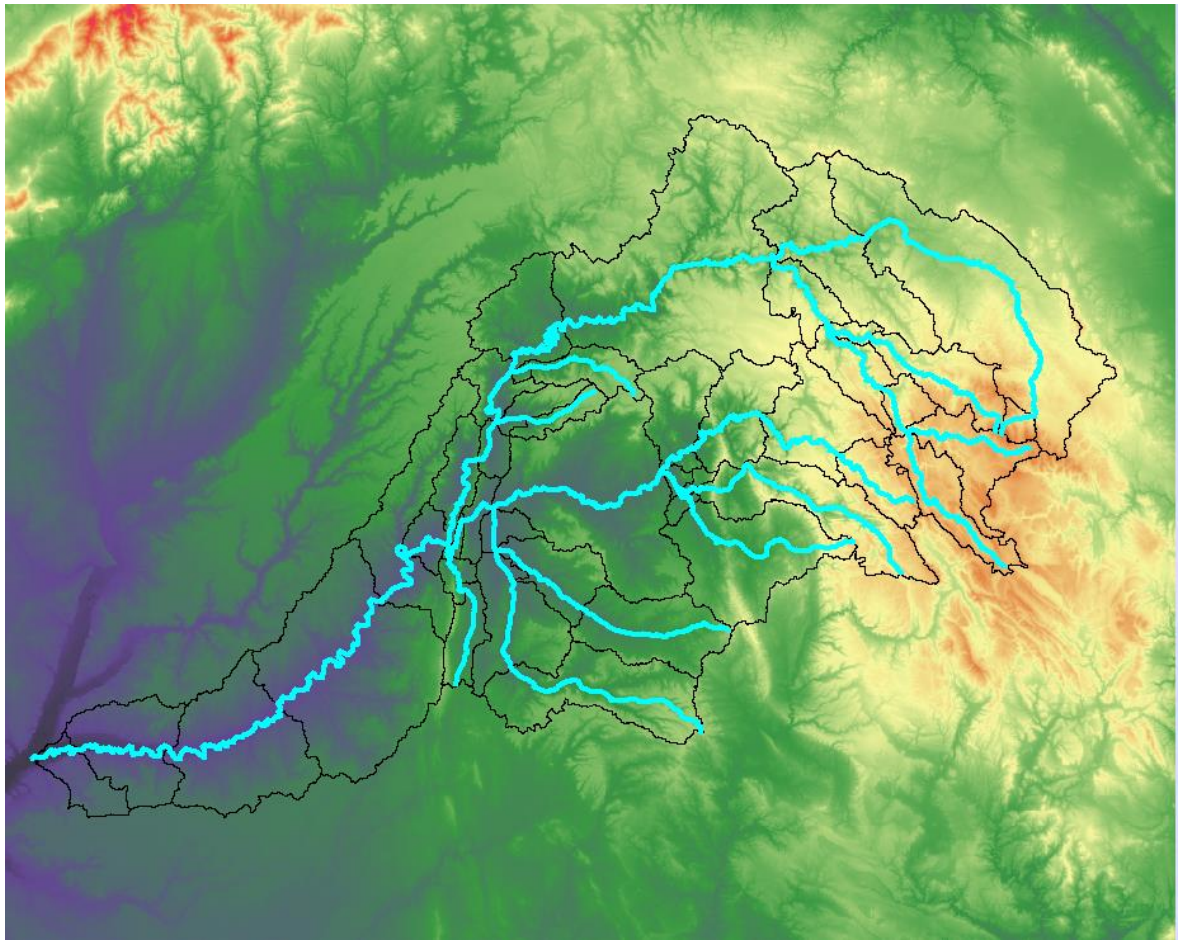


Figura 1. Mapa básico de la zona considerada

2. DATOS CLIMÁTICOS

2.1. INTRODUCCIÓN. ORÍGENES DE DATOS

Entrando de forma específica en la descripción y análisis de los datos climáticos, básicos para la evaluación del comportamiento hidrológico de la cabecera, se revisará la información existente proporcionada por las redes de la zona y, tras su contraste, se propondrá una colección de datos básicos a utilizar en la modelación hidrológica.

Con carácter general se emplearán datos diarios, generándose en su caso los mensuales y anuales por agregación de aquellos.

Existen datos diarios de precipitaciones y temperaturas de la zona en las relativamente abundantes estaciones de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET), con longitudes de las series muy variables según la estación. En general, se cuenta con abundantes datos a partir de la década de los 50, y menos densidad en fechas anteriores.

Por otra parte, existen también distintos registros diarios de diferentes variables climáticas generados por el Servicio Integral de Asesoramiento al Regante (S.I.A.R.). Este servicio dispone de estaciones agroclimáticas distribuidas por toda la región, y que incorporan datos adicionales a las lluvias y temperaturas tales como velocidades del viento, insolación, radiación, o evapotranspiración de referencia. Toda esta información se actualiza diariamente y está a disposición pública en los servidores del Servicio. Las series temporales se extienden desde 1999 a la actualidad, son relativamente completas, y han sido sometidas a controles y chequeos que aseguran, en general, una calidad adecuada de la información suministrada.

Adicionalmente, otra fuente de información climática la constituyen los Anuarios de aforos publicados regularmente por la Dirección general del Agua. Estos anuarios incluyen datos mensuales de evaporación y otras variables relacionadas como temperatura, humedad relativa, viento y precipitación, registrados por las estaciones evaporimétricas situadas en embalses o en sus proximidades.

Por último ha de señalarse que, además de las series de datos registrados puntualmente en las estaciones, recientemente se han desarrollado distintas colecciones de rejillas de datos climáticos que, con resoluciones variables, cubren completamente el territorio de interés.

En los epígrafes que siguen se describen con mayor detalle estas redes y datos en la zona de estudio y área de cobertura en sus alrededores.

2.2. REDES DE ESTACIONES Y DATOS DISPONIBLES

Las redes públicas de datos hidroclimáticos básicos son las descritas seguidamente. Todos estos datos pueden facilitarse libremente a los interesados por sus agencias responsables, bien bajo petición específica o mediante descarga directa de los correspondientes servidores.

2.2.1. RED AEMET

Como se ha indicado, la red AEMET dispone de distintas estaciones con longitudes de datos muy variables y mayor abundancia desde los años 50 del pasado siglo. Las figuras y tablas adjuntas muestran estas estaciones para las dos variables climáticas fundamentales de precipitaciones y temperaturas, y permiten apreciar su densidad y distribución espacial.

2.2.1.1. PRECIPITACIÓN

Las estaciones disponibles AEMET son las mostradas en la figura. Como puede verse, dentro de la ventana la mayor concentración de estaciones se produce en la zona centro y norte de Madrid, con relativamente pocas en la cuenca de cabecera aguas arriba de Bolarque.

Ha de señalarse que de todas esas estaciones algunas pueden estar ya dadas de baja o han sido sustituidas por otras próximas automáticas.

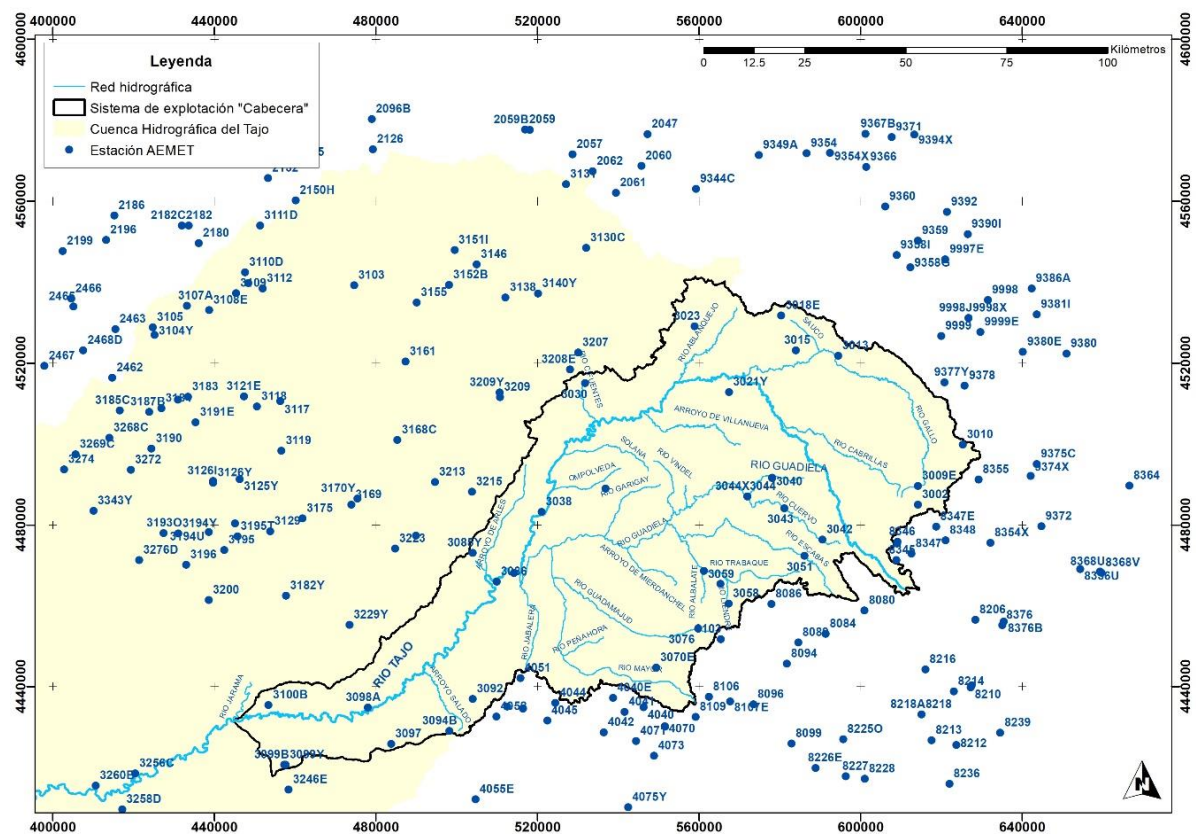


Figura 2. Localización de estaciones de precipitación AEMET

2.2.1.2. TEMPERATURAS

Las estaciones AEMET con registro de temperaturas son las mostradas en la figura.

Los contrastes realizados sobre la rejilla de precipitaciones muestran un buen acuerdo con los datos de estaciones pluviométricas independientes, no empleadas en la generación de la rejilla y empleadas para chequeo, con correlaciones iguales o mayores de 0'8. En general las diferencias observadas son de unas pocas décimas de mm/día, con errores medios cuadráticos inferiores a los errores asumidos para las observaciones, y una buena reproducción del comportamiento estacional.

Puesto que obviamente el área de estudio de cabecera del Tajo queda completamente cubierta por estas rejillas, en los análisis hidrológicos las emplearemos de forma rutinaria en lugar de las series de datos de las estaciones terrestres. Específicamente se emplearán las versiones más recientes de rejillas de precipitaciones y temperaturas máxima y mínima diarias desarrolladas por AEMET en la citada colección AEMET_v20, proyectadas en UTM-30N con resolución de 5x5 km, y extendidas a lo largo de 70 años, desde 1951 hasta 2020. La figura adjunta muestra la superposición de estas rejillas sobre la zona de estudio, pudiendo observarse su adecuada resolución espacial.

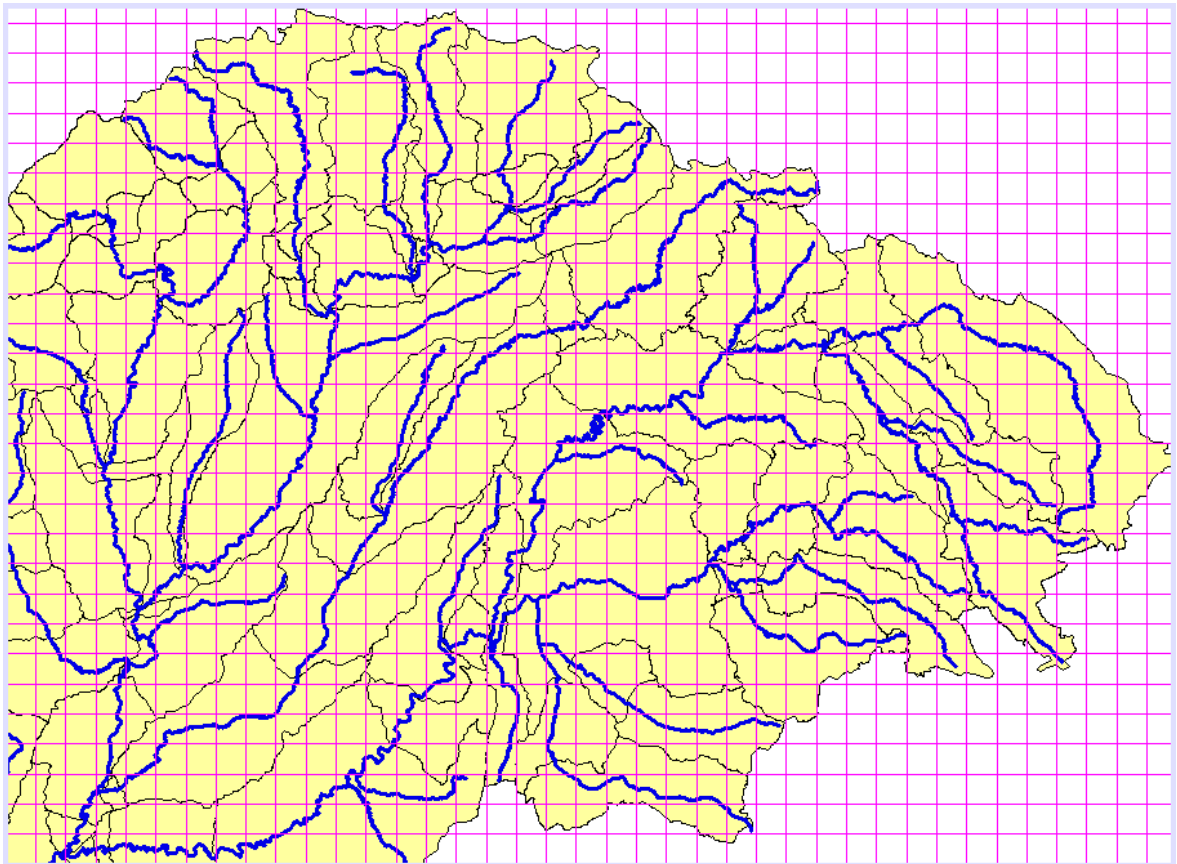


Figura 4. Rejilla AEMET proyectada a UTM-30N y superpuesta al área de cabecera

2.2.2. RED SIAR

SIAR dispone de 15 estaciones en las inmediaciones del área de estudio, en las provincias de Guadalajara y Cuenca, de las que unas 10 estaciones están en la zona cabecera o son muy próximas a la misma.

Num.	Código estación	Nombre	XUTM	YUTM	ZMSNM	Estado	Año inicio	Año fin
8155	CUE4	Barajas de Melo	505513	4440657	707	Alta	2000	
8156	CUE5	Cañete	615295	4431928	1053	Alta	2000	
8157	CUE6	Mariana	573325	4446931	963	Baja	2000	2003
8158	CUE7	Villaconejos de Trabaque	557377	4474010	810	Alta	2000	
8160	CUE9	Mariana2	573220	4445173	940	Alta	2004	
8173	GUA1	Finca el Serranillo: Vivero forestal	485400	4500964	665	Baja	1999	2006
8174	GUA2	Jadraque	504592	4530814	808	Alta	1999	
8175	GUA3	Armuña de Tajuña	498931	4486766	759	Alta	2000	
8176	GUA4	Alovera	479189	4493487	664	Baja	2000	2006
8177	GUA5	Prados Redondos	601452	4516945	1129	Alta	2000	
8178	GUA6	Illana	501226	4451126	589	Alta	2001	
8489	GUA7	Finca El Serranillo	485268	4500730	644	Baja	2007	2010
8490	GUA8	Alovera	479157	4493340	632	Baja	2007	2010
8179	GUA9	Marchamalo	482376	4503472	692	Alta	2010	

Num.	Código estación	Nombre	XUTM	YUTM	ZMSNM	Estado	Año inicio	Año fin
8246	MAD1	Center: Finca experimental	458007	4474353	556	Alta	2003	
8248	MAD2	Arganda	458267	4461771	544	Alta	2003	
8249	MAD3	Aranjuez	447752	4435312	490	Alta	2003	
8250	MAD4	Fuentidueña de Tajo	485861	4439986	551	Alta	2004	
8251	MAD5	San Martín de la Vega	451353	4453867	527	Alta	2005	
8252	MAD6	Chinchón	460390	4448896	529	Alta	2005	
8330	SOR1	Almazán	541593	4588961	947	Alta	1999	
8334	TER1	Calanda	644964	4487629	433	Alta	2003	
8336	TER3	Híjar	638875	4515843	300	Alta	2003	
8338	TER5	Teruel	655838	4468034	928	Alta	2005	
8342	TOL11	Magán2	419897	4421430	471	Alta	2004	
8344	TOL2	Magán	419485	4420912	507	Baja	1999	2003
8349	TOL7	Recas	416687	4434596	609	Alta	2000	
8350	TOL8	Villarrubia de Santiago	471591	4431820	573	Alta	2000	
8416	ZAR18	Daroca	632366	4552076	753	Alta	2005	

Tabla 1. Estaciones climatológicas SIAR

Los datos diarios disponibles en estas estaciones son las temperaturas máxima, mínima y media, la precipitación, la evapotranspiración de referencia, la humedad relativa, la radiación solar, las horas de sol, y la velocidad del viento.

Una información de utilidad básica en el análisis hidrológico es la relativa a las evapotranspiraciones potenciales y evaporaciones de los embalses. Las estaciones SIAR proporcionan estimaciones de estas series aproximadamente desde el año 2000, pero los datos de precipitaciones y temperaturas arrancan en fechas anteriores y, concretamente para la red AEMET_v20, se emplean datos desde 1950.

2.2.3. RED EVAPORIMÉTRICA. ANUARIOS DE AFOROS

Los datos evaporimétricos en la zona de estudio se limitan a las dos estaciones de los embalses de Entrepeñas y Buendía, tal y como muestran la figura y la tabla.

Ambas estaciones, basadas inicialmente en tanques evaporimétricos y posteriormente en atmómetros Piche, fueron dadas de baja hace ya años y presentan una baja fiabilidad, como se puso de manifiesto en estudios previos realizados en la zona. Por este motivo se ha optado por estimar la evaporación de los embalses asimilándola a la ET_0 , aproximación no exacta pero sin duda más encajada que la proporcionada por los evaporímetros.

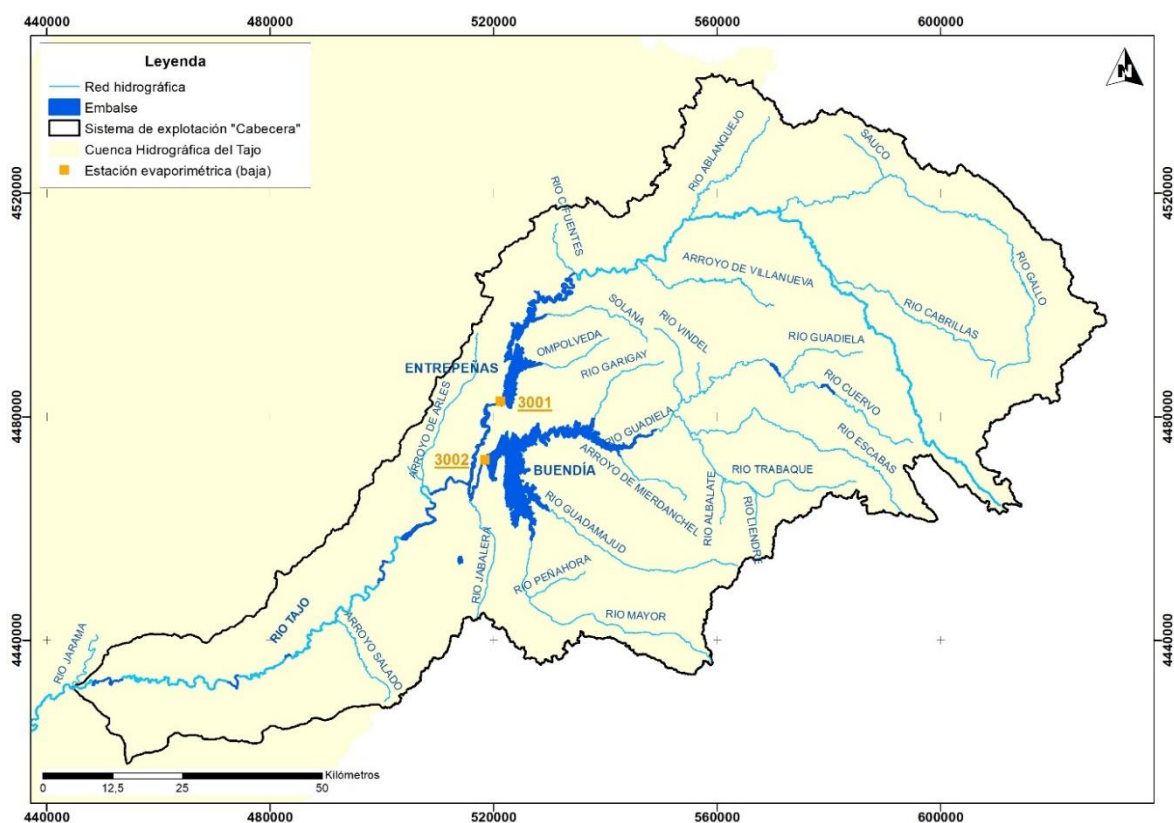


Figura 6. Estaciones evaporimétricas

	Código estación	Nombre	XUTM	YUTM	Estado	Año inicio	Año fin	Años con datos
1	3001	Entrepeñas	521277	4482675	Baja	1969	1975	7
2	3002	Buendía	518455	4472242	Baja	1965	1998	34

Tabla 2. Estaciones evaporimétricas

2.2.4. DATOS SELECCIONADOS

A los efectos de la caracterización y modelación hidrológica de la cabecera, se consideran los datos climáticos básicos de precipitaciones y temperaturas máxima y mínima diarias proporcionados por la rejilla AEMET, y los datos de evaporación y evapotranspiración proporcionados por las estaciones de la red SIAR.

Como se señaló, las series de precipitaciones y temperaturas diarias disponibles en rejillas se extienden desde 1951 hasta 2020, obviamente sin interrupciones, y los de SIAR desde 2000 hasta la actualidad.

La estimación de mallas de ETP consistentes con las AEMET permite disponer finalmente de 4 series de datos (precipitación, temperatura máxima, temperatura mínima y evapotranspiración potencial de referencia), a escala diaria desde 1951 a 2020, y en cada uno de los puntos de la rejilla adoptada AEMET, con resolución de 5 km, cubriendo toda el área de estudio.

Esta información puede obviamente agregarse espacialmente a las escalas de las subcuencas que se desee, y temporalmente a la escala mensual, anual o cualquier otra supradiaria que resulte de interés. Con esta estructura de datos climáticos se posibilita la aplicación de modelos agregados, distribuidos o semidistribuidos, y a escala diaria, mensual o anual.

3. FORONOMÍA. CAUDALES OBSERVADOS

3.1. INTRODUCCIÓN

Tras la consideración de los datos climáticos, en este capítulo se procede al análisis de los datos foronómicos, con especial atención a la calidad y consistencia de los datos de caudales fluviales en la cabecera alta del Tajo, entendiendo por tal toda su cuenca vertiente hasta el embalse de Bolarque. Adicionalmente, y a los efectos de la circulación de caudales en el eje del río, se considera también el tramo fluvial desde Bolarque hasta Aranjuez.

Este análisis de datos disponibles tiene por objetivo identificar y verificar la consistencia de los registros foronómicos en ríos, canales y embalses, depurar posibles errores de las estaciones, contrastar las series entre sí y, en definitiva, realizar un control de calidad previo antes de abordar otros procesos de análisis o modelación que requieran tomar estos datos fundamentales como punto de partida.

El análisis concluirá en definitiva con unos conjuntos de series de caudales en distintas estaciones, a distintas escalas temporales, que se consideran suficientemente fiables, contrastados, y depurados, pudiendo en consecuencia ser utilizados en análisis hidrológicos posteriores.

3.2. INFORMACIÓN DISPONIBLE

3.2.1. REDES Y ESTACIONES

La información foronómica utilizada ha sido obtenida de los datos oficiales del Anuario de Aforos 2017-2018, último publicado hasta la fecha, ofrecido por el Centro de Estudios Hidrográficos en su página web, y en el que se muestran los datos hidrológicos registrados por la Red Oficial de Estaciones de Aforo (ROEA). Esta red suministra información relativa a aforos fluviales en ríos, así como datos de embalses y canales.

Para la revisión de la información se han tenido en cuenta:

- La base de datos oficial del Ministerio, en formato mdb
- El servicio de acceso WMS de acceso a las fichas de las estaciones
- Las fichas del CEDEX
- La cobertura espacial ROEA de la Confederación Hidrográfica del Tajo

En el caso de los aforos se incluye la superficie (km²) vertiente a cada punto, obtenida a partir de las fichas oficiales del CEDEX. Para la base de datos y las fichas del Ministerio unas veces se incluye la superficie receptora y otras la superficie de toda la cuenca del cauce al completo. En algún caso, como por ejemplo en 3006 (Entrepeñas embalse y aforo) se

Ha de señalarse que aunque el Anuario incorpora la práctica totalidad de estaciones existentes, y desde luego todas las significativas, hay algunas que no se encuentran incluidas y de las que en consecuencia no se dispone de información. Es el caso, por ejemplo, de las presas de La Tosca en el río Cuervo, aguas arriba del Molino de Chíncha, o las de Las Librerías y Los Tilos, también aguas arriba del Molino de Chíncha y en el río Guadiela.

Estas presas, vinculadas a pequeños aprovechamientos hidroeléctricos, son funcionalmente azudes con muy reducida capacidad de embalse, que podría distorsionar ligeramente los flujos diarios desviando del régimen natural las entradas al Molino de Chíncha. A escala mensual o anual su efecto es inapreciable y a escala diaria es irrelevante a efectos prácticos. Otros pequeños embalses no incluidos son La Ruidera, en el Guadiela, o La Chorrera y la Ermita, en el Tajo. La figura adjunta muestra los aprovechamientos hidroeléctricos de la zona, siempre asociados a pequeños azudes de derivación o carga, según se muestran en el Plan Hidrológico de esa demarcación. Por lo general, su efecto sobre la alteración del régimen de caudales es inapreciable para periodos temporales mayores del día.

Las tablas adjuntas muestran la relación de estaciones de aforo en ríos (33), aforos en canales (7), y embalses (7) tomadas del Anuario, actualizado conforme a la última edición publicada (2017-18), junto con sus características fundamentales.

Puede verse que la codificación de 4 dígitos puede ser coincidente en aforos y embalses pese a tratarse de tipos de estaciones distintos, lo que se debe en general a que había una antigua estación de aforos en un lugar donde se ha construido una presa, que hereda su codificación, y que usualmente acaba dando de baja el antiguo aforo y sustituyendo su serie de datos. Es el caso p.e. de Entrepeñas, Buendía, Bolarque, Almoguera, o el Molino de Chíncha. En el caso de Almoguera, además del embalse hay dos estaciones de aforo muy próximas pero distintas aunque con el mismo nombre, la 3009 situada aguas arriba del embalse, y la 3149 situada aguas abajo.

Asimismo se observa que los datos publicados de canales no se extienden hasta el último año con regularidad. Examinando Anuarios anteriores puede verse que en el correspondiente a 2015-16 no llegan al último año de los aforos fluviales, y se incluyen tan solo dos estaciones (3401 y 3402) de las siete ofrecidas en el anterior Anuario 2013-14. Posteriormente se vuelven a mostrar las siete estaciones pero sin que las series se hayan actualizado hasta las fechas de cierre.

	Código estación	Nombre	Río	XUTM	YUTM	Estado	Año inic	Año fin	Sup. (km2)
1	3001	Peralejos de las Truchas	Tajo	590373	4494253	Alta	1945		410
2	3005	Trillo	Tajo	534988	4505111	Alta	1934		3253
3	3006	Entrepeñas	Tajo	521168	4482467	Alta	1954		3829
4	3007	Bolarque	Tajo	515396	4467972	Alta	1955		7402
5	3008	Zorita	Tajo	508729	4466212	Alta	1967		7452
6	3009	Almoguera	Tajo	503505	4458195	Alta	1967		7750
7	3011	Aranjuez	Tajo	449485	4432722	Baja	1912	1985	9340
8	3023	La Flamenca	Tajo	444376	4431480	Baja	1912	1931	20832
9	3025	Alcocer	Guadiela	532396	4477027	Baja	1912	1914	2067
10	3030	Ventosa	Gallo	587251	4520316	Alta	1945		944
11	3031	Hoz Seca	Hoz Seca	594375	4487325	Alta	2010		175
12	3033	Sacedón	Tajo	521851	4483062	Baja	1912	1931	3782
13	3034	Orihuela del Tremedal	Gallo	615812	4489868	Alta	2010		31

	Código estación	Nombre	Río	XUTM	YUTM	Estado	Año inic	Año fin	Sup. (km2)
14	3040	Santa María del Val	Cuervo	582124	4483309	Alta	2010		116
15	3041	Alcantud	Guadiela	557128	4484316	Alta	1945		666
16	3043	Buendía	Guadiela	518346	4472034	Alta	1954		3342
17	3045	Priego_Escabas	Escabas	558403	4477230	Alta	1912		345
18	3149	Almoguera	Tajo	502711	4456770	Alta	2010		7880
19	3172	Huete	Mayor	526480	4446764	Alta	1965		430
20	3173	La Peraleja	Guadamejud	538485	4456983	Alta	1966		253
21	3186	Priego_Trabaque	Trabaque	557154	4475104	Alta	1969		361
22	3201	Molino de Chinchá	Guadiela	569606	4489353	Alta	1947		354
23	3248	Fuentidueña	Tajo	487218	4439887	Alta	2010		8528
24	3249	Jabalera	Jabalera	519201	4459732	Alta	1977		84
25	3258	Embocador	Tajo	452121	4432823	Alta	1979		9312
26	3259	Villarrubia de Santiago	Tajo	468775	4432107	Alta	1979		9048
27	3268	Taravilla	Cabrillas	587371	4503726	Alta	1982		206
28	3269	Cereceda	Solana	529486	4498257	Alta	2008		105
29	3270	Pareja	Ompolveda	529051	4489467	Baja	1980	2007	117
30	3271	Pastrana	Arlés	506281	4468817	Alta	1984		625
31	3500	Gárgoles de Abajo	A. Cifuentes	531387	4509247	Alta	2016		41
32	3908	Maquilón	Tajo	503620	4458242	Baja	1912	1924	7698
33	3909	Valdajos	Tajo	465600	4432633	Baja	1912	1948	8944

Tabla 3. Estaciones de aforo en ríos

	Código estación	Nombre	Río	XUTM	YUTM	Estado	Año inic	Año fin	Sup. (km2)
1	3032	Barranco Hoz Seca	Hoz Seca	594379	4487280	Alta	2010		179
2	3206	Canal de Las Aves	Tajo	453395	4433008	Baja	1967	2003	9297
3	3207	Canal Caz Chico	Tajo	453290	4434858	Baja	1967	2003	9294
4	3214	Acequia El Tajo	Tajo	465860	4432788	Baja	1967	2002	9000
5	3216	Canal Estremera	Tajo	498870	4449697	Baja	1969	1999	7850
6	3401	Túnel Entrep.-Buendía	Tajo	523051	4481209	Alta	1960		3782
7	3402	Trasvase Tajo-Segura	Tajo	514038	4455052	Alta	1969		

Tabla 4. Estaciones de aforo en canales

	Código estación	Nombre	Río	XUTM	YUTM	Estado	Año inic	Año fin	Sup. (km2)
1	3006	Entrepeñas	Tajo	521168	4482467	Alta	1954		3842
2	3007	Bolarque	Tajo	515396	4467972	Alta	1955		7403
3	3008	Zorita	Tajo	508729	4466212	Alta	1967		7455
4	3009	Almoguera	Tajo	503505	4458195	Alta	1967		7778
5	3043	Buendía	Guadiela	518346	4472034	Alta	1954		3318
6	3201	Molino de Chinchá	Guadiela	569606	4489353	Alta	1947		360
7	3257	La Bujeda	Tajo	514080	4454892	Alta	1989		6

Tabla 5. Estaciones de embalses

La información proporcionada por las distintas estaciones depende obviamente de su tipología.

Para la red de aforos en ríos y canales la información fundamental es la de los datos medios diarios de caudal, en m^3/s , proporcionados en los Anuarios junto con sus correspondientes niveles de escala (m).

Estas series diarias de niveles-caudales constituyen el dato primario del que se derivan todos los otros también ofrecidos en los Anuarios, tales como los medios y extremos diarios y los agregados mensuales y anuales:

Caudales medios mensuales

Caudales medios anuales

Máximo caudal medio diarios del mes

Máximo caudal medio diario del año

Mínimo caudal medio diario del mes

Mínimo caudal medio diario del año

A los efectos perseguidos en este estudio, se analizarán las series diarias de niveles-caudales, $h-q$, aplicándoles distintos test de control de calidad, contrastes y rellenos hasta considerarlas validadas y darlas por satisfactorias. A partir de la serie de caudales diarios depurados se generarán automáticamente las agregadas mensuales o anuales que son a su vez objeto de otros contrastes y comparaciones adicionales, en un proceso de mejoras sucesivas. Finalmente se dispondrá de colecciones diarias, mensuales y anuales depuradas, no necesariamente correspondientes a las mismas ventanas temporales, y que se utilizarán para procesos posteriores.

3.2.2. DATOS UTILIZADOS

Operativamente, el proceso se inicia descargando del Anuario todas las series de todas las estaciones y formando un fichero único de valores diarios $h-q$. Como se mostrará, este fichero es procesado mediante programas de cálculo propios específicamente desarrollados para realizar estas tareas.

En cuanto a la red de embalses, en el Anuario se proporcionan a escala diaria dos datos de reservas y salidas $r-s$ de cada día, con los siguientes criterios:

Reserva o volumen embalsado en hm^3 . Sobre este dato es importante indicar que, siguiendo las convenciones históricas de cada momento, la reserva se considera en ocasiones la correspondiente a comienzos del día (tipo 2) y otras veces al final (tipo 1), efecto que resulta muy perceptible con los datos a escala mensual. Este efecto de diferentes tipos de datos no se da solo entre diferentes estaciones, sino también en diferentes periodos temporales dentro de una misma estación. Es necesario que los programas de cálculo para procesar estos datos detecten y contemplen ambas posibilidades adoptando un criterio coherente y homogéneo para todas las series.

Caudal medio diario de salida del embalse, en m^3/s , referido a la suma de todas las salidas, tanto a vertidos por los aliviaderos y los desagües, como a tomas de canales y derivaciones directas desde el embalse.

A partir de dicha información básica diaria, la ecuación del balance permite deducir directamente las entradas netas de cada día. Si además se tiene en cuenta el efecto de las pérdidas por evaporación o posibles filtraciones, cuando procedan, entonces pueden obtenerse las entradas brutas, que son en definitiva los caudales que circularían por el río si no hubiese embalse en ese punto.

Los datos diarios pueden agregarse para obtener mensuales y anuales o, alternativamente, de la serie diaria se pueden obtener las reservas de embalse mensuales correspondientes a la lectura de final de mes o principio del mes siguiente y las entradas netas medias mensuales al embalse. Estas últimas se deducen del balance directo entre las variaciones del volumen y los caudales de salida, sin tener en cuenta pérdidas. De igual forma se procede con el dato anual. Si se consideran las pérdidas, entonces pueden obtenerse los valores brutos de caudales de igual forma que con los datos diarios.

La tabla adjunta muestra los tipos de datos utilizados en los embalses según los periodos temporales. Según los Anuarios, los datos descargados de entradas y salidas mensuales de embalses se ofrecen en hm^3/mes en lugar de m^3/s , debiendo comprobarse en cada caso concreto.

Estación							
Aforo Diario		Embalse Mensual			Embalse Anual		
Nivel	Caudal	Reserva	Salida	Entrada	Reserva	Salida	Entrada
m	m^3/s	hm^3	m^3/s	m^3/s	hm^3	m^3/s	m^3/s

Tabla 6. Datos de embalses

Como se ha apuntado, para el proceso de los datos de embalse se analizan las series diarias y mensuales de balance, estimando previamente las evaporaciones mensuales unitarias medias bien a partir de los valores observados medios estacionales para cada mes en cada estación, o bien a partir de cálculos hidrometeorológicos.

Sumadas las evaporaciones y, en su caso, filtraciones, a las entradas netas, deducidas del balance, se obtienen las entradas brutas y, como se ha apuntado, a partir de las series depuradas diarias se generarán automáticamente las agregadas mensuales o anuales que interesen para procesos posteriores. Realizar los balances a escala diaria supone un mayor esfuerzo de cómputo pero permite obtener resultados con mayor resolución. El supuesto de valores constantes para cada mes puede introducir pequeñas distorsiones en las transiciones diarias entre meses pero son irrelevantes a efectos prácticos, máxime considerando las incertidumbres en los propios valores de las evaporaciones.

Por otra parte, es usual que las entradas deducidas de los balances diarios muestren pequeñas oscilaciones atribuibles a ruido numérico por efectos del redondeo e imprecisiones de medida. Si se estimase necesario, existen diferentes técnicas numéricas de filtrado o basadas en ondículas para suprimir estos ruidos y generar hidrogramas limpios de ruido, libres de oscilación.

Operativamente, como en el caso de los caudales diarios, se descargan todas las series de todas las estaciones de embalse formando un fichero único de valores de reservas-salidas, *r-s*, y se preparan otros ficheros de evaporaciones medias mensuales unitarias en las distintas estaciones representativas del embalse (mm/mes) y de características batimétricas de los embalses (relación superficies-volumenes) y eventuales filtraciones.

Estos ficheros de series, evaporaciones y filtraciones, y batimetría, se procesan con programas de cálculo propios, específicamente desarrollados para realizar los balances completos de embalses a escala diaria y mensual. Los procesos incluyen el cómputo de balances netos, la estimación de evaporaciones y filtraciones, y el cálculo de entradas totales brutas o reales al embalse, junto con mecanismos de control del criterio de definición de reservas, a comienzos o finales del periodo, como antes se apuntó. Los resultados hidrológicos del cálculo del balance son colecciones de series diarias conteniendo:

- 1 F Fecha
- 2 R Reserva embalsada al final del día (hm^3)
- 3 S Salida total media diaria (m^3/s)
- 4 N Entrada neta media diaria (m^3/s)
- 5 A Superficie media inundada en el día (has)
- 6 V Evaporación producida en el día ($\text{hm}^3/\text{día}$)
- 7 E Entrada total o bruta media diaria truncada (m^3/s)
- 8 YZ Entrada total media diaria sin truncar (m^3/s)

Todos estos procesos preliminares, y sus resultados obtenidos para la cabecera del Tajo, se mostrarán con detalle en los capítulos que siguen.

Nótese que, como ya se apuntó, los análisis hidrológicos preliminares concluyen con unas colecciones de series de caudales circulantes, a distintas escalas temporales, en aquellos puntos donde se dispone de una estación de aforos con datos $h-q$, o entradas y salidas en los puntos donde se ubica un embalse con datos $r-s$. Para ello se realizan tanto chequeos locales puntuales como regionales, por tramos y con estaciones próximas, que aseguren la coherencia de los datos y detecten inconsistencias locales. Finalmente, tras los análisis preliminares, la evaluación de recursos requeriría realizar, en su caso, los correspondientes rellenos de las series y restituciones a régimen natural. El proceso seguido se muestra a continuación.

3.3. ANÁLISIS PRELIMINARES

3.3.1. INTRODUCCIÓN. FASES DE LOS ANÁLISIS PRELIMINARES

Denominaremos como *análisis preliminares* al conjunto de procesos y controles a que han de someterse los datos hidrológicos directos descargados del Anuario para ser considerarlos como válidos y utilizarlos en los estudios y modelos hidrológicos posteriores que los requieran. En nuestro caso estos análisis hidrológicos se referirán a los caudales circulantes y la evaluación de recursos hídricos en el área considerada. Para desarrollar tales evaluaciones, en esta investigación se llevarán a cabo cuatro tipos de análisis preliminares:

1. Control de calidad de las series $h-q$ para cada estación de aforos
2. Proceso de datos diarios de embalse
3. Análisis de coherencia por tramos de los datos de aforo y de embalse
4. Integración y creación de serie unificada de flujos

En primer lugar, se aborda el examen y control de calidad de las series diarias de niveles-caudales $h-q$ de forma aislada cada estación de aforo, comprobando anomalías en ambos registros y puntos singulares indicativos de error, teniendo en cuenta que las curvas de gasto evolucionan con el tiempo dando lugar a diferentes subconjuntos de puntos que hay que discernir. El conjunto de chequeos realizados se describe posteriormente. El resultado de este primer control es un conjunto de series de caudales diarios validadas y, en su caso, con algunos huecos de caudales rellenados. El relleno se lleva a cabo en el supuesto, que se da en ocasiones, de que existan datos de niveles sin sus correspondientes caudales. En este caso se examinan las curvas de gasto en el entorno del tramo sin datos, se estiman analíticamente las curvas a partir de los datos existentes del entorno, y se aplican las curvas estimadas a los datos de nivel, obteniendo los correspondientes caudales. Como puede verse, este tipo de análisis se lleva a cabo individual e internamente para cada estación, sin consideración conjunta con ninguna otra estación próxima.

Una segunda fase del análisis parte de los datos diarios de embalses, estima sus pérdidas diarias a partir de información de evaporaciones medias y batimetrías, realiza los balances diarios y obtiene las series de entradas brutas al embalse, asimilables a su caudal real circulante si no existiera el embalse y al régimen natural si no hubiese otras afecciones aguas arriba. Estos datos de caudal son en principio conceptualmente similares a los de las estaciones de aforo y susceptibles por tanto de un tratamiento conjunto, que es el abordado en la siguiente fase.

En efecto, a partir de las series de caudales procedentes bien de estaciones de aforo o bien derivadas de embalses, obtenidas tras las fases anteriores, una tercera fase de análisis considera los diferentes tramos fluviales contrastando la coherencia de los flujos observados en las distintas estaciones de cada tramo. Para ello puede también utilizarse la información hidrogeológica existente, que puede revelar circunstancias de drenaje, recargas o descargas a la red fluvial, agotamientos, etc. que deban considerarse, así como situaciones singulares como es el caso del túnel que conecta Entrepeñas y Buendía y las alteraciones de flujos circulantes que ello induce. El resultado es, en definitiva, un perfeccionamiento de las series de caudales al incorporar información de otras estaciones próximas, e incluso un descarte de aquellas estaciones que muestran errores e inconsistencias que recomiendan su desestimación. Este contraste puede llevarse a cabo utilizando distintas resoluciones temporales de las series: diarias, mensuales o anuales.

Un cuarto nivel de análisis combinaría los resultados obtenidos en los niveles anteriores, contrastando e integrando aforos de río con embalses y generando series de caudales diarios, mensuales y anuales que incluyen toda la información de flujos existente en la zona estudiada.

Tras todo ello, y como ya se apuntó, se tendrá una colección de flujos circulantes consistente y contrastada, y se estará en condiciones de plantear el cálculo de la restitución a régimen natural y la aplicación de modelos hidrológicos, lo que constituye un nivel de proceso posterior, una vez concluidos los análisis preliminares de datos a los que se refiere este capítulo.

En los siguientes epígrafes se describen las cuatro fases antedichas y los distintos resultados obtenidos.

3.3.2. EXAMEN Y CONTROL DE CALIDAD DE LAS SERIES DIARIAS EN ESTACIONES DE AFORO H-Q (FASE 1)

Como primera fase de los análisis preliminares, se ha llevado a cabo un examen y control de calidad previo e individualizado de las series de aforo diarias $h-q$ de todas las estaciones de aforo en ríos en la zona de estudio. Para ello, y como ya se indicó, se comienza por identificar las estaciones de la zona y descargar todas las series diarias $h-q$ formando un fichero único formado por mero anexo secuencial de todas las estaciones, con el mismo formato original de la descarga. Este fichero único es la base para los procesos y cálculos posteriores.

3.3.2.1. INSPECCIÓN DE LAS SERIES. DISPONIBILIDAD DE DATOS

Una vez descargados los datos de las estaciones foronómicas y unificados en el fichero único, con el mismo formato original de las descargas, el primer paso es la conversión de este fichero al formato estándar de series MHAX, siendo este estándar el que se empleará para los procesos de cálculo. Una vez en este formato, el primer análisis de los datos originales es la inspección de las características básicas de fechas y huecos de las diferentes series.

Para ello, y como un primer resultado generado directamente a partir del fichero único de datos diarios, la tabla adjunta muestra la disponibilidad de datos existente (último Anuario publicado 2017-18) para todas las 33 estaciones ya mostradas anteriormente, y las principales características de las series registradas en cada estación (sin dato se codifica como -999).

Estac	Ain	Afi	nan	nhnoa	nqnoa	%h	%q	hmin	hmax	qmin	qmax	qmed	apoAn
	----- (años) -----			---- (días) ----		----- (%) -----		----- (m) -----		----- (m³/s) -----			(hm3)
3001	1945	2017	73	26298	26299	100.00	100.00	0.18	3.41	0.010	179.895	4.80	151.3
3005	1933	2017	85	27394	27394	89.29	89.29	-0.38	4.51	2.030	385.200	16.77	529.0
3006	1934	1986	53	3652	16071	19.23	84.62	0.90	4.10	0.000	484.925	20.35	641.7
3007	1911	1986	76	8335	22060	30.43	80.53	0.10	6.50	0.000	755.125	35.34	1114.6
3008	1964	1986	23	0	8035	0.00	100.00	-999.00	-999.00	0.000	188.000	32.91	1037.8
3009	1964	1986	23	0	8035	0.00	100.00	-999.00	-999.00	0.000	213.900	33.95	1070.6
3011	1911	1985	75	17289	17160	63.96	63.49	0.04	6.50	0.000	237.500	30.16	951.0
3023	1912	1936	25	6471	6265	73.82	71.47	0.00	5.60	4.972	575.000	67.11	2116.5
3025	1911	1915	5	1096	1077	75.02	73.72	0.50	3.60	3.000	73.009	11.46	361.4
3030	1945	2017	73	26297	26297	100.00	100.00	0.00	2.18	0.013	36.000	1.80	56.7
3031	2010	2017	8	2557	2557	100.00	100.00	0.10	0.71	0.376	11.944	1.43	45.2
3033	1911	1936	26	7305	7198	79.99	78.82	0.60	6.50	4.860	122.000	18.62	587.3
3034	2010	2017	8	2557	2557	100.00	100.00	0.01	0.27	0.003	3.960	0.13	4.0
3040	2010	2017	8	2557	2557	100.00	100.00	1.35	2.83	0.122	35.733	1.22	38.3
3041	1945	2017	73	18620	18618	70.80	70.80	0.12	4.59	0.000	128.000	5.67	178.9
3043	1911	1986	76	9454	21333	34.51	77.87	0.10	6.80	0.000	307.000	16.68	525.9
3045	1911	2017	107	23200	21481	59.92	55.48	0.00	3.50	0.000	84.500	3.52	111.1
3149	2010	2017	8	2557	2557	100.00	100.00	0.51	0.96	5.040	28.887	10.86	342.4
3172	1965	2017	53	16584	16576	87.32	87.27	0.05	2.80	0.000	26.850	0.59	18.5

Estac	Ain	Afi	nan	nhnoa	nqnoa	%h	%q	hmin	hmax	qmin	qmax	qmed	apoAn
	----- (años) -----			---- (días) ----		----- (%) -----		----- (m) -----		----- (m ³ /s) -----			(hm3)
3173	1966	2017	52	16886	16885	90.65	90.64	0.00	2.04	0.000	21.158	0.25	8.0
3186	1968	2017	50	17683	17677	98.80	98.77	0.00	2.74	0.000	36.099	0.60	19.1
3201	1965	1986	22	0	7651	0.00	99.75	-999.00	-999.00	0.000	34.618	2.64	83.3
3248	2009	2017	9	2535	2809	86.76	96.13	0.40	1.74	4.463	27.678	11.26	355.0
3249	1976	2017	42	8196	8196	54.73	54.73	0.00	0.84	0.000	2.829	0.07	2.1
3258	1978	2017	40	11682	11700	82.01	82.13	0.00	2.34	2.207	103.040	10.44	329.3
3259	1978	2017	40	12917	13282	90.68	93.24	0.10	3.00	0.305	90.550	12.05	380.0
3268	1982	2017	36	12784	12784	100.00	100.00	0.04	0.85	0.109	19.878	0.91	28.5
3269	2007	2017	11	3484	3484	95.37	95.37	0.00	0.54	0.000	5.794	0.18	5.6
3270	1979	2007	29	9366	8271	91.58	80.87	0.03	1.03	0.004	3.197	0.16	5.0
3271	1983	2017	35	4324	4324	34.82	34.82	0.21	0.40	0.033	0.770	0.24	7.6
3500	2016	2017	2	365	365	100.00	100.00	0.35	0.45	0.452	0.834	0.65	20.4
3908	1911	1940	30	4369	4169	41.24	39.36	0.30	6.00	8.000	235.258	39.12	1233.6
3909	1911	1948	38	9400	8120	69.55	60.08	0.10	8.00	1.000	929.500	32.64	1029.2

Tabla 7. Características de los datos de aforo diarios registrados en las diferentes estaciones

La tabla ofrece, para cada estación, el año en que aparece el primer registro en el fichero (*Ain*), el año del último (*Afi*), y el periodo en años correspondiente (*nan*). Tras ello, el número de registros (de días) con niveles no ausentes (*nhnoa*) y con caudales no ausentes (*nqnoa*), y los porcentajes de datos no ausentes respecto al periodo total de cada estación (*%h* y *%q*). Seguidamente se muestran los valores mínimo y máximo de niveles (*hmin* *hmax*), así como los mínimos, máximo y medio de caudales (*qmin* *qmax* *qmed*). Por último se incluye una estimación de la aportación media anual calculada a partir del caudal medio diario (*apoAn*). Tal estimación ha de considerarse con cautela dado que las series diarias ni son ininterrumpidas ni cubren años completos.

Una primera figura adjunta muestra la presencia/ausencia de datos (0/1) para cada una de las 33 estaciones existentes, mientras que la segunda muestra sus correspondientes series de caudales (m³/s) registrados en los periodos con datos. Por último la figura siguiente muestra la evolución del número total de datos de las series (número de estaciones activas) mediante un gráfico apilado.

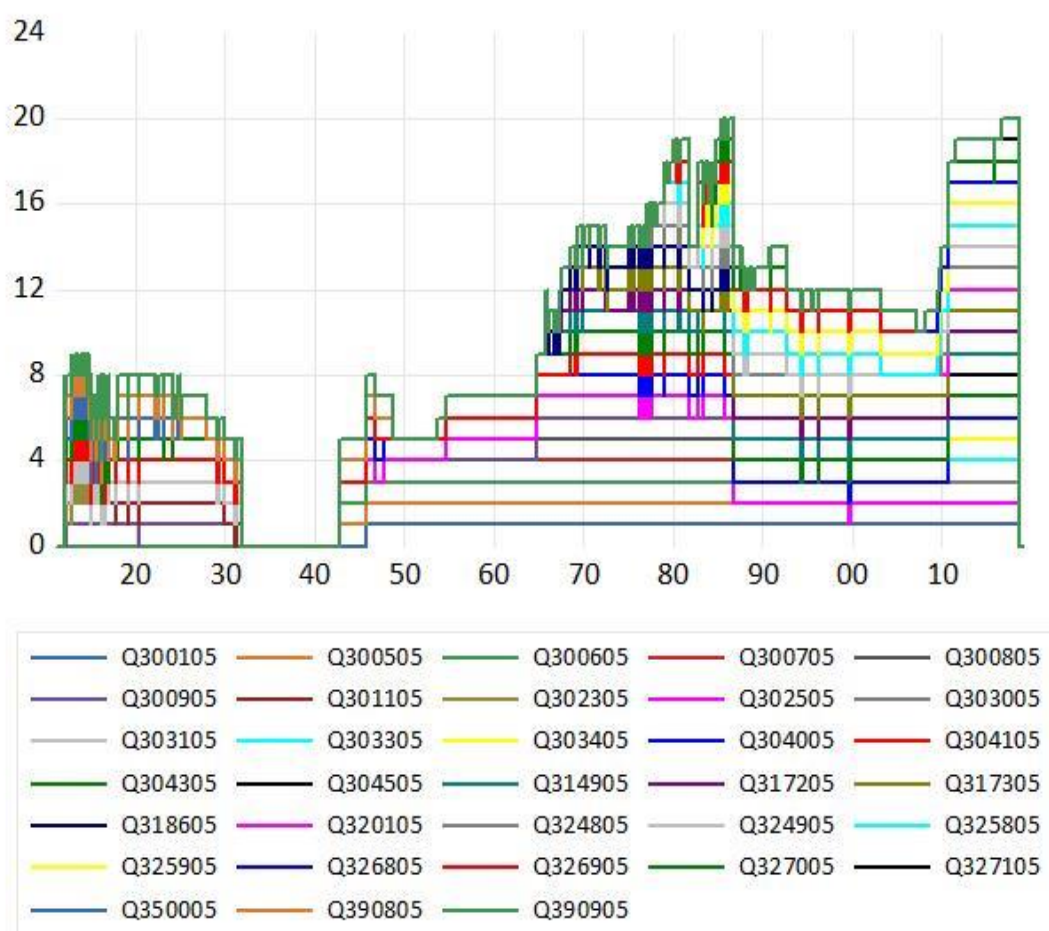


Figura 10. Serie con la evolución del número total de datos de aforo

Puede verse que de las 33 estaciones de aforos con datos, unas 20 se mantienen activas a fecha de hoy. Los datos más antiguos corresponden a 8 estaciones que se inician en 1911 (datos no ausentes a partir de 1912) y que disponen de series relativamente largas y completas (decenas de años). En los años 30 el registro se interrumpe por completo, reiniciándose ya entrados los 40. Por su parte, las estaciones activas más recientes se inician en 2010, e incluso una en 2016, disponiendo por tanto de un registro muy corto aunque, presumiblemente, de buena calidad.

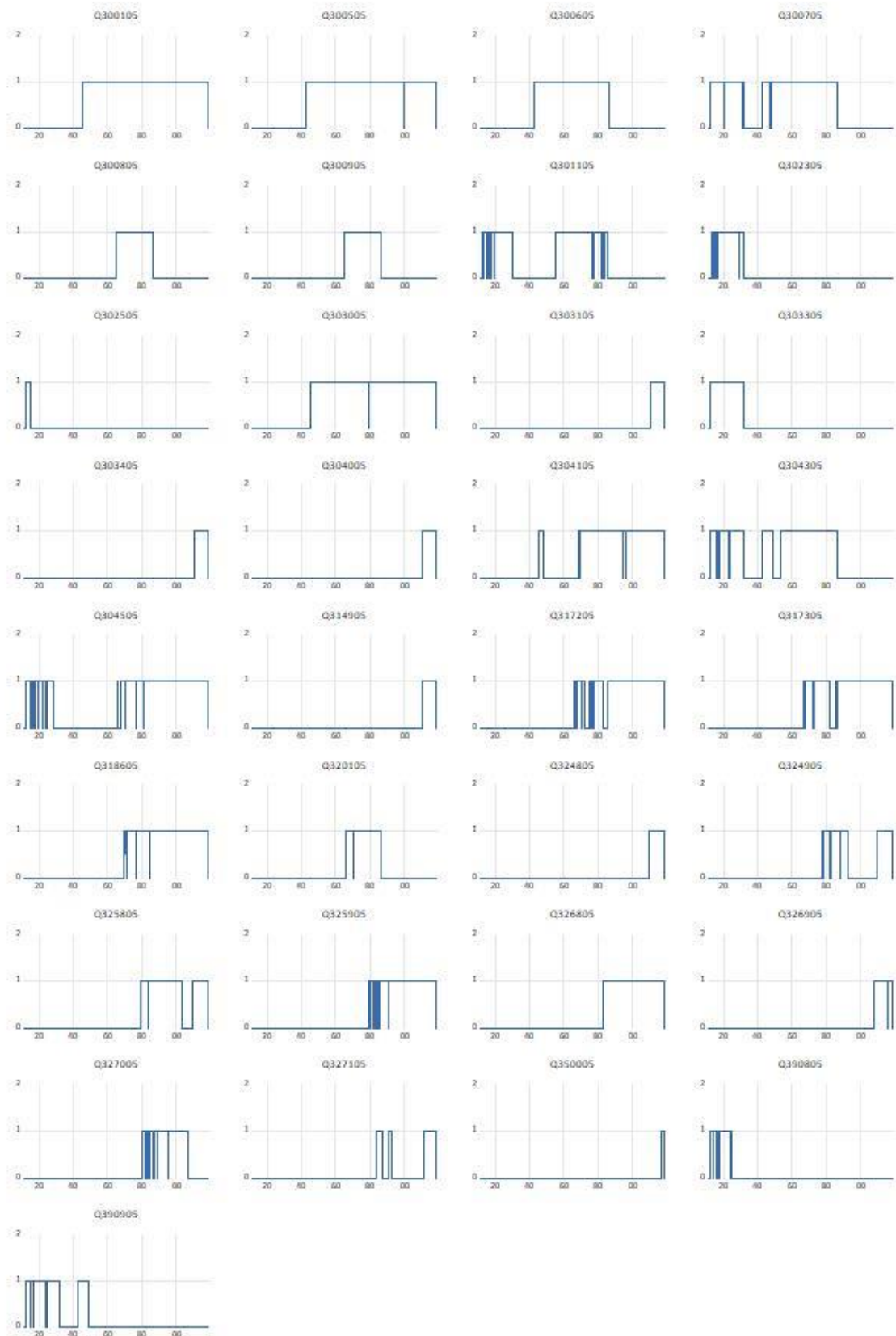


Figura 11. Presencia/ausencia de datos en las estaciones de aforo

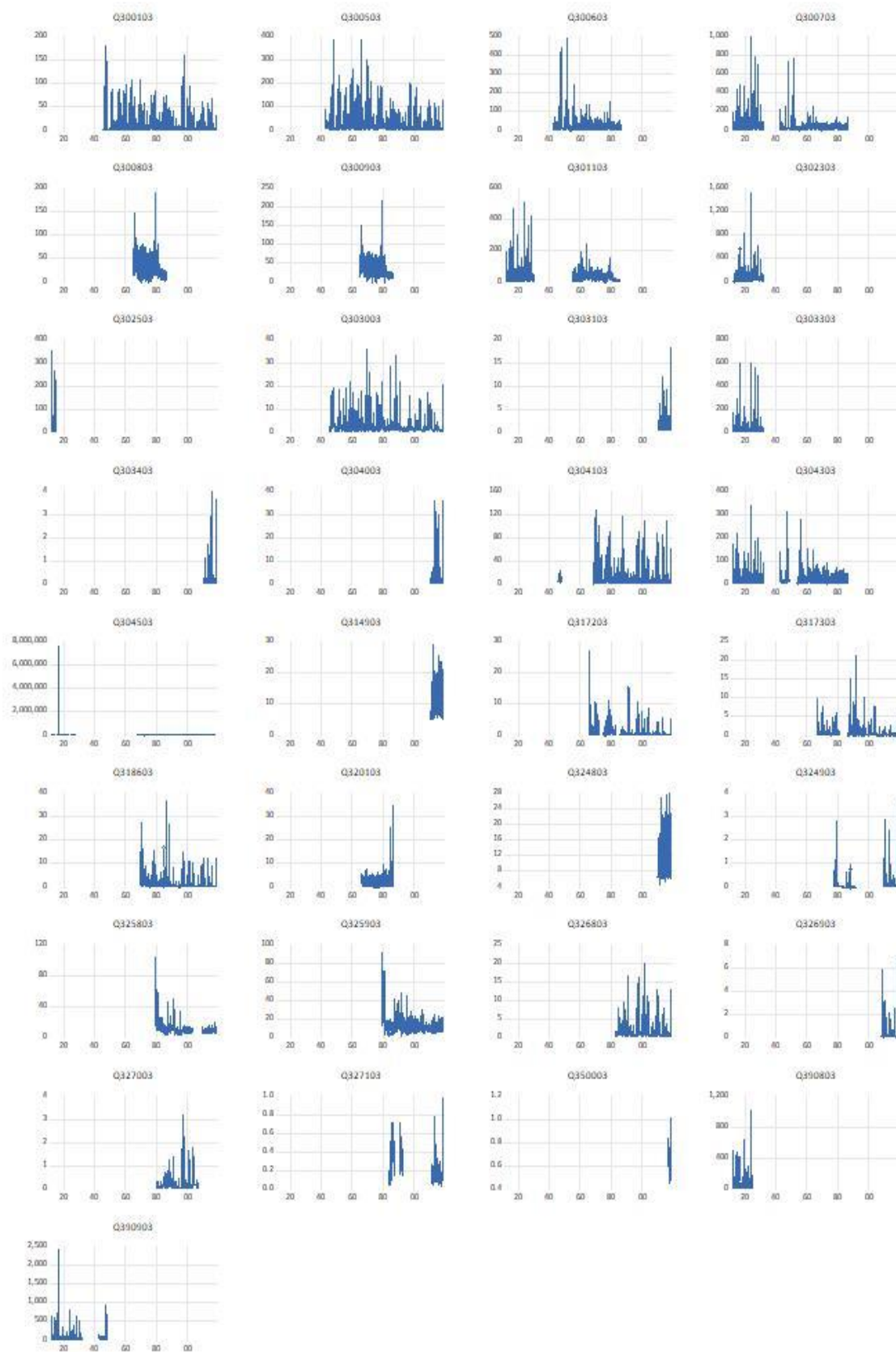


Figura 12. Series de caudales en las estaciones de aforo

A la vista de estos resultados se ha optado por elegir como ventana temporal de análisis la del periodo 1912 a 2017 (último año disponible), con 106 años.

El número total de datos de alturas diarias es de 316 214 y el de datos diarios de caudal es de 373 844, dando lugar a un conjunto total de 690 058 datos brutos a procesar.

Se observa asimismo que hay 3 estaciones (3008, 3009, 3201) sin datos de niveles, solo con caudales, y registros de 22-23 años. Para esas estaciones no es posible realizar contrastes de niveles y curvas de gasto, aceptándose inicialmente como válidos sus datos de caudales que superen los controles básicos.

También se observa que hay ocasiones en las que se dispone de niveles para algunos periodos temporales, pero no se han calculado los caudales correspondientes. Ello puede deberse a que no existe o hay dudas sobre la curva de gasto a emplear en cada caso. Si no es así y existe continuidad anterior-posterior en esta curva, puede procederse al relleno automático de caudales obteniéndola y aplicándola a los niveles dados, tal y como se indicó y se mostrará más adelante.

Como puede verse, en la zona de cabecera, aguas arriba de Aranjuez, las aportaciones medias anuales registradas circulantes oscilan entre 2 hm³/año en la estación 3249 y 1234 hm³/año en la 3908, en sus correspondientes ventanas temporales, diferentes en cada caso.

3.3.2.2. CONTROLES DE CALIDAD BÁSICOS. RANGOS Y GRADIENTES

El fichero de datos iniciales *h-q* de las diferentes estaciones se ha sometido a 13 controles de calidad básicos, detectándose distintas anomalías que, cuando se han considerado errores seguros, han sido corregidas.

Los controles básicos de calidad, relativos a una estación concreta, pueden clasificarse en dos grandes grupos, según se analice una serie o variable aislada de forma individual o se analice un conjunto de variables de forma simultánea. Para contrastes individuales, además de la inspección visual de la serie, siempre preceptiva en estos análisis, las pruebas de control básico de calidad son:

1. Ordenación de fechas (todos los datos registrados aparecen ordenados siguiendo la secuencia temporal).
2. El dato de fecha (año, mes, día) es consistente (años dentro del rango min-max admisible, meses de 1 a 12, días coherentes con su mes).
3. El dato está dentro del rango de valores que se considera admisible.
4. La variación del dato entre días consecutivos (en valor absoluto) es menor que la máxima variación considerada admisible.
5. La comparación anterior-posterior es consistente (se comparan 3 días consecutivos y se verifica que la diferencia entre el intermedio y la media del anterior y posterior no supera cierto umbral).

Otros análisis básicos no analizan una serie o variable aislada sino que emplean una variable asociada adicional, con la que mantiene una relación funcional que puede ser constante o variable en el tiempo. El caso usual de esta situación es el de la depuración conjunta de las series de niveles y caudales correspondientes a las estaciones de aforo. La relación entre ambas variables se expresa por la curva de gasto, en general supuesta de tipo potencial, y que puede experimentar cambios a lo largo del tiempo a consecuencia de cambios en la propia estación o en la morfología del cauce.

Una vez aplicados los controles básicos anteriores tanto a la serie de niveles como a la de caudales de forma aislada, puede verse si existe correspondencia entre la tendencia entre días sucesivos de niveles y la de caudales (ambos han de crecer o decrecer simultáneamente).

Además, es muy útil analizar visualmente las series niveles-caudales como gráficos XY. Estos gráficos mostrarán el aspecto de las curvas de gasto continuas (podría haber varias si ha habido cambios). Los puntos aislados anómalos revelan errores de datos que deben depurarse.

Para la detección automática de cambios en las curvas de gasto o relleno de caudales a partir de niveles, puede analizarse la relación potencial mediante una ventana móvil, o subserie extraída de la serie completa, a la que se ajusta una función de tipo potencial, registrando los parámetros correspondientes a cada fecha (p.e. pueden usarse ventanas centradas en cada dato de la serie, con longitudes iguales hacia atrás y hacia delante). La inspección de la evolución temporal de los parámetros del ajuste permite inferir posibles cambios estructurales en las curvas de gasto y, en consecuencia, realizar las correcciones y rellenos oportunos.

Se trata de un laborioso proceso que, pese a disponer de las necesarias ayudas automáticas de cálculo, resulta ser altamente interactivo, y que opera por aproximaciones sucesivas comenzando por los errores más obvios y groseros, hasta llegar a un estado en el que los posibles errores residuales no son evidentes y no es claro que deba procederse a su corrección ni el sentido que esta tendría.

Con el apoyo de programas específicos propios, este proceso se ha llevado a cabo para todas las series de todas las estaciones de aforo de cabecera, con los resultados finales mostrados en el correspondiente Anexo de depuración de datos diarios $h-q$.

Los principales errores detectados en el proceso (unos 400) se deben a anotaciones erróneas de nivel-caudal, fuera de márgenes o interrumpiendo la continuidad de las series. Los errores más frecuentes son el desplazamiento de la coma decimal, la confusión de cero/nulo, o errores en algún dígito de las cifras. Se observa asimismo que a lo largo del tiempo hay numerosos cambios en las curvas de gasto en casi todas las estaciones. En algunos casos los cambios se producen coincidiendo con el año hidrológico (p.e. la estación 3001 en los años 1974, 1982, 1993 y 2004; la estación 3268 en 2006; o la estación 3030 en 1981), lo que introduce ineludiblemente errores ocasionales en el caudal diario cuya subsanación no es posible con la información de que se dispone. A escala mensual o anual es posible que estos errores queden absorbidos o sean irrelevantes, lo que se comprobará en una fase posterior, al proceder al contraste con otras estaciones próximas a esas escalas temporales.

La observación de los gráficos de pares de valores comunes $h-q$ mostrados en el Anexo permite apreciar las diferentes curvas de gasto utilizadas a lo largo del tiempo, claramente perceptibles como alineamientos diferenciados de pares de valores. Mediante ajustes locales, esas curvas pueden emplearse tanto para la depuración de puntos erróneos, desviados del alineamiento, como para el completado de series mediante el relleno de segmentos que registran datos de nivel pero no de caudal.

Del total de 33 estaciones del Anuario hay 30 que incluyen pares $h-q$ comunes, y solamente 3 (3008, 3009 y 3201) que solo tienen datos de caudal pero no de nivel, no siendo posible obviamente depuración de curvas de gasto ni completado alguno en esos casos, y aceptándose en principio los datos de caudal sin esta posible corrección.

Metodológicamente, se ha desarrollado un procedimiento numérico de ayuda a la depuración que permite la inspección de los datos, la identificación de anomalías, y el ajuste y relleno

local mediante curvas potenciales. El procedimiento es altamente interactivo, y requiere de sucesivas iteraciones hasta llegar a una situación final considerada como válida, no susceptible de mayor depuración.

El Anexo muestra la colección completa de gráficos de datos diarios nivel-caudal de las diferentes estaciones, incluyendo tanto los datos originales (columna de la izquierda) como los finales tras el proceso de depuración (columna de la derecha), y tanto en escala ordinaria (primera fila) como logarítmica (segunda fila). Las curvas de gasto se muestran como aproximadamente rectas en esta escala, lo que facilita su inspección y depuración. Con ello, para cada estación, representada en una página, se ofrecen 5 gráficos. En la primera fila se muestran un primer gráfico, en la primera columna, con los datos de pares de puntos $h-q$ originales resultantes de la descarga, y un segundo gráfico, en la segunda columna, con los resultantes tras el proceso de depuración nivel-caudal realizada. En la segunda fila se muestran los mismos valores pero ahora en escala logarítmica, pudiendo apreciarse más claramente la configuración de las curvas. En la tercera fila se muestran las series temporales diarias de los valores $h-q$ log-transformados.

La inspección de estos gráficos muestra como el proceso de depuración consigue remover y corregir numerosos errores puntuales de los datos $h-q$, eliminando o sustituyendo anomalías evidentes. El conjunto de gráficos del Anexo da una idea muy ajustada de los datos de la estación, sus huecos de datos, los cambios de curvas de gasto, la linealidad y anomalías de las curvas etc.

En síntesis, la situación observada es:

3001 Numerosas curvas de gasto, con posibles errores puntuales pero no muchos. Aparentemente bien los q , sin segmentos de huecos para rellenar. La irregularidad decrece desde primeros de los 60.

3005, Numerosas curvas de gasto, con posibles errores puntuales pero no muchos. Un punto aislado erróneo muy destacado. Aparentemente bien los q , sin segmentos de huecos para rellenar. La irregularidad decrece desde finales de los 60.

3006, Pocas curvas de gasto por escaso periodo común, con posibles errores puntuales pero no muchos. Un punto aislado muy destacado. Aparentemente bien los q , sin segmentos de huecos para rellenar. La irregularidad decrece desde mediados de los 60.

3007, Pocas curvas de gasto por escaso periodo común, con varios errores puntuales fácilmente identificables. Aparentemente bien los q , sin segmentos de huecos para rellenar. La irregularidad podría decrecer desde mediados de los 60.

3008 y 3009 y 3201, No hay datos de niveles por lo que no se puede contrastar una curva de gasto. Aparentemente bien los q , sin segmentos de huecos para rellenar en 3008 y 3009 para las que la irregularidad decrece mucho desde primeros de los 80 (quizá por el ATS). En la 3201 la irregularidad aumenta desde mediados de los 80.

3011 y 3023 3025 3030 3033 3043 3045 3908 muestran pocas curvas de gasto y varios errores puntuales identificables. Aparentemente bien los q , sin segmentos de huecos para rellenar.

3031 3034 3040 3045 3149 3248 3258 3259 3268 3269 3270 3271 3500 muestran pocas curvas de gasto, sin que se aprecien errores puntuales identificables Aparentemente bien los q , sin segmentos de huecos para rellenar.

3041 3172 3173 3186 3249 3909 numerosas curvas de gasto, con pocos errores puntuales identificables Aparentemente bien los q , salvo pequeños segmentos a mediados de los 80. Sin segmentos de huecos para rellenar. Las 3249 3909 muestran datos dudosos.

3.3.2.3. COMPLETADO DE DATOS A PARTIR DE CURVAS DE GASTO

Tras el proceso descrito en el epígrafe anterior se dispondrá de una colección de series de niveles y caudales con los errores básicos (umbrales/gradientes admisibles y anomalías de las curvas de gasto) detectados y corregidos. El paso siguiente del proceso de depuración sería el de procurar el relleno de datos de caudales a partir de los niveles en aquellos segmentos donde sea posible.

Esta situación q ausente h no ausente se da en las estaciones 3270, 3033, 3041, 3045, 3186, 3172, 3173, 3025, 3043, 3007, 3908, 3909 y 3011. Para cada estación se han examinado las curvas de gasto que cubren los periodos temporales de interés, de forma que queden cubiertos de forma no ambigua por una sola curva. El resultado de este examen ha sido:

- 3270. Presenta dos ventanas extensas, sin puntos aislados. Una primera ventana (1981.1001 – 1982.0930) es ambigua (las curvas de gasto antes y después son diferentes) y no puede rellenarse. Una segunda ventana (1984.1001 – 1986.0930) puede rellenarse con la curva de gasto 1984.07-1987.12.
- 3033. Presenta numerosos puntos aislados y ventanas muy reducidas. Un primer periodo, desde el origen hasta 1913.02 puede cubrirse con una misma curva de gasto, desde 1913.03 hasta 1917.04 puede cubrirse con otra, y desde 1917.05 hasta 1929.12 se cubre con una tercera.
- 3041. Presenta tan solo dos valores puntuales que quedan cubiertos por la curva correspondiente a 1996.01-1998.09.
- 3045. Presenta numerosos puntos aislados y ventanas reducidas. Un primer periodo, desde el origen hasta 1912.12 puede cubrirse con una misma curva, entre 1913.01 y 1914.09 hay una segunda, entre 1914.10 y 1915.09 hay una tercera, entre 1915.10 y 1917.09 una cuarta, una quinta entre 1917.10 y 1928.09, una sexta entre 1978.10 y 1980.11, una séptima entre 1980.10 y 1982.09, y finalmente una octava entre 1985.10 y 1988.09. Al comienzo se obtienen numerosos puntos anómalos, con datos muy elevados, que deben corregirse.
- 3186. Presenta pocas ventanas reducidas que quedan cubiertas por la curva entre 1984.02 y 1984.11.
- 3172. Presenta pocos puntos aislados cubiertos por la curva entre 1996.10 y 1997.09.
- 3173. Presenta un solo punto cubierto por 1988.05 a 1988.06.
- 3025. Presenta puntos aislados cubiertos por la curva entre 1911.01 y 1916.09.
- 3043. Presenta puntos aislados y pequeños periodos. Un primer periodo queda cubierto por la curva entre 1911.01 y 1912.12, un segundo por la curva entre 1913.01 y 1913.12, un tercero por la curva entre 1914.01 y 1915.12, un cuarto por una curva representativa entre 1916.01 y 1927.12, y un quinto por la curva entre 1928.01 y 1928.12.
- 3007. Presenta numerosos puntos y pequeños intervalos aislados, con alguno de hasta pocos meses de duración. Un primer periodo se cubre por la curva entre 1911.01 y 1913.12, un segundo por la curva entre 1914.01 y 1916.12, y un tercero por la curva representativa entre 1917.01 y 1931.12.

- Para cada una de las ventanas indicadas se supuestó una curva potencial triparamétrica del tipo $q=a(h+b)^c$, ajustando sus parámetros por mínimos cuadrados y utilizándola para completar el periodo sin caudales. La tabla adjunta muestra los segmentos de ventanas temporales elegidas para las diferentes estaciones. Para cada estación (fila) se señalan su código, número de segmentos, e intervalo inicial-final de los segmentos.

Tabla 8. Ventanas temporales para relleno de datos mediante las curvas de gasto

3.3.2.4. RELLENO DE DATOS POR INTERPOLACIÓN EN LA SERIE

41

para ventanas temporales reducidas, de muy pocos días, y contrastando cada caso. Puede usarse interpolación lineal o log-lineal, más adecuada para ramas de agotamiento del hidrograma.

Se ha observado que el número de datos así interpolables es reducido pero no despreciable.

Finalmente, tras todos los procesos de depuración y relleno expuestos, el control de calidad básico concluye con la disponibilidad de una colección depurada de series diarias de niveles-caudales, de niveles solos y de caudales solos, donde los errores groseros antes descritos han sido debidamente filtrados y se han realizado algunos rellenos de datos. Ha de recordarse que este control foronómico básico se limita a detectar algunos tipos de errores usuales, pero no garantiza la total validez de las series resultantes. Estas series pueden verse afectadas por otro tipo de errores (inconsistencias, derivas, etc.) que no pueden detectarse por los filtros expuestos y requieren la consideración simultánea de varias estaciones por tramos, y junto con los embalses, como se mostrará posteriormente. El punto de partida serán las series diarias filtradas de caudal, prescindiendo ya de los niveles, y se procederá a otros controles y verificaciones por tramos como indicará.

Tras los rellenos por interpolación, los análisis preliminares de caudales diarios en estaciones de aforo se dan por concluidos. Faltaría únicamente un posible completado adicional de las series mensuales mediante el examen de las series foronómicas mensuales del Anuario, tal y como se mostrará en el siguiente epígrafe.

Por último, el paso siguiente sería el análisis de datos diarios de embalse, con el objetivo de obtener series estimadas de caudales circulantes entrantes y salientes en esos puntos. La consideración de estas series de embalses, junto con las de aforos, permite completar la descripción de los flujos circulantes en la zona de estudio.

3.3.2.5. COMPLETADO DE DATOS CON LAS SERIES MENSUALES

Es relativamente frecuente que las series mensuales descargadas del Anuario comprendan un periodo de datos mayor que el de las series diarias. Las razones pueden ser varias, como que no se dispone de los datos diarios perdidos, o que no han sido cargados en la base de datos. En estos casos, para obtener la colección completa de series mensuales de referencia han de combinarse las series mensuales directamente ofrecidas por el Anuario a esa escala temporal, con las procedentes de la agregación mensual de los datos diarios.

El criterio general es que, para cada mes, si hay dato de agregación debe adoptarse con preferencia, haya o no directo, y si solo hay directo, debe adoptarse este valor.

En el caso que analizamos puede comprobarse que hay 8 estaciones de aforo en las que la ventana de datos mensual es significativamente mayor que la diaria, tal y como se muestra en la tabla, elaborada con los datos directos descargados del Anuario.

Estac	Ain	Afi	Años (día)	Años (mes)
3005	1933	2017	75	85
3006	1934	1986	45	53
3007	1911	1986	65	75
3023	1912	1936	20	25
3033	1911	1936	20	26
3043	1911	1986	61	71

Estac	Ain	Afi	Años (día)	Años (mes)
3908	1911	1940	12	21
3909	1911	1948	27	37

Tabla 9. Estaciones de aforo con series mensuales más largas que las diarias

Para todas estas estaciones se han descargado las series de aportaciones mensuales, y se han procesado junto con las procedentes de agregación diaria. El resultado final es la colección ampliada completa de datos mensuales, procedentes de estaciones de aforo, considerada como la base para los análisis posteriores a escala mensual.

Concluido el proceso de datos de estaciones de aforo, se aborda el de los datos de estaciones de embalse, tal y como se muestra seguidamente.

3.3.3. BALANCES EN EMBALSES (FASE 2)

3.3.3.1. INTRODUCCIÓN

En el capítulo anterior se han analizado las distintas series de caudales registrados en las 33 estaciones de aforo de la red oficial existentes en la zona y publicadas en los Anuarios, procediendo a su depuración y relleno a partir de las curvas de gasto, con los resultados mostrados. Adicionalmente se han descargado también las series mensuales de esas estaciones, contrastándolas con las procedentes de las agregaciones diarias.

Como ya se indicó, además de estas 33 estaciones de aforo existen también 7 embalses en la zona cuyas características básicas (volúmenes, superficies, áreas vertientes, etc.) se ofrecen en el Anuario, y que disponen de datos diarios y mensuales de reservas, entradas y salidas, útiles para complementar los datos de estaciones de aforo, y mejorar así el conocimiento de los flujos en el tramo.

Como también sucede ocasionalmente con los aforos, y tal y como ya se comentó, los periodos cubiertos por las series mensuales no siempre son coincidentes con los de las series diarias, observándose en ocasiones que son de mayor longitud o que tienen menos huecos. Por este motivo deben examinarse ambas colecciones de datos con objeto de seleccionar y unificar las series finales mensuales y anuales que deben considerarse como de referencia a esas escalas temporales.

Esta situación se da en los embalses del Molino de Chinchá, Entrepeñas, Buendía y Bolarque, con series mensuales de mayor longitud que las diarias tal y como muestra la tabla adjunta. Para estos cuatro embalses se han descargado las series mensuales, sometiéndolas a un proceso de cálculo de balances similar al diario anteriormente descrito, y realizándose la integración con los mensuales procedentes de agregados diarios, obteniéndose los resultados que se mostrarán.

Otra circunstancia que también puede darse y debe ser chequeada es la de que los tres ficheros mensuales descargados de cada embalse (reservas, entradas y salidas) no tengan el mismo periodo temporal de datos y/o presenten huecos distintos. Así sucede con el Molino de Chinchá y La Bujeda, debiendo realizarse las oportunas correcciones. En este último no se dispone de las series completas al iniciarse el registro descargable en 1992, pese a que el embalse se encontraba construido y en operación desde varios años antes.

Las características de las series se resumen en la tabla, en la que se muestran los periodos de datos (primer y último dato registrado) de las series descargadas del Anuario, tanto a escala diaria como mensual, y su correspondiente longitud. Todas las series mensuales comienzan en el mes de octubre del año indicado como inicial y acaban en septiembre del año indicado como final (años hidrológicos). Puede verse la diferencia antes señalada de los embalses del Molino de Chincha, Entrepeñas, Buendía y Bolarque, con algunos años más en el registro mensual.

	Código	Nombre	Río	Año inic. diario	Año final diario	N.años día	Ainic. mens	Afin mens	N.años mes
1	3006	Entrepeñas	Tajo	1958.1001	2018.0930	61	1953	2018	65
2	3007	Bolarque	Tajo	1958.1001	2018.0930	61	1955	2018	63
3	3008	Zorita	Tajo	1967.1001	2018.0930	51	1967	2018	51
4	3009	Almoguera	Tajo	1967.1001	2018.0930	51	1967	2018	51
5	3043	Buendía	Guadiela	1958.1001	2018.0930	61	1953	2018	65
6	3201	Molino de Chincha	Guadiela	1958.1001	2018.0930	61	1947	2018	71
7	3257	La Bujeda	Tajo	1992.1001	2018.0930	26	1992	2018	26

Tabla 10. Estaciones de embalses. Periodos de datos diarios y mensuales

Una circunstancia muy singular es la existencia de un túnel que conecta los embalses de Entrepeñas y Buendía a una cota intermedia, lo que requiere una consideración especial en los análisis de balance, tal y como se mostrará.

Asimismo, debe recordarse que Bolarque y La Bujeda se encuentran conectados por la central reversible de Altomira, y La Bujeda es el origen del canal de Riansares, tramo inicial de la conducción del ATS, circunstancias todas que deben tenerse en cuenta para la correcta formulación de los balances hídricos.

Respecto a la tipología de medida de los datos, el examen de las series diarias revela que todos estos embalses de cabecera presentan un tipo de dato 2 hasta 1991, y de tipo 1 desde 1992 hasta la actualidad, circunstancia que debe también ser tenida en cuenta para homogeneizar las series finales. Esta misma diferencia de tipologías se da también con las series mensuales, observándose que hay casos (p.e. Molino de Chincha o Entrepeñas) en los que el criterio cambia dos veces en la misma serie.

Seguidamente se muestran los análisis realizados de caudales circulantes en los diferentes embalses y los resultados obtenidos en cada caso. En el correspondiente Anexo se muestran diferentes gráficos de comportamiento de los embalses (entradas, salidas, reservas y evaporaciones), a distintas escalas temporales (diaria, mensual agregada y anual agregada), lo que permite adquirir una idea visual muy descriptiva de su comportamiento. En las series mensuales y anuales no se representan los datos completos finales, incluyendo los directos no agregados, sino solo los datos resultantes de la agregación de los diarios.

3.3.3.2. MOLINO DE CHINCHA

El Molino de Chincha (código 3201) es un pequeño embalse en el río Guadiela asociado a un aprovechamiento hidroeléctrico, puesto en marcha en 1947, y con unos 6 hm³ de capacidad máxima. Debido a este uso y a la relativa abundancia de aportaciones circulantes, el embalse suele estar lleno o próximo a su capacidad máxima, y la alteración de caudales inducida es poco significativa, incluso a escala diaria.

El código y ubicación de la estación de aforos y el embalse son el mismo, de forma que los datos de salida del embalse son, desde el año 1970, los datos de caudal en la estación 3201, siendo muy similares, aunque no idénticos, en el periodo anterior, 1965-70. A partir del 1 de octubre de 1986 no hay datos de la estación de aforo 3201, sustituyéndolos por los de salida del embalse, que incorporan siempre 3 decimales, a veces redondeados a enteros en los datos de la estación.

Los datos diarios de embalse publicados en el Anuario se inician en 1958 pero los datos mensuales directos se inician años antes, en 1947.11, cuando arranca la explotación del embalse, y ofrecen un registro prácticamente completo hasta hoy, si bien con cambios en el criterio de medición de reservas (datos a fin de mes hasta 1958.09, a comienzos de mes desde 1958 hasta 1988.09, y a finales de mes desde entonces hasta hoy).

Se observan unas anomalías en los datos iniciales de la serie, así como que entre 1989 y 1992 hay un periodo de pocos años sin datos. También se observan algunos errores puntuales aislados como el del 30/09/1978, en la transición del año hidrológico, que puede depurarse directamente igualándolo al día anterior, o como rachas de varios días con valores negativos entre noviembre de 2015 y marzo de 2016, imputables a los errores de oscilaciones del balance, y para los que se ha optado por dejarlos como están, sin corrección.

Pese a estos errores ocasionales, los registros diarios muestran un adecuado comportamiento general, con entradas y salidas siguiendo patrones de hidrogramas muy similares, y unas oscilaciones, especialmente en las entradas, características de los cálculos de balance diario. A escala mensual y anual los errores puntuales diarios se amortiguan, las series de entrada y salida son prácticamente indistinguibles y el ciclo de estiajes es muy perceptible, como cabría esperar de una serie prácticamente inalterada. Las reservas tienden a mantenerse en los valores altos, y los patrones de evaporación son muy regulares, con valores medios anuales en torno a $0.5 \text{ hm}^3/\text{año}$.

Alrededor de 1990 se observa un cambio en las reservas, que pasan a ser más estables, y en los hidrogramas, que pasan en consecuencia, en especial las salidas, a ser más irregulares.

3.3.3.3. ENTREPEÑAS

Los datos diarios de este embalse se inician en 1958, prolongándose hasta la actualidad, mientras que los mensuales directos se inician unos años antes, en 1953. Estos mensuales directos son de tipo 1 (existencias a finales de mes) desde 1954.06 hasta 1958.09, de tipo 2 (existencias a comienzos de mes) desde 1958.10 a 1992.09, y nuevamente del tipo 1 desde entonces hasta la actualidad.

En este embalse se puede apreciar muy claramente el efecto del cambio de criterio en el tipo de dato de reserva. Al aplicar el cálculo de balances mensuales a este embalse se comprueba que entre octubre de 1958 y noviembre de 1992 los balances ofrecidos presentan errores muy importantes, no imputables a redondeos, y si se acude a los datos diarios del embalse, que incluyen reservas y salidas, pero no entradas netas, se observa que el criterio seguido para el dato de reserva embalsada en este periodo con errores era diferente del general, dándose el dato de reserva a comienzos de mes, en lugar de al final. Se comprobó también que la reserva de final de mes es la del primer día del mes siguiente en el comienzo de la serie, pero en determinado momento el criterio cambia a la del último día del mes en curso, lo que podría explicarse por cambio en el criterio de medida (a comienzos o a finales del día en relación con la salida media).

Se procedió a la corrección de estos errores de forma que, nuevamente ejecutado el programa de cálculo, no se detectó más que un mes erróneo, y con valores relativamente reducidos, dándose por buenos los datos resultantes. Las figuras del Anexo permiten observar estos resultados.

Tanto a escala diaria como mensual son apreciables los estiajes de las entradas al embalse, mientras que las salidas han sido claramente alteradas, mostrando los efectos de la regulación. Los valores anuales de entradas y salidas son en general más concordantes, con un efecto limitado de regulación hiperanual, y permiten observar una aparente caída de flujos en torno a 1980 (indicios del efecto 80). Las evaporaciones pueden alcanzar valores por encima de los 30 hm³/año, con mínimos del orden de 10 hm³/año.

Es de destacar el hecho de que en este embalse, con vaso sobre el acuífero de Entrepeñas (código de masa de agua subterránea MASb 031.014), se producen filtraciones conocidas desde antiguo, que podrían emerger parcialmente en el embalse de Bolarque, y también parcialmente aguas abajo de la presa de Bolarque, observándose en ese caso en la estación de Almoguera.

En los periodos de activación del túnel, con flujos salientes de Entrepeñas hacia Buendía, las entradas totales son en todo caso las debidas a circulación fluvial generada en la cuenca y por tanto son asimilables al caudal circulante en ese punto.

3.3.3.4. BUENDÍA

En el caso de Buendía (código 3043) se ha realizado el mismo análisis de balances que en Entrepeñas mediante el programa de cálculo comentado, comprobándose que se produce también la misma diferencia de tipos de datos de las reservas y en el mismo periodo, de forma que entre octubre de 1958 y noviembre de 1992 el comportamiento es diferente al periodo posterior. Examinando los datos y especificaciones del Anuario se observó que los tipos son iguales que en el caso de Entrepeñas, y se aplicó la misma corrección en los balances, obteniéndose finalmente la serie corregida de entradas totales, incluyendo la evaporación estimada. Tras un periodo inicial anómalo, con secuencias de entradas negativas, la serie parece estabilizarse desde octubre de 1961, pudiendo darse por válida desde esa fecha.

A escala mensual con las series directas, no agregadas, se observa también que hay un periodo inicial que empieza en 1954.05 hasta 1958.09, con datos de tipo 1, que pasan a tipo 2 desde 1958.10 hasta 1992.09, y vuelven al tipo 1 desde entonces hasta hoy.

Además, en este caso concreto hay que tener en cuenta la existencia del túnel de comunicación Entrepeñas-Buendía, al que se dedicará un apartado específico. En los periodos de activación del túnel, con flujos salientes de Entrepeñas hacia Buendía, las entradas totales a Buendía son la suma de las llegadas por el túnel más las debidas a circulación fluvial generada en la cuenca. En consecuencia, para estimar el caudal fluvial circulante en ese punto debe restarse el flujo del túnel de las entradas totales deducidas del balance, tal y como se indicará.

Realizadas las oportunas correcciones, se dieron finalmente por buenos los datos del balance de Buendía, con los resultados mostrados en las figuras del Anexo.

Al igual que sucedía en Entrepeñas, tanto a escala diaria como mensual son apreciables los estiajes de las entradas al embalse, mientras que las salidas han sido claramente alteradas, mostrando los efectos de la regulación. Los valores anuales de entradas y salidas son en general más concordantes, con un efecto limitado de regulación hiperanual, aunque mayor que el observado en Entrepeñas. Es también muy perceptible una aparente caída de flujos en torno a 1980 (indicios del efecto 80). Las evaporaciones pueden alcanzar valores del orden de los 90 hm³/año, con mínimos del orden de 20 hm³/año.

3.3.3.5. TÚNEL DE CONEXIÓN ENTREPEÑAS-BUENDÍA

Puesto que las crecidas del Tajo en Entrepeñas son mayores que las del Guadiela en Buendía, con aportaciones similares, mientras que la capacidad de Entrepeñas es mucho menor que la de Buendía, cuando se concibieron y proyectaron estos embalses, en los años 40 del pasado siglo, se pensó la conveniencia de conectarlos mediante un túnel, aprovechando la proximidad de ambos vasos. Este túnel funcionaría eventualmente como un aliviadero adicional de Entrepeñas, y permitiría en situación ordinaria un funcionamiento conjunto de ambos embalses, derivando agua de uno al otro de forma automática cuando en uno se alcance un nivel del agua suficientemente elevado.

La longitud de la conducción es de unos 4 km de los que 3.5 son el túnel y el resto a cielo abierto. El máximo caudal que ha circulado por la conducción, a comienzos de 1960, es de unos 140 m³/s (12 hm³/día), valor próximo a su capacidad máxima dado que la cota del agua de Entrepeñas era muy elevada en esas fechas, próxima a su máximo nivel de explotación.

La cota de embocadura corresponde aproximadamente a algo menos del 80% de la capacidad máxima de Entrepeñas, confirmando la funcionalidad del túnel como aliviadero complementario.

Las figuras adjuntas muestran la aportación diaria circulante por el túnel en los diferentes periodos en que se ha encontrado activo, junto con las series de existencias embalsadas y los diferentes episodios de activación.

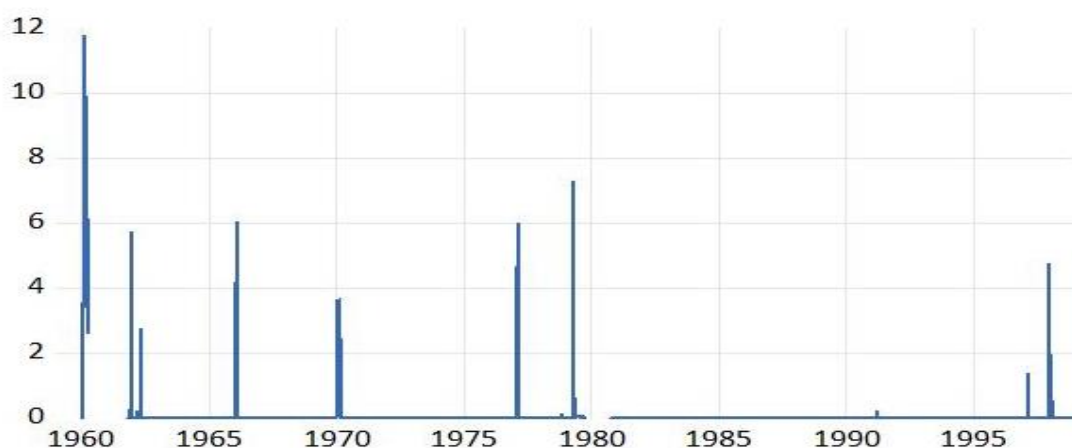


Figura 13. Aportación circulante por el túnel (hm³/día)

Es interesante constatar la escasa duración de estos periodos de activación, confirmando la funcionalidad del túnel como eventual aliviadero y no como una conducción de explotación

ordinaria más o menos permanente. Los moderados volúmenes movilizados sugieren que el efecto del túnel sobre la regulación del sistema ha sido siempre muy reducido.

Se observa asimismo un cierto paralelismo en las evolución de reservas de ambos embalses, si bien siempre son mayores en Buendía (3043, línea azul), y se observa también una reducción simultánea iniciada en torno a 1979 y que llega hasta 1984, año en el que las diferencias se reducen y a partir del cual las existencias son muy similares. Este importante desembalse producido a finales de los 70 y primeros de los 80 es un hecho relevante para el funcionamiento de la cabecera en relación con el trasvase Tajo-Segura, y ha sido analizado en documentos como el Libro Blanco del Agua en España, donde se explica en el contexto del momento.

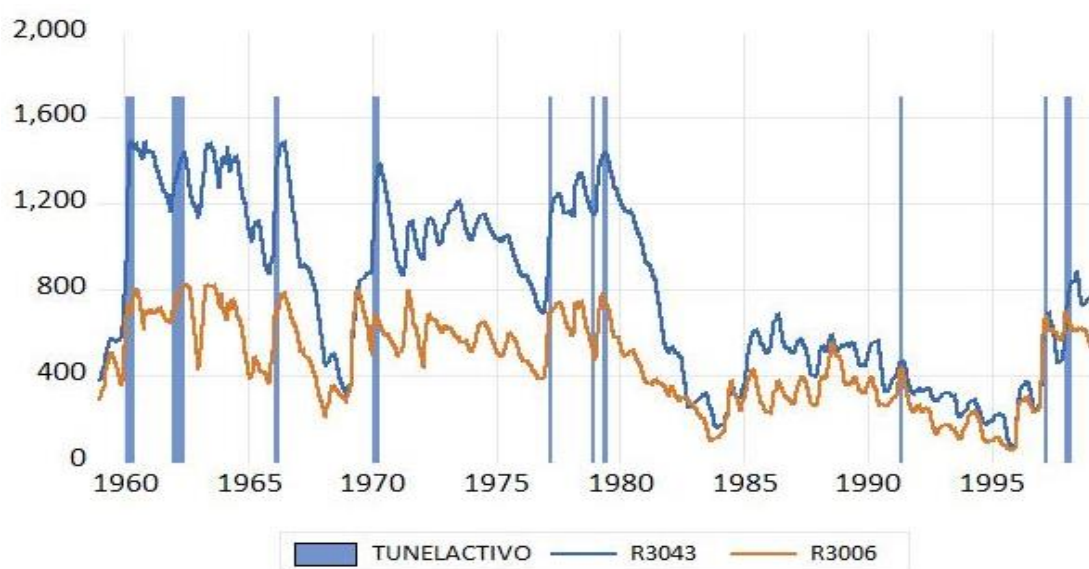


Figura 14. Episodios de activación del túnel y existencias embalsadas en Entrepeñas y en Buendía (hm³)

El gráfico siguiente muestra la relación entre las existencias embalsadas en Entrepeñas y el flujo circulante por el túnel (hm³/día).

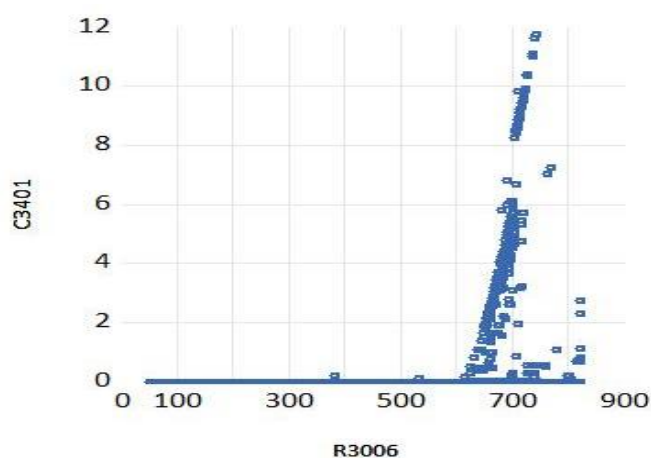


Figura 15. Relación entre existencias embalsadas en Entrepeñas y flujos por el túnel

Puede verse que la circulación por el túnel se inicia para existencias embalsadas de unos 600 hm³, y aumenta rápidamente con el embalse hasta un máximo del orden de 12 hm³/día para existencias de unos 750 hm³, próximas a la capacidad máxima.

Una expresión suficientemente aproximada que relaciona ambas magnitudes, útil a efectos prácticos, es la parabólica, con $Q(\text{hm}^3/\text{día})$, $V(\text{hm}^3)$

$$Q = 0.000387 \cdot V^2 - 0.427 \cdot V + 116 \quad ; \quad Q \leq 12$$

La pequeña dispersión de puntos de la derecha se debe sin duda a errores de imputación de flujo nulo pese a estar el embalse casi lleno, situación que se dio a primeros de los 60 (años 62 a 64 y ocasionalmente alguno posterior). A partir del 1 de enero de 1980 no se produce nunca, lo que nos lleva a pensar en errores de registro o cambios batimétricos en esas fechas. A esta sospecha contribuye el hecho de que la curva reservas-caudales parece mostrar dos segmentos, separados en torno al valor de 700. Se trata de una cuestión curiosa e interesante de dilucidar, pero que resulta irrelevante a los efectos de nuestro análisis, por lo que no nos detendremos en ella.

Se observan asimismo un par de datos claramente erróneos en los que existe circulación con existencias inferiores a 600. Examinando el Anuario se comprueba efectivamente que ambos errores son en el dato de flujo, no en el de reservas, y se corrigen en consecuencia.

Puede verse que en el Anuario hay dos periodos sin datos de circulación: entre el 18-4-1960 y el 30-9-1961, y el año hidrológico 1979-80 completo. A juzgar por las existencias embalsadas, en el primer periodo hubo probablemente circulación por el túnel aunque no ha quedado registrada. Empleando la expresión anterior se han rellenado los huecos de este periodo, pero se obtienen resultados muy anómalos, con volúmenes muy elevados de circulación por el túnel no compatibles con los balances de Buendía. Ante esta situación se ha optado por no rellenar esta ventana de la serie y dejar sus valores como ausentes.

Los niveles en el segundo periodo sin datos muestran sin embargo que, con seguridad, los flujos fueron nulos, por lo que los ausentes se rellenan con ceros.

Hecha esta salvedad respecto a las anomalías de las series en los primeros años, conforme a los datos del Anuario se observan 7 episodios significativos de activación del túnel, y alguno otro de muy reducida magnitud que puede considerarse irrelevante. Como se señaló, la duración de los episodios en general es de días o muy pocos meses, no prorrogándose por periodos mayores, y pudiendo constatarse que solamente se producen flujos significativos si las existencias de Entrepeñas se aproximan a unos 800 hm³.

En el episodio de 1992 el flujo fue irrelevante, con cotas en Entrepeñas que apenas debieron llegar a la embocadura del túnel (existencias de unos 500 hm³).

Los gráficos adjuntos muestran el detalle de los 7 diferentes episodios de activación del túnel, enumerados seguidamente, junto con las ventanas temporales empleadas en los gráficos:

Episodio 1: 1/1/60 a 30/4/60.

Episodio.2: 1/11/61 a 1/6/62.

Episodio 3: 1/1/66 a 1/4/66.

Episodio.4: 1/12/69 a 1/5/70.

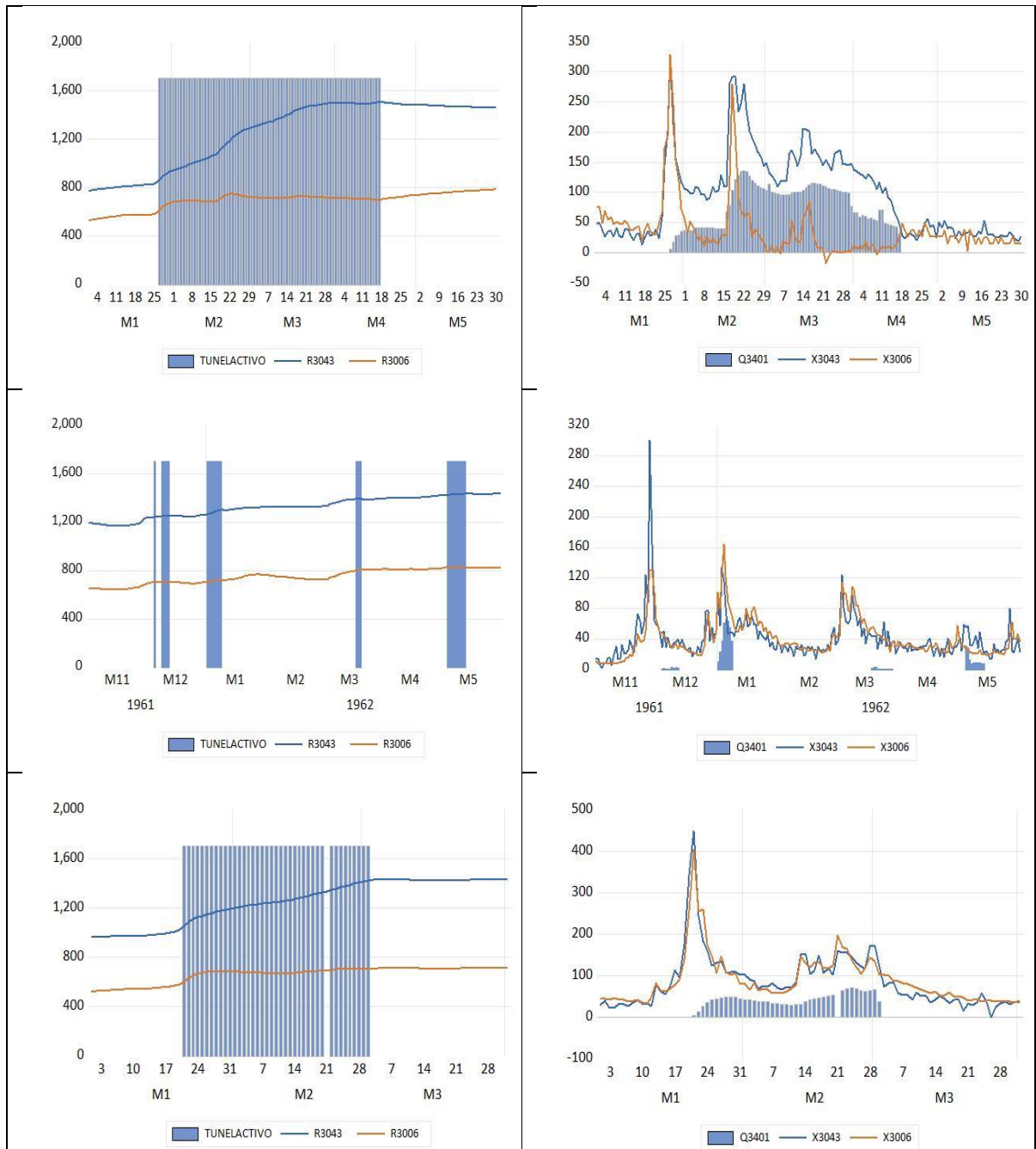
Episodio 5: 1/2/77 a 1/4/77.

Episodio 6: 1/11/78 a 1/8/79.

Episodio 7: 1/1/97 a 1/6/98.

En la columna de la izquierda se muestran las series diarias de reservas embalsadas (hm^3) en Entrepeñas (R3006) y Buendía (R3043), junto con la ventana temporal de activación del túnel. Como puede verse, en cada episodio se produce una estabilización de reservas de Entrepeñas y un aumento de las de Buendía respecto a la tendencia seguida antes del episodio, obviamente por efecto de la aportación adicional inducida por el túnel.

En la columna de la derecha se muestran los flujos (m^3/s) entrantes a los embalses junto con el circulante por el túnel, pudiendo apreciarse como su activación siempre es precedida por puntas de caudales entrantes a Entrepeñas, y como las entradas correspondientes a Buendía experimentan el correspondiente incremento adicional.



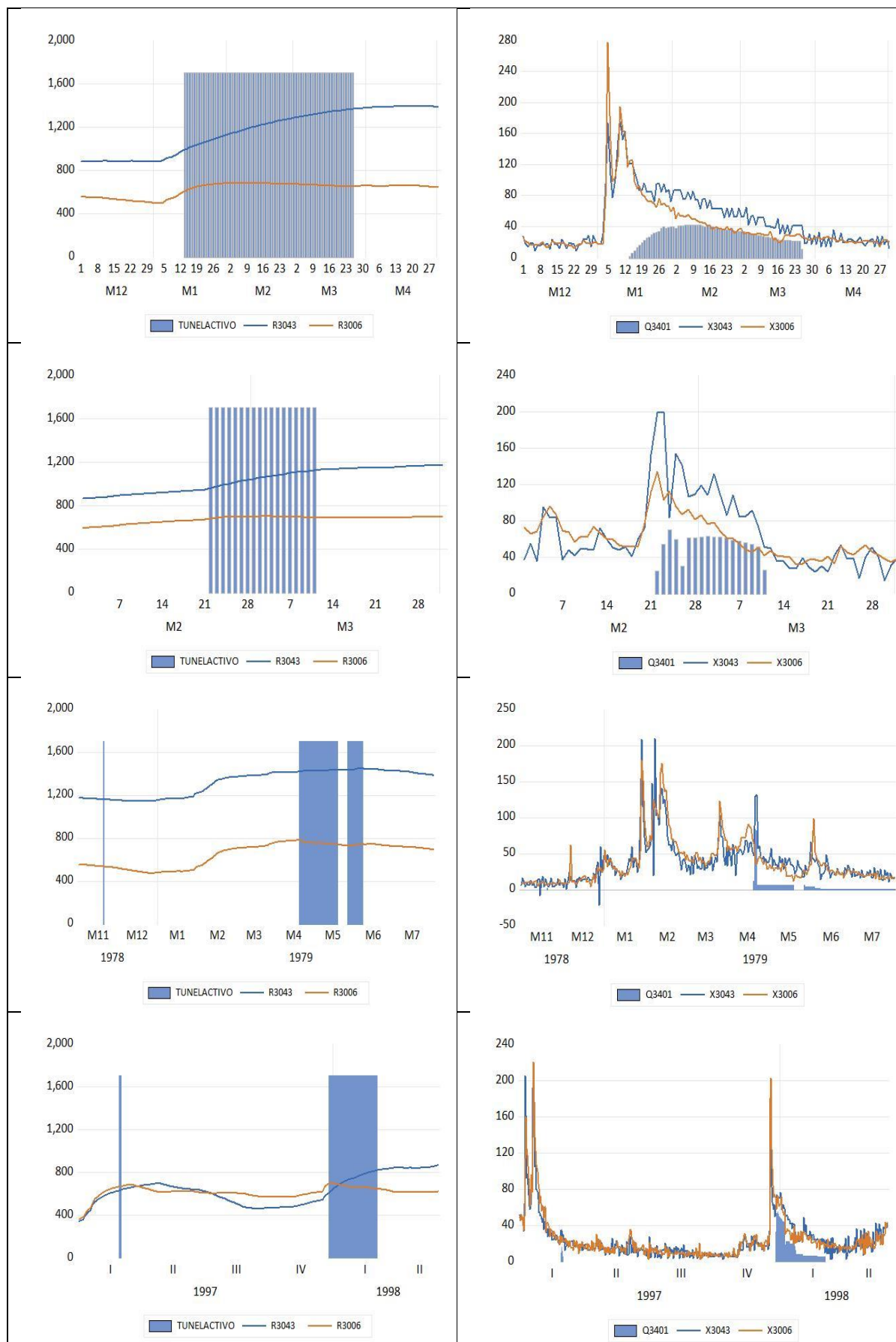


Figura 16. Detalles de los episodios de activación del túnel

Para la correcta realización de balances en Entrepeñas y Buendía se han considerado los flujos inducidos durante estos episodios singulares, introduciendo las oportunas correcciones.

3.3.3.6. SISTEMA BOLARQUE-LA BUJEDA

Con igual metodología que la descrita anteriormente para Entrepeñas y Buendía, se han analizado los embalses de Bolarque (código 3007) y La Bujeda (código 3257), que conforman un sistema conjunto e interconectado mediante la central reversible de Altomira, tal y como se muestra en el esquema representado en la figura. La muy estrecha interrelación entre ambos embalses aconseja su tratamiento conjunto.

En ambos embalses se da la misma situación observada en Entrepeñas y Buendía respecto al criterio de fechas de los datos (tipos 2 y 1 con transición en 1992), requiriendo similar corrección. En la Bujeda solo se ofrecen series desde 1992 (todos de tipo 1), mientras en la serie mensual directa de Bolarque hay datos adicionales desde 1955.10 hasta 1958.09, también de tipo 1, que pasan a tipo 2 entre 1958.10 y 1992.10, y vuelven al tipo 1 de ahí en adelante.

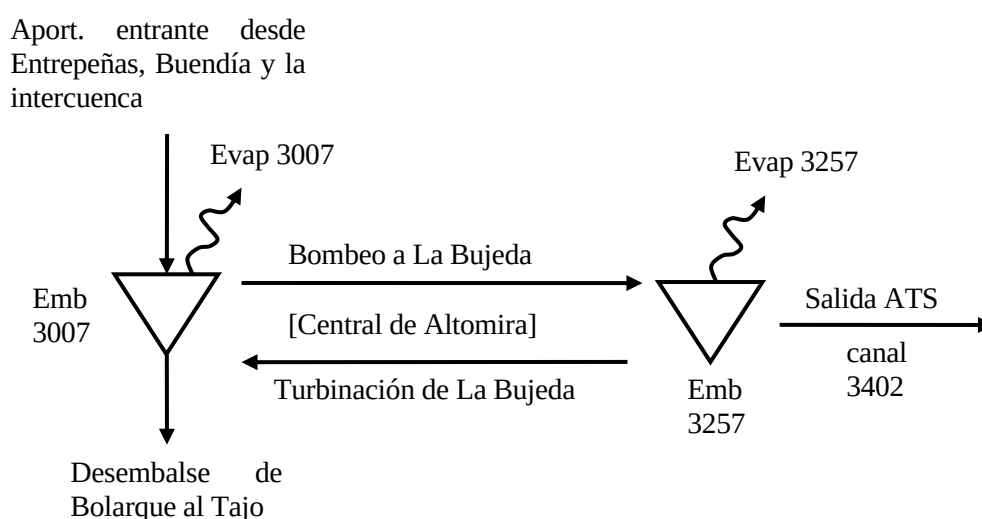


Figura 17. Esquema de flujos del sistema Bolarque-La Bujeda

Calculadas las evaporaciones correspondientes, las entradas y salidas de Bolarque y de La Bujeda, deducidas del balance con los datos del Anuario considerando conjuntamente todo el sistema, son las mostradas en las figuras ofrecidas en el Anexo.

Como puede verse, los datos diarios de Bolarque muestran una apreciable variabilidad, con patrones de entradas y salidas similares. Ello resulta esperable considerando su relativamente reducida capacidad y su aprovechamiento hidroeléctrico, que conduce a mantener las cotas altas y el embalse lleno, como se aprecia, con reservas del orden de 30 hm^3 , y nunca inferiores a 22.

Tanto en las series diarias como en las mensuales y anuales se aprecia que las entradas fluviales son mayores que las salidas desembalsadas hacia el Tajo, efecto lógico debido a la derivación hacia La Bujeda para el trasvase, aunque parecen guardar cierta modulación común, con máximos en verano debidos a los desembalses para riego.

La evaporación anual es relativamente constante, del orden de $3.5 \text{ hm}^3/\text{año}$.

Los datos diarios mostrados de La Bujeda son de entradas netas (entradas menos salidas) y muestran una gran irregularidad, con valores positivos correspondientes a los bombeos de Altomira, y negativos debidos a sus turbinaciones. La reserva La Bujeda es muy oscilante a escala diaria entre 1 y 7 hm^3 . Los datos mensuales ofrecidos son los netos, mostrando salidas muy variables tanto a esa escala como también a la anual, con un máximo de unos 600 hm^3 en torno al año 2000, correspondiente al máximo trasvase anual producido. El hecho de asumirse entradas netas permite asimilarlas a la derivación del ATS, como se mostrará. La evaporación anual media es del orden de $0.32 \text{ hm}^3/\text{año}$.

Se trata de un sistema muy dinámico, en el que puede haber bombeos y turbinaciones en el mismo día, y fuertes variaciones en periodos de tiempo muy reducidos.

Adicionalmente, y como resultado de interés, las figuras adjuntas muestran los volúmenes diarios bombeados y turbinados por la Central de Altomira (hm^3/dia), computados con las ecuaciones de balance, y el flujo de entrada en La Bujeda. Flujos positivos corresponden a bombeos y flujos negativos a turbinaciones.

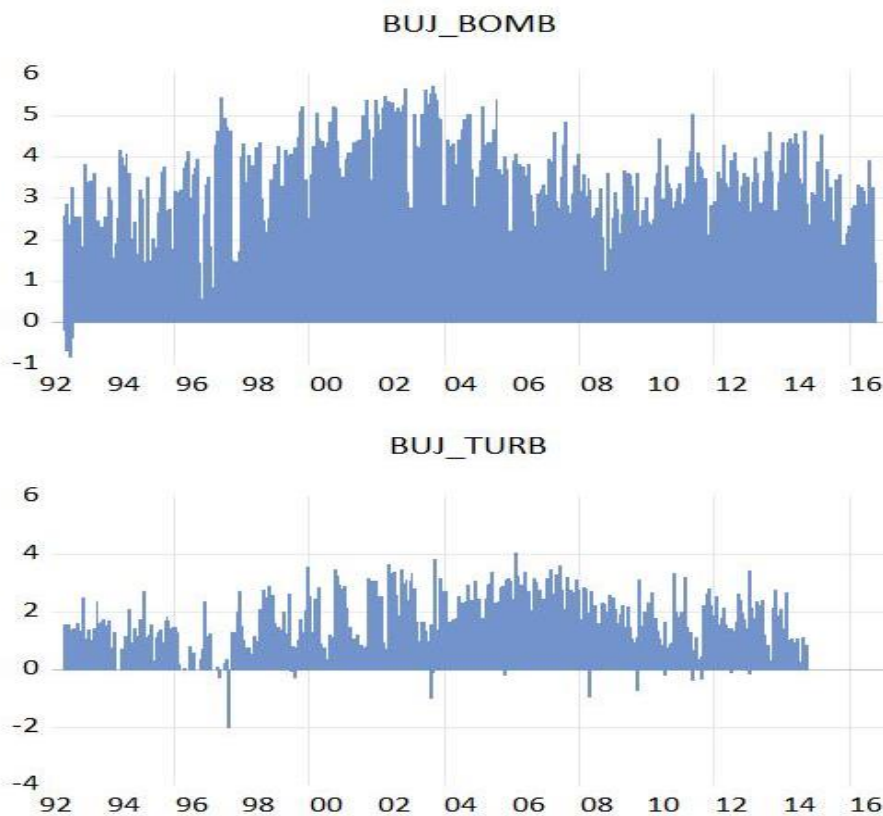


Figura 18. Bombeos y turbinaciones diarias de Altomira

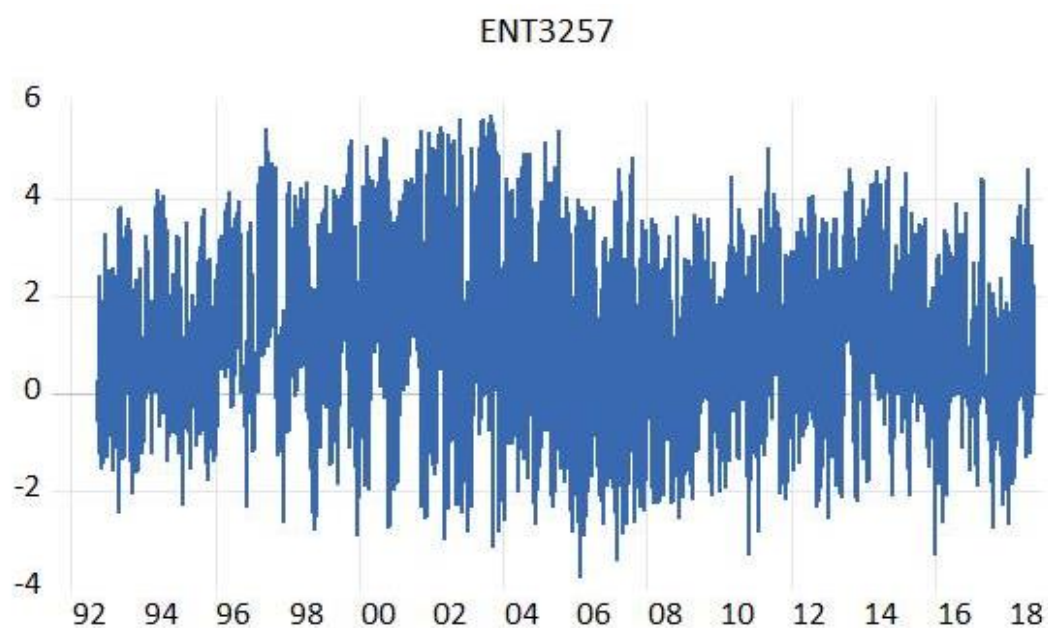


Figura 19. Flujo diario de entrada a La Bujeda

Para concluir la descripción de este sistema, la figura adjunta muestra las salidas diarias de La Bujeda mediante el canal de Riansares, origen del ATS (aforo en canal 3402), así como un detalle de esta circulación (m³/s).

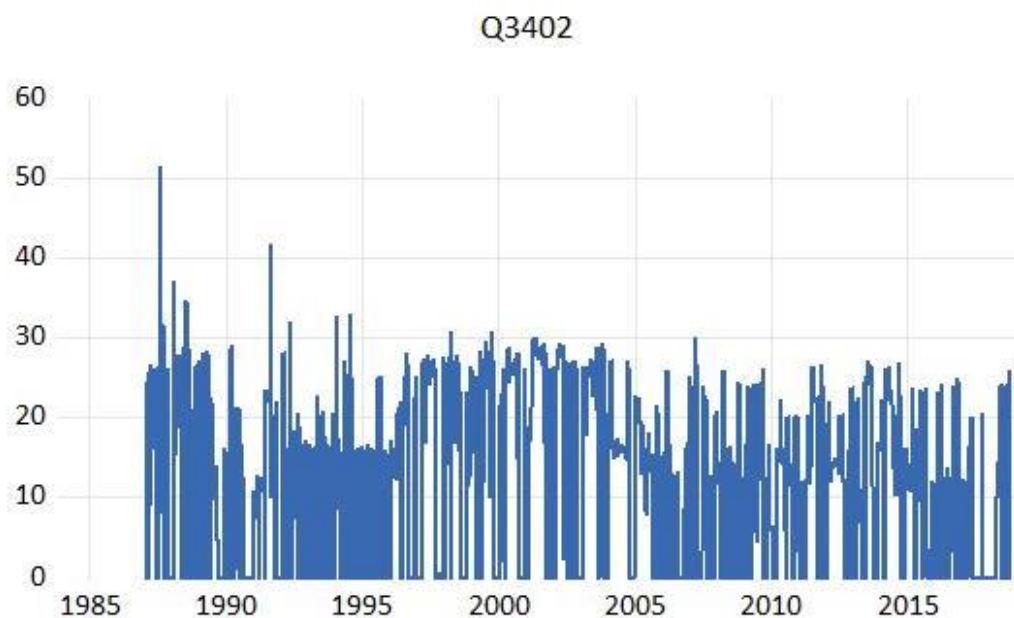


Figura 20. Flujo de salidas de La Bujeda al ATS

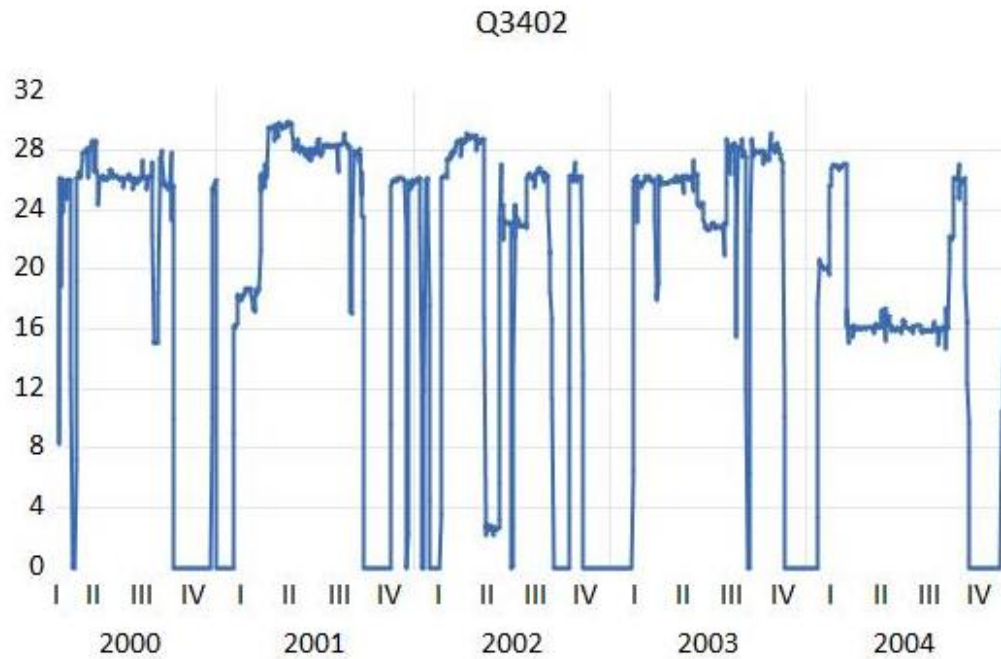


Figura 21. Flujo de salidas de La Bujeda al ATS (detalle)

Es interesante observar el comportamiento típico de este canal, con valores de caudal que se programan para periodos de días o meses y permanecen estables en torno a pocos modos de explotación, adaptados a las necesidades de cada caso. Ello da lugar a una distribución multimodal de caudales de explotación, mostrada en el histograma de la figura.

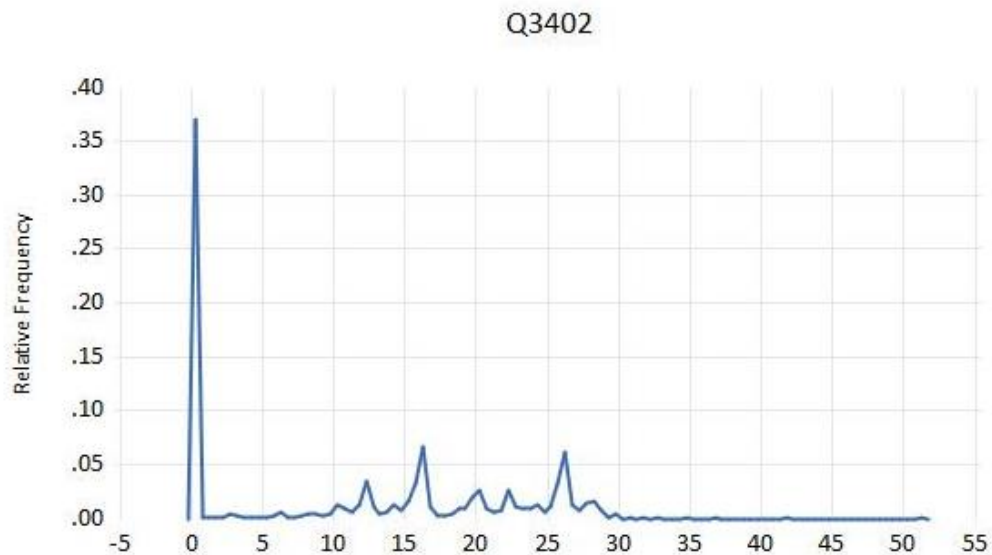


Figura 22. Histograma de los caudales de salida de La Bujeda al ATS

El caudal dominante es obviamente el cero, correspondiente a no trasvase, un 37% de los días, seguido de las otros dos modos de 16 y 26 (7, 6 % de los días) y de los otros modos más infrecuentes de 13, 20 y 22 m³/s. Valores por encima de 32-33 (capacidad de diseño del canal) no se dan nunca por lo que las anomalías de 40 y 50 deben atribuirse a errores en las series.

El conjunto Bolarque-Altomira-La Bujeda constituye en definitiva, y como ya se ha señalado, un sistema muy dinámico y sumamente eficiente, con capacidad de respuesta rápida a las necesidades hidroeléctricas y de suministro al trasvase, además obviamente de proveer los desembalses continuos propios y con modulación relativamente estable requeridos para el Tajo.

3.3.3.7. ZORITA

Este pequeño embalse (código 3008), con una capacidad aproximada de 3 hm³, se construyó en 1947 como toma de refrigeración para la central nuclear José Cabrera (o de Zorita), hasta que la central cesó su actividad en 2006. En la actualidad sus orillas se encuentran cubiertas por vegetación, con difícil acceso al agua, y se ha desarrollado una abundante vida piscícola, aunque con limitaciones para la práctica de la pesca.

Los datos del embalse de Zorita son los mostrados en el Anexo. A escala tanto diaria como sobre todo mensual y anual las entradas y las salidas son prácticamente indistinguibles, con un embalse lleno a su máxima capacidad de unos 2.5 hm³.

Se observa claramente un cambio de régimen desde 1980 debido a la entrada en servicio del trasvase, con mayor regularidad en las circulaciones y valores muy estacionales, con máximos en verano y mínimos en invierno. Tras los muy elevados flujos a finales de los 70 (del orden de 1600 hm³/año) ya comentados en relación a Bolarque, los valores desde los 80 oscilan entre los 300 y 400 hm³/año, con evaporaciones medias de 0.37 hm³/año.

Solo se han observado errores puntuales en la serie en algunos meses concretos (1968.07 a 1968.11 y 1986.09 a 1986.11), siendo los datos de reservas del tipo 2 hasta 1992 y del tipo 1 en adelante.

3.3.3.8. ALMOGUERA

Este pequeño embalse (código 3009) entró en servicio en 1947 como central hidroeléctrica complementaria de la de Bolarque, con una capacidad aproximada de 7 hm³. Las series correspondientes a este embalse son las mostradas en el Anexo, pudiendo observarse un comportamiento muy similar al ya comentado para Zorita.

Respecto a los datos de reservas, son de tipo 2 desde que se inicia el registro en 1967.11 hasta 1992.09, y de tipo 1 desde esa fecha hasta hoy. Las evaporaciones son mayores que en Zorita, llegando hasta valores medios de 1.6 hm³/año.

3.3.4. ANÁLISIS DE CAUDALES POR TRAMOS (FASE 3)

3.3.4.1. INTRODUCCIÓN

En apartados anteriores se ha procedido a una completa revisión de los datos disponibles tanto en estaciones de aforo como en embalses en la zona de estudio, atendiendo a los datos de cada estación, considerada de forma separada. La siguiente fase del análisis es el contraste conjunto de los datos de diferentes estaciones próximas.

Así, tras el filtro inicial $h-q$ y la depuración y relleno de datos en estaciones de aforo, y una vez estimadas mediante balances las entradas y salidas fluviales en los diferentes embalses, el análisis preliminar de los datos de caudales fluviales circulantes requiere verificar la coherencia conjunta de las series obtenidas en las distintas estaciones de un mismo tramo fluvial empleando, en su caso, diferentes escalas temporales (diaria, mensual o anual). El registro diario permite observar el detalle de las concordancias, mientras que la escala anual permite una inspección global de los datos en la que los efectos a pequeñas resoluciones temporales quedan filtrados y puede apreciarse la consistencia general entre estaciones.

El proceso concluye con la disponibilidad de nuevas series diarias, mensuales y anuales debidamente validadas, consideradas como consistentes y homogéneas, que pueden emplearse en siguientes niveles de depuración y en los estudios hidrológicos posteriores.

Para realizar los análisis expuestos de forma sistemática en la cabecera del Tajo, hasta Aranjuez, se recorre la red fluvial, desde aguas arriba hacia aguas abajo, observando conjuntamente los caudales en las estaciones de aforo de los distintos tramos fluviales y las estimaciones de entradas y salidas de los embalses. Los tramos elegidos son:

- Tramo Peralejos de las Truchas-Trillo
- Tramo Trillo-Entrepeñas
- Tramo Entrepeñas-Bolarque
- Tramo Molino de Chinchá-Buendía
- Tramo Bolarque-Zorita
- Tramo Zorita-Almoguera
- Tramo Almoguera-Villarrubia de Santiago
- Tramo Villarrubia de Santiago-Aranjuez

Para el estudio de estos tramos fluviales se emplea todo el registro foronómico oficial disponible ya analizado con detalle en capítulos previos, con un primer nivel de depuración $h-q$ y relleno ya superados y estimaciones contrastadas y unificadas de entradas y salidas a los embalses, con criterios iguales para todas las estaciones y todo el periodo temporal estudiado.

Nótese que todo ello es previo a otros posibles procesos posteriores como la restitución de aportaciones al régimen natural en diferentes puntos, que requeriría una consideración de las afecciones y alteraciones del régimen. Esas alteraciones sobre el estado prístino dan lugar a una resultante final que es el estado que estamos observando en estos análisis.

3.3.4.2. TRAMO PERALEJOS DE LAS TRUCHAS-TRILLO

Las series de aportaciones disponibles en la cabecera del río Tajo, aguas arriba de cualquier regulación, corresponden a las estaciones de aforo 3031 (Hoz Seca, en el barranco de ese nombre), 3001 (Peralejos de las Truchas, en el propio río Tajo), 3034 (Orihuela del Tremedal, en el río Gallo), 3030 (Ventosa, en el río Gallo), y 3268 (Taravilla, en el río Cabrillas). Las 3031 y 3034, de reciente puesta en marcha, son recogidas por las 3001 y 3030 respectivamente, y todas ellas se recogen en la estación aguas abajo de las mismas 3005 (Trillo, en el Tajo).

La figura adjunta muestra un esquema de los flujos en este tramo, con las subcuencas representadas mediante rectángulos y las estaciones de medida mediante círculos. Si existiesen embalses en el tramo, los círculos pequeños en el embalse representan sus entradas y salidas, codificadas como $e#####$ y $s#####$ respectivamente.

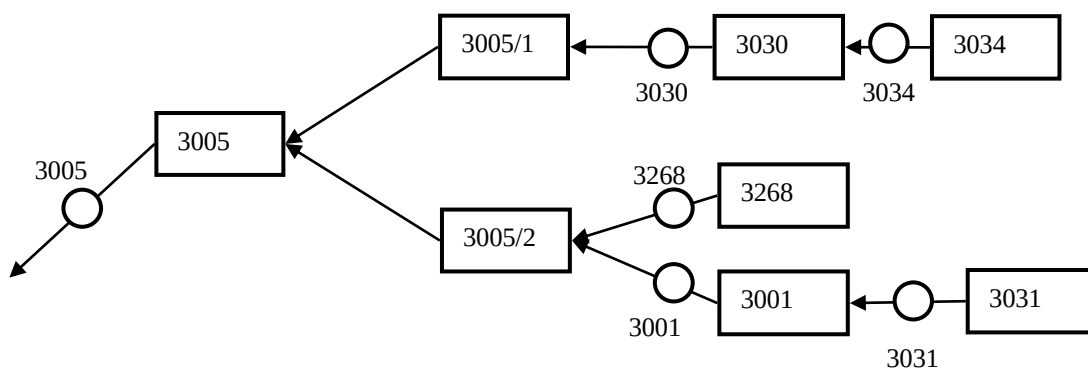


Figura 23. Esquema del tramo Peralejos de las Truchas-Trillo

El tramo puede considerarse formado por las tres subcuencas principales 3030, 3268 y 3001, controladas por sus correspondientes estaciones de aforo, y una extensa intercuenca entre ellas y la 3005, formada por segmentos de subcuencas del río Gallo, Cabrillas y el propio Tajo.

Las series de aportaciones anuales en estas estaciones son las mostradas en el gráfico. En general, se observa una variabilidad común en todas ellas, con ciclos simultáneos y buena concordancia. El registro de las series 3001 y 3030 es muy completo, sin ningún dato ausente para el periodo 1945-2005.

Puede verse que, pese a su pequeña cuenca vertiente, la estación 3001 (Peralejos) ofrece valores medios muy importantes, del orden de $150 \text{ hm}^3/\text{año}$. Las 3030 (Ventosa) y 3268 (Taravilla), con cuencas similares, tienen aportaciones sensiblemente inferiores, del orden de la tercera parte, confirmando la definición del río principal y los afluentes. La 3034 (Orihuela del Tremedal) muestra valores muy inferiores como era de esperar considerando la muy pequeña cuenca recogida, mientras que la 3031 (Hoz Seca) aporta valores relativamente mayores.

Parece apuntarse un cierto efecto de menor variabilidad desde 1980 en las estaciones más largas, 3001 y 3030, que podría tener relación con el efecto 80 si bien, a falta de análisis detallados, no hay evidencia visual clara de posibles tendencias o saltos en las tres series.

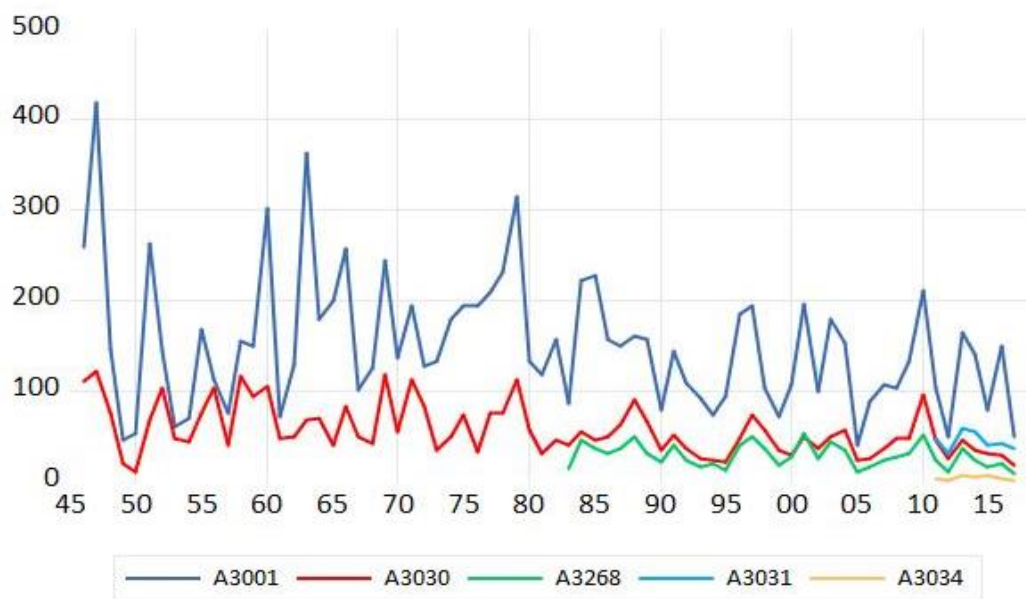


Figura 24. Aportaciones anuales en las estaciones de cabecera del Alto Tajo

Las figuras siguientes ilustran las correlaciones de todas las series a escala anual y mensual, sin ninguna transformación, mostrando sus elipses de confianza del 95% (se emplea distribución F para las probabilidades).

Como puede verse, a ambas escalas las correlaciones positivas son apreciables para todas las estaciones entre sí, como cabe esperar considerando su proximidad geográfica.

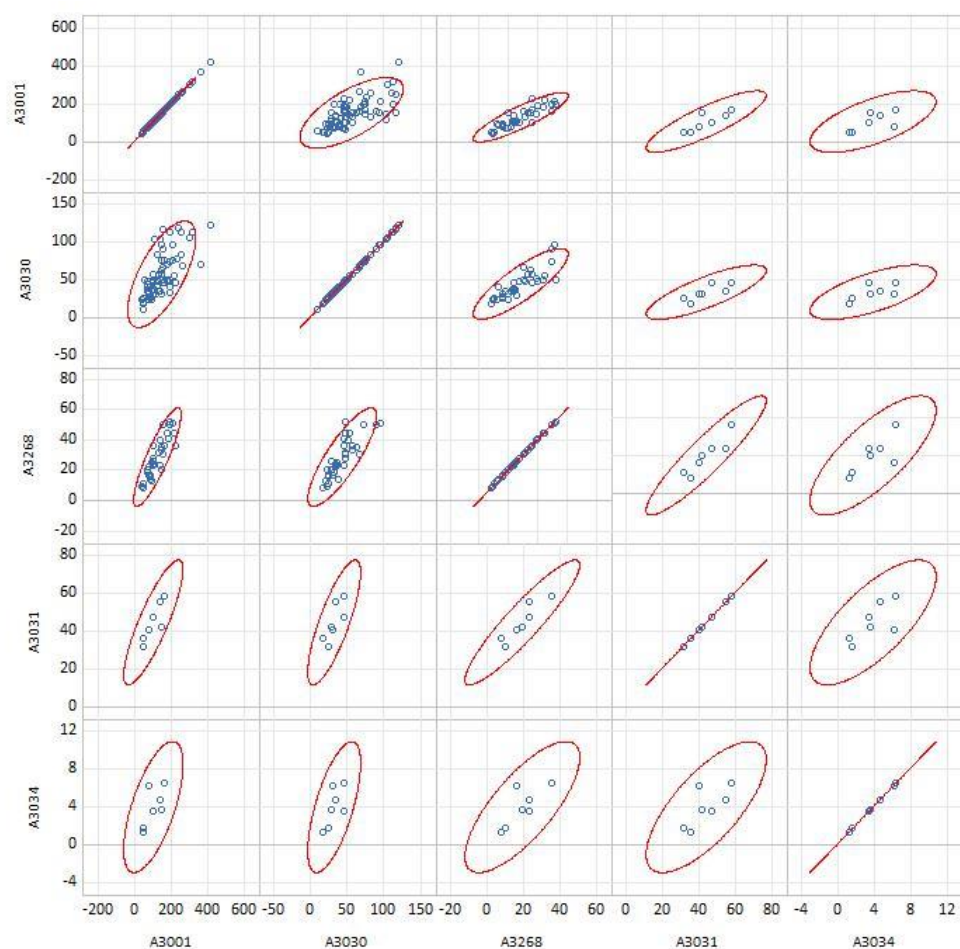


Figura 25. Correlación de aportaciones anuales en estaciones de cabecera del Alto Tajo

Considerando la buena concordancia entre sí de las tres estaciones principales, que recogen a su vez a las otras dos aguas arriba, se ha ensayado la estimación del periodo incompleto de la 3268 (Taravilla) en las fechas anteriores a 1982, mediante una regresión lineal múltiple empleando las otras dos estaciones como variables explicativas, y a escalas temporales tanto anual como mensual. Con ello podría disponerse de registros completos y homogéneos de las tres estaciones.

Los resultados obtenidos revelan varianzas explicadas del 73 y el 82% a las escalas anual y mensual respectivamente, con los gráficos de valores observados, estimados y residuos mostrados en las figuras.

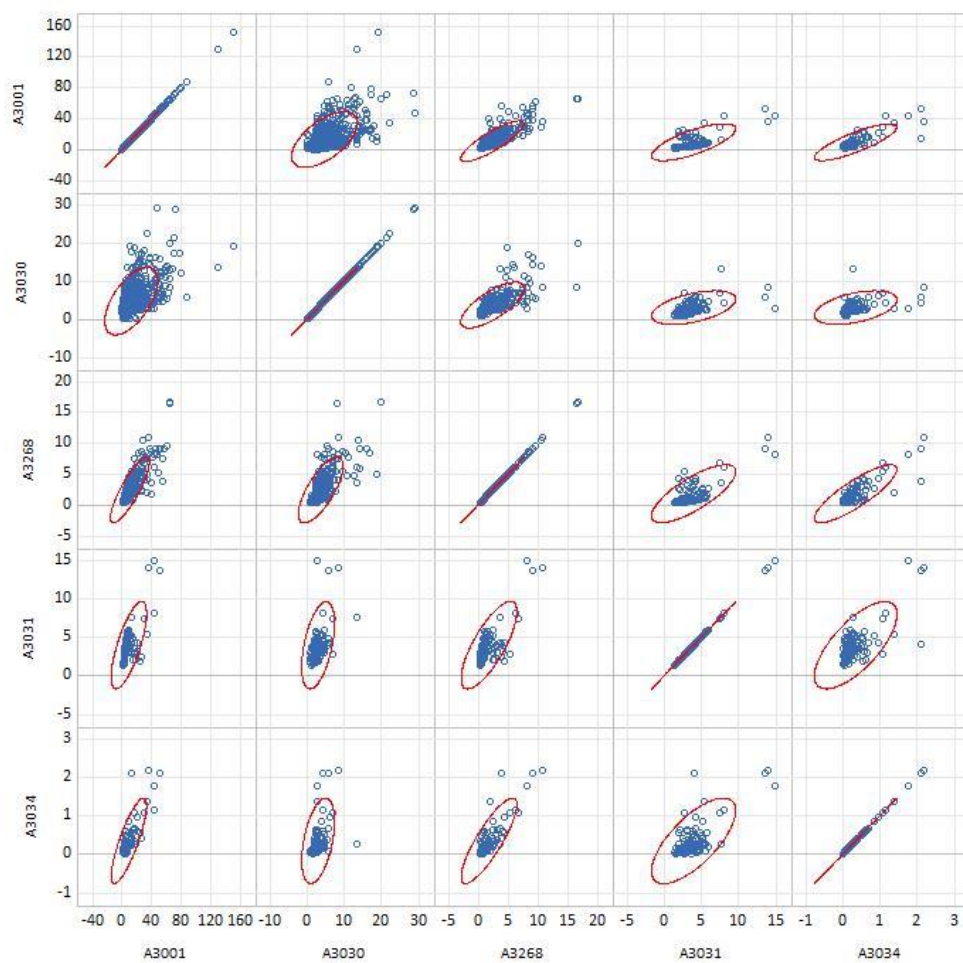


Figura 26. Correlación de aportaciones mensuales en estaciones de cabecera del Alto Tajo

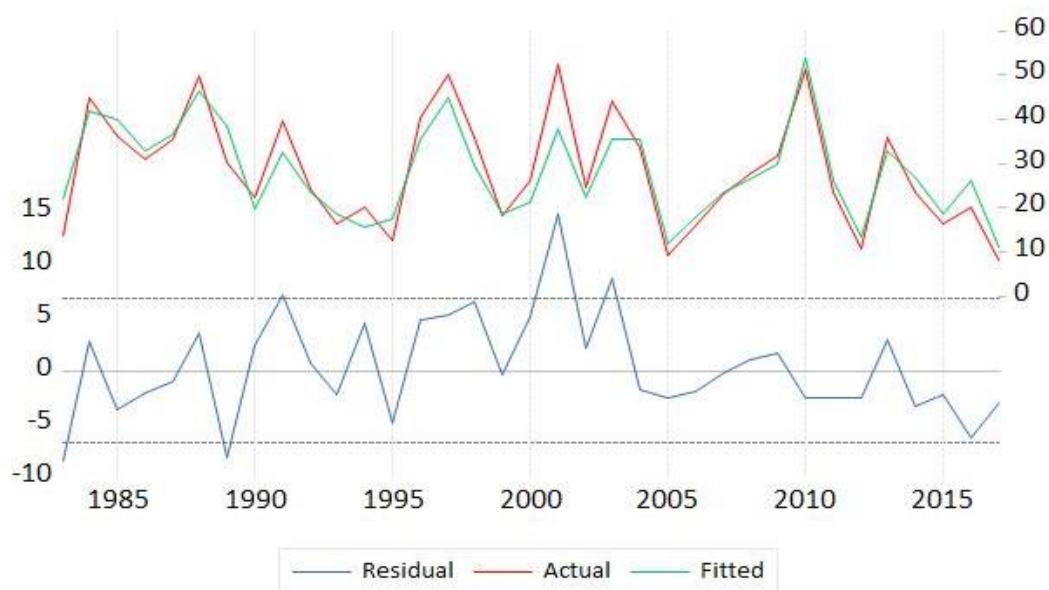


Figura 27. Estimación de 3268 en función de 3001 y 3030 a escala anual

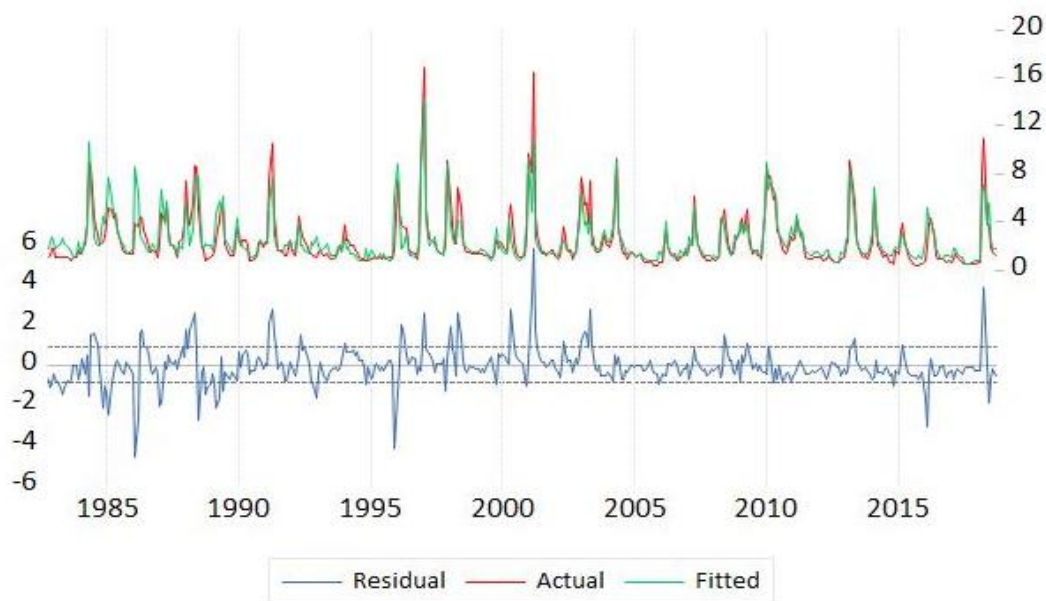


Figura 28. Estimación de 3268 en función de 3001 y 3030 a escala mensual

Estos buenos resultados permiten razonablemente generar estimaciones de las series 3268 mensual y anual, completadas mediante esas regresiones, que pueden ser de utilidad en procesos posteriores.

Resulta asimismo de interés observar la forma de los hidrogramas de las estaciones a escala diaria. La figura adjunta muestra tales series en dos ventanas temporales cortas representativas (2-3 años), a escalas natural y logarítmica.

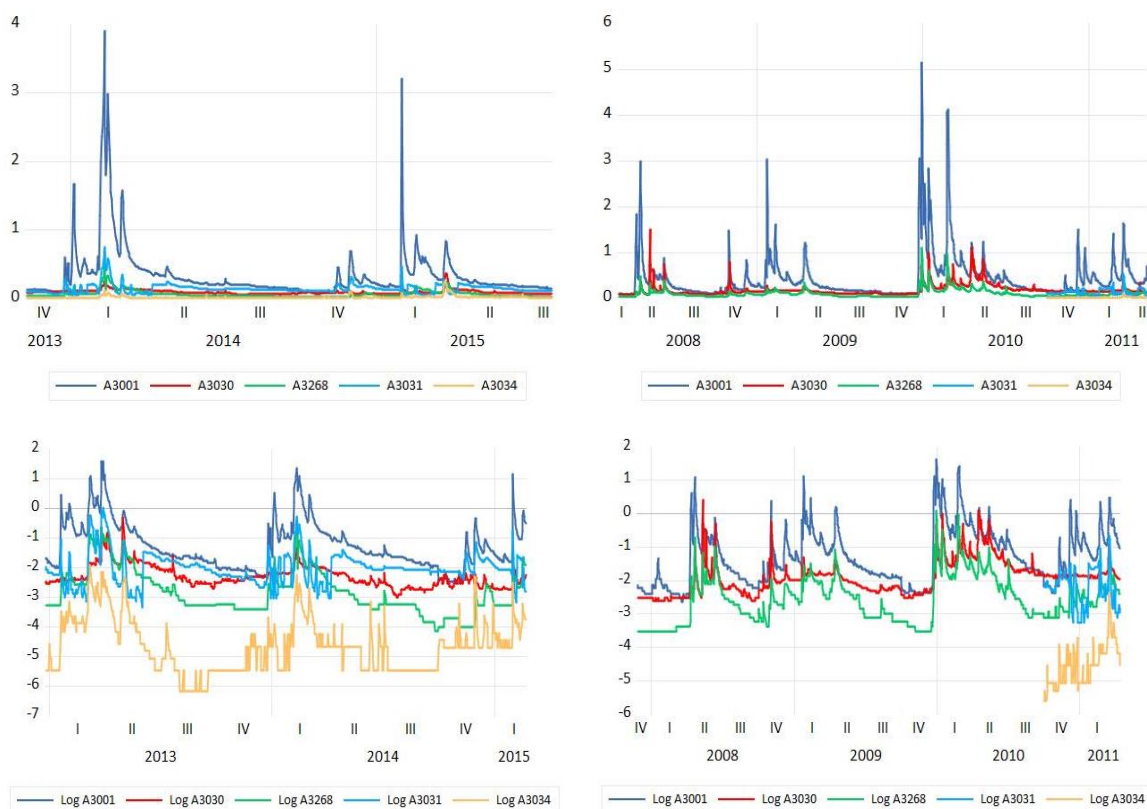


Figura 29. Hidrogramas diarios representativos

Puede verse la forma típica de picos de ascensos arracimados en invierno y curvas de agotamientos el resto del año, con una cierta simultaneidad general de los pulsos en las diferentes estaciones representadas, de las que la 3001 es sin duda la dominante.

Los gráficos logarítmicos muestran agotamientos aproximadamente exponenciales y que se prolongan durante meses, y valores muy pequeños, con oscilaciones propias del ruido de medida, en la estación menos caudalosa, 3034.

Puede considerarse, en definitiva, que la alta cabecera del Tajo queda bien caracterizada por las tres subcuencas del Tajo, Gallo y Cabrillas, pudiendo esta última rellenarse para completar un registro de longitud similar a las otras dos. Las tres subcuencas pueden codificarse como q301 q302 q303.

Tras este análisis del curso alto del Tajo, Gallo y Cabrillas, y el completado de la estación 3268 (Taravilla en el Cabrillas), cabe proceder al contraste de la aportación total suma de las 3 estaciones en este tramo del alto Tajo, con la aportación incremental en la 3005 (Trillo, en el río Tajo), es decir, la diferencia entre la serie registrada en dicho punto menos la suma de las series de aportaciones aforadas aguas arriba. El resultado de este contraste se muestra en la figura, en la que se incluye tanto el periodo común como el rellenado, anterior a 1982.

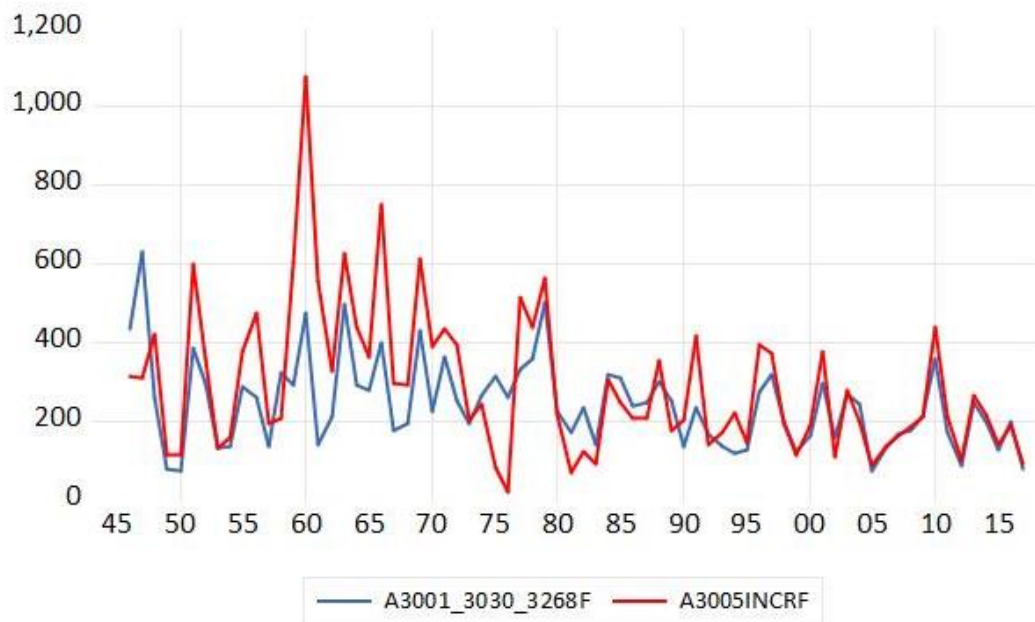


Figura 30. Aportaciones anuales incremental de Trillo y suma de cabeceras del Alto Tajo

Puede verse que las aportaciones incrementales son del mismo orden de magnitud que las de aguas arriba, resultado razonable considerando las superficies de las respectivas cuencas vertientes.

Al igual que en el caso anterior, se observa una buena concordancia general de las series, pero con un cierto efecto de separación en el periodo 1955-1970, donde la aportación incremental en Trillo parece sistemáticamente mayor que la de aguas arriba.

Para confirmar esto, las figuras adjuntas muestran el contraste de la serie incremental de Trillo pero solo con las dos estaciones con registros largos, pudiendo verse que en efecto parece haber un periodo, en torno a la década de los 60, con valores incrementales en Trillo superiores al resto del periodo registrado. Este aumento de caudales parece producirse

solamente en la cuenca incremental, y no es tan perceptible en la suma de las dos cuencas aguas arriba.

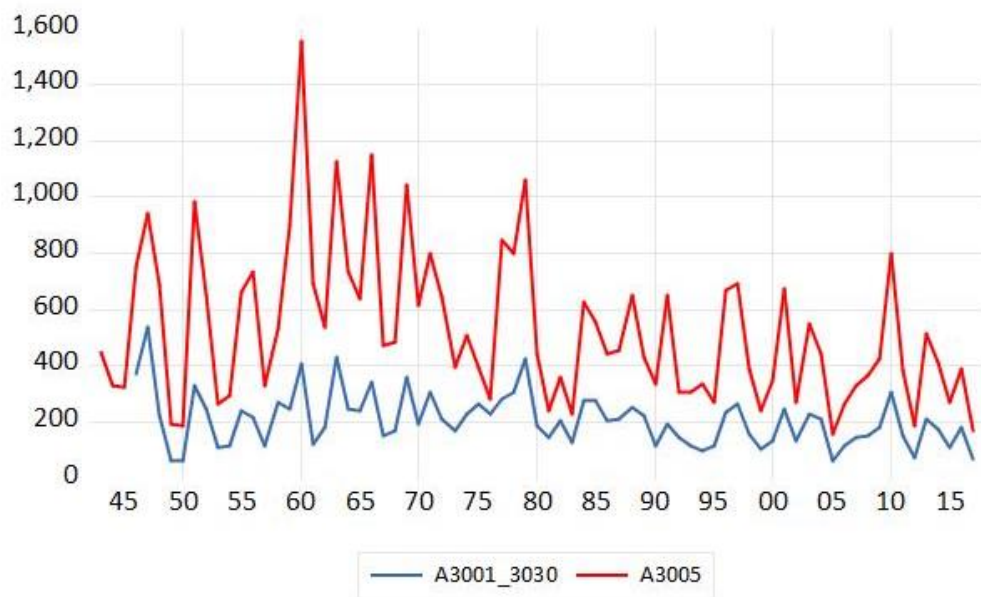


Figura 31. Aportaciones en Trillo y suma de las estaciones 3001 y 3030

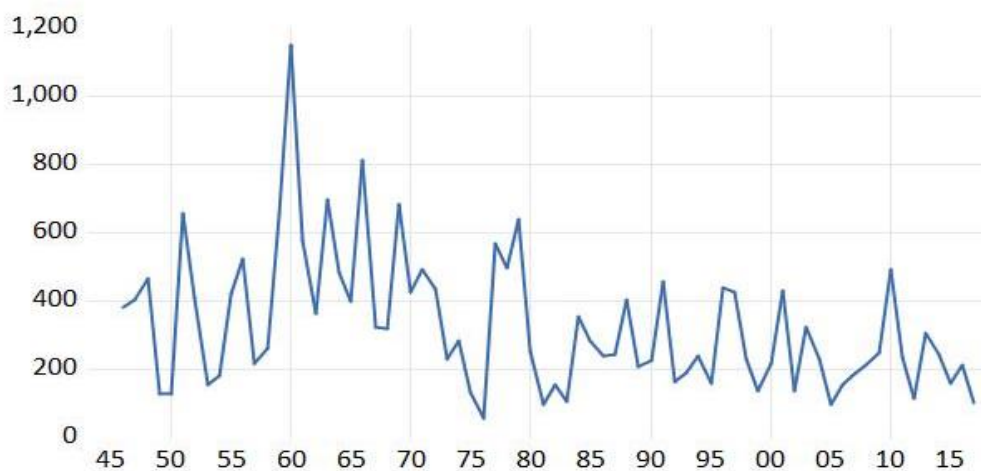


Figura 32. Aportaciones incrementales en Trillo relativas a las 3001 y 3030

Como efecto puntual, se observa también una posible anomalía en los datos del año 1975-76, dado el muy reducido valor de la aportación incremental en ese año.

Por último, el año 1990 parece presentar también una anomalía, al ser las aportaciones incrementales relativas mucho mayores que las de la suma.

Las series diarias en estos años anómalos son las mostradas en las figuras.

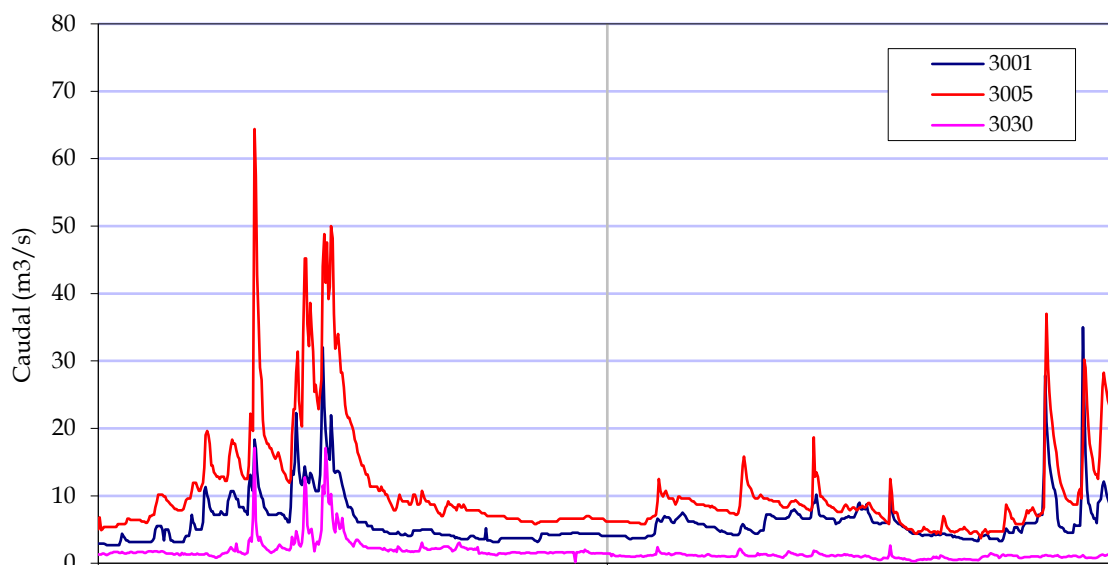


Figura 33. Caudales diarios en cabecera. Periodo 1-1-1975 a 31-12-1976

En relación al primer caso se comprueba que, en efecto, la aportación incremental en año 1975/76 es prácticamente nula, con caudales base de recesión prolongados durante meses, fruto, sin duda de la intensa sequía de aquel periodo. Ello permite descartar la posible anomalía y validar los datos de la serie de Trillo en esos años.

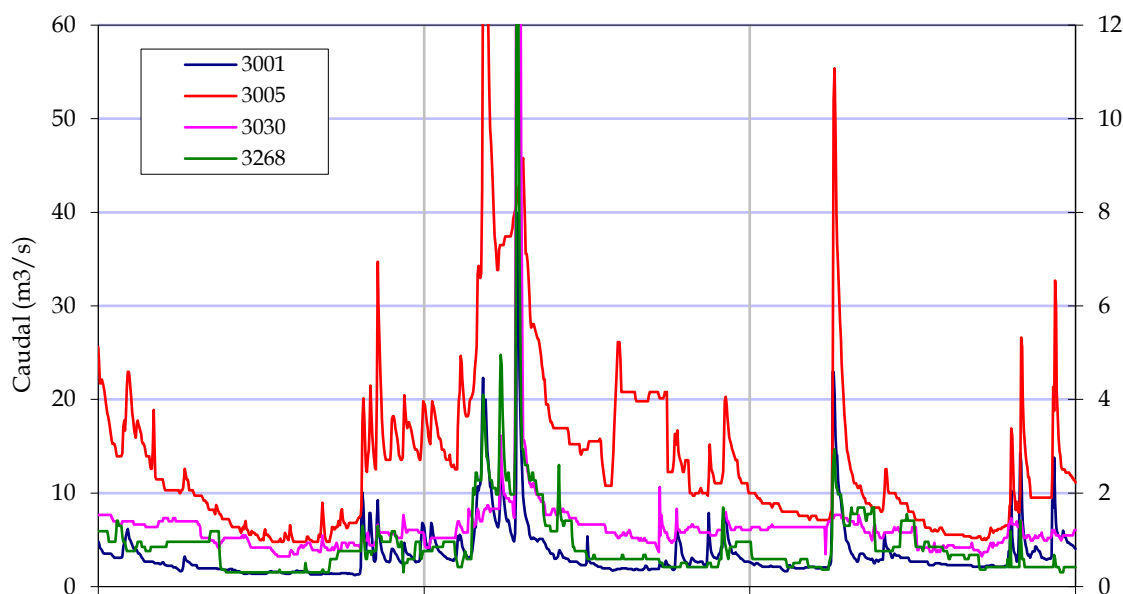


Figura 34. Caudales diarios en cabecera. Periodo 1-1-1990 a 31-12-1992

Para el segundo caso, y por el contrario, a comienzos de los 90 se observa que la concordancia de Trillo con el resto parece buena excepto en el periodo entre el 1 de agosto y el 30 de septiembre de 1991 (2 meses completos exactos), en que aparece en Trillo un caudal medio del orden de 21 m³/s, sin correlato con las otras estaciones de cabecera, en lugar de en torno a 10 m³/s, que sería esperable según el gráfico. Se trata, con toda probabilidad, de un error de la serie 3005, que supone de hecho añadir ficticiamente unos 30 hm³ a cada uno de los meses citados. Considerando esta circunstancia, los valores de incremento relativo siguen siendo elevados pero en menor cuantía, similar a la de otros años.

En conclusión, a escala anual la serie 3005 se puede considerar representativa de la intercuenca entre las altas cabeceras y Trillo, a todas las escalas temporales, pudiendo codificarse como q304. A escala anual parece mostrar una buena concordancia con las situadas aguas arriba, con la única anomalía detectada del año 1990/91, en que parece dar valores más altos que los reales (al menos unos 60 hm³/año), si bien lo relativamente reducido de estas cantidades no permite extraer conclusiones firmes. Parece apreciarse también, en la década de los 60, un periodo más húmedo que el resto de la serie.

3.3.4.3. TRAMO TRILLO-ENTREPEÑAS

Las estaciones de aforo que se encuentran en este tramo fluvial son, en el río Tajo, las 3005 (Trillo), 3033 (Sacedón) y 3006 (Entrepeñas), mientras que al tramo afluyen por la margen derecha la 3500 (Arroyo Cifuentes) y por la margen izquierda la 3269 (Cereceda) y 3270 (Pareja). Además, hay otra estación 3401 que controla la circulación en el túnel de conexión de Entrepeñas-Buendía. Junto con estas estaciones de aforo en ríos y canales, se dispone también de los datos de entradas y salidas del embalse de Entrepeñas (e3006 y s3006 respectivamente).

La figura adjunta muestra un esquema de flujos en el tramo, con las subcuencas representadas mediante rectángulos y las estaciones de medida mediante círculos. Los círculos pequeños en el embalse codificado como ##### representan sus entradas y salidas, codificadas como e##### y s##### respectivamente.

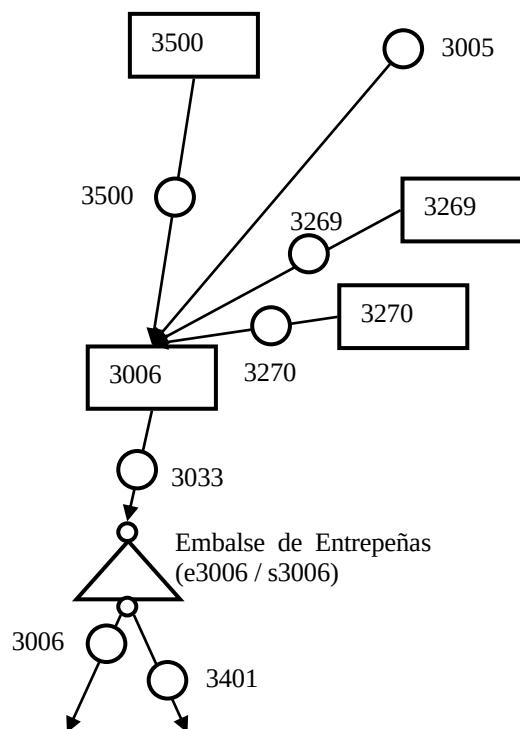


Figura 35. Esquema del tramo Trillo-Entrepeñas

El tramo puede considerarse formado por una intercuenca principal del río Tajo, comprendida entre la estación 3005 y la 3006, con las pequeñas subcuencas de afluentes con estación de control ya señaladas.

Las estaciones 3033 (Sacedón) y 3006 (Entrepeñas) son muy próximas y equivalentes, ofrecen datos en 1912-1931 y 1942-1986 respectivamente, mientras que las 3500, 3269 y 3270 son relativamente recientes. La 3033 (Sacedón) se sustituyó por la 3006 (Entrepeñas), dejando de proporcionar datos desde 1936. La 3270 (Pareja, río Ompolveda) tiene datos 1979 hasta 2007, en que se interrumpe la serie, quizá por la entrada en funcionamiento del embalse de Pareja, cuya cola podría afectarle. Existe además la estación de aforo en canal 3401 (túnel de conexión Entrepeñas-Buendía), con flujos completamente alterados pero relevantes para los cálculos de balances.

Las figuras adjuntas muestran las series anuales de aportaciones en estas estaciones.

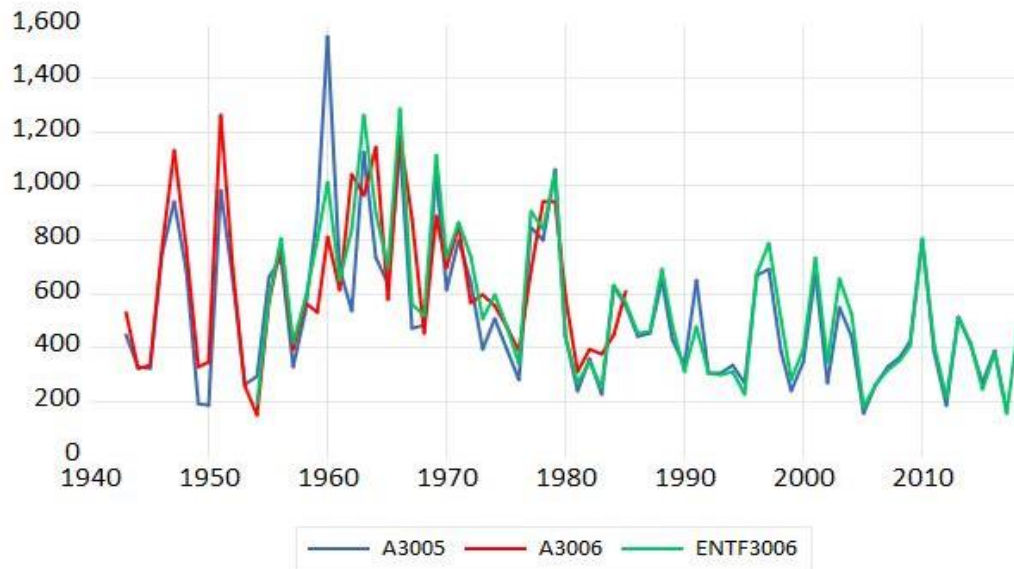


Figura 36. Series básicas del tramo Trillo-Entrepeñas

Puede verse la gran concordancia de las series básicas aguas arriba y aguas abajo del tramo, la equivalencia de las 3033 y 3006, y el muy reducido flujo incremental de 3006 respecto a 3005 (unos 10 $\text{hm}^3/\text{año}$ medios totales debidos a las 3269 y 3270 y quizá otro tanto por la 3500).

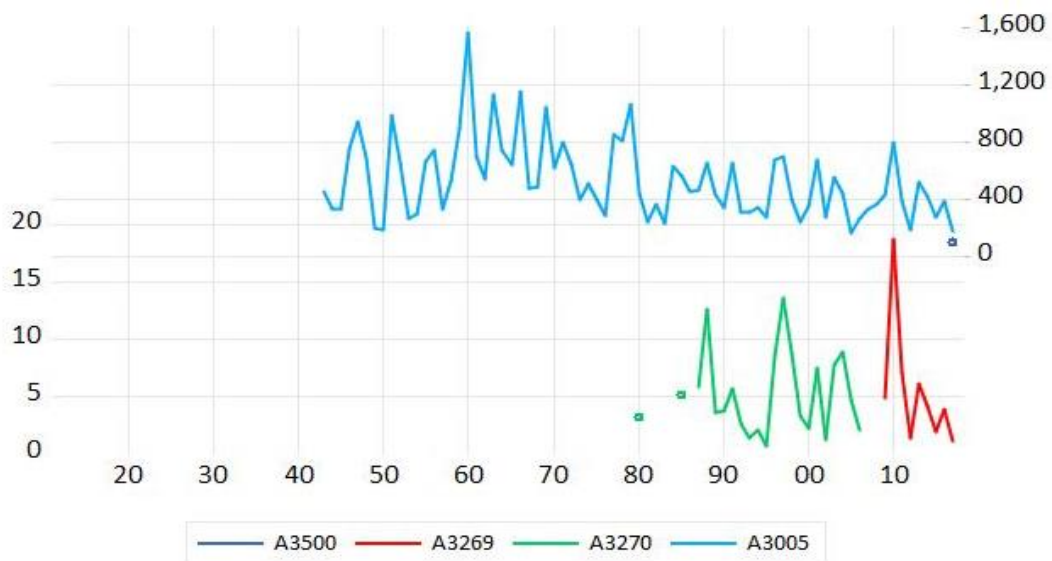


Figura 37. Series de afluentes del tramo Trillo-Entrepeñas

El examen del gráfico de aportaciones incrementales mensuales en 3006 es el mostrado en la figura, pudiendo verse una línea de fondo con valores positivos y moderados, y picos negativos ocasionales muy elevados, sobre todo desde finales de la década de los 50, indicativos de alguna anomalía en los datos de Trillo-Entrepeñas que debe ser investigada.

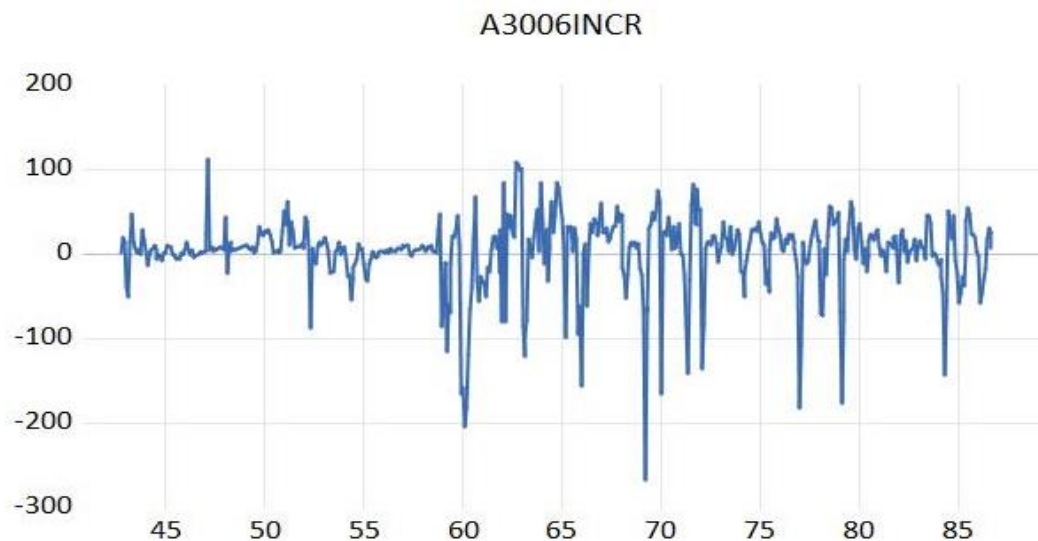


Figura 38. Series de aportaciones incrementales mensuales 3005-3006

Puede verse asimismo que las tres series anuales representativas de los caudales en Entrepeñas dan valores coherentes entre sí, y el efecto de racha húmeda detectado en Trillo (3005) en la década de los 60 también se manifiesta en Entrepeñas tanto en la estación de aforos (3006) como en las entradas al embalse (e3006), apuntando a que se trata de un hecho estructural y no a un error de los datos de una estación concreta.

Por su parte, los datos en Sacedón (3033) muestran una media similar a la de Entrepeñas anterior a 1980, confirmando aportaciones medias similares a las de los años 60 y 70, y sugiriendo un salto alrededor de 1980 (posible efecto 80).

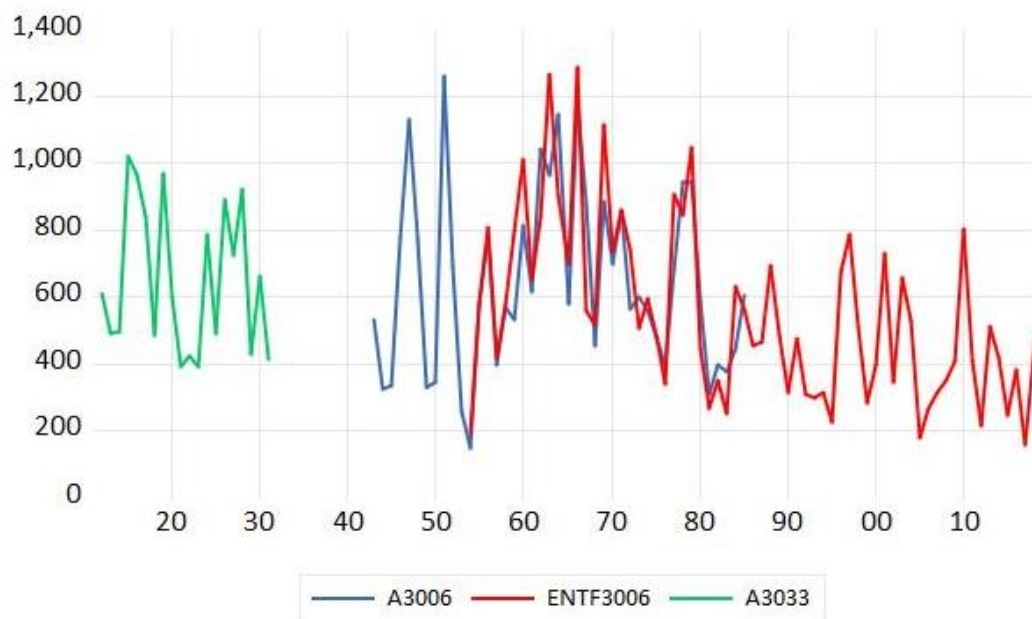


Figura 39. Series anuales en Entrepeñas

Volviendo a la anomalía observada de Trillo-Entrepeñas, y considerando la cuenca de Trillo (3253 km²), la reducida intercuenca entre Trillo y Entrepeñas (576 km²), y los valores relativos muy moderados observados en los afluentes aforados 3500, 3269 y 3270 (total conjunto de unos 20-30 hm³/año), cabría esperar que las aportaciones incrementales totales Trillo-Entrepeñas fuesen del orden de un 5%, orden de magnitud de los errores de medida en estaciones ordinarias, lo que podría explicar parcialmente, aunque no del todo, las discrepancias. Hay un año extraordinariamente anómalo, 1959, con un error cercano a 750 hm³.

Dado que Entrepeñas fue abandonada mientras que Trillo se ha mantenido hasta hoy, cabe pensar que es esta última la que dispone de datos correctos en el periodo común. No obstante, para dilucidar estas discrepancias entre ambas estaciones se ha de recurrir a la inspección de los datos a escalas temporales inferiores.

En efecto, observando las series de caudales medios diarios de ambas estaciones se observa que la 3006 (Entrepeñas) es sensiblemente coincidente con la 3005 (Trillo), pero hay un punto a partir del cual muestra unas fuertes oscilaciones en los caudales diarios, claramente erróneos, mientras que la 3005 presenta siempre el mismo aspecto estándar de una serie diaria, pudiendo confirmarse sin duda que, al menos desde esa fecha, es la correcta entre ambas.

Por otra parte, se observan periodos de varios días consecutivos con valores nulos en 3006 y no nulos en 3005, lo que en principio no tiene sentido y revela un error en esos datos de la 3006. Así sucede en los periodos del 27 de abril al 6 de agosto de 1953, el 1 de enero de 1954, u del 20 de marzo al 2 de agosto de 1954. Cabría corregir estos errores a partir de los datos de la 3005, ligeramente incrementados en su caso para considerar la intercuenca.

Las tres figuras adjuntas ilustran el comportamiento señalado mostrando diferentes ventanas temporales representativas de las tres series diarias de aforo en Trillo y aforo y entrada al embalse en Entrepeñas.

En un periodo inicial se aprecia una correcta concordancia general de los caudales diarios 3005 y 3006, sin que existan aún datos de entrada al embalse, y pudiendo apreciarse en la serie 3006 las rachas de valores nulos antes apuntadas. En un segundo periodo parece producirse una transición al comportamiento oscilatorio (en torno a octubre de 1958). En un tercer periodo posterior se aprecia claramente este comportamiento oscilatorio de la A3036 mientras que la A3005 y las entradas al embalse ENT3006 resultan concordantes.

Nótese que las oscilaciones pueden quedar en gran parte absorbidas en las agregaciones temporales a periodos mayores, dando lugar a similitudes y concordancias a esas otras escalas.

La razón de este cambio estructural ha de buscarse sin duda en una modificación de las condiciones de medida de la estación de aforos 3006 a partir del año hidrológico de 1958/59, modificación perfectamente esperable dado que en aquella época debió quedar anegada la primitiva estación por el progresivo llenado de Entrepeñas, terminado de construir en 1956.

Probablemente el dato de la estación 3006 es, desde entonces, el resultado del cálculo de un balance diario en el embalse, lo que explicaría su carácter oscilatorio a escala diaria y su relativamente aceptable concordancia a escala anual, tal y como se comprobó, aunque los errores apreciados en diferentes periodos (valores nulos o estabilizados en torno a mesetas inexistentes en Trillo) aconsejan no emplear la serie de aforos diarios de Entrepeñas y utilizar preferiblemente la de entradas diarias al embalse.

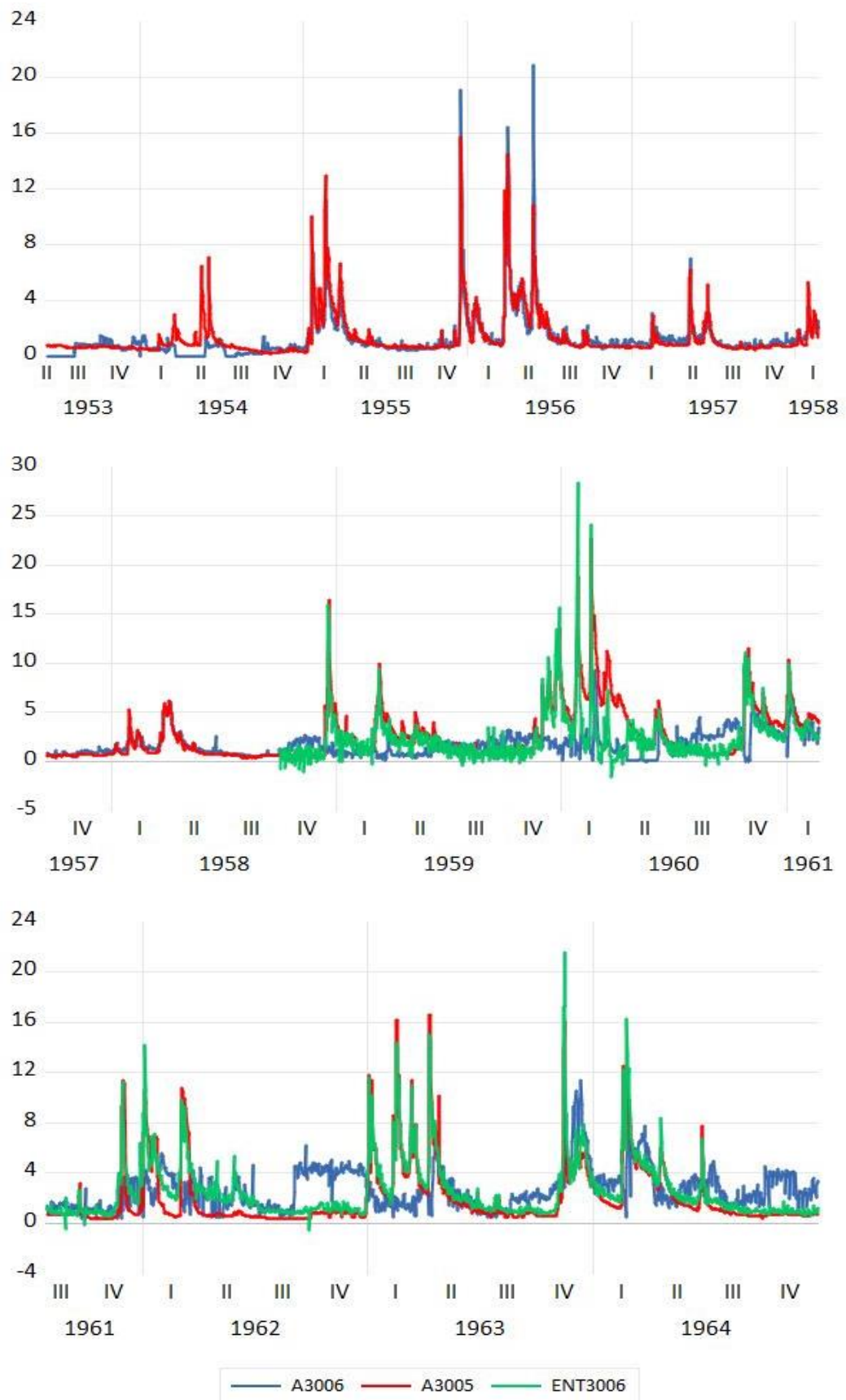


Figura 40. Ventanas temporales de caudales diarios en 3005 (Trillo) y 3006 (Entrepeñas)

En definitiva, el análisis de los aforos existentes aguas arriba de Entrepeñas permite aceptar como válida la serie 3005 (Trillo), a todas las escalas temporales, mientras que la diaria 3006 (Entrepeñas) solo puede aceptarse, y con las salvedades apuntadas, hasta comienzos del año hidrológico 1958/59, siendo preferible desde entonces la de entradas al embalse aquí calculadas, deducidas del balance.

A este criterio general sobre la 3006 puede añadirse el relleno de los periodos nulos de 1953 y 1954 tomando los datos de 3005 incrementados un 5%. Las series así formadas son las compuestas 3006c1 (series elegidas según ventanas) y 3006c2 (3006c1 con los nulos rellenados). Finalmente, si se desea extender la serie incorporando datos anteriores, cabe asumir que los caudales de la estación 3033 son iguales a los de la 3006, pudiendo en consecuencia formarse una 3006c3 compuesta añadiendo a la c2 este registro. Esta última serie 3006c3 puede ser considerada como representativa de la circulación en Entrepeñas y se codificaría como q305.

A escalas mensual y anual pueden emplearse series compuestas (3006c1, 3006c2 y 3006c3) formadas de igual forma con las estación de aforos 3006 hasta 1959, la entrada al embalse desde entonces hasta hoy, y la estación 3033 para los datos más antiguos.

Alternativamente, y como elemento de contraste, para estimar los caudales en Entrepeñas podría suponerse que la serie de aportaciones en este punto es la de Trillo, en todo su periodo, incrementada en un pequeño porcentaje (del orden del 5%) para considerar la aportación de la intercuenca.

La figura adjunta muestra las series anuales 3006c2 y 3005 y su diferencia o aportación incremental Trillo-Entrepeñas. No se ha empleado la 3006c3 porque no existen datos de 3005 para el periodo antiguo.

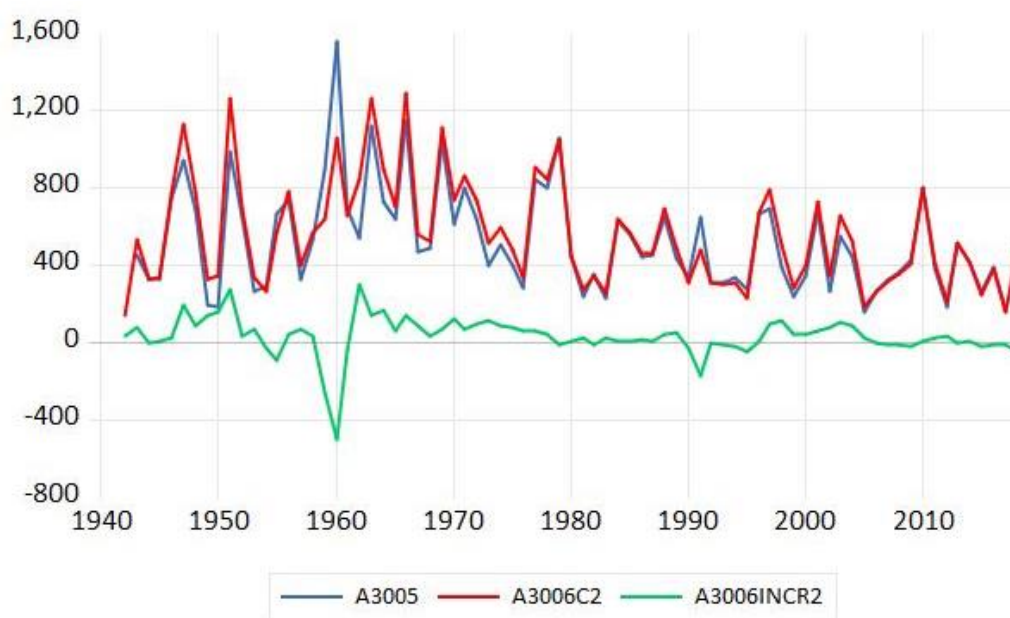


Figura 41. Aportaciones anuales en 3005 (Trillo) y 3006c (Entrepeñas compuesta) e incremental

Puede verse el excelente acuerdo general entre ambas series lo que, considerando que proceden de registros diferentes e independientes, confirma su calidad y buena representatividad de las circulaciones por el tramo en régimen natural. Prescindiendo de las

anomalías observadas, la aportación incremental media es del orden de 40 hm³/año, consistente con los escasos aforos disponibles en la intercuenca.

Los únicos años claramente anómalos, con incrementos negativos muy apreciables, son los del periodo 1958-1960 y el año 1990/91, mostrados seguidamente.

Respecto al año 1990/91, la figura adjunta muestra evidentes deficiencias en la estación 3005 que aconsejan descartar su empleo en favor de la de entradas al embalse, como se ha propuesto anteriormente y se ha hecho en 3006c3.

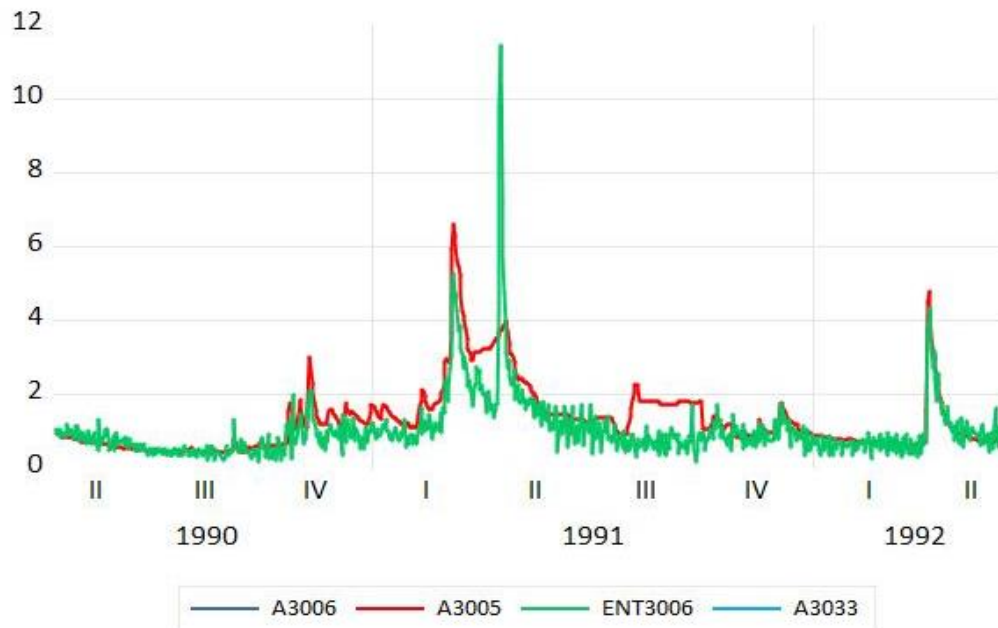


Figura 42. Aportaciones diarias en Trillo y Entrepeñas en 1990-91

Para el periodo 1958-1960, mostrado en la figura anterior sobre la transición, se observa un buen ajuste general, pero con dos años y medio –de diciembre de 1958 a agosto de 1961– claramente anómalos. Como se comentó, en este periodo 1958-60 se produce la transición del sistema de medida aforo-embalse ya señalada, con diferentes alteraciones en los registros que aconsejan emplear por defecto el balance de embalse.

El único contraste posible sería el de Trillo (3005) con la estación aguas arriba de Peralejos de las Truchas (3001), apreciándose en la figura adjunta la excelente concordancia de las secuencias de pulsos en ambos hidrogramas.

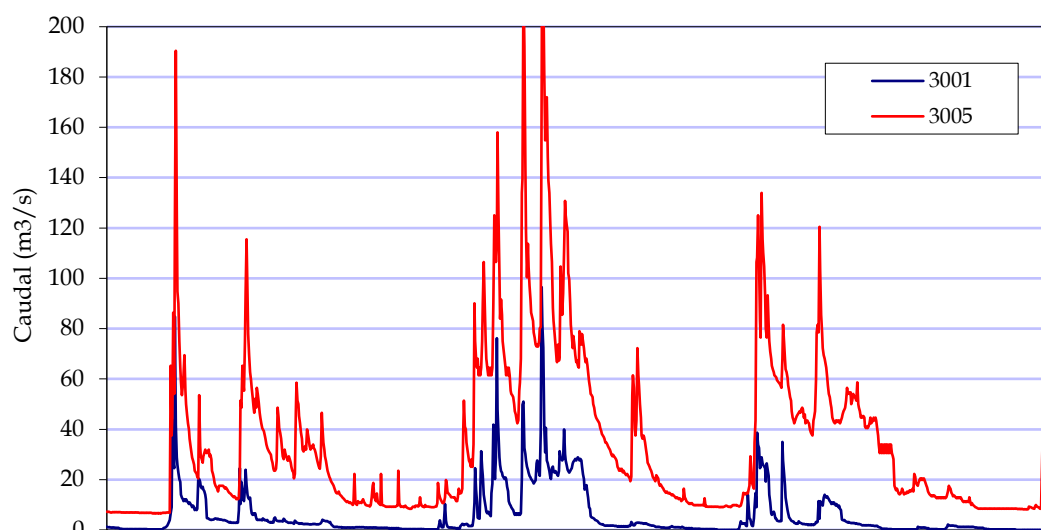


Figura 43. Caudales diarios en Peralejo de las Truchas y Trillo (1958/59 – 1960/61)

Ello hace pensar que podría ser correcto el dato de Trillo en lugar del deducido del balance de Entrepeñas, por lo que cabe concluir que el análisis de caudales no permite resolver la discrepancia, debiendo en su caso recurrirse a otros procedimientos –modelos de lluvia-escorrentía- para su dilucidación.

Si se prescinde de estas anomalías, la media de las aportaciones incrementales en Trillo-Entrepeñas es de unos 40 hm³/año, del orden del 8% de su aportación, valor más ajustado que el 5% antes sugerido deducido de la proporcionalidad de superficies. La evaporación media del embalse resulta ser de unos 15 hm³/año.

3.3.4.4. RÍO GUADIELA

La cuenca del Guadiela, entendida como toda la situada aguas arriba del embalse de Buendía, dispone de un conjunto de estaciones en el propio Guadiela y en sus afluentes, cuyo examen sistemático abordamos seguidamente.

En río Guadiela se sitúan las estaciones 3201 (Molino de Chinchá), 3041 (Alcantud), 3025 (Alcocer), y la estación final de salida 3043 (Buendía en el río Guadiela). En los afluentes del Guadiela por la margen izquierda se sitúan las 3040 (Santa María del Val, en el río Cuervo), 3045 (Priego en el río Escabas), 3186 (Priego en el río Trabaque), 3173 (La Peraleja en el río Guadamejud) y 3172 (Huate en el río Mayor).

La figura adjunta muestra un esquema de flujos en el tramo, con la misma representación de los tramos anteriores, es decir, las subcuencas representadas mediante rectángulos y las estaciones de medida mediante círculos. Los círculos pequeños en el embalse codificado como ##### representan sus entradas y salidas, codificadas como e##### y s##### respectivamente.

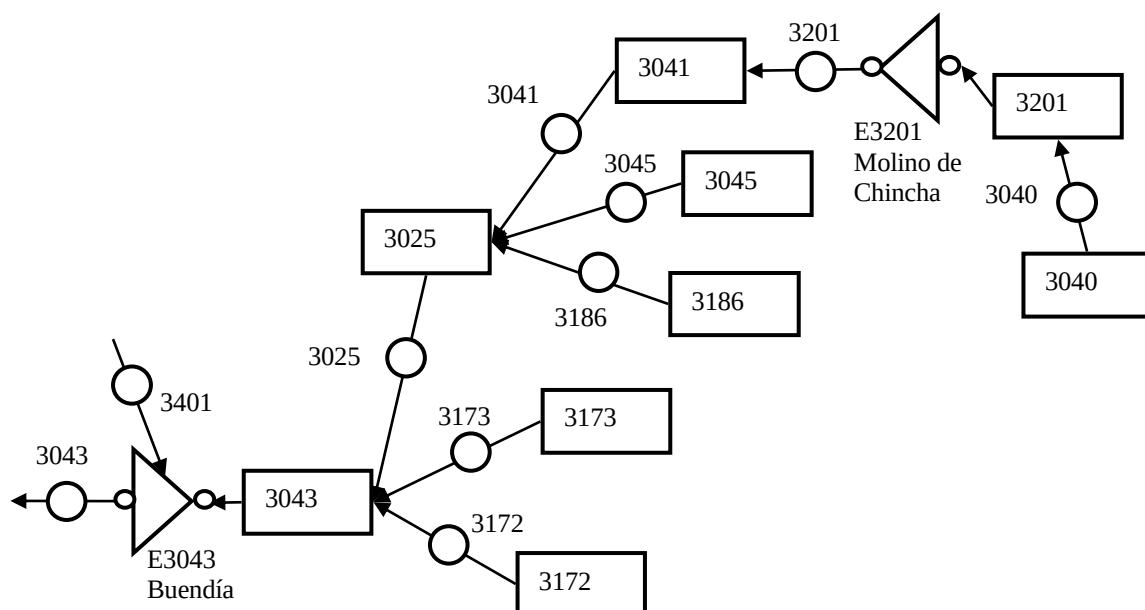


Figura 44. Esquema de la cuenca del Guadiela

El tramo puede considerarse formado por una cabecera hasta el Molino de Chíncha, una primera intercuenca hasta Alcantud, otra hasta Alcocer, y otra final hasta Buendía. A estas intercuenas se incorporan por la margen izquierda dos afluentes principales con aforos, el Escabas y el Mayor, cuyos afluentes principales son a su vez el Trabaque y el Guadamejud.

Como en las anteriormente mostradas para la cabecera del alto Tajo, las figuras adjuntas muestran las correlaciones de las series anuales y mensuales de cabecera del Guadiela, hasta Alcantud, sin ninguna transformación, mostrando sus elipses de confianza del 95% (se emplea distribución F para las probabilidades). Pueden verse las elevadas correlaciones existentes en todos los casos, incluso con práctica coincidencia en algunos casos.

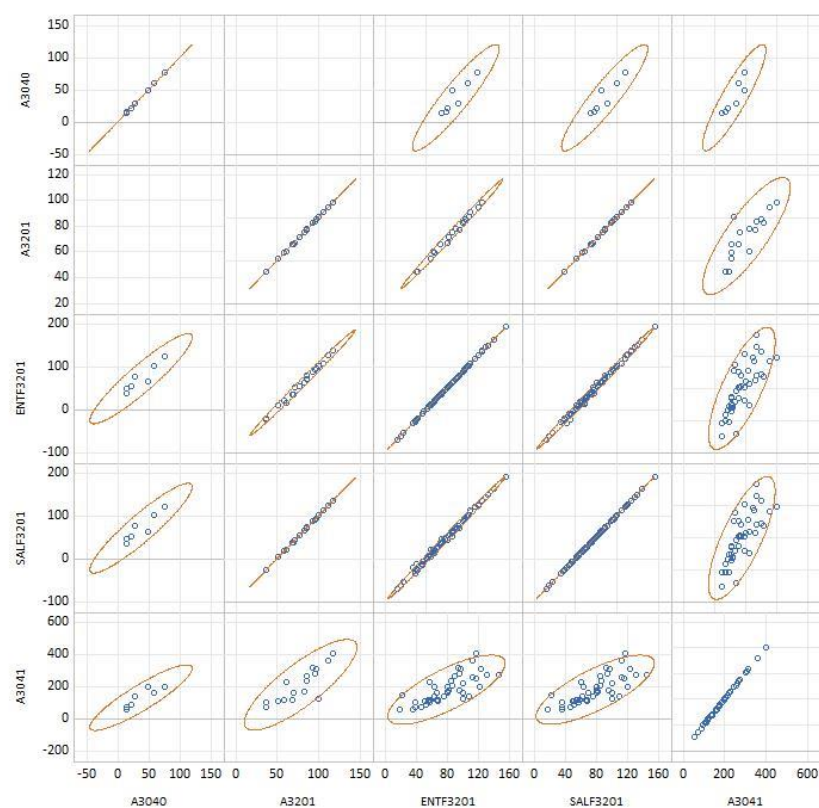


Figura 45. Correlación de aportaciones anuales en estaciones de cabecera del Guadiela

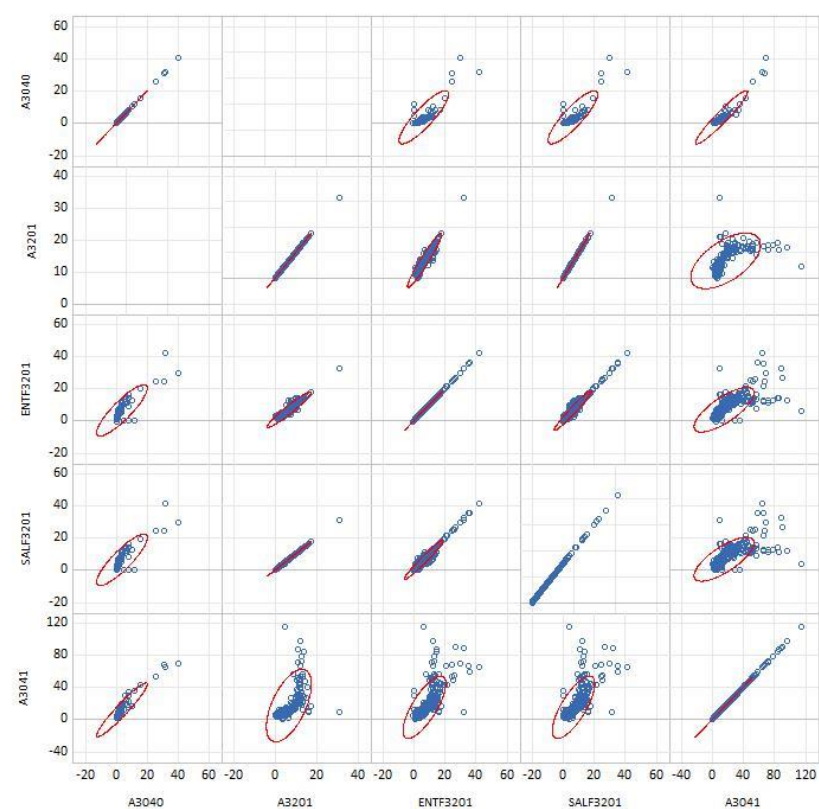


Figura 46. Correlación de aportaciones mensuales en estaciones de cabecera del Guadiela

La inspección de las series anuales, mostradas en la figura, confirma que, conforme a lo antes apuntado, tanto las entradas como las salidas del embalse y los datos de la estación de aforos del Molino de Chinchá (3201) son plenamente coincidentes.

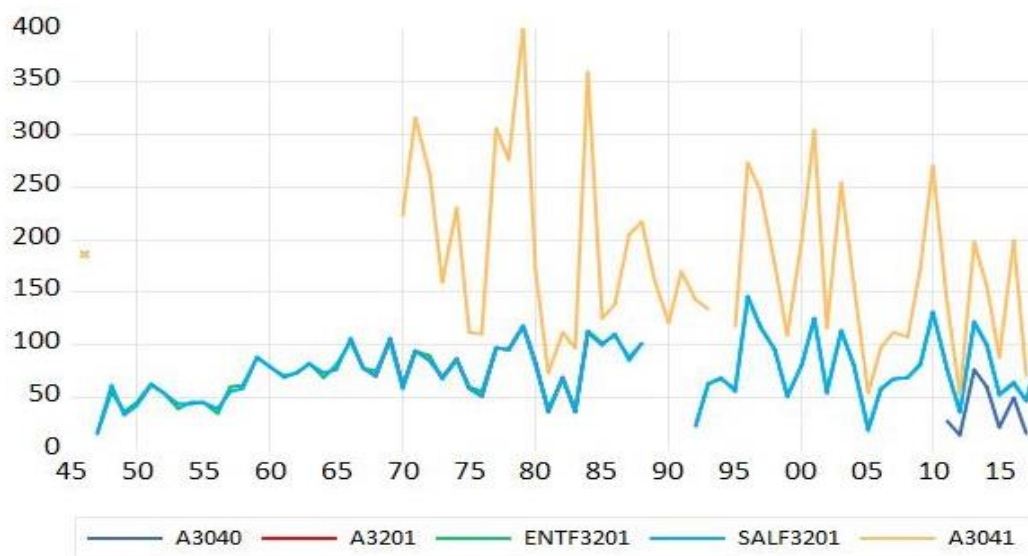


Figura 47. Series anuales de cabecera del Guadiela

La estación 3040, en el río Cuervo, es bien concordante con el Molino de Chinchá, situado aguas abajo, y la estación de Alcantud, aguas abajo del Molino, es también concordante con éste.

En el Molino de Chinchá hay un embalse de pequeña capacidad relativa (máximo de unos 5 hm³), cuyos datos de salida son, desde el año 1970, los datos de caudal en la estación 3201, siendo muy similares, aunque no idénticos, en el periodo anterior, 1965-70. A partir del 1 de octubre de 1986 no hay datos de la estación de aforo 3201, sustituyéndolos por los de salida del embalse, que incorporan siempre 3 decimales, a veces redondeados a enteros en los datos de la estación. Considerando la magnitud de los caudales circulantes, el efecto de alteración del embalse se puede considerar irrelevante a escala anual aunque significativo a escala diaria.

Cabría en consecuencia elegir la serie del Molino de Chinchá, compuesta por la estación de aforos y las entradas y salidas del embalse, como representativa de la cabecera del Guadiela, codificándose como q306. No obstante, la serie del aforo muestra valores sensiblemente inferiores antes de mediados de los 60, que es cuando comienza a operar la estación de aforo con dato diario. El examen del registro mensual confirma esta discrepancia.

Ha de recordarse que hasta esa fecha se ha empleado una serie mensual directa del Anuario, no procedente de la agregación de datos diarios por lo que, ante esta discordancia, es dudoso que deba ser empleada y se opta por suprimir este periodo de la serie mensual y anual, empleando solo los datos desde comienzos de los 60 procedentes del aforo diario y, adicionalmente, de las entradas diarias al embalse deducidas del balance. La figura adjunta muestra diferentes ventanas temporales de ambas series, pudiendo observarse su excelente acuerdo pese al comportamiento oscilante más marcado del cálculo de balance, al menos hasta 1979.

Considerando esta concordancia, se propone en definitiva emplear como serie representativa diaria la de entradas al embalse ent3201 de octubre de 1960 hasta la actualidad, y superponer a esta la de los datos de aforos en la estación 3201 en el periodo de oct 1965 a sep 1980. A

partir de la diaria se generarían la mensual y anual por agregación, que son prácticamente iguales en ambos casos. Esta serie compuesta sería la codificada como q306. Para el dato diario queda la duda de si sería más conveniente, a efectos de la modelación hidrológica, mantener la serie del embalse en todo el periodo, a pesar de sus mayores oscilaciones, de forma que a pesar del ruido de fondo las puntas no queden filtradas en exceso. Un procedimiento de chequeo sería el contraste a escala diaria con las estaciones aguas arriba y aguas abajo, 3040 y 3041. Ese contraste muestra en efecto puntas elevadas, concordantes en las tres estaciones, y de ascenso rápido, comportamiento más consistente con la serie de embalse que con la de aforos, por lo que es posible sostener este supuesto como más adecuado, adoptando tal serie de entradas al embalse como única de referencia q307.

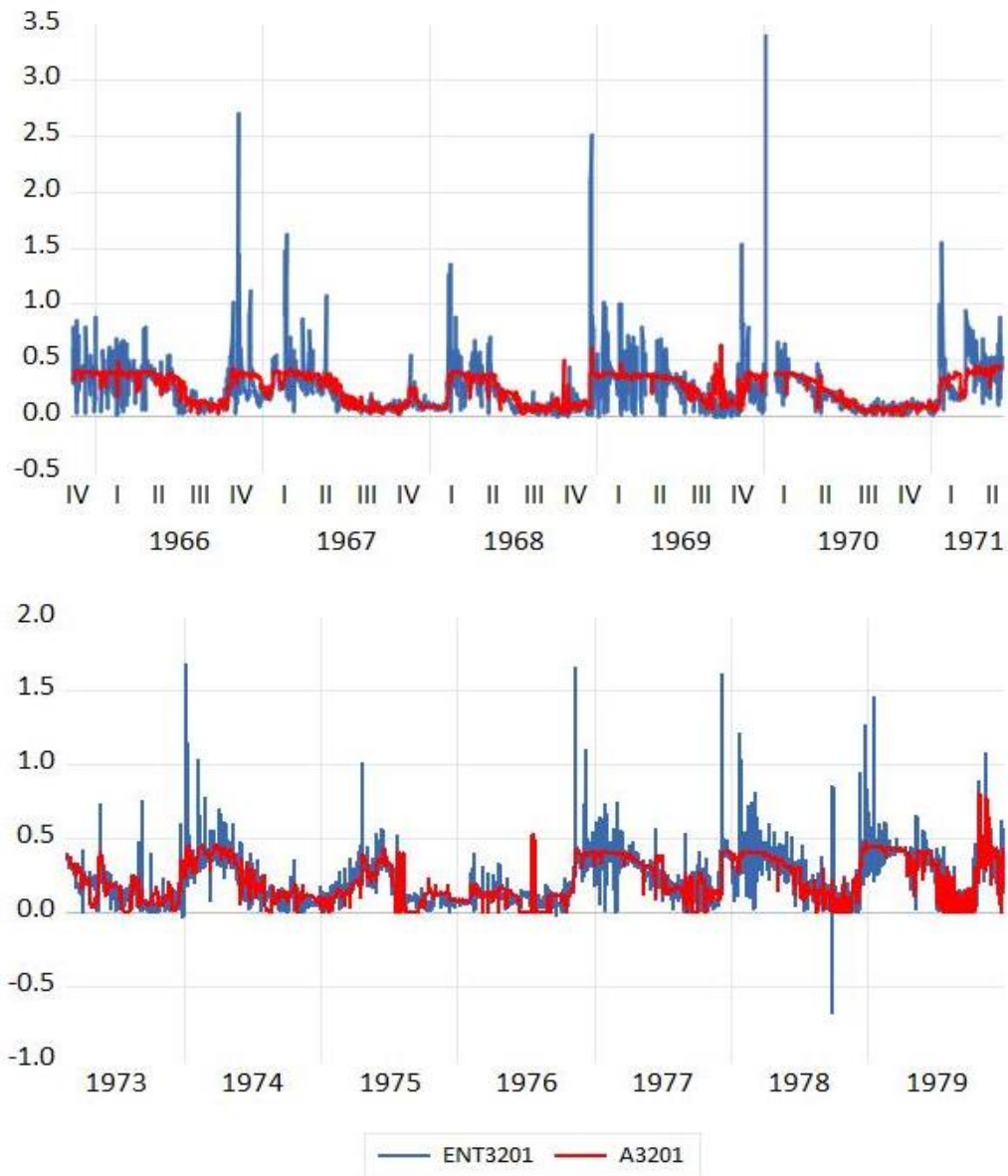


Figura 48. Series diarias en el Molino de Chinchá

Por su parte, la serie incremental de aportaciones en Alcantud (3041incr) es la mostrada en las figuras a escalas diaria y anual. Puede verse que los errores puntuales negativos son muy escasos, y la aportación incremental media es de unos $100 \text{ hm}^3/\text{año}$, con un efecto 80 que resulta perceptible en esta serie incremental.

En la estación 3025 (Alcocer) los datos son antiguos, anteriores a estas otras estaciones, y no pueden observarse las posibles concordancias. La longitud de su serie es de 3 años, desde el 1 de enero de 1912 al 31 de diciembre de 1914, por lo que no resulta útil para el análisis comparativo de las series anuales, aunque puede tener interés a otros efectos (caudales base, contraste a escala diaria, etc.), como se verá posteriormente.

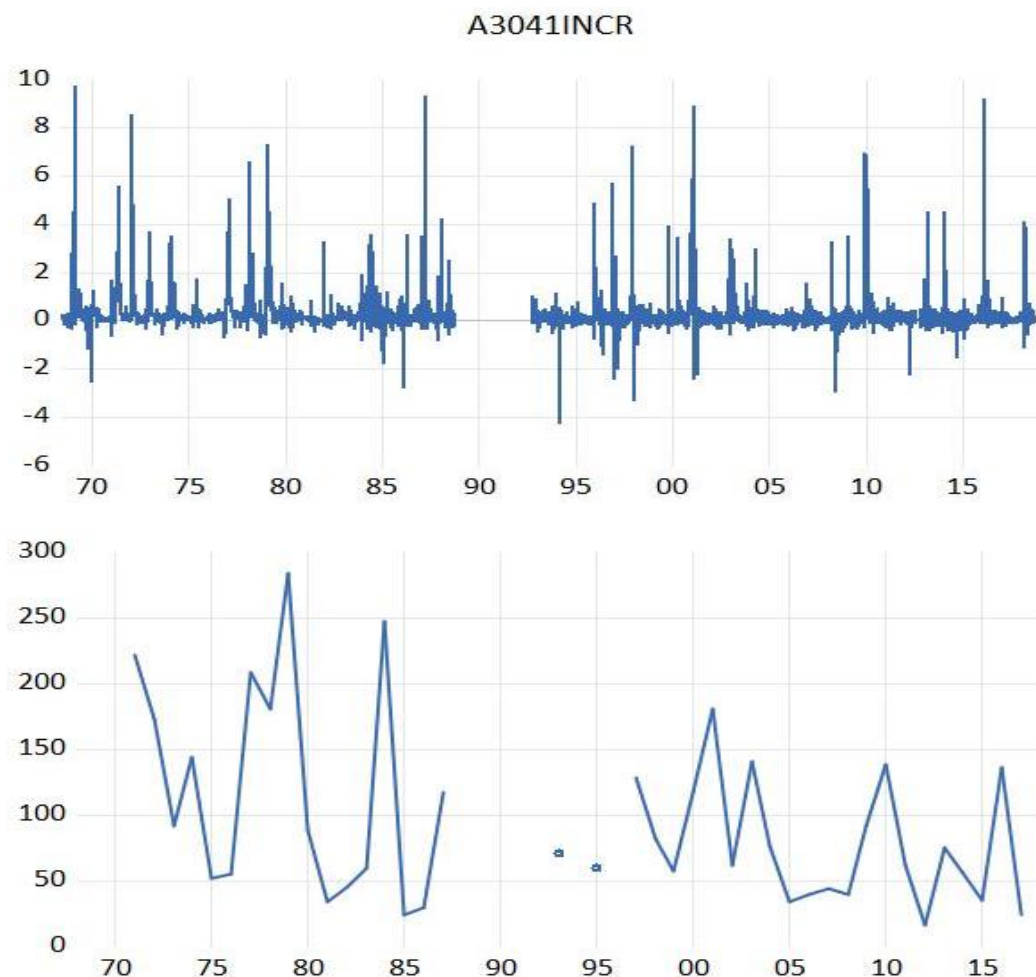


Figura 49. Series incrementales diarias y anuales en Alcantud

Es destacable la importante magnitud relativa de esta aportación incremental Chíncha-Alcantud, considerando la moderada superficie de intercuenca y la ausencia de afluentes importantes en el tramo. Ello sugiere la conveniencia de definir una estación de referencia en Alcantud, en el curso medio del Guadiela, que sería codificada como q307.

En definitiva, puede asumirse que la información básica de la cabecera y curso medio del Guadiela queda recogida por la estación de Alcantud (3041) desde 1970 en adelante (q307), y por una estación virtual en el Molino de Chíncha (3201), asimilada a las entradas al embalse, si se requieren datos anteriores, desde 1948 (q306).

En el Molino no es apreciable el efecto 80, que si puede intuirse en Alcantud, si bien su registro es corto y no permite extraer conclusiones firmes.

Por otra parte, los flujos anuales registrados en los dos afluentes del Guadiela, Escabas y Mayor, son los mostrados en las figuras.

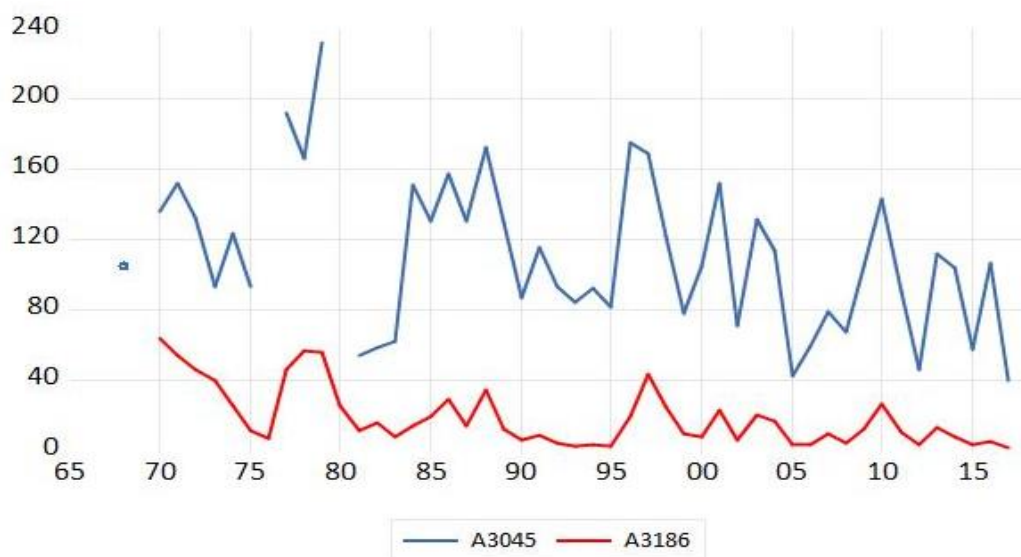


Figura 50. Series anuales en la cuenca del Escabas

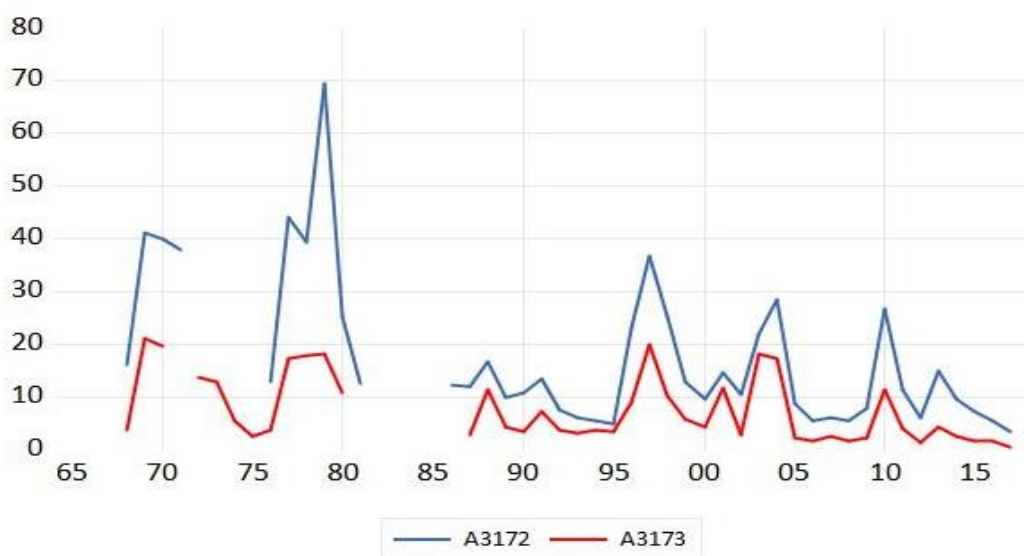


Figura 51. Series anuales en la cuenca del Mayor

Puede verse que los registros mostrados revelan comportamientos coherentes, con rachas concordantes, y una aportación total media conjunta de unos 150 hm³/año. Si fuese necesario, los escasos huecos existentes pueden ser rellenados mediante regresiones lineales con resultados satisfactorios.

La suma de las dos estaciones del Escabas y su afluente el Trabaque (3045+3186), acaso muy ligeramente incrementada por la intercuenca hasta la confluencia con el Guadiela, puede considerarse como otra estación de referencia, río Escabas, codificada como q308. Si se suma la anteriormente mencionada de Alcantud (conjunto 3041+3045+3186), acaso ligeramente incrementada por las pequeñas intercuenas, puede considerarse como una serie bien representativa de la cabecera del Guadiela, hasta la confluencia con el Escabas en el paraje de Las Juntas (estación ficticia de Las Juntas). En el Guadiela, inmediatamente aguas arriba de Las Juntas, antes de la incorporación del Escabas, se encuentra la presa de La Ruidera, incorporada a la red SAIH pero de la que no se dispone de registro de caudales en el Anuario.

En definitiva, todos los datos examinados del Guadiela hasta Alcantud son coherentes entre sí, al igual que ambos afluentes principales, mientras que la estación de Alcocer (3025) tiene datos muy anteriores, que no permiten el contraste salvo con el aforo de Bolarque, como se verá.

Aguas abajo de Las Juntas, que incorporan tanto el Alcantud (3041) como el Escabas, y descartada la 3025 por las razones antedichas, la siguiente estación de aforos considerada es la de Buendía (3043), en el Guadiela, donde además del aforo también se dispone de los datos del embalse. La intercuenca desde Las Juntas hasta Buendía incluye al río Mayor y otros pequeños afluentes secundarios como el Vindel, Merdanchel o Garigay.

Las series anuales de Las Juntas (3041+3045+3186), el aforo de Buendía (3043), y la entrada al embalse calculada por balance (3043ent) son las mostradas en la figura.

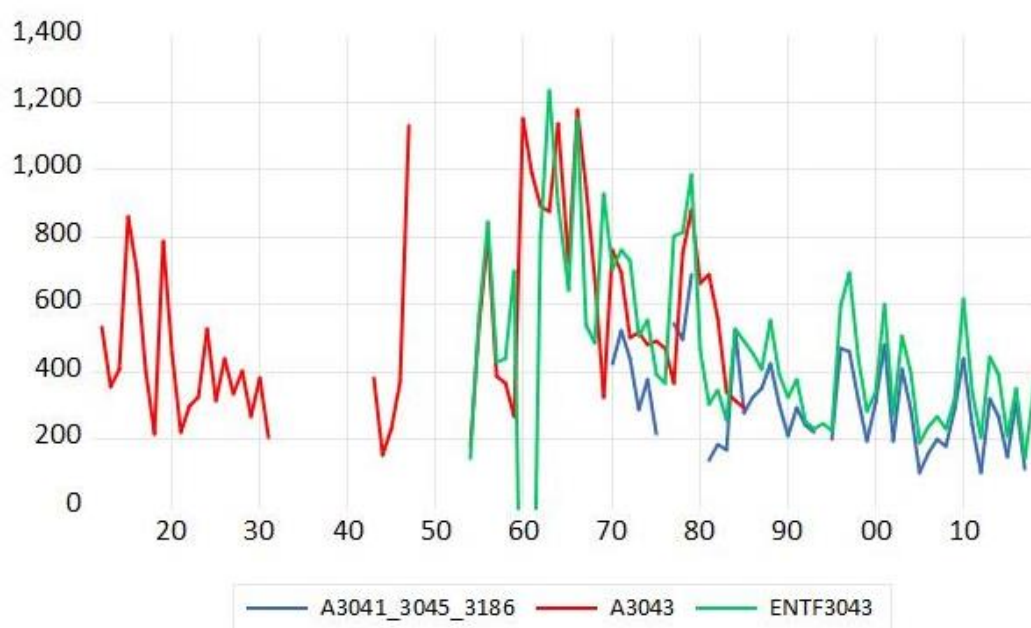


Figura 52. Series anuales en Buendía

Como se observa, los datos del aforo se inician en 1912 y se interrumpen en los años 30, volviendo a restaurarse unos años después hasta su cese a mediados de los 80. Al entrar en operación el embalse esta serie comienza a ofrecer los datos de sus salidas, por lo que solo puede considerarse como representativa de la circulación de caudales hasta esa época (finales de los 50), a partir de la cual debe descartarse a estos efectos.

Tras un periodo de inestabilidad inicial (1960), a partir de octubre de 1961 la serie de entradas al embalse puede considerarse como la representativa de los caudales circulantes aguas arriba, pudiendo comprobarse su excelente concordancia con la de Las Juntas, con la que mantiene una gran coherencia pese a tener orígenes muy diferentes, lo que confirma la fiabilidad de los registros.

En definitiva, una serie representativa de los flujos en Buendía sería la compuesta formada por los datos del aforo 3043 hasta 1960, y la de entrada del embalse desde octubre de 1961 hasta hoy. Puede verse que el efecto 80 es perceptible en estas series. La serie compuesta representativa se codifica como q309.

Verificada la consistencia global a escala anual, es de interés examinar el comportamiento de las series de Buendía a escala diaria en diferentes periodos representativos de distintas

condiciones, tal y como se hizo anteriormente en el análisis de Entrepeñas. La figura adjunta muestra ejemplos de estas distintas situaciones.

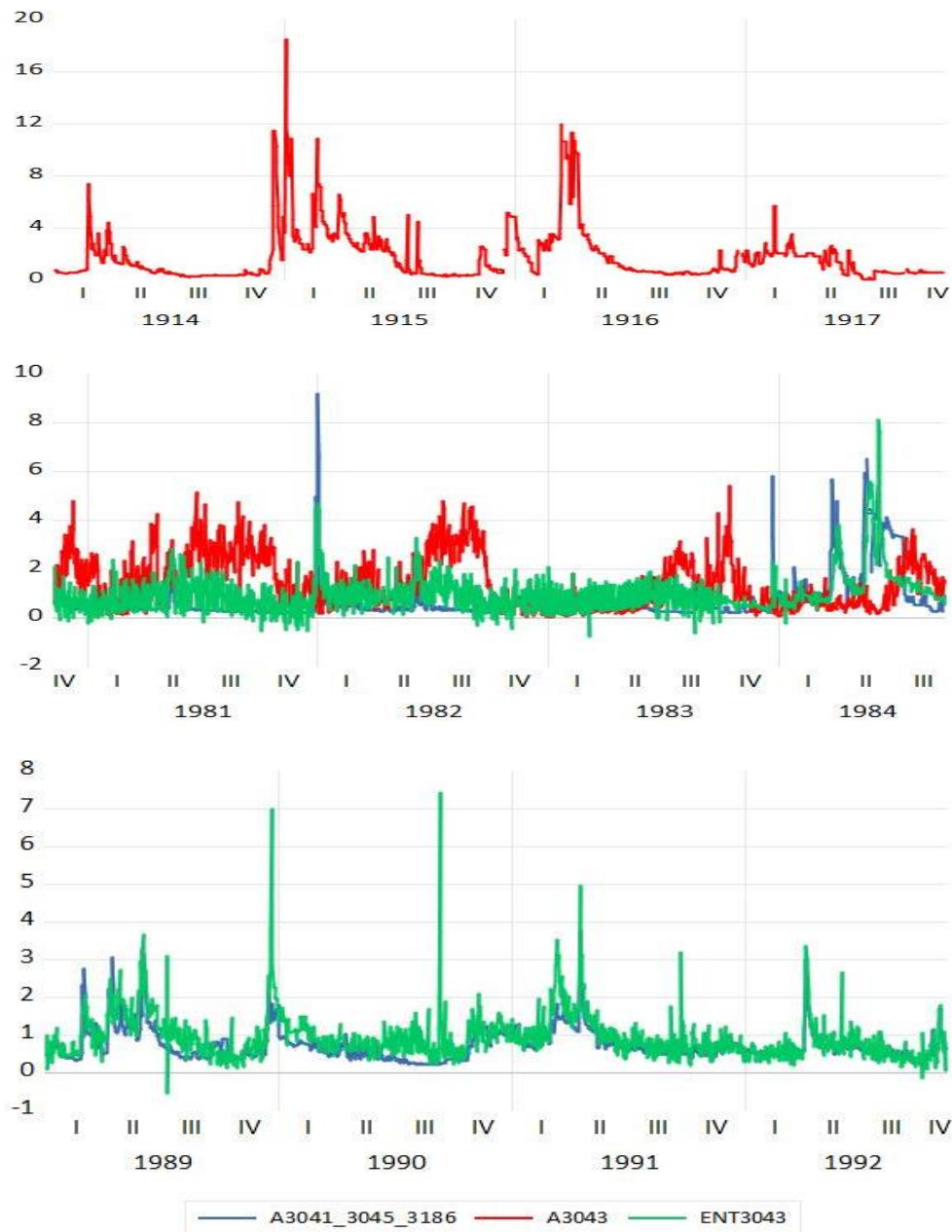


Figura 53. Caudales diarios en Las Juntas y Buendía en diferentes periodos temporales

Puede verse que el hidrograma del periodo inicial, en la ventana 1914-1917, presenta un aspecto general satisfactorio, con ciclo estacional bien marcado y curvas de crecida y agotamiento en principio correctas, sin efectos espurios constatables. En una segunda ventana 1981-1984 se observan ya tanto el comportamiento oscilatorio típico de los hidrogramas calculados por balance de embalse, como el efecto de separación del hidrograma del aforo, que ya no es representativo de los flujos entrantes al embalse sino de los salientes. Finalmente, en la tercera ventana 1989-1992 se observa la excelente concordancia de la serie de Las Juntas con la calculada por entradas del embalse que, pese a su comportamiento oscilatorio, marca muy correctamente la secuencia de los caudales situándose ligeramente por encima de Las Juntas, a causa de la intercuenca.

Para contrastar la validez de la serie 3043 en el periodo anterior a la puesta en marcha del embalse de Buendía, cabe contrastarla con la serie 3025 (Alcocer), ya reseñada, en el periodo trianual desde el 1 de enero de 1912 al 31 de diciembre de 1914, en que hay datos comunes. El resultado es el mostrado en la figura, en la que se muestran las series en escala ordinaria y semilogarítmica.

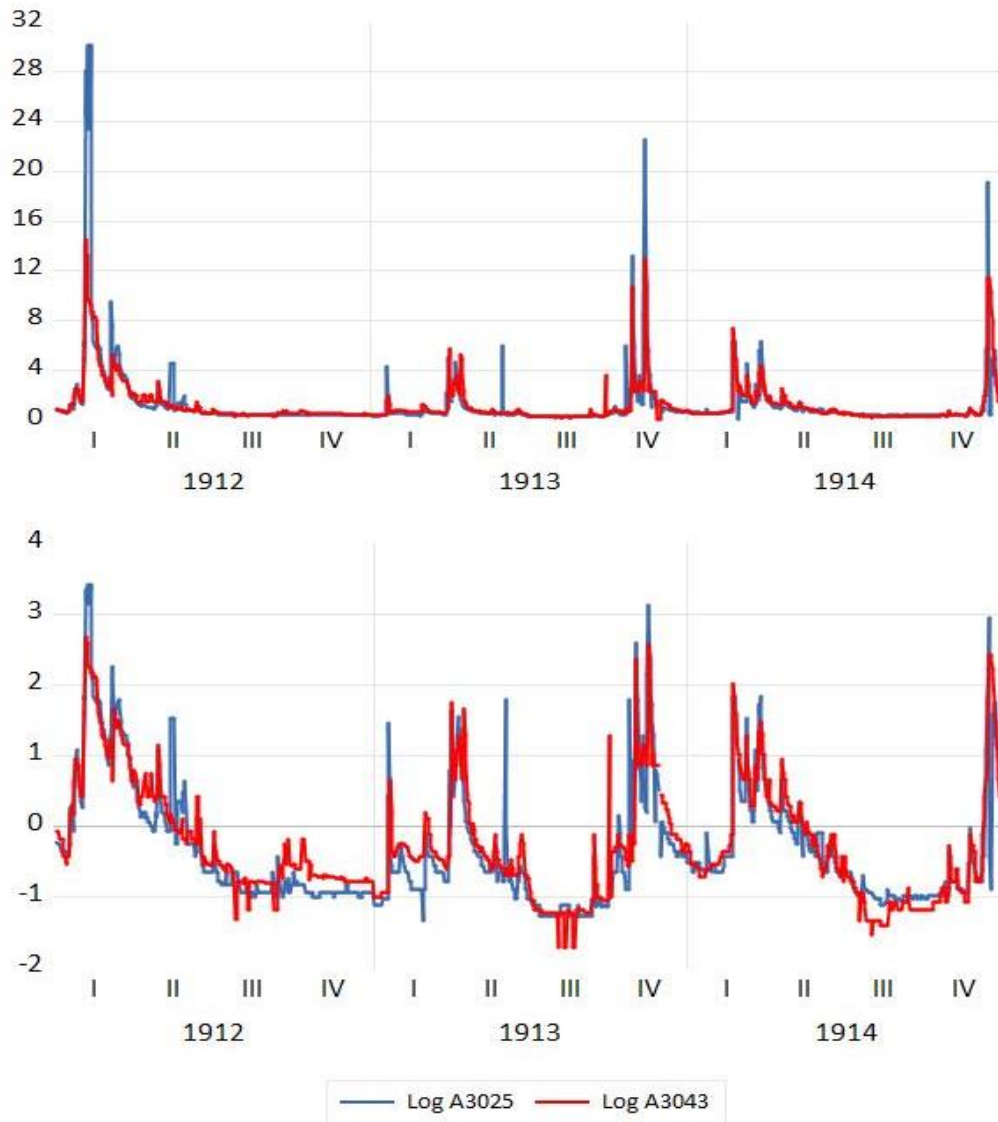


Figura 54. Series de aportaciones diarias en Alcocer y Buendía (1912 a 1914). Escalas ordinaria y semilogarítmica

Se observa que la asociación es excelente ($R^2=0.72$ para el modelo ajustado de regresión con curva potencial), lo que permite en efecto sostener la validez de la serie de aforos de Buendía, 3043, como representativa de los caudales circulantes en ese punto en el periodo anterior a la construcción del embalse.

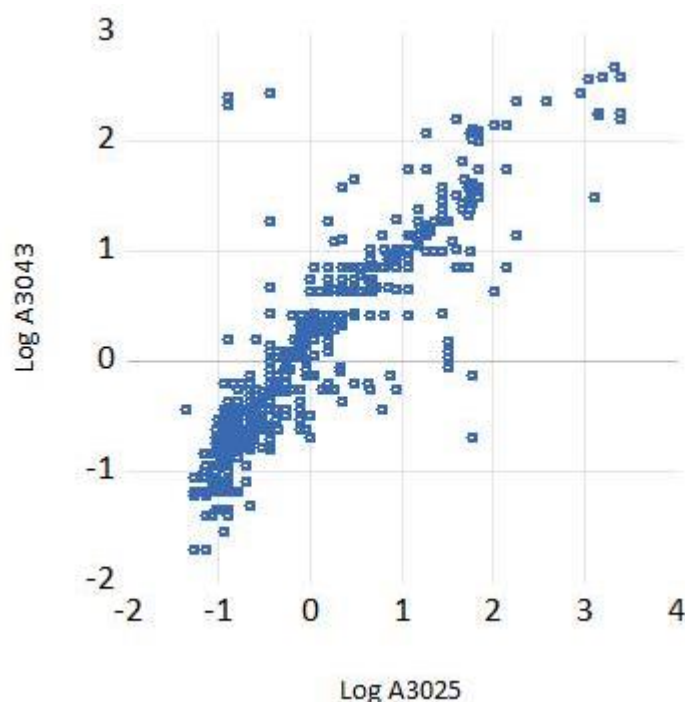


Figura 55. Gráfico de dispersión de las aportaciones diarias en Alcocer y Buendía (1912 a 1914)

Se observa asimismo que las curvas de agotamiento son claramente exponenciales (rectas en el gráfico semilogarítmico), y que los datos en Buendía tienden a ser iguales o muy ligeramente superiores a los de Alcocer en estos periodos, como cabría esperar por efecto de la pequeña intercuenca entre ambos, que en ningún caso genera ganancias ni pérdidas incrementales netas significativas.

3.3.4.5. CONJUNTO ENTREPEÑAS-BUENDÍA-BOLARQUE

Tras el análisis de caudales en ambas cabeceras, Tajo y Guadiela, hasta los embalses de Entrepeñas y Buendía, procede ahora analizar el tramo inferior a estos embalses, que sería el que inicia en ambas presas, con sus correspondientes flujos de salida, y concluye en el embalse de Bolarque, con los desembalses hacia Zorita.

Es importante destacar que así como los caudales analizados hasta hora se encuentran en un régimen cuasi-natural o muy próximo al natural, dada la muy reducida afección relativa experimentada en la zona tanto por detracciones como por almacenamientos, en este tramo a partir de las presas los flujos son claramente diferentes de los de régimen natural tanto por efecto de las mayores derivaciones para usos como por la modulación de los desembalses.

La figura adjunta, son la misma codificación gráfica de las anteriores, muestra el esquema conjunto. Puede verse que las entradas a Bolarque son las salidas de Entrepeñas y Buendía más las de su pequeña intercuenca en la que solo hay un aforo 3249 en el río Jabalera, y las procedentes de La Bujeda. Las salidas lo son hacia La Bujeda y las propias del Tajo hacia Zorita.

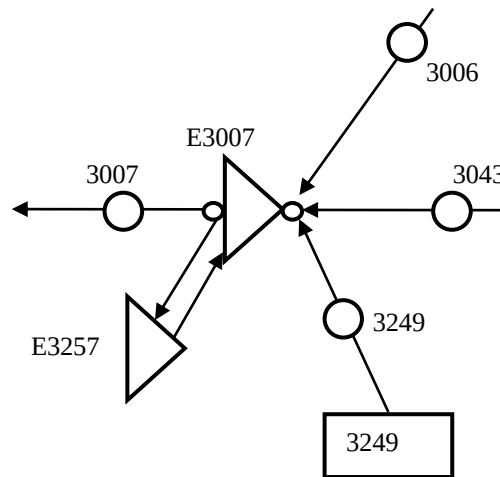


Figura 56. Esquema del conjunto Entrepeñas-Buendía-Bolarque

La relación de Bolarque con La Bujeda fue analizada con detalle anteriormente, por lo que nos centraremos ahora en las salidas hacia Zorita.

Para ello, la figura adjunta muestra en primer lugar las series anuales de las entradas a ambos embalses, asimilables a la circulación por ambos puntos.

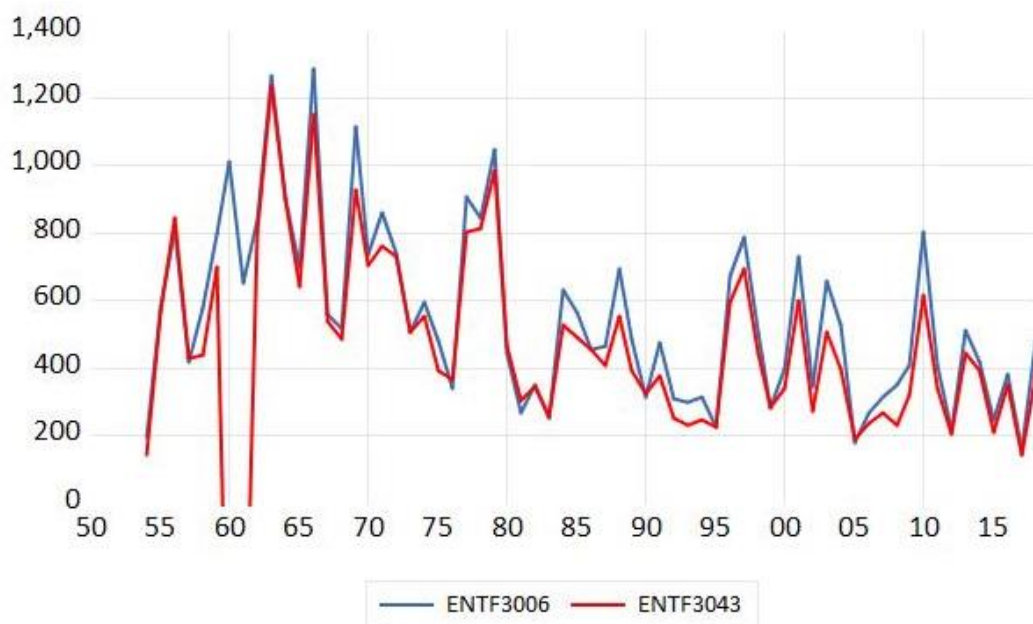


Figura 57. Series anuales de entradas a los embalses de Entrepeñas y Buendía

Dejando a salvo la anomalía de los datos a comienzos de los 60, puede observarse la gran correlación de las aportaciones anuales en Entrepeñas y en Buendía, con valores medios similares, del orden de 570 y 470 $\text{hm}^3/\text{año}$ respectivamente (media conjunta ligeramente superior a 1000 $\text{hm}^3/\text{año}$), y rachas secas y húmedas también concordantes. El efecto 80 es perceptible en ambas series, y las dos son muy húmedas de forma sostenida a lo largo de la década de los 60, existiendo dudas sobre la prolongación hacia atrás de ese efecto, en las décadas anteriores. Esta cuestión es de interés y requeriría de posteriores investigaciones adicionales.

La elevada correlación entre ambos registros principales de la cabecera del Tajo, así como las concordancias apreciadas en las otras estaciones aguas arriba, permite considerar la posibilidad de obtener series fiables de todas las aportaciones de cabecera mediante relleno de las series mensuales y anuales utilizando técnicas multivariadas basadas en correlaciones múltiples. Esta posibilidad se desarrollará más adelante.

Las dos series de entrada indicadas son moduladas por los embalses dando lugar a las dos series de salida mostradas en la figura, donde se ha representado también la suma de ambas y la serie de entradas a Bolarque obtenida mediante el balance del embalse.

Las series de suma de salidas y la de entrada a Bolarque han de ser muy similares, como efectivamente se comprueba, considerando la pequeña intercuenca intermedia formada básicamente por la subcuenca del Jabalera.

El río Jabalera desemboca en el Guadiela en el tramo Buendía-Bolarque y tiene una estación de aforos (3249) con datos registrados entre marzo de 1977 y septiembre de 1992. Las aportaciones medias que presenta esa estación son muy reducidas, del orden de 2 hm³/año, despreciables frente a las de las otras estaciones en los embalses. En Jabalera los años 80 fueron particularmente secos (0.1 hm³/año) mientras que el máximo se observó en 2010 (13 hm³/año). Valores tan pequeños apuntan, con toda probabilidad, a la existencia de aprovechamientos aguas arriba que consumen buena parte de su caudal.

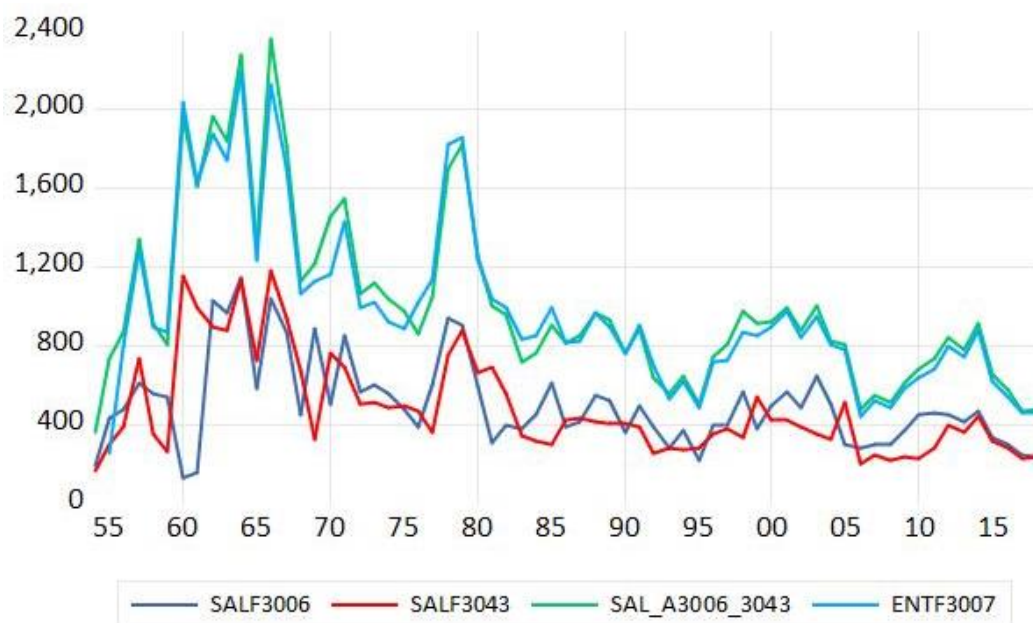


Figura 58. Series anuales de salidas de Entrepeñas y Buendía y entradas a Bolarque

Comprobada la similaridad de las salidas de Entrepeñas-Buendía con las entradas de Bolarque, en la siguiente figura se representan ambos junto con los flujos en Bolarque registrados en su antigua estación de aforos.

Con ello puede construirse la serie de referencia de entradas a Bolarque, codificada como q310, formada por combinación de la estación de aforos y las entradas al embalse. Esta serie es fuertemente oscilante a escala diaria, pero se ha optado por no realizar ningún filtrado y dejar los datos originales deducidos del Anuario, dejando el filtrado, si fuese necesario, para una fase posterior. A escala mensual y anual el efecto oscilatorio queda compensado y las series pueden considerarse como realistas, sin ajuste alguno.

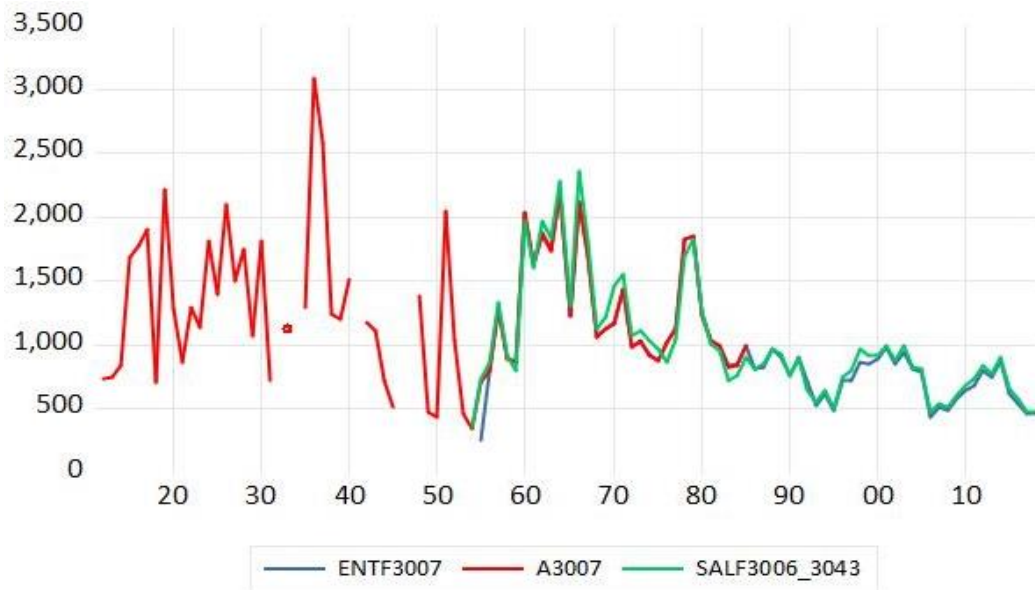


Figura 59. Series anuales de flujos en Bolarque

La perfecta concordancia entre el aforo y el balance se debe sin duda a que desde 1955 a 1985 los datos de la estación de aforos se sustituyen por las entradas al embalse obtenidas por balance. En el Anuario de Aforos la estación aparece como dada de baja en 1986.

Como ya se apuntó, a partir de 1974 entra en servicio el embalse de La Bujeda, por lo que las entradas a Bolarque dadas en el Anuario incluirían desde ese año las posibles turbinaciones de la central reversible. Para determinar su magnitud ha de realizarse el balance en La Bujeda y restar al total entrante el caudal derivado por el Acueducto Tajo-Segura (ATS).

El ATS comenzó su explotación en 1979 y ha venido funcionando de forma ininterrumpida hasta hoy con caudales variables dentro de su rango legal (de 0 a 600 hm³/año), dependientes de la coyuntura hidrológica. La figura adjunta muestra la serie anual de las derivaciones al ATS estimadas desde La Bujeda, que es una parte del total bombeado en el que se incluye el volumen posteriormente turbinado, y la serie ofrecida en los partes mensuales de la Comisión Central de Explotación del ATS.

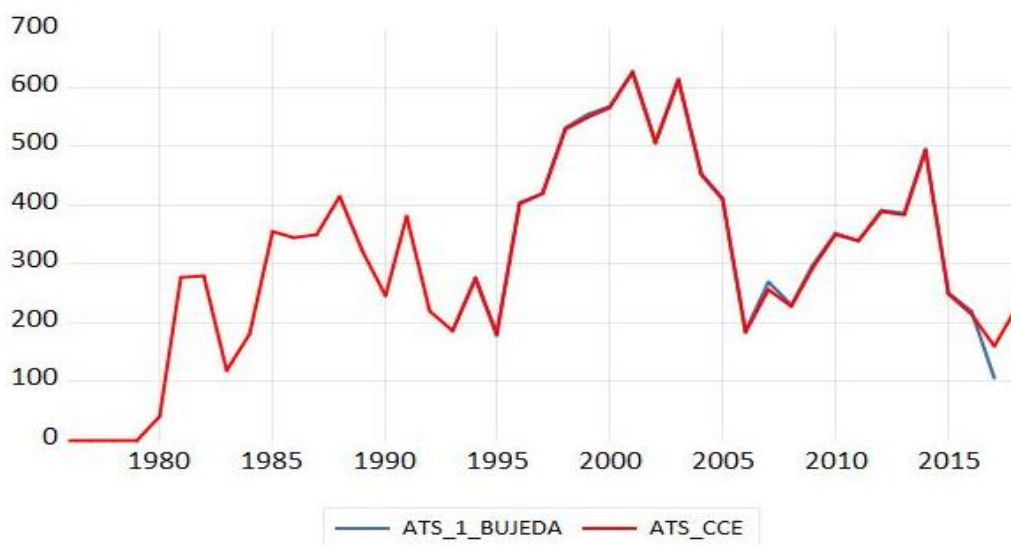


Figura 60. Serie de derivaciones del Acueducto Tajo-Segura en La Bujeda (hm³/año)

Puede verse que ambas series se superponen y son indistinguibles, como cabría esperar considerando que la fuente de los datos es la misma, la Confederación Hidrográfica del Tajo. En 2017 hay una ligera diferencia por los calendarios y deja de disponerse del dato publicado en el Anuario, que llega hasta septiembre de 2018 y por tanto no es completo. Por esta razón no se aprecia en la figura el periodo con trasvases nulos entre 2017 y 2018.

Considerando que las series de salidas de embalse del anuario incluyen todas las salidas existentes, si se resta la serie de salidas hacia La Bujeda (que son las entradas netas a este embalse dadas en el anuario más su evaporación, que consideramos despreciable) de la serie de salidas totales de Bolarque, también dada en el Anuario, se obtiene la serie de salidas de Bolarque hacia el río Tajo, mostrada en la figura, junto con la de entradas y la de envíos al ATS.

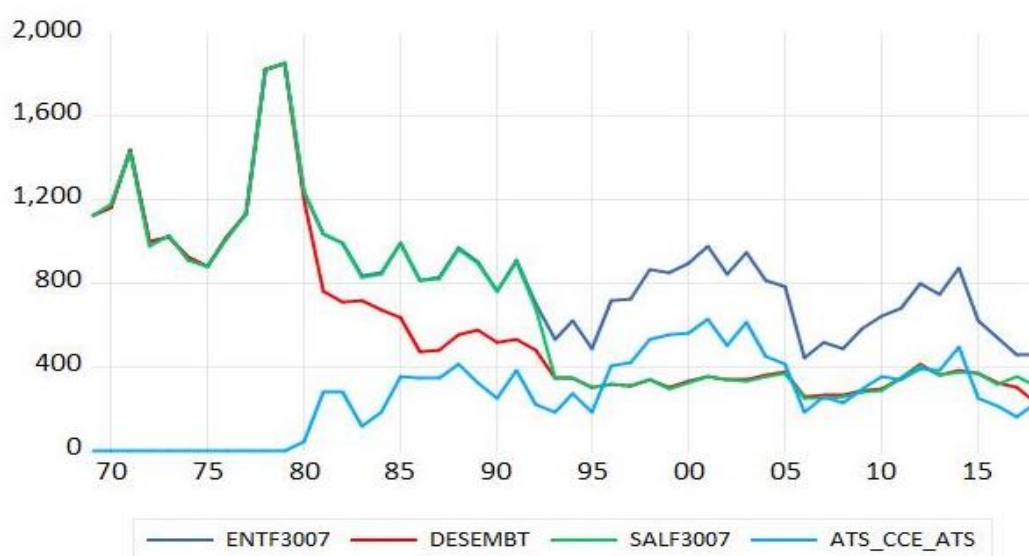


Figura 61. Series de entradas y salidas de Bolarque

Puede verse que las series de salidas y desembalses al Tajo son iguales hasta comienzos de los 80 en que se inicia la explotación del ATS. Desde entonces la salida hacia el Tajo es la diferencia entre ambas. Aunque el inicio de su explotación es anterior, los datos publicados de la Bujeda, empleados en el balance, se inician en 1992, observándose el salto. A partir de esa fecha los datos de estos desembalses son coincidentes, oscilando entre 300 y 400 $\text{hm}^3/\text{año}$.

En conclusión, los datos de aportaciones reales entrantes a Bolarque, diferentes del régimen natural, pueden tomarse del análisis de balance del embalse desde 1955 y de la estación 3007 en el periodo anterior. Las salidas pueden considerarse iguales a las entradas hasta 1954, e iguales a las salidas del embalse desde esa fecha.

Por su parte, las aportaciones en régimen natural podrían estimarse mediante la suma de Entrepeñas y Buendía, pudiendo deducirse un pequeño incremento variable, con valor medio del orden del 5%.

3.3.4.6. TRAMO BOLARQUE-ALMOGUERA

Aguas abajo de Bolarque, en el tramo hasta Almoquera, se sitúan la estación de aforos 3008 (Zorita), el embalse 3008 (Zorita), la estación de aforos 3009 (Almoquera), el embalse 3009 (Almoquera), la estación de aforos 3908 (Maquilón), y la estación de aforos 3149

(Almoguera). Además, en el arroyo Arlés se sitúa la estación 3271 (Pastrana), desembocando entre Zorita y Almoguera. A ellas puede añadirse la serie de aportaciones desembalsadas de Bolarque hacia el Tajo según los partes mensuales elaborados por la Comisión Central de Explotación del ATS.

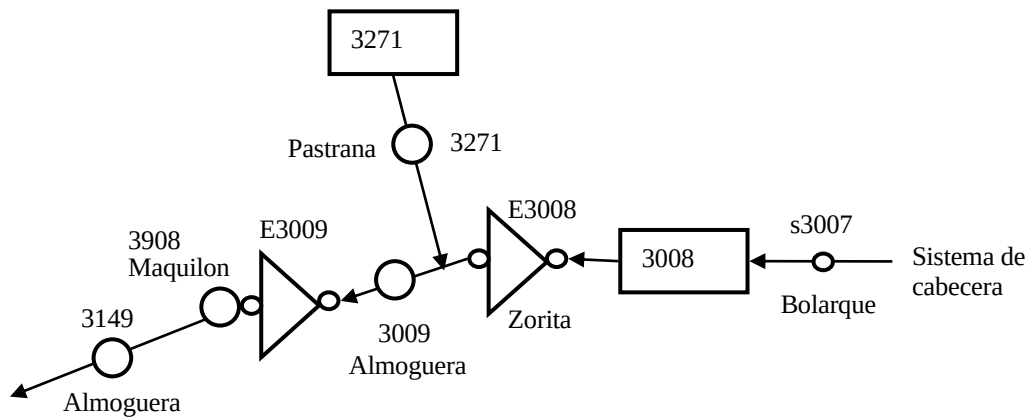


Figura 62. Esquema del tramo Bolarque-Almoguera

Todas las estaciones en el Tajo se encuentran en un tramo corto del río (unos 10 kms), y sin el aporte de afluentes significativos, por lo que sus caudales deben ser muy similares. La figura adjunta muestra las series anuales de las estaciones de Bolarque-Zorita en gráficos separados por estaciones.

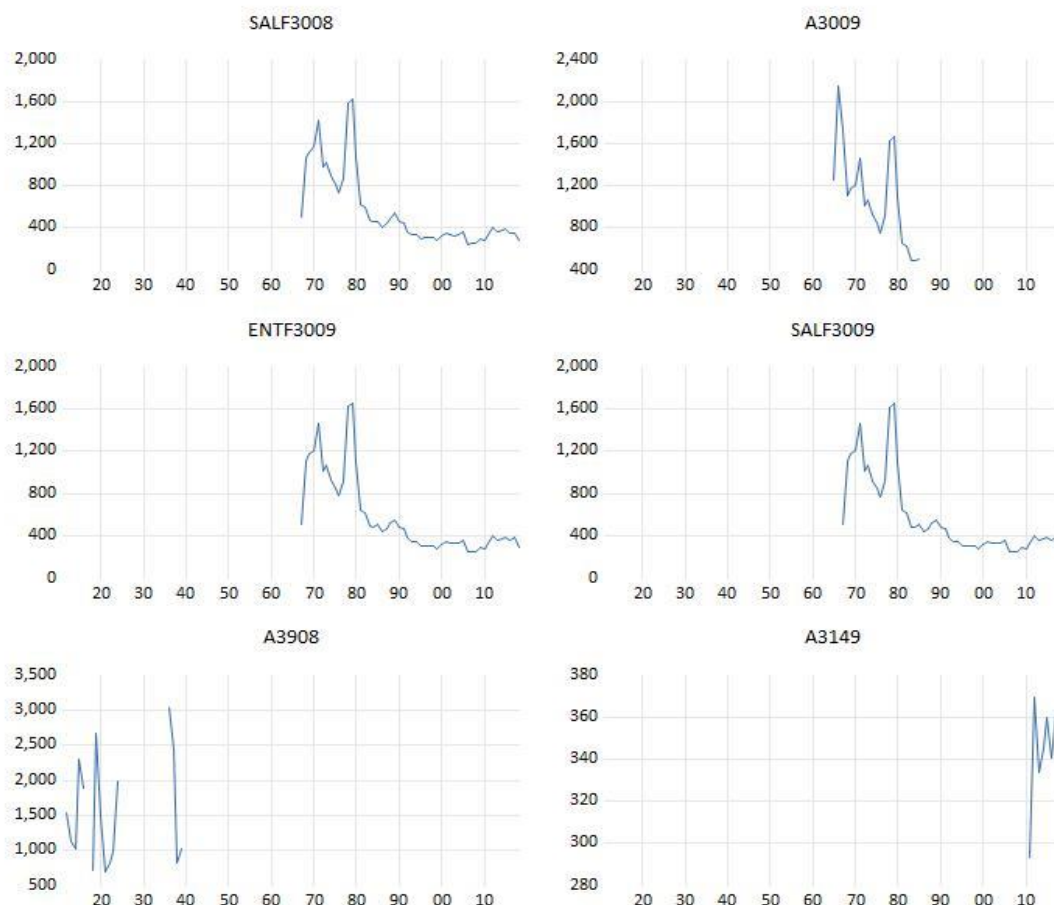


Figura 63. Series del tramo Bolarque-Almoguera en gráficos separados

Como puede verse, una importante ventana temporal, desde mediados de los 60, es compartida, y sus datos son muy similares. La estación de Maquilón es más antigua, con datos en las primeras décadas del siglo XX, y no puede contrastarse con las otras con datos más recientes, si bien parece mostrar una aportación media mayor.

Si se representan conjuntamente se obtiene la siguiente figura, en la que la concordancia en el tramo común de todas ellas es manifiesta. Las salidas de Almoguera SALF3009 junto con Maquilón A3908, para el periodo antiguo, anterior a 1960, podrían considerarse como representativas de la circulación por Almoguera, y codificarse como q311.

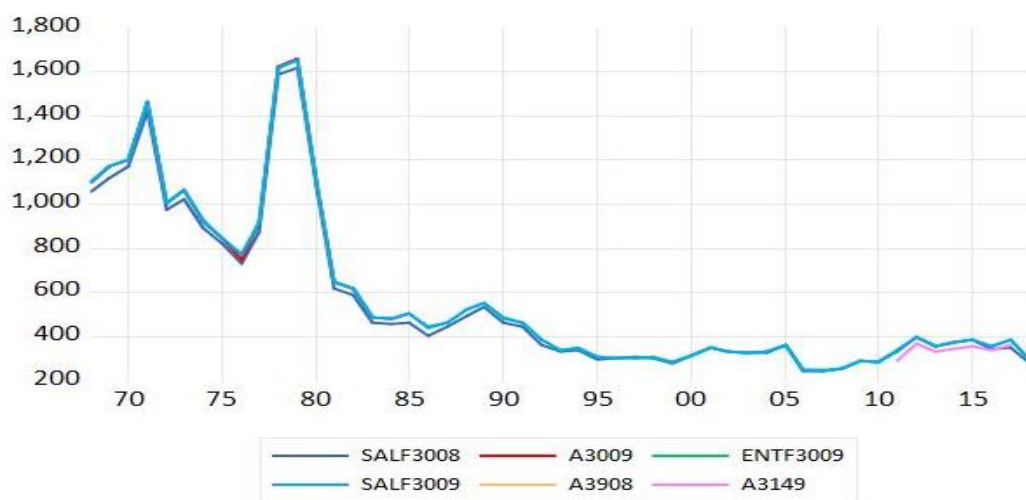


Figura 64. Series del tramo Bolarque-Almoguera en gráfico único

Asimismo, para contrastar las series de Zorita y Almoguera con el desembalse de la CCE, la siguiente figura muestra detalles de estas series en diferentes ventanas de tiempo.

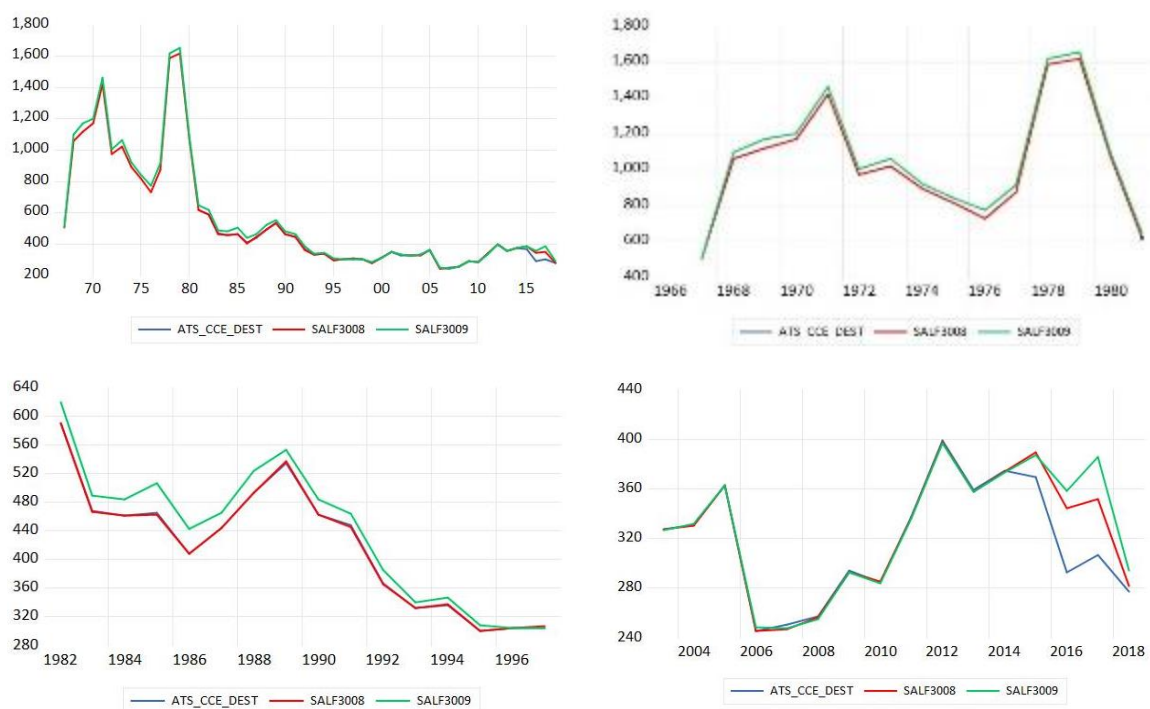


Figura 65. Series del tramo Bolarque-Almoguera. Detalles

Como puede verse, la serie CCE y la de Zorita son prácticamente indistinguibles, y la de Almoguera es ligeramente superior, como parece razonable por efecto de su intercuencia, en la que se incluye el arroyo de Arlés, ya reseñado. La similitud de flujos revelaría en su caso que las detracciones netas intermedias son comparables a las aportaciones incrementales.

En los periodos comunes, las aportaciones medias son de 368, 371 y 382 $\text{hm}^3/\text{año}$ respectivamente, con máximos de 620, 620, 649 y mínimos de 245, 246, 247. La pequeña ganancia sistemática entre Zorita y Almoguera es de unos 30 $\text{hm}^3/\text{año}$ (un 8%), aunque parece decrecer hasta anularse desde 1995 hasta 2015, como muestra la figura, sin que conozcamos la causa de esta anomalía.

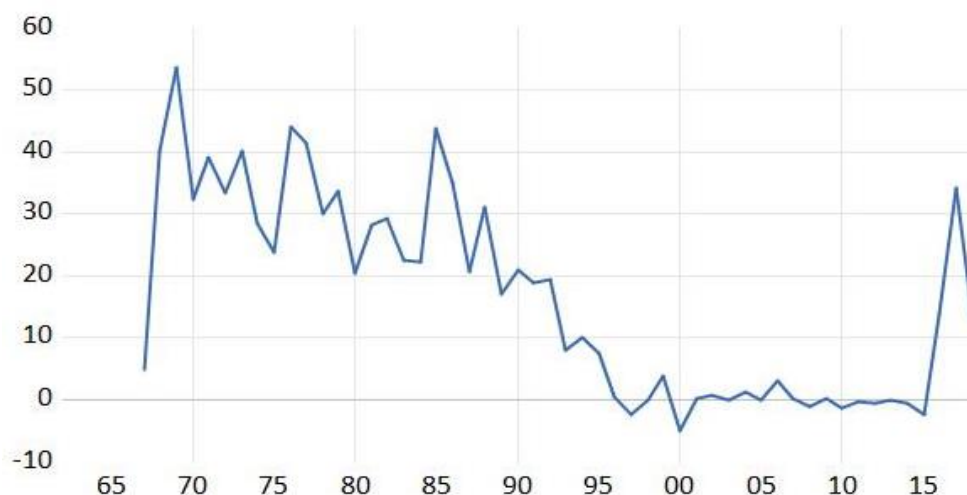


Figura 66. Flujos incrementales Almoguera-Zorita

En síntesis, las salidas de Bolarque, tanto calculadas por balance como tomadas de los partes de la CCE, son concordantes con las otras series aguas abajo hasta Almoguera, lo que permite afirmar que los datos implicados son en ese tramo son correctos y no hay anomalías relevantes.

Como ya se señaló, las salidas de Almoguera SAL3009 junto con Maquilón A3908, para el periodo antiguo, podrían considerarse como representativas de la circulación por Almoguera, q311.

3.3.4.7. TRAMO ALMOGUERA-VILLARUBIA DE SANTIAGO

Aguas abajo del tramo anterior se identifica el tramo Almoguera-Villarrubia de Santiago, en el que existen tres estaciones: la estación en canal 3216 (Canal de Estremera) y las estaciones de aforo en cauce 3248 (Fuentidueña) y 3259 (Villarrubia de Santiago).

A lo largo del tramo, y básicamente por su margen izquierda, confluyen distintos arroyos como los de Vállega, la Guindalera, el Regajo, Calvache o el Salado, este último destacable por aportar una concentración salina al Tajo que degrada su calidad y resulta claramente perceptible aguas abajo. Esta salinidad ha exigido la instalación de tratamientos especiales, como la ósmosis inversa, en la potabilizadora del Tajo a cargo del CYII, con toma situada muy aguas abajo, en el entorno de Valdajos.

El canal de Estremera, construido en los años 40 del pasado siglo, se inicia en el azud de ese nombre, inaugurado en 1950 aguas abajo de Almoguera, y discurre paralelo al Tajo y próximo al río por su margen derecha hasta Villarubia de Santiago, donde conecta con el canal del Tajo, alimentando el área regable de la vega del Tajo. Hace unos años el canal a cielo abierto fue sustituido por una tubería en carga, reduciendo sus consumos.

Las figuras adjuntas muestran un esquema del tramo y las series anuales de aportaciones en esos puntos.

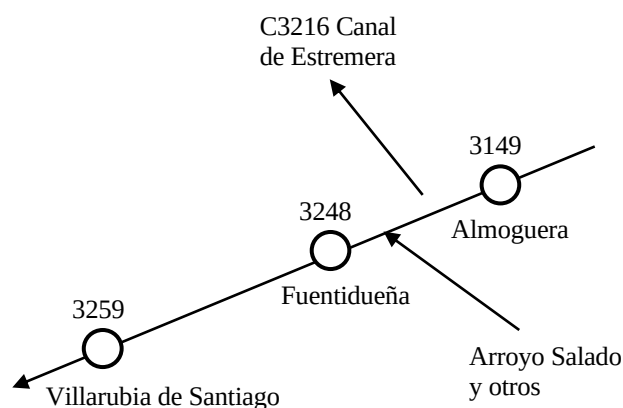


Figura 67. Tramo Almoguera-Villarrubia de Santiago

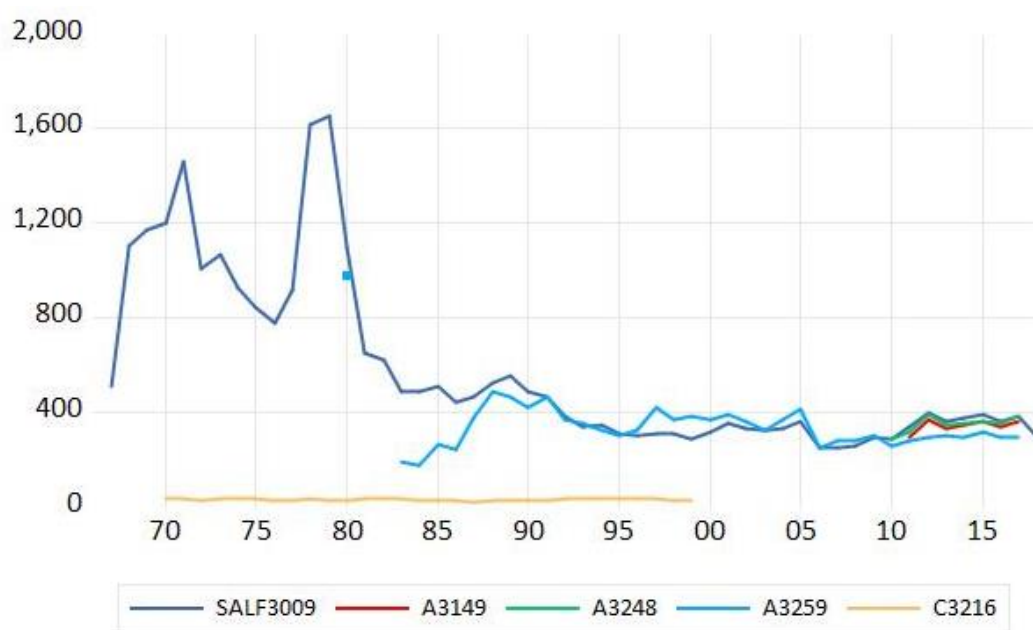


Figura 68. Series anuales en el tramo Almoguera-Villarrubia de Santiago

Puede verse que los caudales medios circulantes por el río son similares, del orden de $350 \text{ hm}^3/\text{año}$ desde comienzos de los 80 hasta la actualidad, con unos máximos excepcionales registrados en las salidas de Almoguera que alcanzan los $1600 \text{ hm}^3/\text{año}$.

Frente a estos valores, la derivación por el canal de Estremera C3216 es muy reducida, del orden de $30 \text{ hm}^3/\text{año}$. El ahorro por su modernización no puede apreciarse en la figura dado que el registro recogido en el Anuario concluye en 1999, aunque parece observarse una cierta reducción en el caudal de Almoguera y de Villarrubia desde 2006. No se observan ganancias netas importantes en la intercuenca, y en los últimos 10 años la diferencia entre los flujos en Almoguera y Villarrubia de Santiago es de una reducción de $50\text{-}60 \text{ hm}^3/\text{año}$, que serían el saldo neto actual del tramo.

3.3.4.8. TRAMO VILLARRUBIA DE SANTIAGO-ARANJUEZ

El último tramo en análisis corresponde al comprendido entre Villarrubia de Santiago y Aranjuez, donde se encuentran las estaciones, interrumpidas en 1948, 2003 y 1985 respectivamente, 3909 (Valdajos), 3258 (Embocador) y 3011 (Aranjuez) y las estaciones de aforo en canales 3410 (Acequia El Tajo), 3411 (Canal Caz Chico) y 3412 (Canal Las Aves). Esta codificación no es coincidente con la de otros Anuarios anteriores, en los que se denominaban como 3410, 3411 y 3412.

Se trata de un tramo complejo por su red de tomas, canales y retornos. La figura adjunta muestra esquema de circulación en el tramo, con la misma simbología de esquemas anteriores, e incluyendo la incorporación del río Jarama.

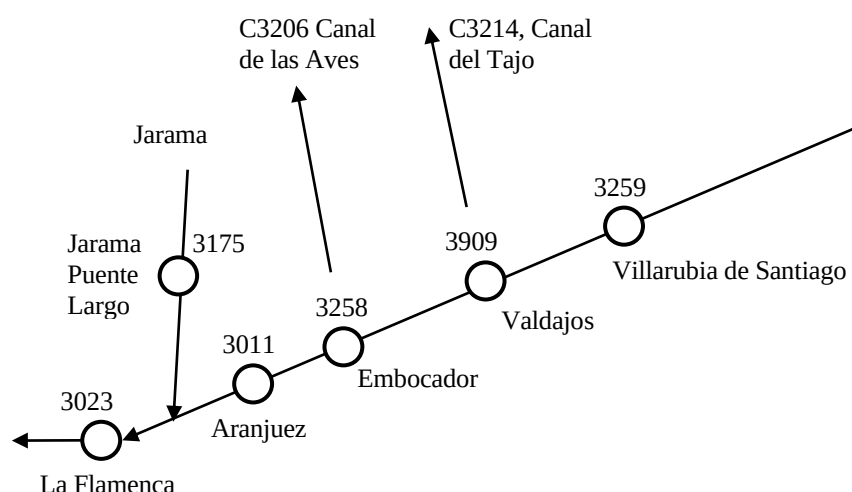


Figura 69. Esquema del tramo Villarrubia de Santiago-Aranjuez

Las series de aportaciones fluviales anuales hasta Aranjuez son las mostradas en la figura.

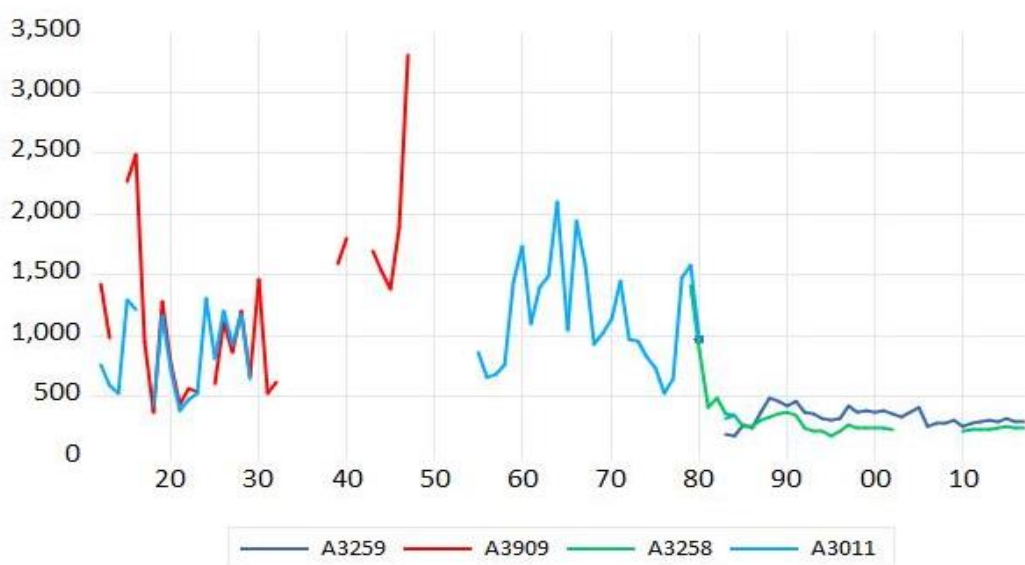


Figura 70. Series anuales de caudales en el tramo Villarrubia de Santiago-Aranjuez

Como puede verse, la estación de Valdajos presenta datos desde comienzos del pasado siglo, dejando de proporcionarlos, con intermitencias, desde finales de los 40. En este periodo

antiguo hay también datos de la estación de Aranjuez, plenamente concordantes con el comportamiento de Valdajos, como era de esperar teniendo en cuenta la proximidad de ambas. Es llamativo tan solo un valor muy elevado en Valdajos en 1947 que, examinado a escala diaria, permite sospechar que se trata de un error en el mes de marzo, con valores sostenidos del orden de $60 \text{ hm}^3/\text{día}$ a lo largo del mes, que no son concordantes con otros del entorno y deben ser corregidos.

La figura adjunta, a escalas aritmética y semilogarítmica, permite apreciar esta buena concordancia diaria en una ventana representativa del periodo común.

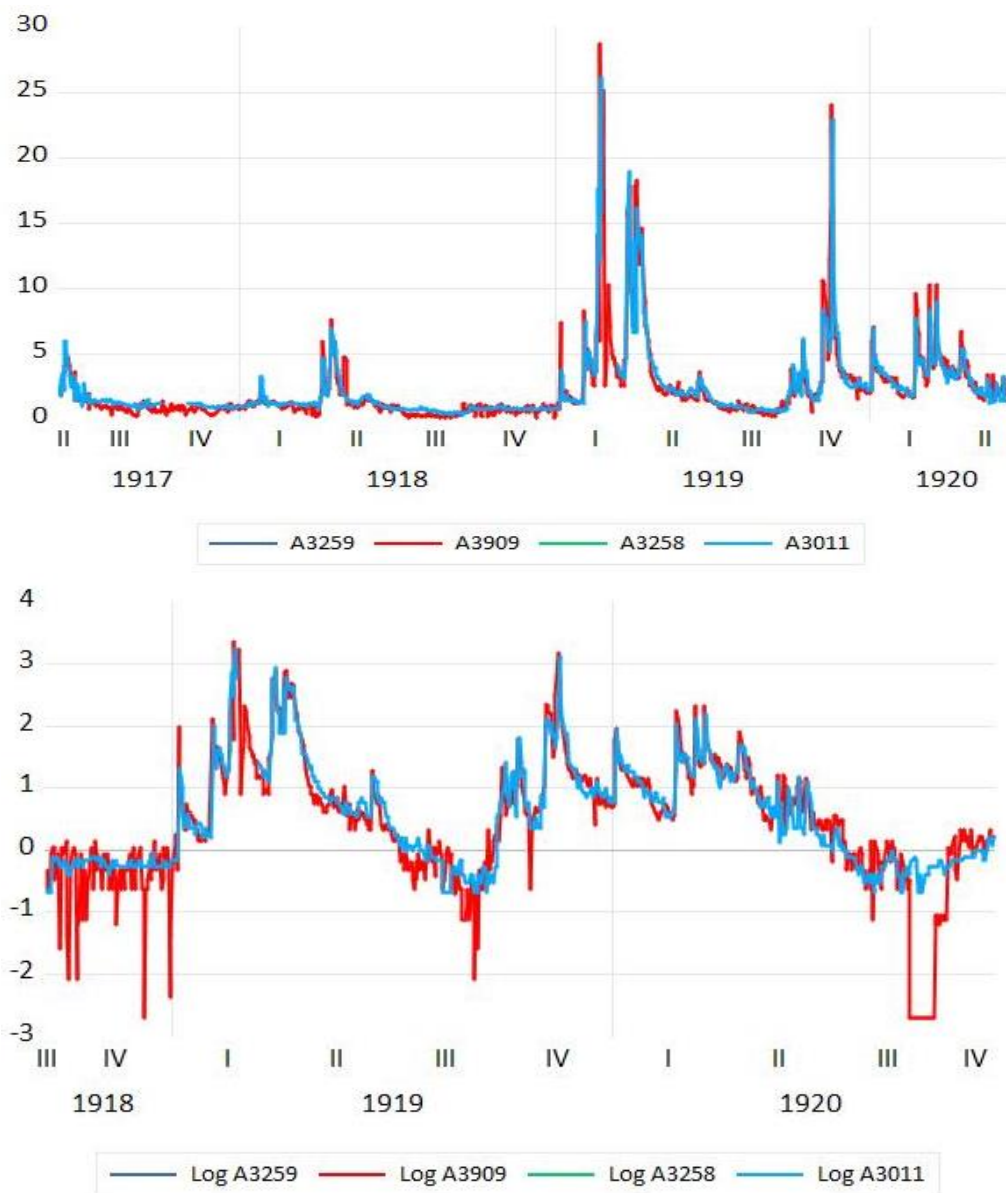


Figura 71. Contraste de series diarias en Valdajos y Aranjuez

Se observa que las series son prácticamente coincidentes, y singularmente en los periodos de aguas bajas, donde la de Aranjuez filtra algunas oscilaciones espurias que se observan en Valdajos.

Por otra parte, el examen de las derivaciones por los canales no permite analizar los flujos detraídos en aquellas épocas pues los datos disponibles en el Anuario, mostrados en la figura, son mucho más recientes y no cubren esos periodos.

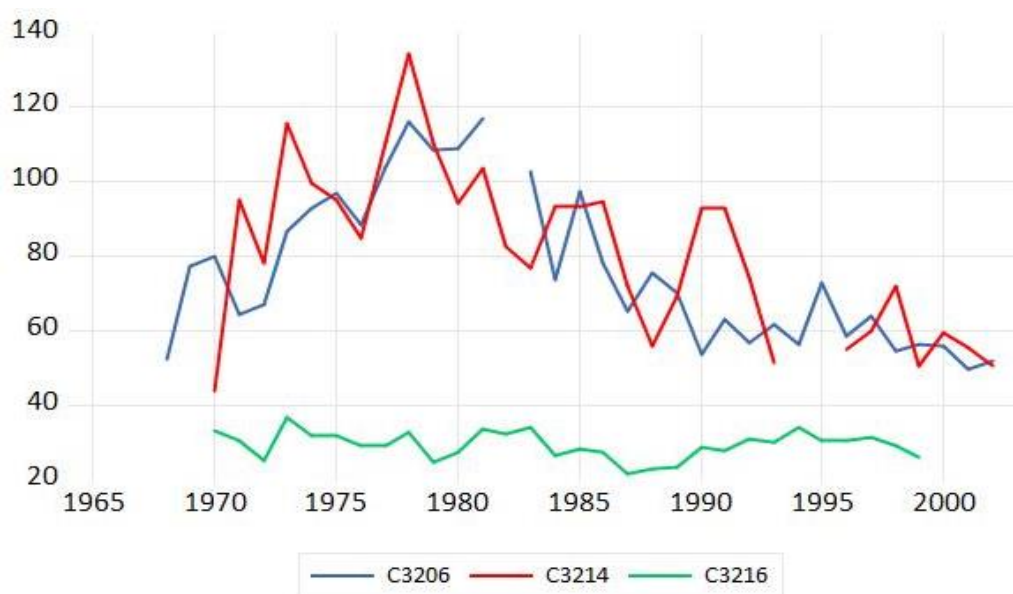


Figura 72. Series anuales de los canales en el tramo Almoguera-Aranjuez

Conforme a estos datos, la derivación total de Valdajos a Aranjuez en el periodo entre 1970 y 2000 es de unos 160 hm³/año y con tendencia a la baja desde finales de los 70 hasta mediados de los 90, en que parece estabilizarse en torno a unos 120 hm³/año. Esa detracción no se observa en el registro fluvial antes mostrado, en el que los datos son sensiblemente coincidentes.

El estudio de esta cuestión en el pasado y la actualidad requiere analizar en detalle la evolución histórica de la red de canales y acequias existentes en la zona y la reconstrucción de sus flujos y retornos circulantes, tarea de indudable interés pero que queda fuera de los objetivos de este documento.

Volviendo al examen de las aportaciones anuales, se observa que la estación de Aranjuez vuelve a dar datos desde 1955 y, tras los primeros años 80 con huecos, se interrumpe definitivamente en 1985, mientras que Embocador, que sería similar al encontrarse aguas arriba y muy próxima a Aranjuez, ha continuado hasta la actualidad. En consecuencia, se podría adoptar como serie representativa de aportaciones en Aranjuez, codificada como q312, una compuesta formada por la propia estación de Aranjuez (3011) hasta el 30 de septiembre de 1980, con la de Valdajos (3909) rellenado sus huecos en los periodos en que tenga datos, y la de Embocador (3258) desde el 1 de octubre de 1980 hasta hoy.

Un último contraste de datos sería el proporcionado por las estaciones del Tajo y Jarama en el entorno de su desembocadura. En el Tajo la estación aguas arriba sería Aranjuez-Embocador (3011-3258) y aguas abajo La Flamenca (3023), mientras que en el Jarama sería Puente Largo (3175). La figura adjunta muestra las series de aportaciones anuales de esas estaciones.

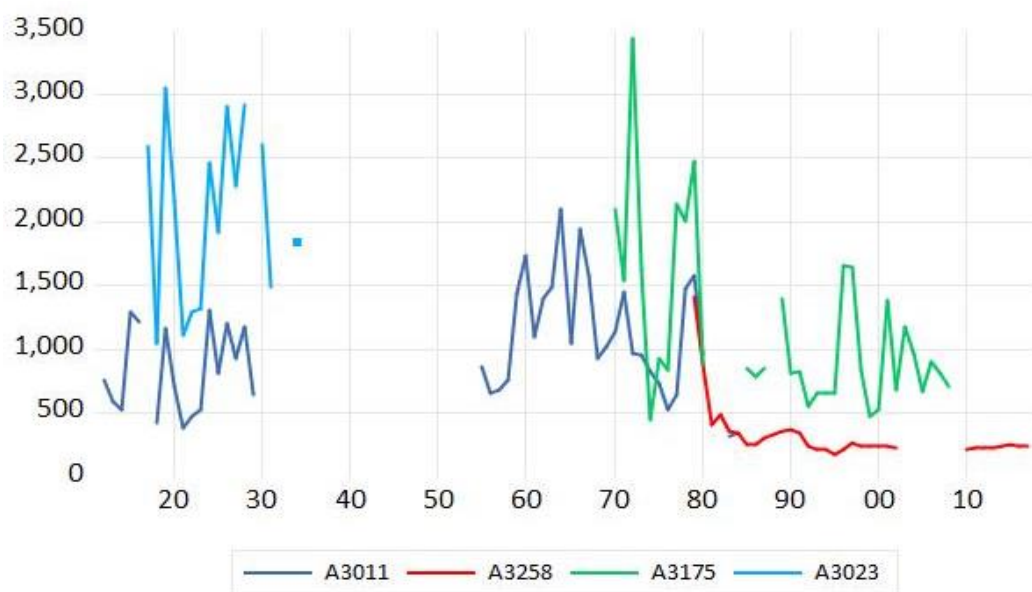


Figura 73. Series anuales de aportaciones en la confluencia con el Jarama

Como puede verse, no presentan un periodo de datos común que permita el contraste, pues La Flamenca operó una década entre 1921 y 1933, y Puente Largo arranca en 1970 e interrumpe su registro en 2008. Otras estaciones aguas abajo de La Flamenca tampoco permiten el contraste pues se alejan de la confluencia, con alteraciones cada vez mayores, y muestran series muy cortas (1983-85 en el Puente de La Barca o, ya muy alejada, 2010-17 en Puente Algodor).

No es posible por tanto comprobar la acumulación de Jarama y Tajo tras la confluencia en un periodo común representativo, aunque puede sin duda confirmarse la importancia de la contribución del Jarama al Tajo, con aportaciones de un orden de magnitud similar a lo largo del tiempo e incluso superiores a las del propio Tajo, del orden del doble, desde los años 80.

3.3.5. FORMACIÓN DE SERIES DE REFERENCIA (FASE 4)

Como conclusión de los análisis preliminares expuestos, se dispone de una colección de datos de caudales circulantes en diferentes puntos, directamente medidos en las estaciones de aforo o estimados por balance de embalses, a las escalas temporales diaria, mensual y anual.

A los efectos de la modelación hidrológica resulta conveniente, en primer lugar, la selección de estaciones originales o derivadas, consideradas como representativas de subcuencas, y la formación de nuevas series derivadas a partir de estas, obtenidas por combinaciones lineales de las mismas (agregación en confluencias, coeficientes correctores de área, etc.). Para la selección se han de tener en cuenta criterios como la representatividad, tamaño de las subcuencas o disponibilidad de registros de cierta longitud y extendidos hasta el presente (estaciones activas).

Seleccionadas y construidas las series representativas de referencia, también puede ser de interés la formación de una colección compacta y sin huecos, con los registros completados dentro de una ventana temporal común única. Si los datos son mensuales o anuales suelen emplearse regresiones múltiples con buenos resultados y si son diarios cabría recurrir a otras técnicas específicas. Junto con los rellenos se aplicarían en su caso las combinaciones

lineales que procedan, dando lugar finalmente al conjunto de series representativas, completadas y homogéneas.

Como primera tarea, y considerando lo expuesto en capítulos anteriores, se propone adoptar, a los efectos del análisis y modelación hidrológica, una primera colección de 12 estaciones de referencia formada por 5 en el Tajo hasta Entrepeñas, 4 en el Guadiela hasta Buendía, y 3 en el Tajo desde Bolarque hasta Aranjuez. Como se indicó, estas nuevas estaciones de referencia, reales o ficticias, se codifican mediante 3 dígitos, 3## entre 301 y 399, correspondiendo el 3 a la demarcación del Tajo y los otros dos dígitos ## a una numeración secuencial cualquiera.

Las estaciones de referencia propuestas dan lugar a la teselación hidrográfica de subcuencas mostradas en la tabla, en la que se señalan sus superficies y sus relaciones con las estaciones reales de aforos y embalses incluidas en el Anuario.

Cód.	Ubicación	Cauce	Composición	Área (km ²)
301	Peralejos de las Truchas	Tajo	3001	417
302	Ventosa	Gallo	3030	191
303	Taravilla	Cabrillas	3268	952
304	Trillo	Tajo	3005	1770
305	Entrepeñas	Tajo	3006+e3006+3033	562
306	Molino de Chinchá	Guadiela	3201ent	361
307	Alcantud	Guadiela	3041	212
308	Trabaque	Trabaque	3045+3186 , incr+3%	769
309	Buendía	Guadiela	3043+e3043	2075
310	Bolarque	Tajo	e3007+3007	247
311	Almoguera	Tajo	s3009+3908	390
312	Aranjuez	Tajo	3011+3909+3258	1512

Tabla 11. Teselación hidrográfica de referencia

El mapa adjunto muestra las estaciones y sus subcuencas asociadas.

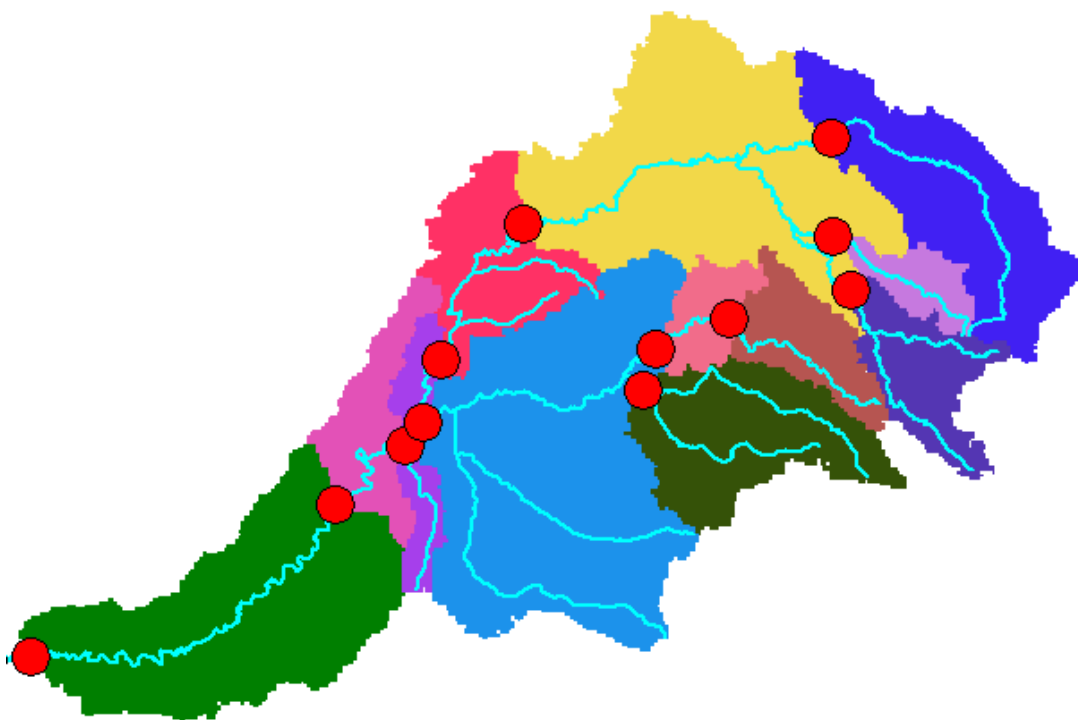


Figura 74. Mapa de subcuencas de referencia

La modelación hidrológica de la cabecera del Tajo podría partir de estas series observadas de referencia a distintas escalas temporales para análisis posteriores, realizar en su caso las correspondientes restituciones, y disponer de elementos contrastados que posibiliten una calibración robusta y fiable.

3.3.6. CONTRASTE CON LOS RESULTADOS DE SIMPA

En epígrafes anteriores se ha analizado con detalle el comportamiento de los registros foronómicos y de embalses disponibles en la zona de estudio a diferentes escalas temporales, concluyendo con una propuesta de 12 estaciones de referencia, cuya teselación en las 12 subcuencas asociadas se considera representativa e idónea para proceder a la modelación hidrológica de cabecera.

Estas 12 series, disponibles a escalas diaria, mensual y anual, son de datos observados y, por tanto, en general alterados y no correspondientes al régimen natural. Las alteraciones en las cuencas aguas arriba de Entrepeñas y Buendía son nulas o relativamente reducidas, por lo que las series pueden considerarse de régimen natural o cuasi-natural. Aguas abajo de los embalses las series están en general fuertemente alteradas y su evaluación del régimen natural requeriría de restitución.

Como primer paso en el análisis de esta situación, es del mayor interés el contraste entre las series de referencia obtenidas y las proporcionadas por modelos de simulación de lluvia-escorrentía como SIMPA.

Este modelo, desarrollado en la pasada década de los 90 como instrumento de gran utilidad en el contexto de la planificación hidrológica nacional, y aplicado a la totalidad del territorio español, ha sido objeto desde entonces de mejoras y actualizaciones sucesivas, supone un muy destacado esfuerzo de estandarización y homogeneización técnica a gran escala, y se ha

constituido de hecho como el estándar común adoptado por las diferentes demarcaciones hidrográficas para la evaluación de recursos hídricos de los planes hidrológicos, sin perjuicio de que cada demarcación haya podido disponer, en su caso, de otros instrumentos complementarios o adicionales.

Así sucede en la demarcación del Tajo en la que, además del estándar SIMPA, se ha dispuesto desde antiguo de otro modelo utilizado en anteriores trabajos de planificación, y que constituye una variante basada en el clásico modelo diario de Sacramento pero adaptado a periodos temporales de diez días.

Utilizando en principio el estándar SIMPA, resulta del mayor interés contrastar sus resultados con las series de referencia obtenidas en este trabajo. De las diferentes versiones existentes se ha utilizado la más reciente, con datos mensuales en el periodo entre octubre de 1940 y septiembre de 2018 (436 mapas mensuales correspondientes a 78 años completos), y resolución espacial de 500 m (mapas peninsulares escalados a 2230 filas por 2920 columnas).

Las series mensuales SIMPA consideradas en el análisis han sido:

AAC aportaciones acumuladas (hm^3/mes)

EST escorrentías totales (mm)

ESU escorrentías subterráneas (mm)

PRE precipitaciones (mm)

TEM temperaturas medias ($^{\circ}\text{C}$)

Las series de los mapas se han agrupado en los recintos de las subcuencas elegidas, obteniendo series asociadas a cada subcuenca, o series incrementales, y series asociadas a todas las subcuencas vertientes, o series acumuladas de todas las incrementales aguas arriba.

Asimismo, las series de flujos en hm^3/mes se trasladan también a m^3/s , lo que proporciona una imagen más intuitiva de las magnitudes involucradas. Por último se obtienen las series de caudales anuales, medias de los valores mensuales. El proceso seguido es:

$\text{AAC} (\text{hm}^3/\text{mes}) \rightarrow \text{qtemporales} (\text{m}^3/\text{s})$

$\text{Q} (\text{hm}^3/\text{mes}) \rightarrow \text{qobs} (\text{m}^3/\text{s})$

$\text{EST} (\text{mm}) \rightarrow \text{qsimpaincr} (\text{m}^3/\text{s}) \rightarrow \text{qsimpa} (\text{m}^3/\text{s})$

$\text{ESU} (\text{mm}) \rightarrow \text{qbsimpaincr} (\text{m}^3/\text{s}) \rightarrow \text{qbsimpa} (\text{m}^3/\text{s})$

Los resultados de la comparación entre los datos observados del Anuario y los resultados de SIMPA son los mostrados en las figuras, en las que se representan las series anuales de flujos en ambos casos (QOBS líneas azules, QSIMPA líneas rojas).

Puede verse que el acuerdo global es satisfactorio, con algunas diferencias más acusadas en algunas subcuencas.

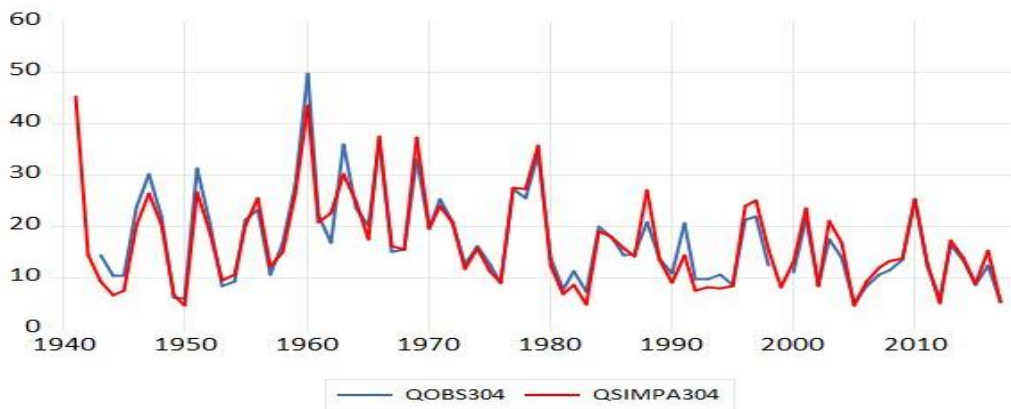
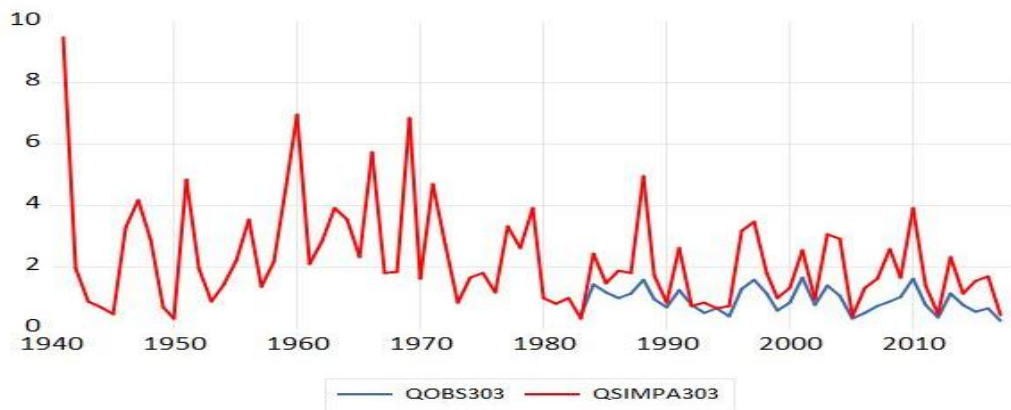
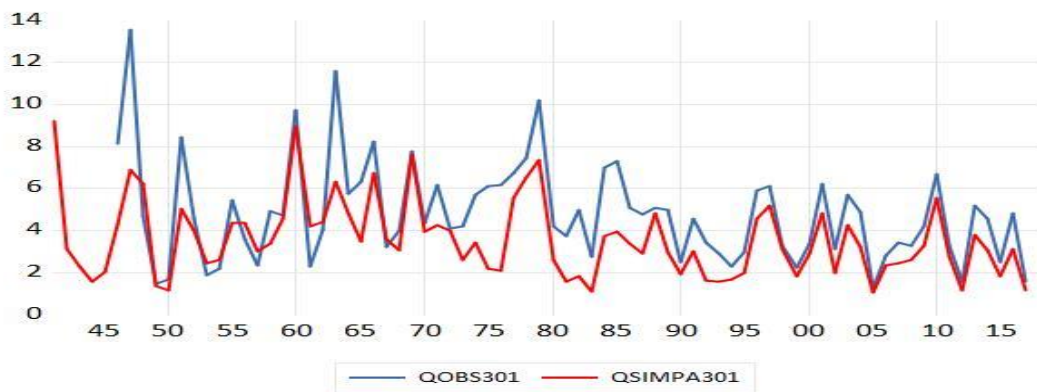
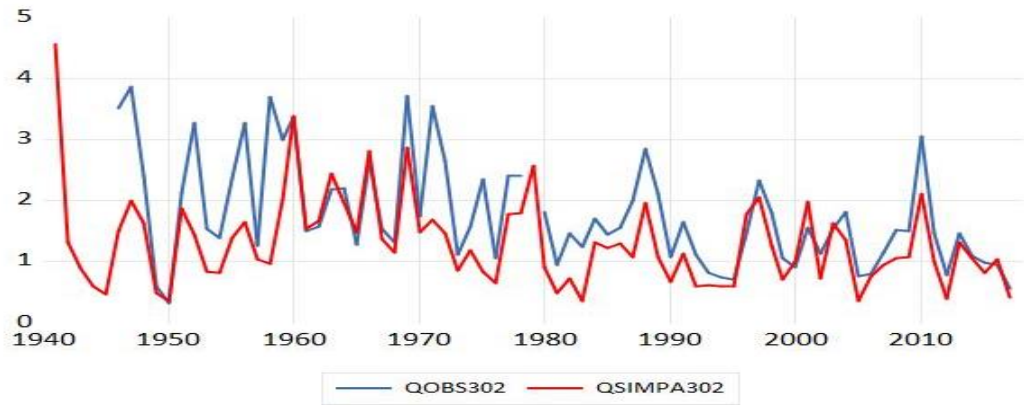
Así, en las estaciones de referencia 1 y 2 las series calculadas son ligeramente inferiores a las observadas, mientras que la 3 es algo superior. Su efecto, combinado con el de la intercuenca hasta Trillo, hace que el acuerdo sea excelente en las cuencas 4 y 5, de forma que, en síntesis, los caudales del Tajo en Entrepeñas son bien concordantes, con valores calculados ligeramente superiores a los observados ($18'7$ frente a $17'7 \text{ m}^3/\text{s}$ en el periodo común), no explicables enteramente por las detracciones existentes.

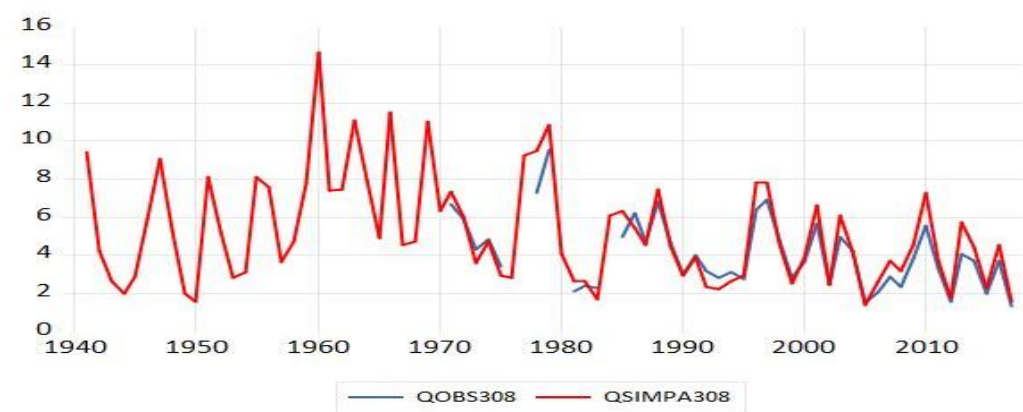
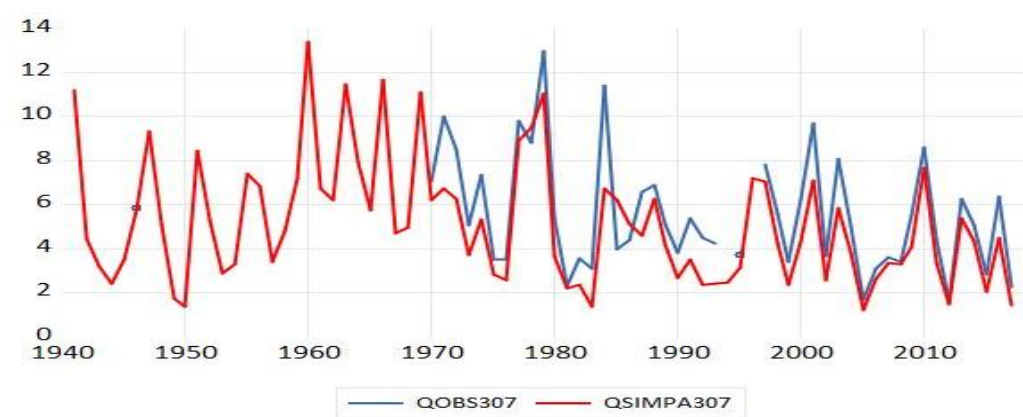
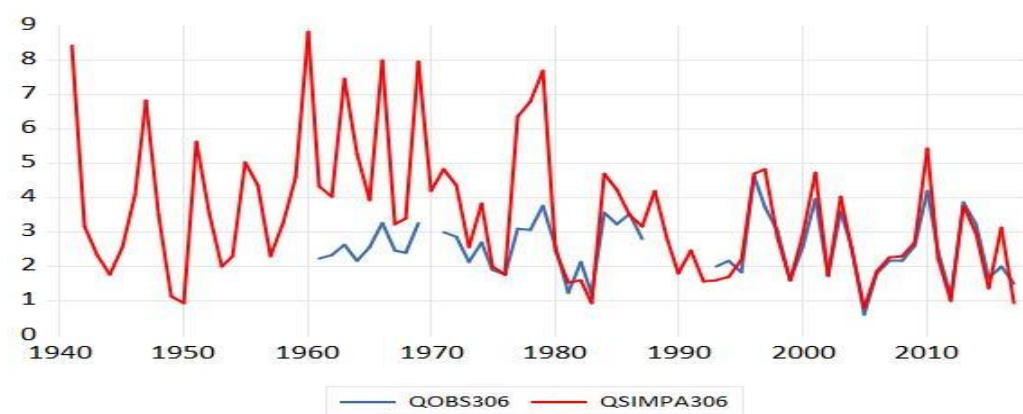
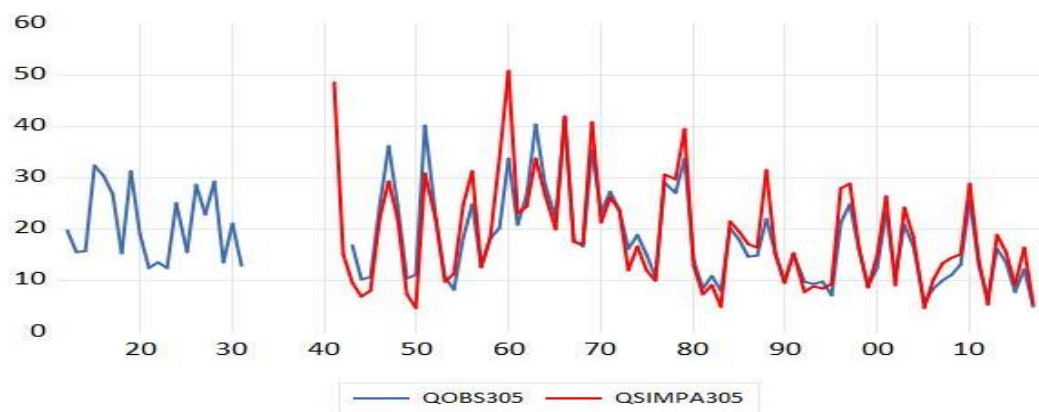
Las estaciones del Guadiela 6, 7, 8 y 9 están también bien encajadas, con un resultado global en Buendía bien ajustado, con valores medios calculados muy ligeramente superiores a los

observados (16'0 frente a 15'8 m³/s en el periodo común), que podrían quizá explicarse en buena medida por las detracciones existentes.

A partir de la estación 10 se observa una clara divergencia entre los valores observados y calculados, con un alisamiento en la estación 10 y una clara reducción en las 11 y 12, debida fundamentalmente a la derivación del ATS y a las propias del Tajo entre Bolarque y Aranjuez.

Estas desviaciones, sumadas a la dificultad para explicarlas numéricamente a partir de los consumos y retornos de las demandas y de las modulaciones de los embalses, impiden su consideración como de régimen cuasi-natural y hacen necesario, como se verá, recurrir a métodos combinados para analizar ese régimen.





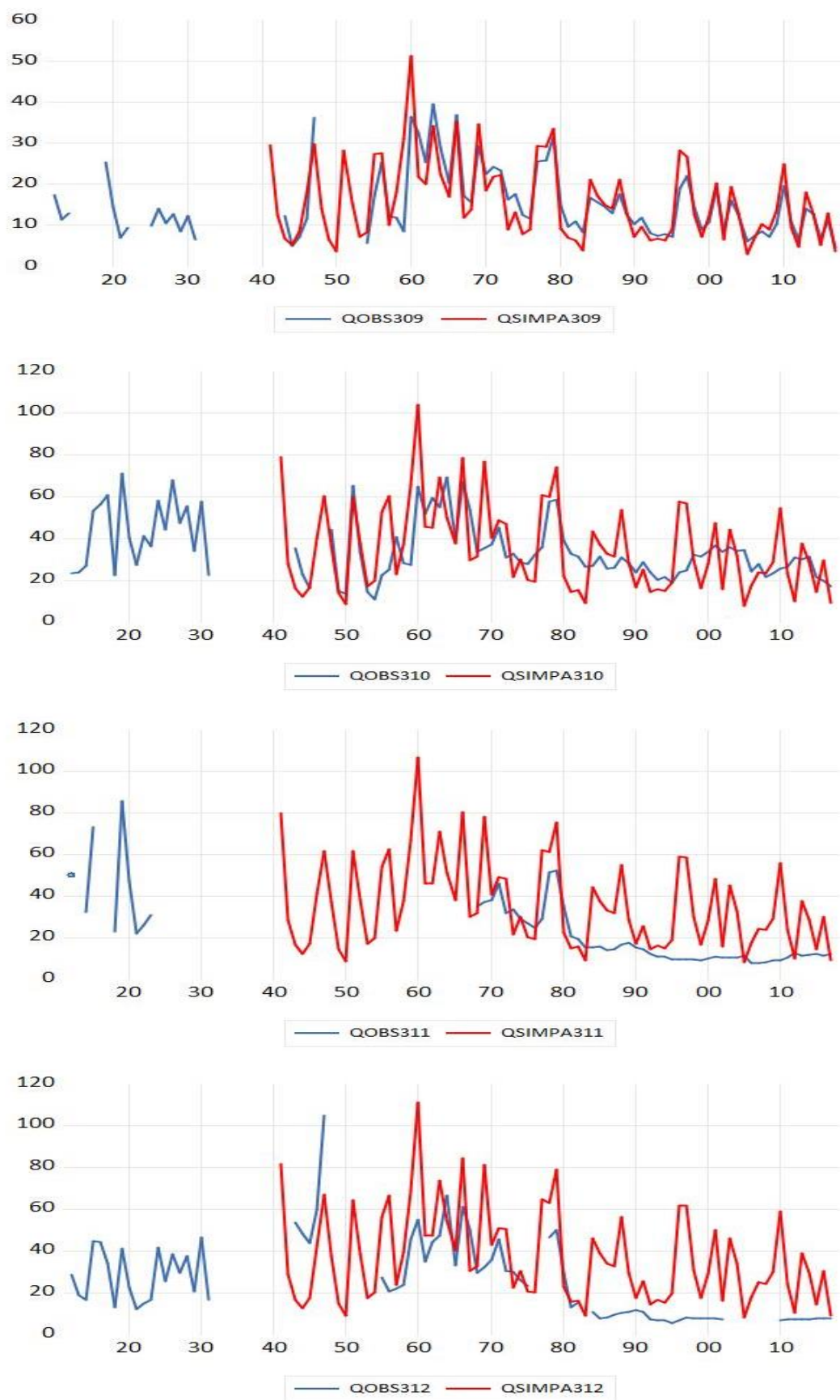


Figura 75. Series anuales observadas y calculadas

Como curiosidad histórica, la figura adjunta, elaborada con datos de la CHT, muestra las aportaciones anuales del Tajo en Bolarque obtenidas mediante SIMPA y mediante Sacramento.

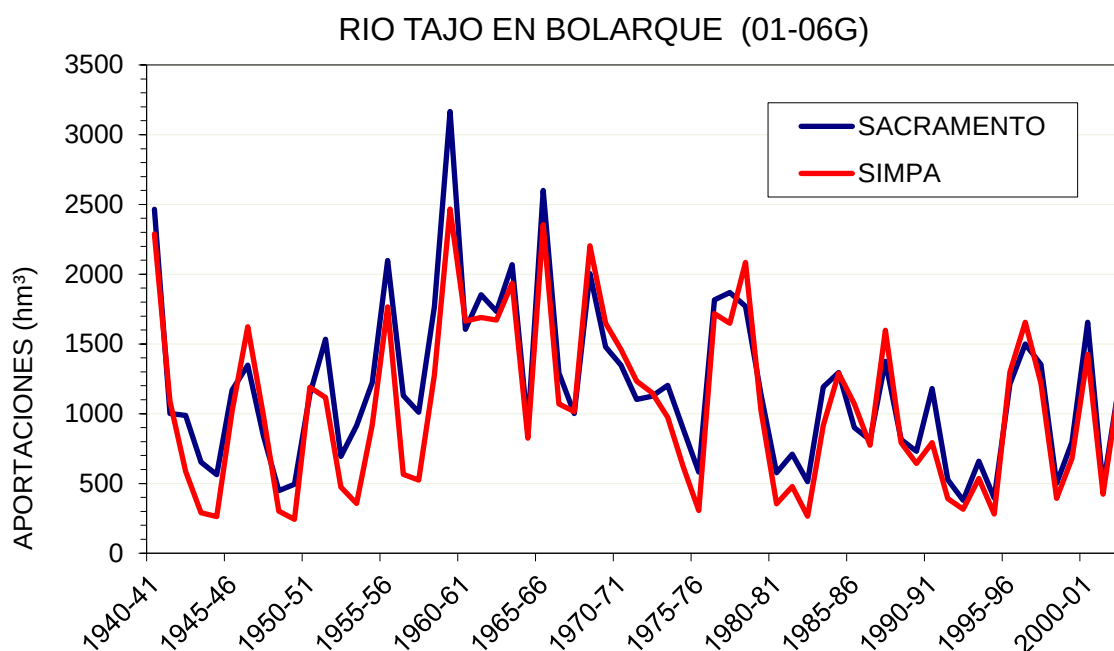


Figura 76. Serie de aportaciones anuales en Bolarque estimadas por SIMPA y por Sacramento

Aunque las estimaciones corresponden a los trabajos de planificación del primer ciclo, y la estimación SIMPA ha sido objeto de mejoras desde entonces, puede observarse la tendencia a una ligera infraestimación de este modelo frente al otro, al menos en el periodo más antiguo.

Volviendo a la estimación SIMPA actual, es de interés contrastar estos resultados con los ofrecidos en la planificación hidrológica del Tajo, comparando los resultados de SIMPA con el denominado SIMPA-ajustado, desarrollado para esa planificación.

Este ajuste del modelo SIMPA tiene por objetivo adaptar los resultados de SIMPA a las series restituídas elaboradas por la CHT, para lo que se realiza un ajuste lineal por mínimos cuadrados entre ambos, obteniendo los coeficientes de ajuste para cada mes y cada cuenca parcial restituída. Con ello pueden obtenerse las series de aportación SIMPA-ajustado en cualquier punto de la cuenca.

La figura adjunta, tomada del borrador del Plan Hidrológico del Tajo (tercer ciclo 2022-2027), *Anejo nº 2. Inventario de recursos. Apéndice 2. Metodología ajuste SIMPA*, ilustra esta comparación para distintas subcuencas.

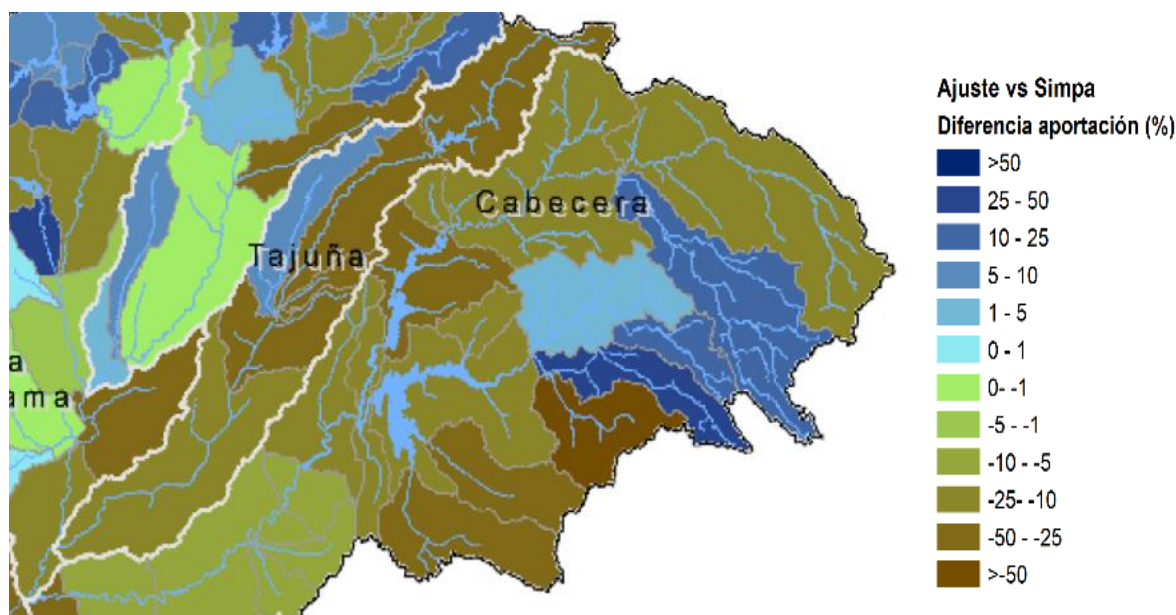


Figura 77. Comparación SIMPA-SIMPA ajustado

Parece apreciarse en el mapa un valor de aportaciones SIMPA-ajustadas entre el 10 y el 25% inferiores a las de SIMPA en todo el Tajo aguas arriba de Trillo (estaciones de referencia 3 y 4), así como el Guadiela desde Las Juntas hasta Buendía (estación 9), e incluso reducciones mayores, entre el 25 y el 50%, en la intercuenca de Trillo a Entrepeñas (estación 5) y la cuenca del Trabaque (estación 8 parcial). Solamente en el Tajo aguas arriba de la confluencia con el Gallo (estación 1) y en el Escabas (estación 8 parcial) las aportaciones ajustadas son un 5-10% mayores que las de SIMPA. El alto Guadiela hasta Alcantud, excluido el río Cuervo (estaciones 6 y 7 parciales), muestra valores ajustados similares, del orden de un 0-1% mayores a los de SIMPA.

Por su parte la tabla adjunta muestra los resultados de comparar las aportaciones incrementales relativas de las diferentes subcuencas de referencia, para el periodo común de datos en todas las estaciones. Las diferencias relativas se definen como la diferencia porcentual de caudales SIMPA y caudales observados dividida por el caudal observado.

Se añaden igualmente los resultados de la comparación SIMPA-SIMPA ajustado antes señalada, en aquellos casos donde la concordancia de subcuencas así lo permite.

Estac. de referencia	Dif.relat. (%)	SIMPA-ajust (%)
301	-28	5 10
302	-19	
303	97	-10 -25
304	19	-10 -25
305	210	-25 -50
306	8	
307	-50	
308	11	

Estac. de referencia	Dif.relat. (%)	SIMPA-ajust (%)
309	74	-10 -25
310	-651	-10 -25
311	-104	-5 -10
312	-129	

Tabla 12. Diferencias relativas de los caudales por subcuencas de referencia

Puede verse en la tabla que, como cabía esperar, ambos resultados son cualitativamente consistentes ya que una infraestimación de SIMPA aparece como valor positivo de la diferencia entre SIMPA-ajustado y SIMPA, y a la inversa. No obstante, se observan diferencias cuantitativas apreciables que requerirían una explicación adicional, no posible sin conocer en detalle las propias series mensuales finalmente empleadas.

En las estaciones fuertemente alteradas, 310 a 312, las diferencias son muy elevadas por el ya comentado efecto de las detracciones. Sin embargo, esa gran diferencia no es perceptible en la comparación con el SIMPA-ajustado, debido sin duda al empleo de las series restituidas por la CHT en esa zona, con las dificultades de información ya señaladas. Nótese que el error asociado a estas incertidumbres de detracciones y retornos puede ser del orden de magnitud, y sin duda mayor al avanzar hacia aguas abajo y aumentar el número y complejidad de los aprovechamientos, que el error de la modelación SIMPA. Ello hace que las restituciones con las que se contrasta SIMPA para obtener el SIMPA-ajustado puedan no ser suficientemente robustas y fiables para el objetivo perseguido.

Explicar todo esto requeriría también precisar en detalle el procedimiento de estimación de aportaciones en las subcuencas del gráfico, pues no todas son coincidentes con estaciones de aforos y, por tanto, sus valores no pueden adoptarse directamente sin aplicar correcciones. Igualmente sería necesario conocer el detalle del procedimiento de restitución y comparación para las subcuencas aguas abajo de los embalses de Entrepeñas y Buendía, pues las series de aforos están, como se ha visto, sumamente alteradas y no permiten la comparación directa, ni siquiera de forma aproximada.

Volviendo a las series de referencia analizadas, las últimas estaciones de referencia que pueden considerarse de régimen cuasi-natural son las de Entrepeñas y Buendía, 305 y 309. Su suma es un excelente indicador de las aportaciones naturales totales de cabecera, por lo que resulta de interés su contraste conjunto.

Designando a esa estación ficticia suma como ENYBU, sus caudales medios anuales observados y calculados son los mostrados en la figura, en la que se incluye también la serie de aportaciones entrantes a Entrepeñas y Buendía mensualmente facilitada por la CHT a la Comisión Central de Explotación del ATS.

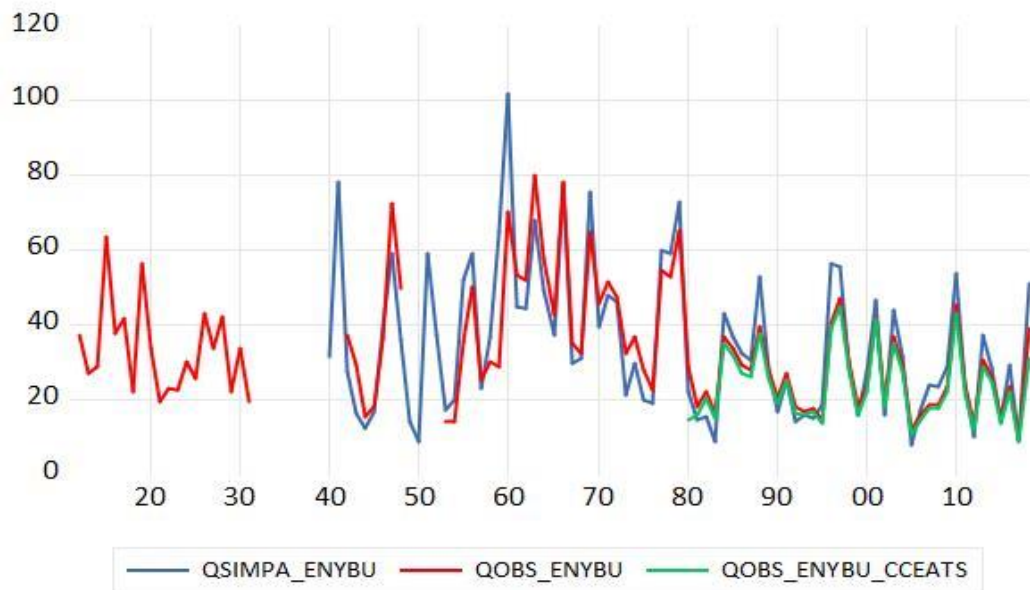


Figura 78. Series de caudales medios anuales observados y calculados en Entrepeñas-Buendía

Puede verse el buen acuerdo global de las series, que para la de la CCE-ATS había sido ya contrastado anteriormente. En el periodo de datos comunes, la serie ENYBU observada arroja una media de $25.5 \text{ m}^3/\text{s}$, mientras que SIMPA arroja 27.3 (804 y $861 \text{ hm}^3/\text{año}$ respectivamente, con $57 \text{ hm}^3/\text{año}$ de diferencia que podrían atribuirse en parte a consumos netos). Extrayendo el detalle de los últimos 20 años, el resultado es el de la figura.

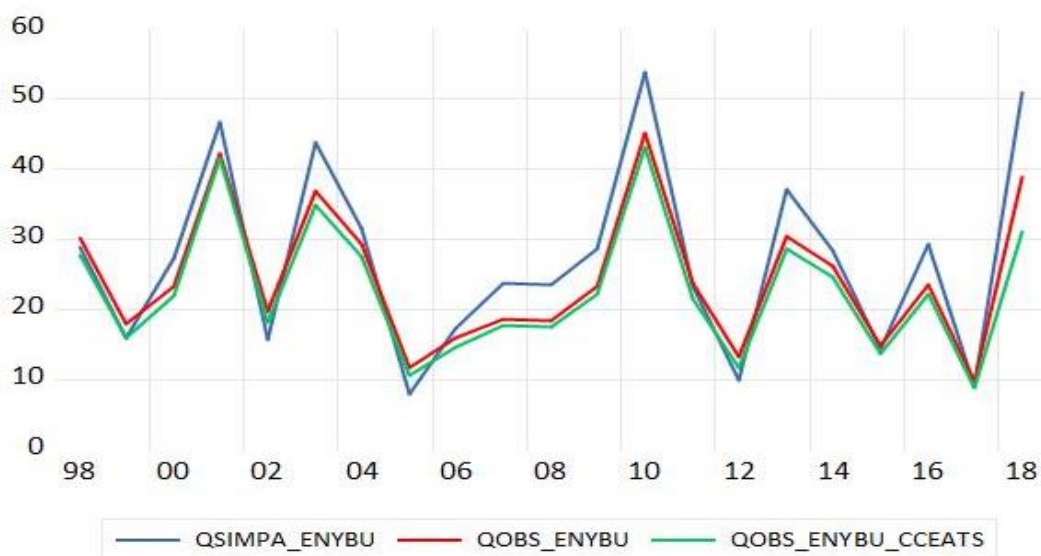


Figura 79. Series de caudales medios anuales observados y calculados en Entrepeñas-Buendía. Detalle

Se observa la buena concordancia antes señalada, con unos valores ligeramente superiores para la serie SIMPA sobre las aforadas ENYBU, así como una muy ligera diferencia entre la propuesta como aforada y la ofrecida por la CCE. El primer efecto es explicable considerando que la serie ENYBU es una cota inferior de la de régimen natural debido a los consumos netos aguas arriba, mientras que el segundo efecto puede acaso deberse a la consideración de la evaporación de los embalses.

Es interesante constatar que para el sistema de explotación de cabecera (hasta Aranjuez), la Memoria del Plan Hidrológico del Tajo (tercer ciclo 2022-2027) ofrece la magnitud de 993/830 hm³/año de esorrentía total para las series 1940-2018 / 1980-2018 respectivamente, valores razonablemente encajados con los anteriores.

Avanzando en el análisis, es interesante contrastar la estacionalidad de las diferencias anuales mostradas. Para ello, la tabla adjunta muestra los caudales medios mensuales (m³/s) correspondientes a los 38 valores de cada mes en el periodo común, entre octubre de 1980 y septiembre de 2018, junto con sus diferencias absolutas y porcentuales.

Mes	ENYBU	SIMPA	DIF.	DIF(%)
1	34.22	31.25	-2.98	-8.7
2	34.80	35.14	0.33	1.0
3	35.52	42.89	7.37	20.7
4	36.98	38.19	1.20	3.3
5	32.87	32.95	0.09	0.3
6	26.57	24.45	-2.12	-8.0
7	18.85	17.11	-1.74	-9.2
8	14.72	14.52	-0.20	-1.3
9	12.81	13.75	0.93	7.3
10	13.80	20.09	6.29	45.6
11	16.65	23.54	6.89	41.4
12	25.09	33.50	8.41	33.5

Tabla 13. Caudales medios mensuales en Entrepeñas-Buendía

Como comportamiento general se observa que en el periodo de octubre a diciembre los caudales medios estimados por SIMPA son apreciablemente mayores que los observados, mientras que en el periodo de junio a agosto son inferiores, lo que podría revelar un cierto sesgo sistemático estacional en la modelación, bien en la estructura del modelo o bien en los propios datos meteorológicos de entrada, susceptible de ser corregido.

Avanzar en esa línea requeriría un trabajo sistemático de análisis y modelación hidrológica de indudable interés, pero que queda fuera de los objetivos de este estudio.

4. RESTITUCIÓN A RÉGIMEN NATURAL

4.1. INTRODUCCIÓN

En los capítulos anteriores se ha procedido a la revisión de los datos hidroclimáticos básicos disponibles sobre la cabecera del Tajo, incluyendo una completa revisión de los datos de caudales observados en las estaciones de aforo y los deducidos a partir del balance de los embalses. Las series diarias se han agregado en mensuales y anuales, y se han contrastado por tramos fluviales, verificando la consistencia de los diferentes registros. Finalmente, se han propuesto 12 estaciones de referencia hasta Aranjuez, con sus correspondientes series de datos considerados como válidos y adecuados para análisis posteriores.

Estas series de datos corresponden en todo caso a caudales circulantes, medidos o estimados, pero siempre asociados a la situación realmente observada, es decir, en régimen real o alterado.

Como se ha señalado en capítulos anteriores, el régimen real corresponde bastante ajustadamente al natural hasta llegar a los embalses de Entrepeñas y Buendía. Aguas arriba de estos embalses los consumos netos son relativamente reducidos y no hay embalses de entidad que puedan introducir alteraciones relevantes a escala mayor de la diaria.

Los caudales tanto diarios como mensuales y anuales son en consecuencia de régimen cuasi-natural, y pueden adoptarse como tal, introduciendo en su caso, alguna corrección por los consumos netos de la zona. A escala diaria la corrección es más incierta, pero a escalas mensual y anual será previsiblemente muy ajustada y fiable.

Aguas abajo de los embalses la situación cambia por completo, pues se produce una modulación de los desembalses para su adecuación a las demandas aguas abajo, y se van incorporando detracciones relevantes, la primera de las cuales es la correspondiente al acueducto Tajo-Segura, a la que siguen las de los riegos y abastecimientos en la vega del Tajo. El conocimiento de las detracciones y, sobre todo, la cuantía y modulación de los retornos, no es completo, existiendo lagunas en la información publicada sobre las captaciones y ausencia de datos contrastados sobre los retornos.

Esta situación de imperfecto conocimiento de detracciones y retornos impide que pueda realizarse una restitución al régimen natural mediante técnicas de balance, y hace necesario acudir a modelos hidrológicos que proporcionen una estimación razonable de los flujos en condiciones naturales.

La evaluación de recursos en régimen natural constará por tanto de dos fases, una primera, hasta los embalses de Entrepeñas y Buendía, en la que se cuantificarán las correcciones que han de hacerse a los flujos entrantes observados para tener en cuenta las detracciones netas, y una segunda, desde los embalses hasta Aranjuez, en la que se estimarán los flujos incrementales producidos en las distintas subcuencas y se acumularán hacia aguas abajo a las series obtenidas en la fase anterior.

Esta metodología de restitución en dos fases: balances en las subcuencas altas y modelación hidrológica en las bajas, garantizando su coherencia conjunta, es la técnica recomendada para casos como este, muy frecuentes en cuencas de tamaño medio y grande.

Las operaciones descritas se llevarán a cabo a escala mensual, pudiendo posteriormente ser agregados a la anual o desagregados a la diaria.

4.2. DETRACCIONES NETAS EN CABECERA

Las estaciones de referencia 305 y 309 describen los caudales circulantes totales en Entrepeñas y Buendía, deducidos aplicando aforos y balances de embalses observados, y su suma, designada como ENYBU, incorpora el total de ambas subcuencas. Se trata de series basadas directamente en datos observados, incluyendo posibles detracciones, y son por tanto series alteradas. El planteamiento combinado para la restitución en dos fases se lleva a cabo como sigue.

La restitución a régimen natural de la serie de referencia observada ENYBU puede realizarse mediante balance hídrico, sumando a esta serie observada la detracción neta global producida aguas arriba de los embalses. Puesto que, por el momento, es la primera estación escogida para análisis posteriores, basta disponer de la detracción total neta, sin desagregación espacial por subcuencas.

Para las estaciones 310, 311 y 312 puede adoptarse el criterio de ir sumando a la situada aguas abajo las series de aportaciones incrementales en esas subcuencas, deducidas de la modelación SIMPA. Se estima que este supuesto es adecuado considerando el buen acuerdo general SIMPA-aforo que se ha observado en las series analizadas, y que su muy moderada magnitud relativa no permite que se introduzcan errores apreciables en el cálculo.

Para estimar las detracciones netas aguas arriba de los embalses se adoptan las cifras de demandas indicadas en el borrador del Plan Hidrológico del Tajo (tercer ciclo 2022-2027), *Anejo nº 3, Usos y demandas de agua*.

Una dificultad existente es la de conocer determinadas demandas del alto Tajo, aguas arriba de los embalses de Entrepeñas y Buendía, para las que este Anejo no proporciona datos desagregados, estando unificados en un dato global para el sistema de explotación de Cabecera, que engloba esta zona y el resto de cuenca hasta Aranjuez. Así sucede con las demandas de regadío con aguas subterráneas, las industriales tanto superficiales como subterráneas, o las de otros usos superficiales o subterráneos. Para superar esta dificultad se han estimado tanto las fracciones del alto Tajo respecto al sistema de explotación de Cabecera, como las fracciones de distribución entre Tajo y Guadiela, a partir de otros estudios y planes previos, y se adoptan directamente los valores desagregados ofrecidos en las tablas del Anejo cuando esos datos están disponibles.

Con estos criterios, y conforme a ese documento, las demandas actuales de abastecimiento urbano pueden estimarse en unos 4.76 hm³/año, incluyendo los núcleos aguas arriba de Entrepeñas-Buendía, los núcleos de la Mancomunidad de Municipios Ribereños, y la Mancomunidad del Guadiela. Estas demandas presentan una acusada estacionalidad turística, con máximos en verano, y retornos estimados en un 80% y producidos arriba de los embalses. La demanda industrial se cifra en 6.95 hm³/año, con similar distribución.

Para los regadíos se estima una demanda total aguas arriba de los embalses de 26.79 hm³/año, con distribución fuertemente estacional y retornos del 21%, mientras que otras demandas varias de tipo recreativo se estiman en 0.35 hm³/año, con distribución y retornos similares a las urbanas. El total consuntivo es, por tanto, de 38.84 hm³/año.

Para integrar todo esto, sumando las evaluaciones de demandas anteriormente indicadas y restando los retornos, se ha construido un modelo OPTIGES con el esquema básico de restitución mostrado en la figura, en el que señalan las detracciones y retornos considerados. Se estima que esta representación es suficientemente satisfactoria a efectos prácticos, máxime considerando la muy reducida magnitud de las detracciones frente a los caudales circulantes y sus errores asociados.

The diagram illustrates a network of evidence types (DA, DI, DR, AP) for two cases (Tajo and Guadiela) and a central node (Nuclear Trillo). The nodes are represented by colored boxes (blue for DA, red for DI, green for DR) and circles (yellow for 031, black for others). Arrows indicate the flow of information or relationships between these nodes.

- Top Section (Tajo Case):**
 - 031 DA.CabTajo (Blue box 1) connects to 031 DI.CabTajo (Red box 5) and 031 DR.CabTajo (Green box 2).
 - 031 DI.CabTajo (Red box 5) connects to 031 DI.NuclearTrillo (Red box 7).
 - 031 DR.CabTajo (Green box 2) connects to 031 DI.NuclearTrillo (Red box 7).
 - 031 AP.TCte10 (Blue circle 1) connects to 031 DI.CabTajo (Red box 5) and 031 DI.NuclearTrillo (Red box 7).
 - 031 DI.NuclearTrillo (Red box 7) connects to 031 DI.CabTajo (Red box 5) and 031 DR.CabTajo (Green box 2).
- Bottom Section (Guadiela Case):**
 - 031 DA.Guadiela (Blue box 3) connects to 031 DI.Guadiela (Red box 4) and 031 DR.Guadiela (Green box 6).
 - 031 DI.Guadiela (Red box 4) connects to 031 DI.NuclearTrillo (Red box 7).
 - 031 DR.Guadiela (Green box 6) connects to 031 DI.NuclearTrillo (Red box 7).
 - 031 AP.GCte10 (Blue circle 2) connects to 031 DI.Guadiela (Red box 4) and 031 DI.NuclearTrillo (Red box 7).
 - 031 DI.NuclearTrillo (Red box 7) connects to 031 DI.CabTajo (Red box 5) and 031 DR.CabTajo (Green box 2).
- Central Node:**
 - 031 DI.NuclearTrillo (Red box 7) connects to 031 DI.CabTajo (Red box 5) and 031 DR.CabTajo (Green box 2).

El análisis del sistema muestra que el consumo neto actual del conjunto de todas las demandas aguas arriba de los embalses es de unos 44 hm³/año (33 en el Tajo y 11 en el Guadiela).

En los tres casos la distribución es marcadamente estacional, con máximos en verano y mínimos en invierno, tal y como se muestra en la figura.

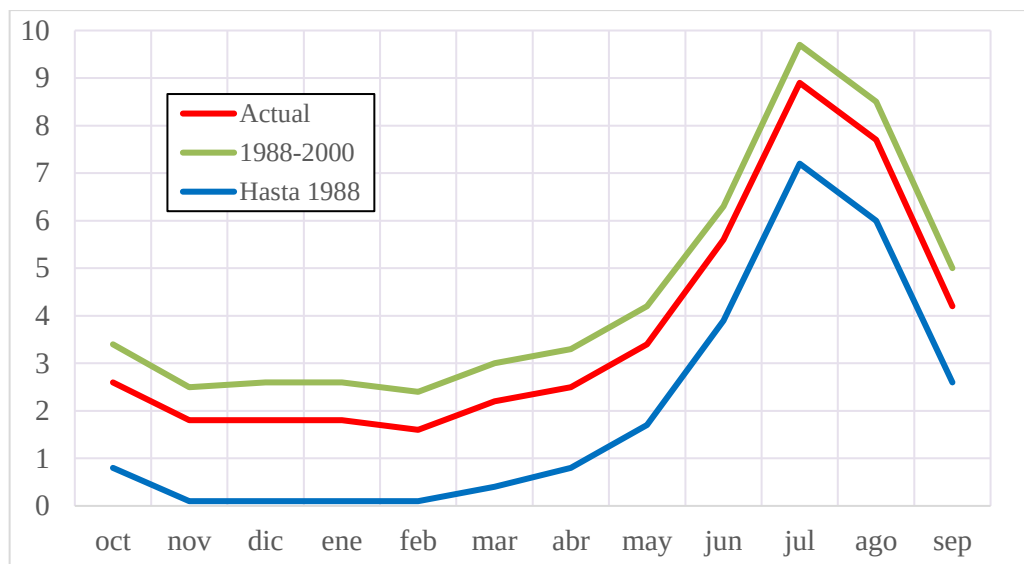


Figura 81. Distribución estacional de los consumos netos para cálculos de restitución

Supondremos en definitiva que este consumo conjunto neto es el que ha de añadirse al flujo observado y demodulado en los embalses, ENYBU, para obtener una mejor estimación de su régimen natural, régimen que será parecido al observado pero no igual por el pequeño efecto de esas detracciones netas.

Ha de advertirse que esta estimación es aproximada pues los consumos no son iguales todos los años, y a lo largo del tiempo se producen cambios en las demandas que pueden ser significativos. Como ya se señalado, el caso más relevante es el de la central nuclear de Trillo, cuya explotación se inicia en 1988, y cuyos retornos también han cambiado a lo largo del tiempo a consecuencia de mejoras tecnológicas. También se han modificado las demandas de abastecimiento, con tendencias a disminuir siguiendo el patrón de población, e incluso las de regadío, también en disminución básicamente a consecuencia de las mejoras y modernizaciones, incluso manteniendo las mismas superficies.

Como muestra de esta situación cabe señalar que en el modelo cartográfico desarrollado para el Libro Blanco del Agua en España, con cifras adoptadas de los planes hidrológicos de 1998, la demanda consuntiva de regadío y urbana-industrial asociada a ENYBU era de 35 hm³/año, cifra muy similar a los 38 hm³/año dada como actual.

Como aproximación inicial al cálculo de la restitución se supuso que las demandas netas históricas eran constantes e iguales a las actuales, y como primera mejora de este cálculo inicial, a falta de información de mayor detalle, se ha supuesto que los consumos netos anuales son constantes pero dentro de cada una de las tres ventanas temporales señaladas, con las modulaciones temporales anteriormente mostradas. Con ello, se asume que los regadíos son básicamente constantes y solo cambia la demanda de Trillo a lo largo de todo el periodo temporal analizado, y ello sin perjuicio de que este supuesto pueda perfeccionarse en el futuro con un mejor conocimiento de la pasada evolución de los aprovechamientos. Esta mejora supone unas aportaciones en régimen natural para la estación de referencia suma de Entrepeñas y Buendía, ENYBU muy similares a las del primer supuesto de consumos constantes, sin relevancia práctica para el comportamiento del sistema.

A partir de la restitución en ENYBU continúa la segunda fase del proceso mediante balances acumulados, como se describe seguidamente.

4.3. CAUDALES INCREMENTALES

A partir de la estación de referencia ficticia ENYBU, en las estaciones aguas abajo se aplica el criterio general de acumulaciones conforme al esquema de la figura, en la que para cada subcuenca o tesela pueden definirse los flujos simplificados mostrados.

Asumiendo que se desea analizar el régimen natural, y las aportaciones entrantes desde aguas arriba y salientes hacia aguas abajo son de régimen natural, la única contribución a considerar es la aportación propia generada en la subcuenca (flecha inferior entrante), sin otros suministros, captaciones, tomas ni retornos propios de un régimen alterado (las flechas de flujo superiores del esquema son todas nulas).

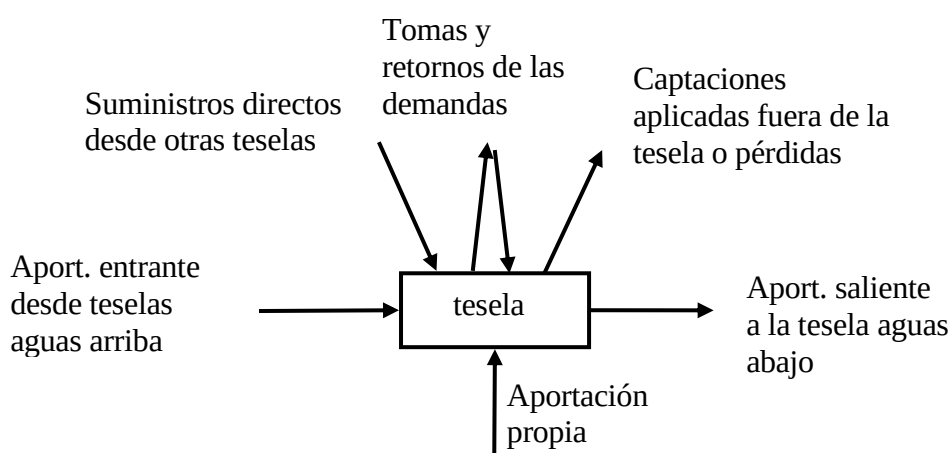


Figura 82. Flujos principales en cada tesela hidrográfica afectada

Si la tesela vierte en un embalse, que sería su límite aguas abajo, el esquema de flujos sería el mostrado en la figura.

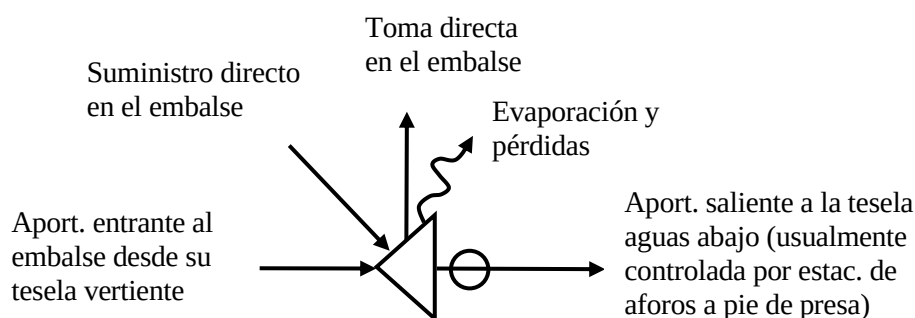


Figura 83. Flujos de balance en un embalse

La ecuación del balance es similar, con la salvedad de requerir previamente la estimación de evaporaciones a partir de la evaporación media mensual unitaria (12 valores mm/mes) y la serie de superficies inundadas mes a mes, deducida de los volúmenes embalsados mediante la curva batimétrica. De igual modo pueden incorporarse pérdidas por filtración a partir de las cotas del agua embalsada.

En nuestro caso, las subcuencas no contienen embalses de volumen suficientemente grande como para introducir distorsiones relevantes a escala mensual, por lo que las ecuaciones de

restitución son muy simples y se limitan a la acumulación de aportaciones incrementales para cada subcuenca en régimen natural, deducidas de SIMPA.

Partiendo de la serie ENYBU, se han calculado de este modo las series restituidas correspondientes a las estaciones de referencia 310, 311 y 312.

4.4. RESULTADOS

Los resultados obtenidos del proceso descrito son las cuatro series mencionadas restituidas calculadas tanto a escala anual como mensual.

Puede verse la gran similitud de las series a ambas escalas, siempre acumulativas y con algunas ligeras diferencias que solo se aprecian ocasionalmente, en los años más húmedos.

5. CONCLUSIONES

A la vista de lo expuesto, y sin perjuicio de las posibles mejoras y ampliaciones que se abordarán en su caso más adelante, cabe señalar las siguientes conclusiones preliminares.

- En casos de importancia singular como es este de cabecera del Tajo, debiera ser preceptiva la realización de depuraciones y análisis hidrológicos de detalle que permitan contrastar las diferentes series foronómicas y de embalses disponibles, y proceder a una primera depuración de sus valores a distintas escalas temporales. El proceso es largo y tedioso pero se estima imprescindible para avanzar en los siguientes procesos de modelación sobre bases sólidas y robustas.
- En cabecera del Tajo se ha conseguido una caracterización de flujos suficientemente fiable y con registros de adecuada longitud, comprobándose la consistencia de los datos aforados con los procedentes del balance de embalses.
- En las zonas aguas abajo de los embalses de cabecera la afección es muy grande y los registros no son representativos del régimen natural, ni siquiera de forma aproximada. En estos casos los análisis basados en cuantiles no son de utilidad descriptiva.
- El modelo peninsular SIMPA proporciona en general muy buen encaje, pero muestra algunas desviaciones locales que no son evitables en un modelo a esa escala territorial. En el caso de la cabecera se ha observado que infravalora los mínimos y sobrevalora los máximos, lo que puede dar lugar a distorsiones, según el tipo de análisis, que han de ser tenidas en cuenta.
- Con carácter general, debe renunciarse a métodos de análisis basados en series de caudales diarios, tanto por su relativa falta de datos como, fundamentalmente, por las dificultades de reconstrucción, comportamientos oscilatorios, etc. Es más robusto el empleo de los datos aforados mensuales, con las oportunas correcciones en su caso.
- La desagregación mensual-diario es compleja si se desean reproducir las distintas partes del hidrograma, pues no suele haber estaciones de referencia diaria que proporcionen una guía adecuada. Se trata de un asunto de interés sobre el que cabría desarrollar nuevas investigaciones prácticas.
- El modelo denominado en el plan del Tajo como SIMPA ajustado es en principio concordante con la estimación obtenida en este trabajo, si bien se requeriría disponer de las series completas para esta completar esta verificación. Un problema de SIMPA ajustado es que se calibra con aforos observados, despreciando en consecuencia el efecto de los consumos netos de cabecera y, por tanto, no proporcionando el verdadero régimen natural. Este efecto es muy reducido pero no nulo.
- Las hipótesis sobre consumos netos tienen también un efecto reducido aunque no nulo sobre los resultados de la restitución. Es una cuestión que debe abordarse y perfeccionarse en el futuro. Así, el hecho de que las estimaciones de caudales ecológicos sean sensibles a estas pequeñas modificaciones hace que no sean robustas y deban incorporar explícitamente sus horquillas de incertidumbre.
- Igualmente, los métodos hidrobiológicos heredan los problemas de caudales en régimen natural, a los que se añaden las curvas de preferencia y hábitat. Dado que el máximo de las curvas no suele alcanzarse, estos métodos suelen derivar a métodos hidrológicos, con las dificultades ya apuntadas.

6. ANEXO I. ESTACIONES DE AFORO

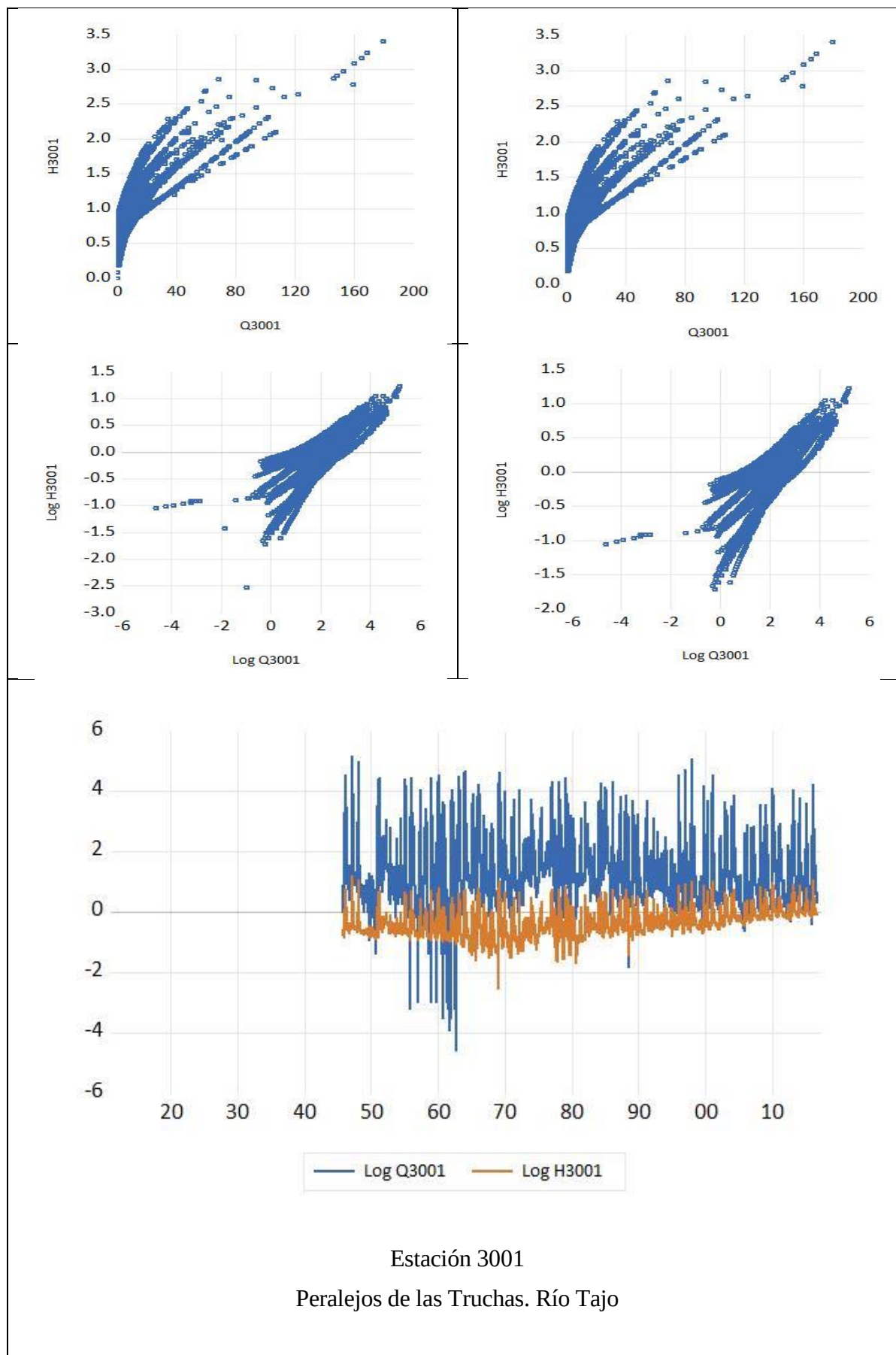
Datos de nivel-caudal en las estaciones de aforo

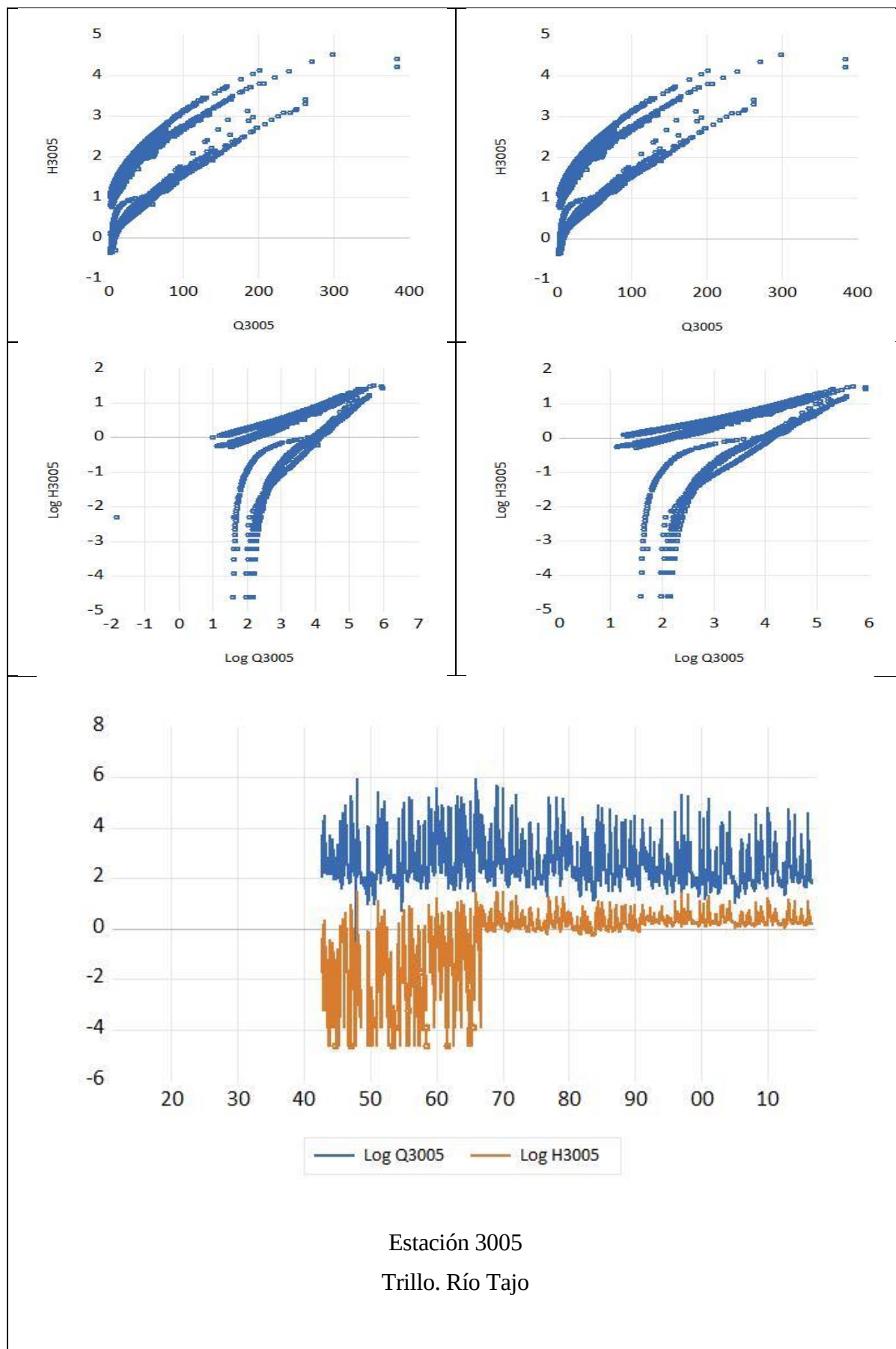
En el presente Anexo se muestran, para todas las estaciones de aforo existentes en el área que presentan datos diarios simultáneos de nivel y caudal, diferentes representaciones gráficas de estos datos.

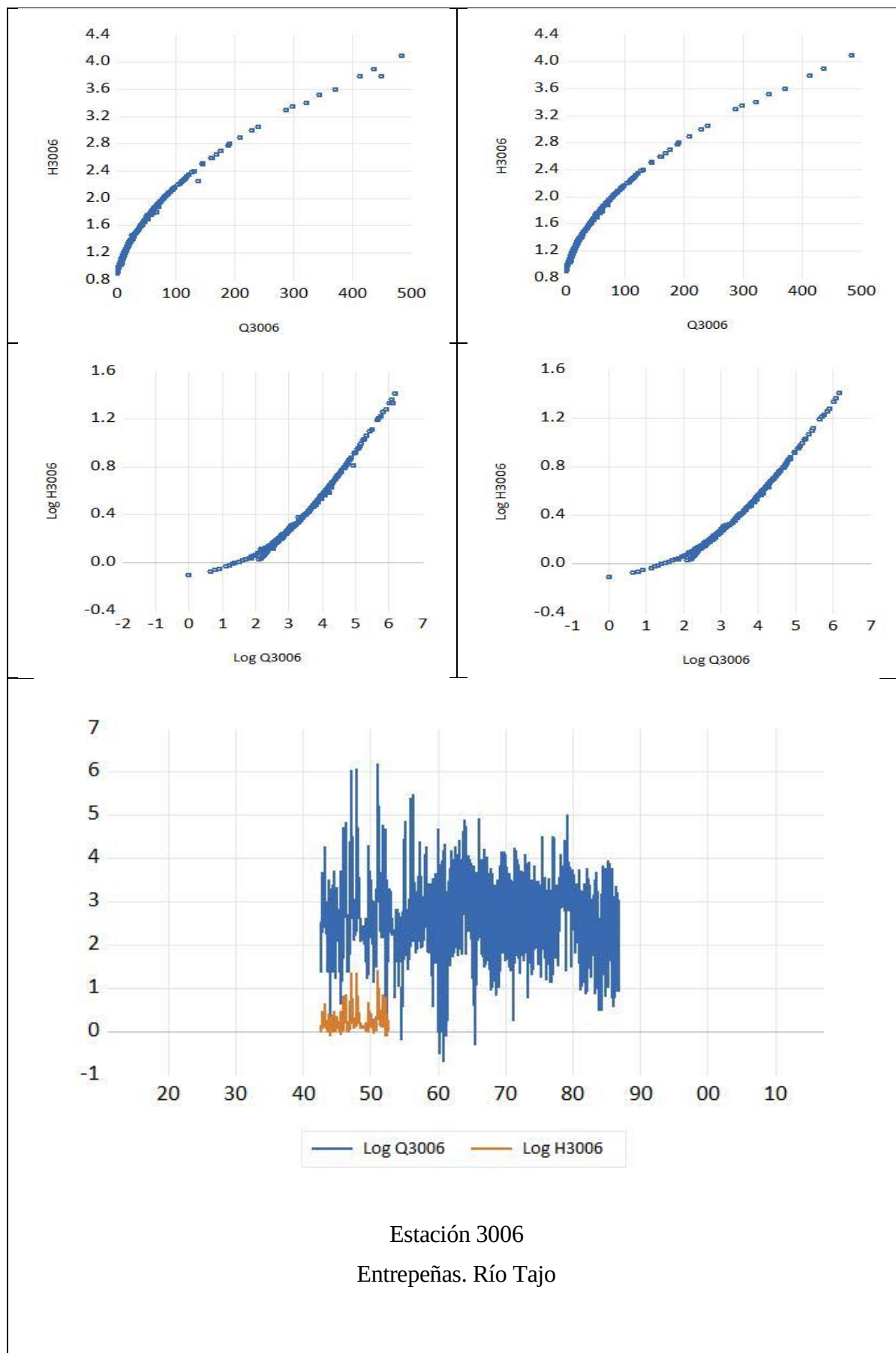
Para cada estación, representada en una página, se ofrecen 5 gráficos. En la primera fila se muestran un primer gráfico, en la primera columna, con los datos de pares de puntos $h-q$ originales resultantes de la descarga, y un segundo gráfico, en la segunda columna, con los resultantes tras el proceso de depuración nivel-caudal realizada.

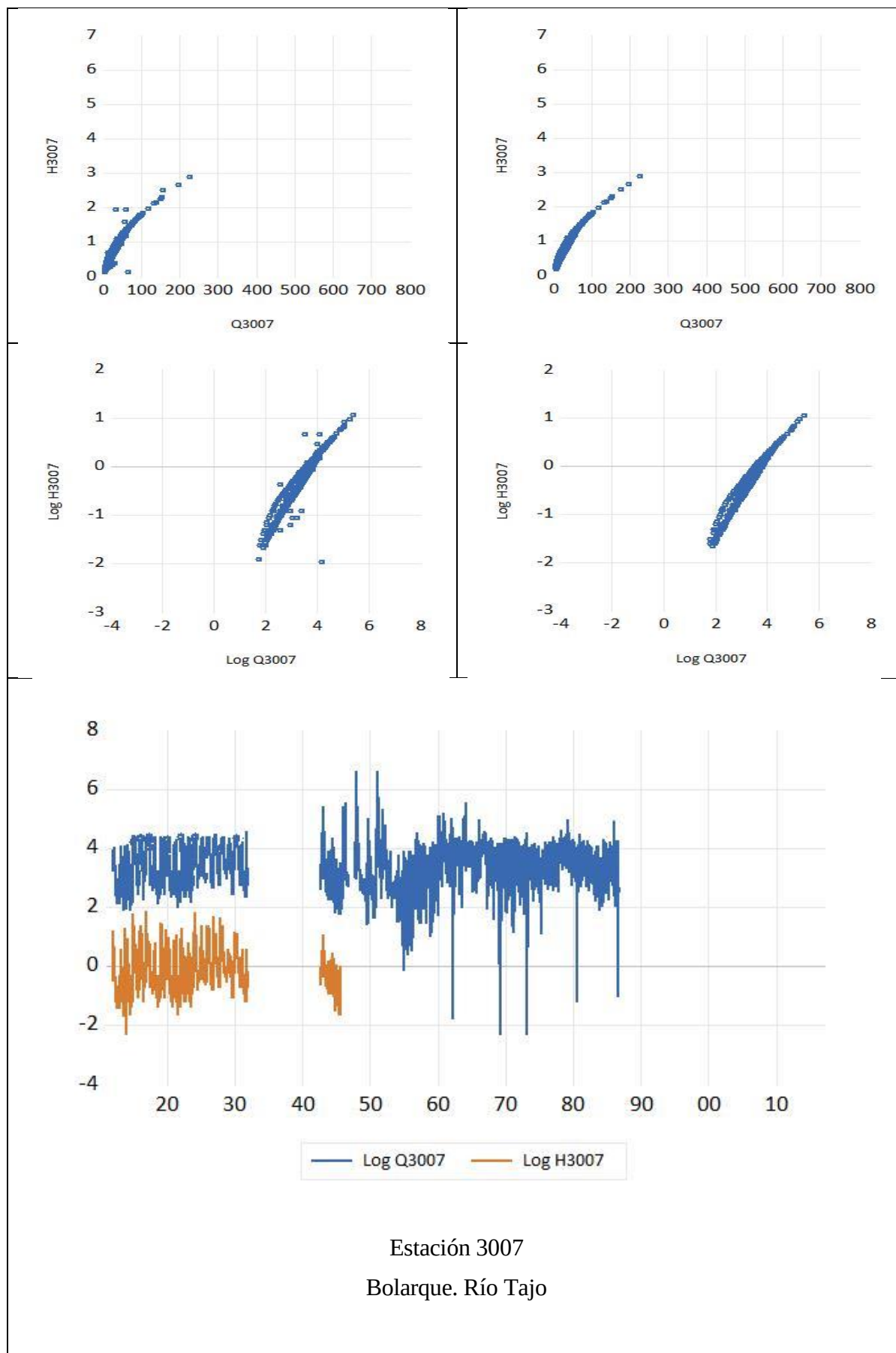
En la segunda fila se muestran los mismos valores pero ahora en escala logarítmica, pudiendo apreciarse más claramente la configuración de las curvas.

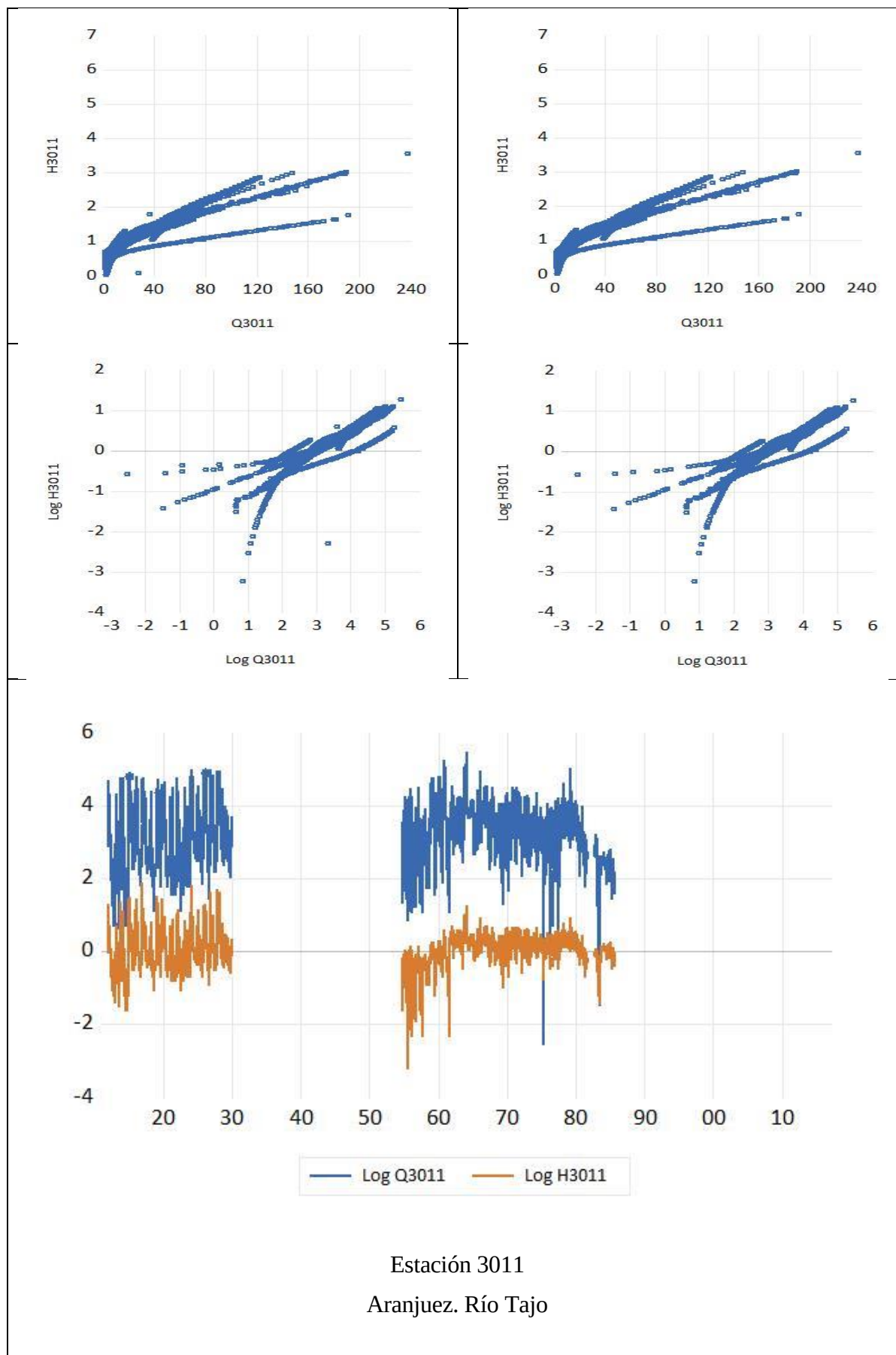
En la tercera fila se muestran las series temporales diarias de los valores $h-q$ log-transformados.

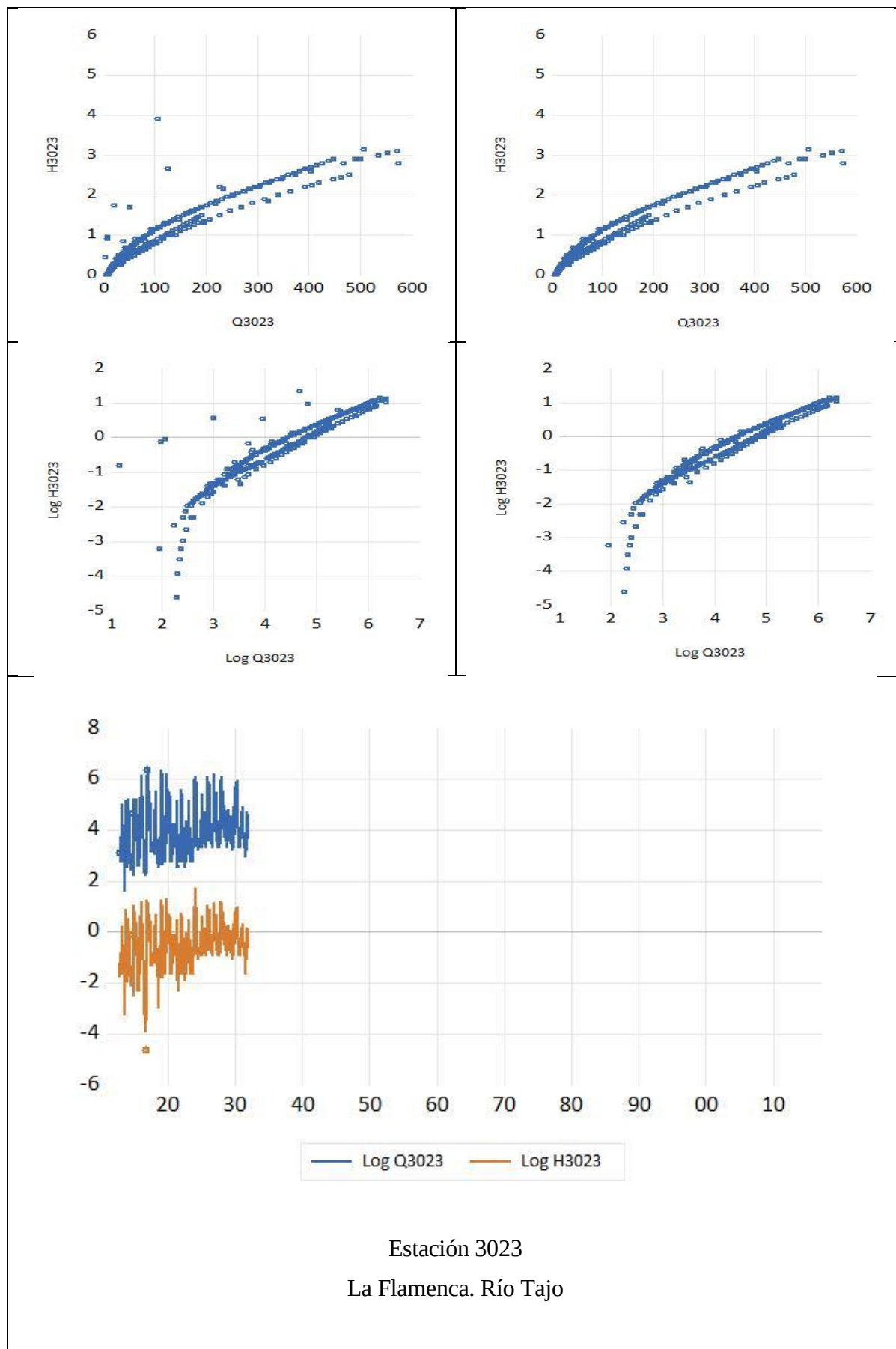


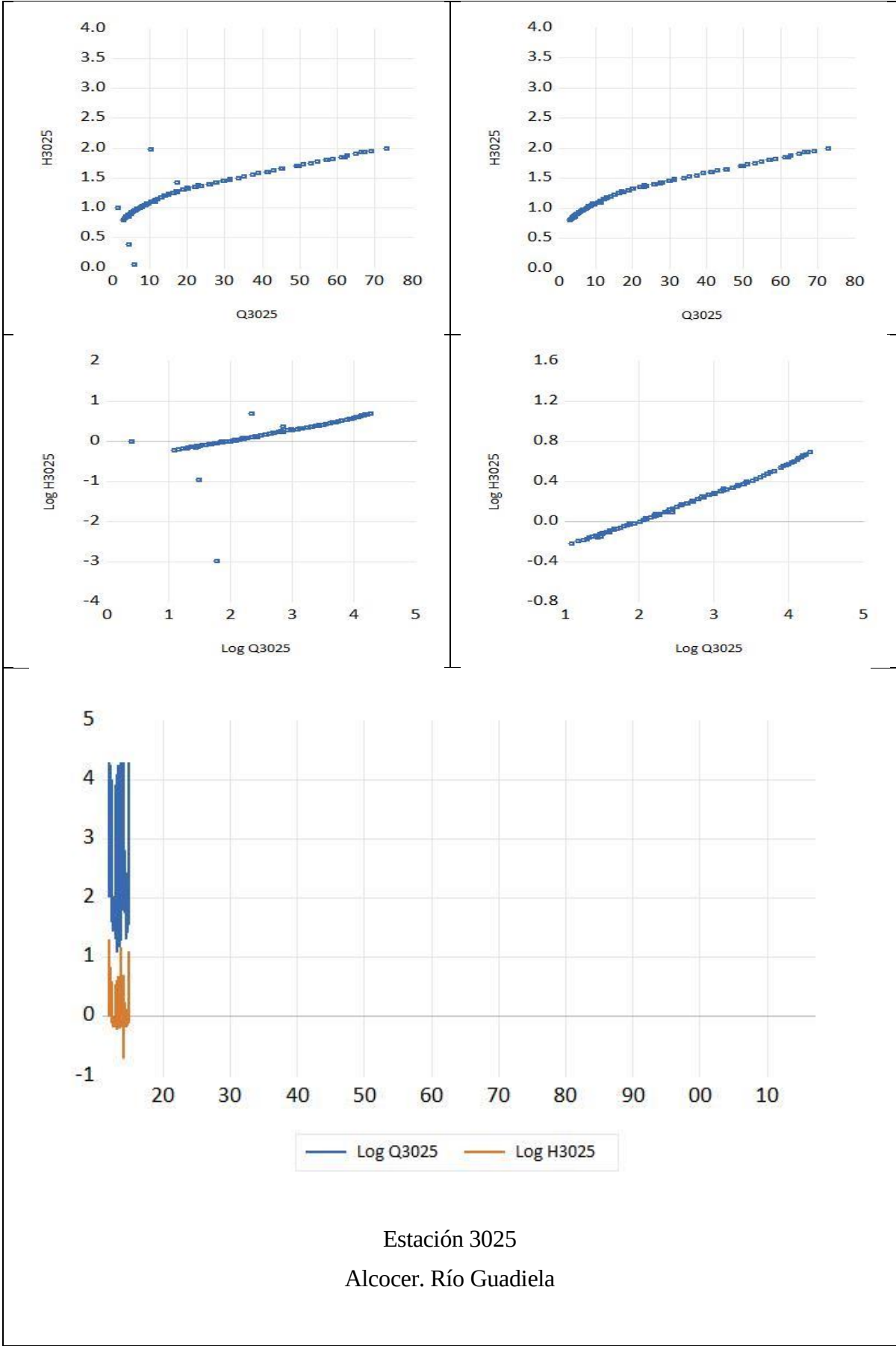


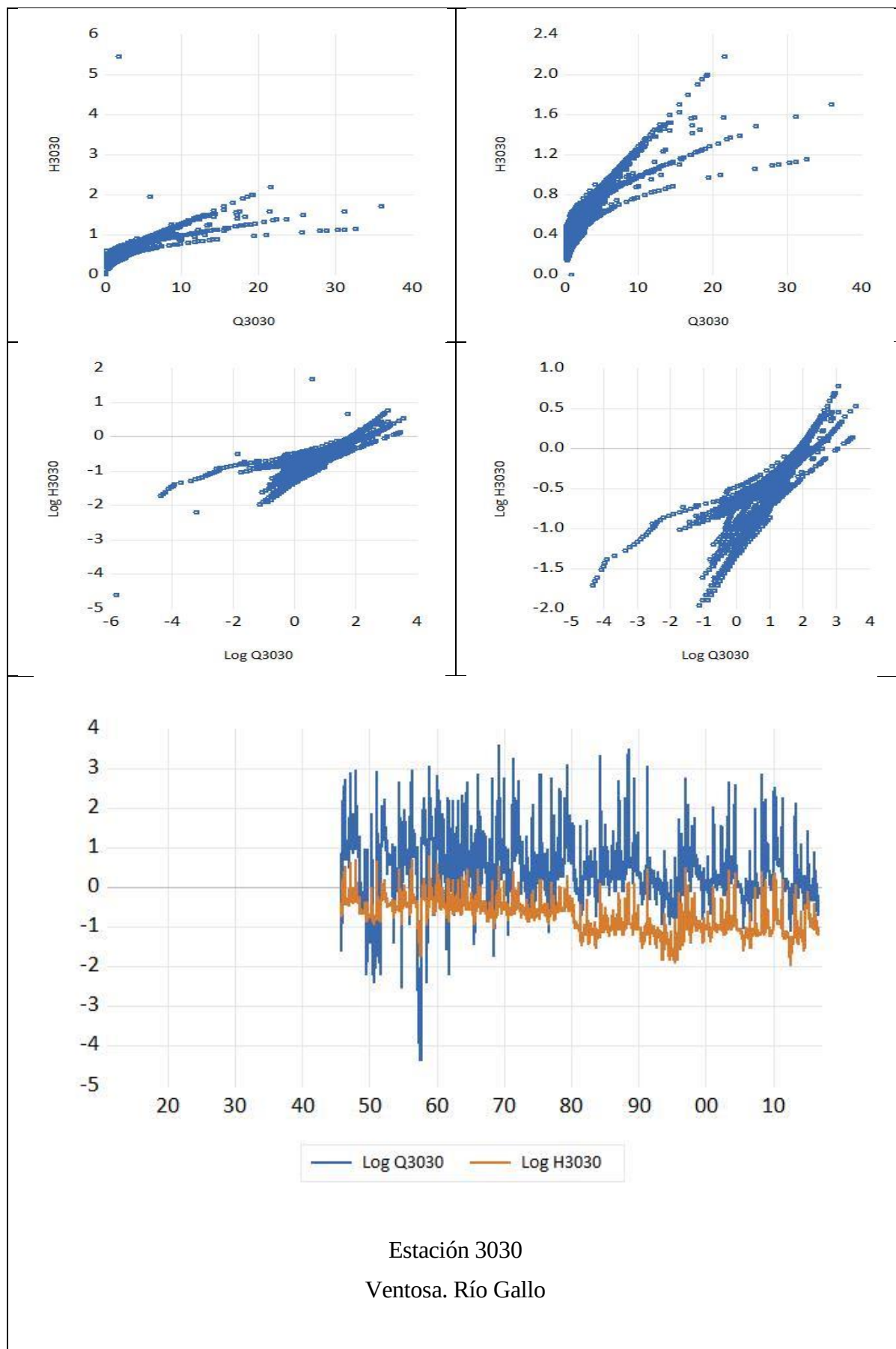


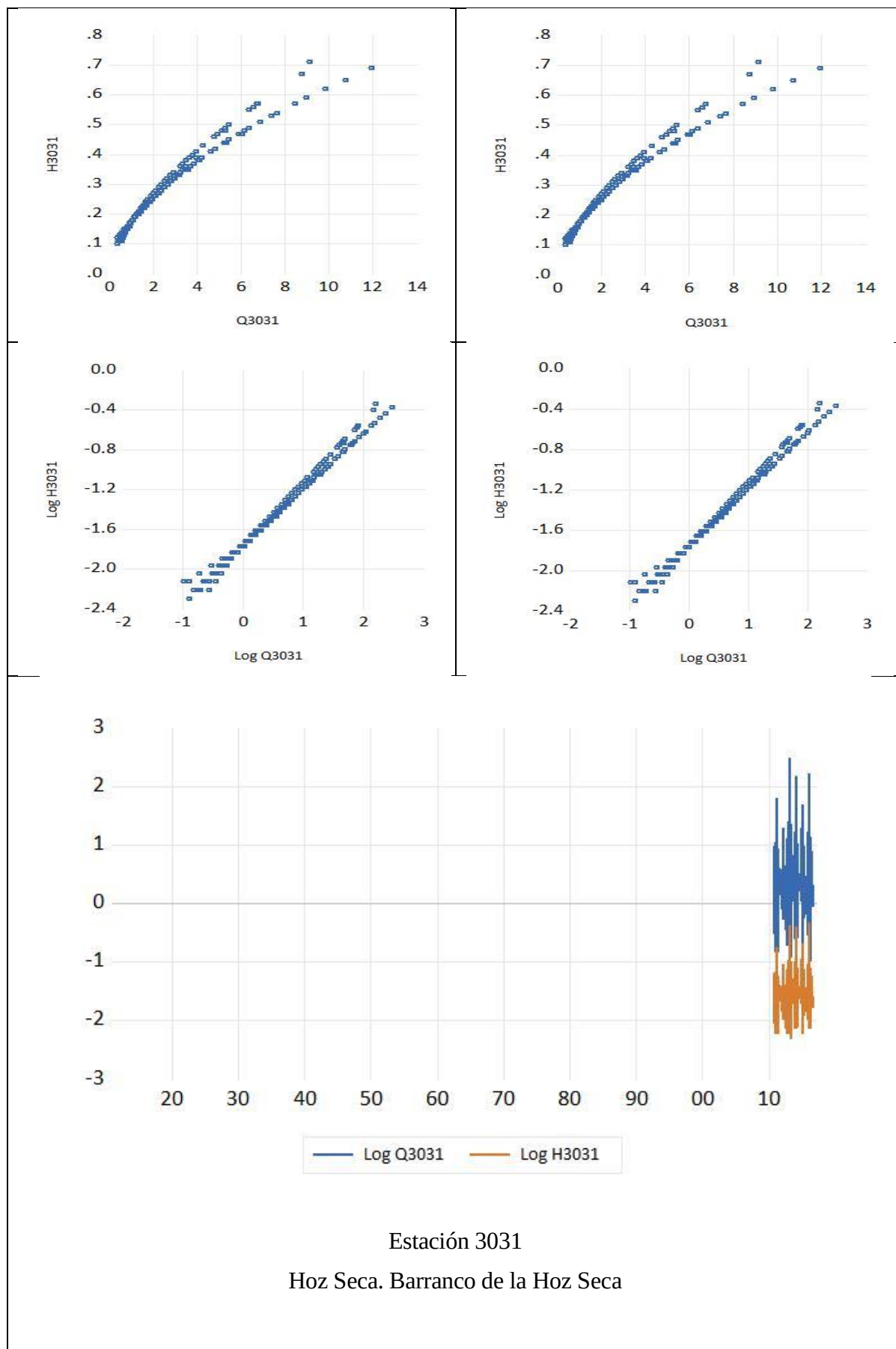


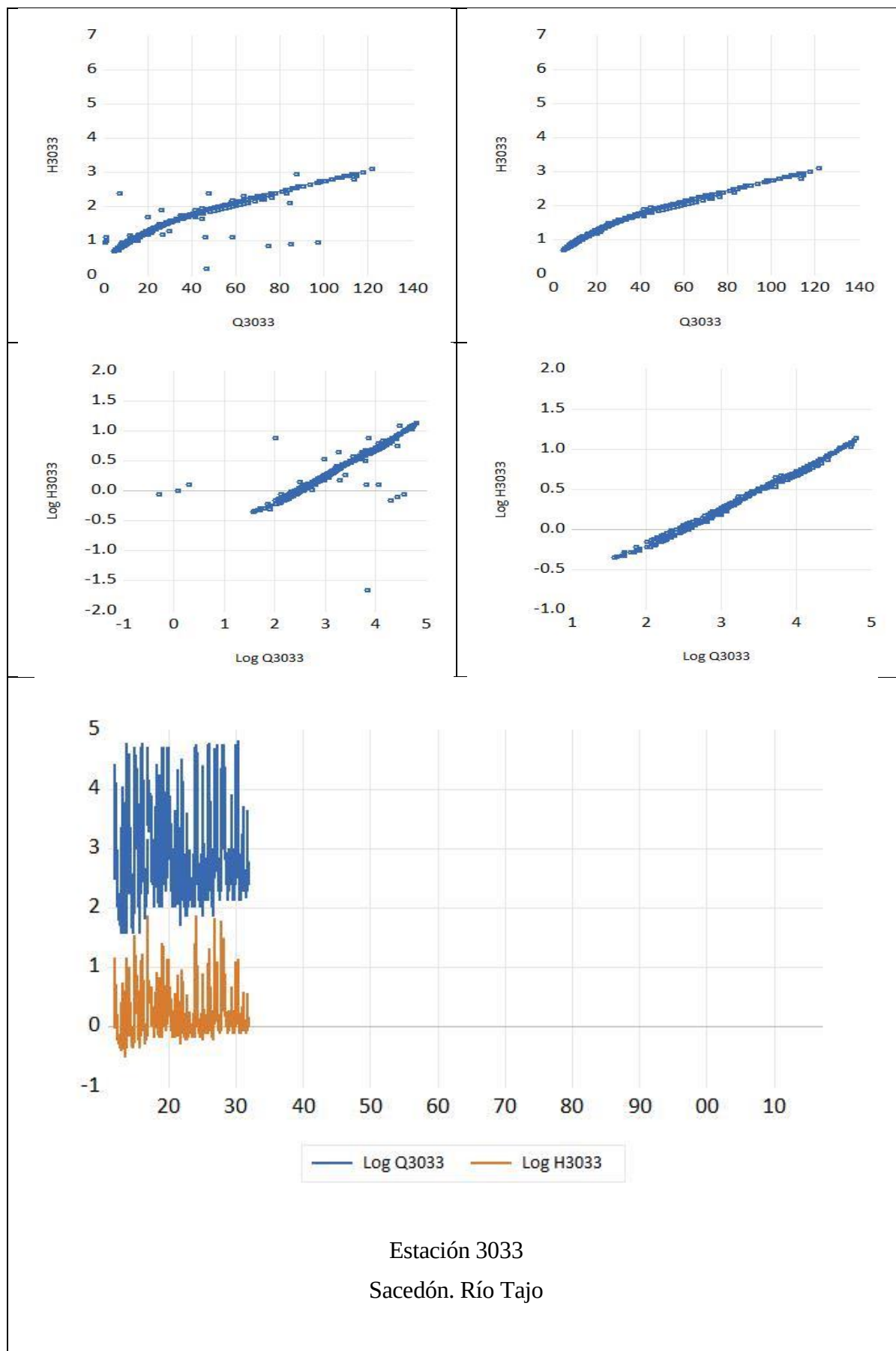


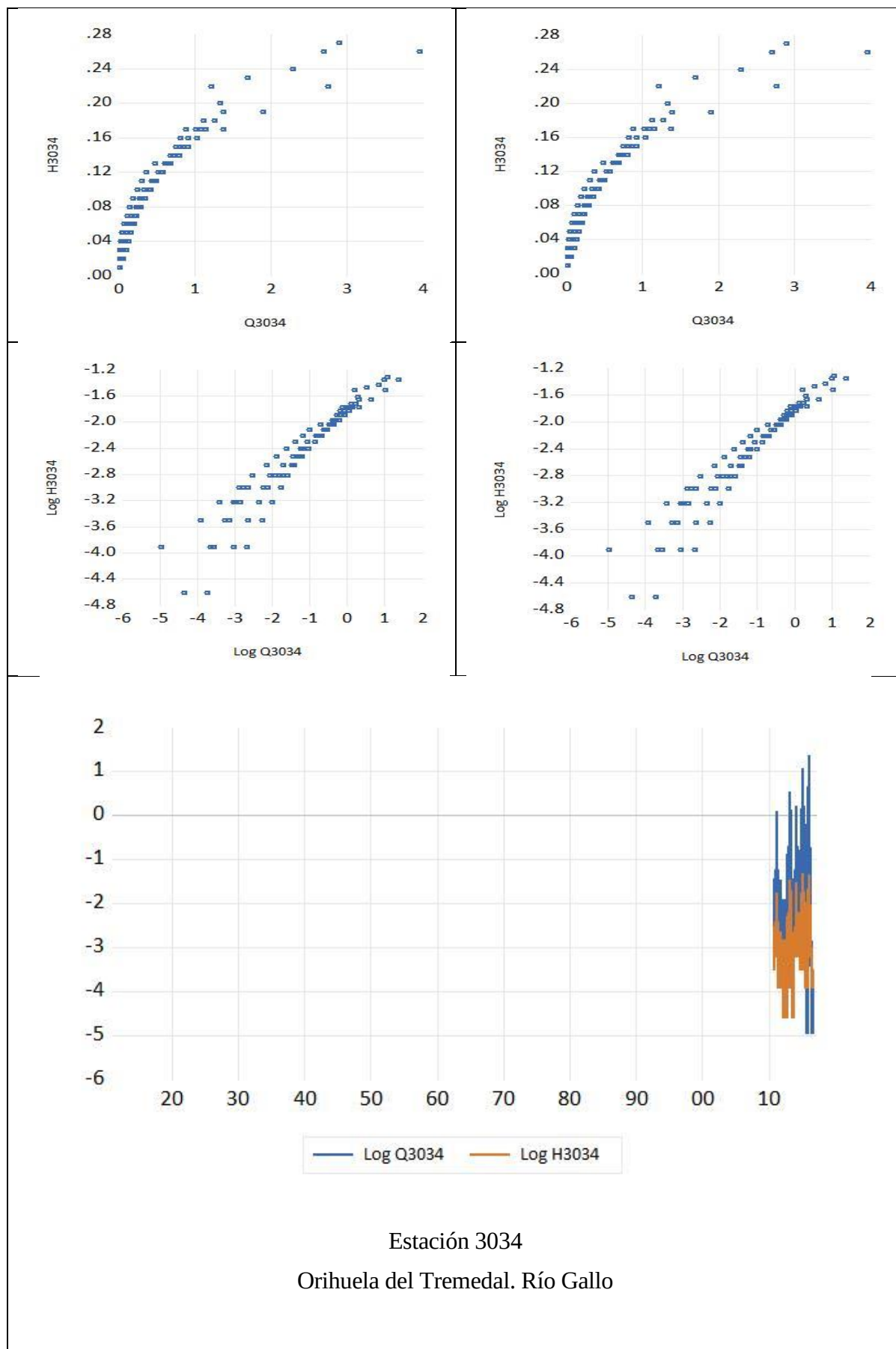


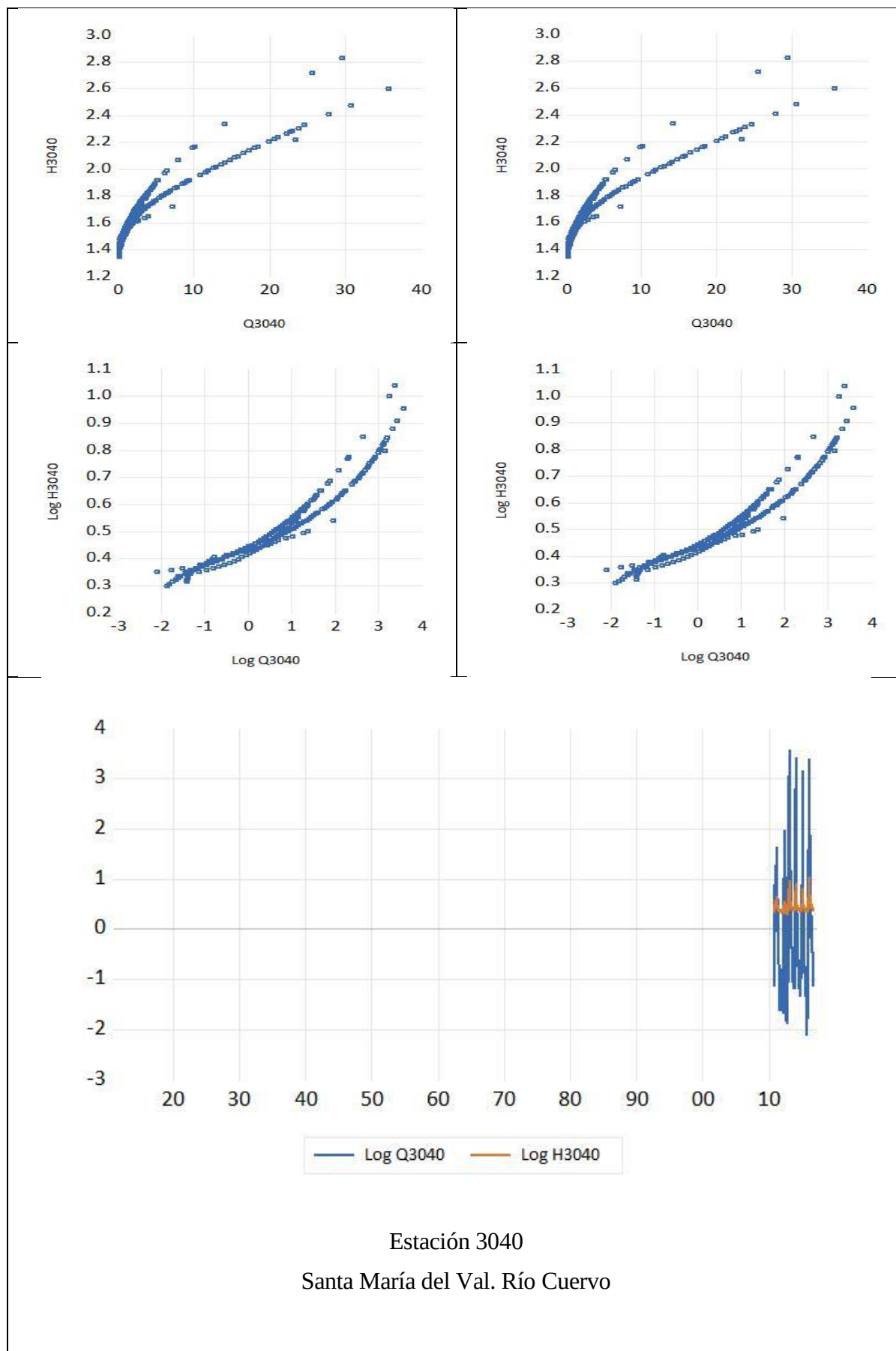


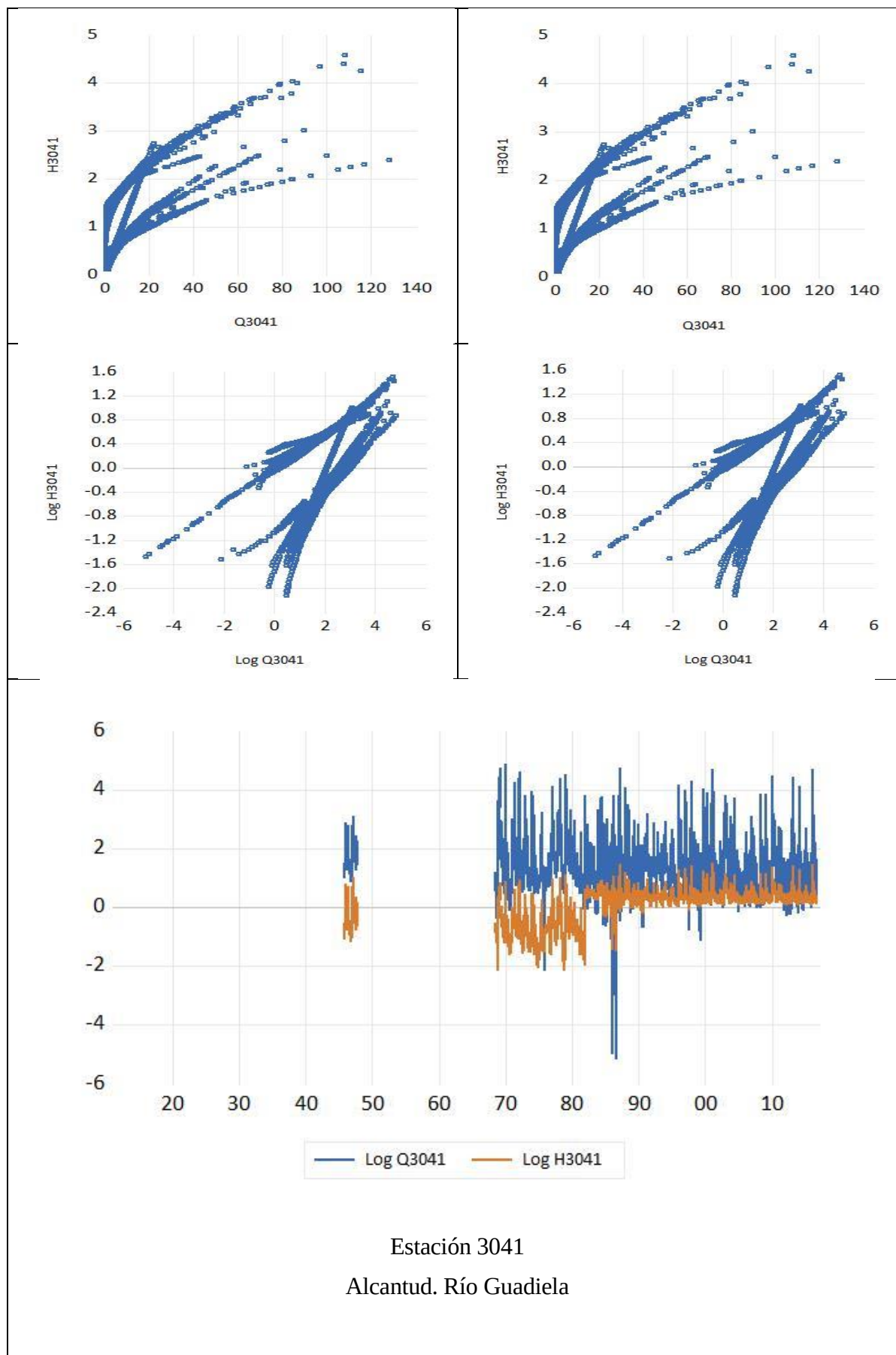


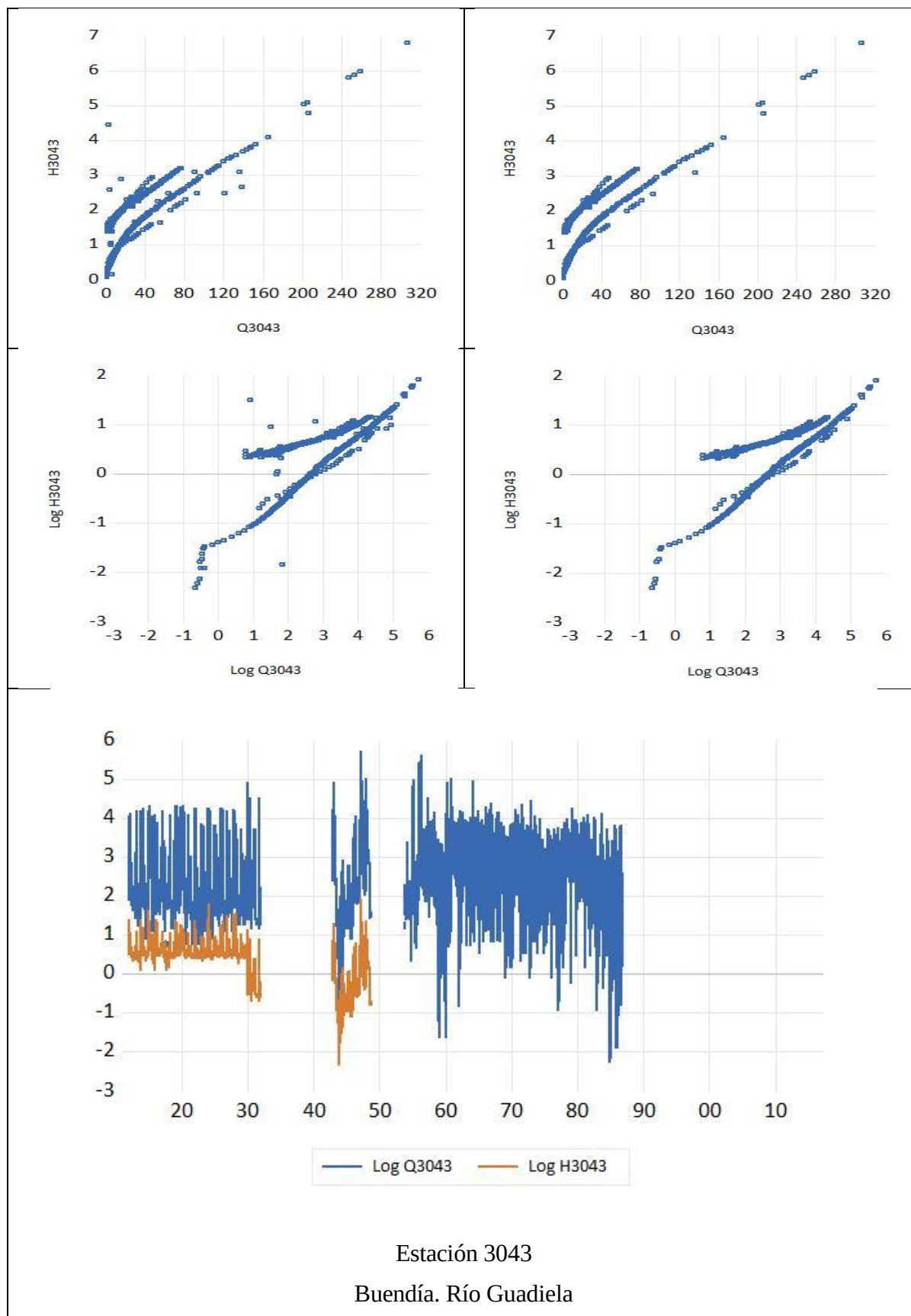


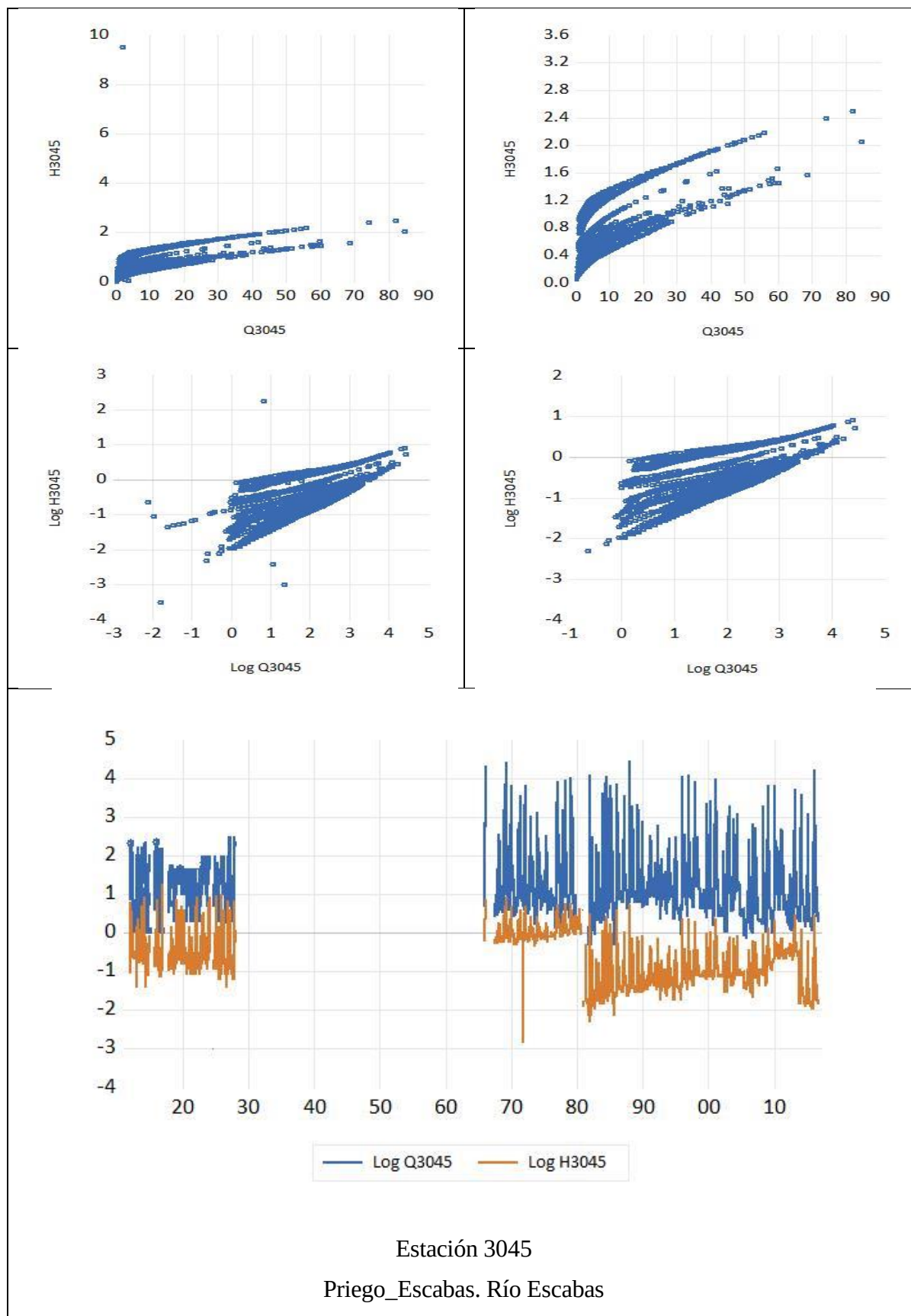


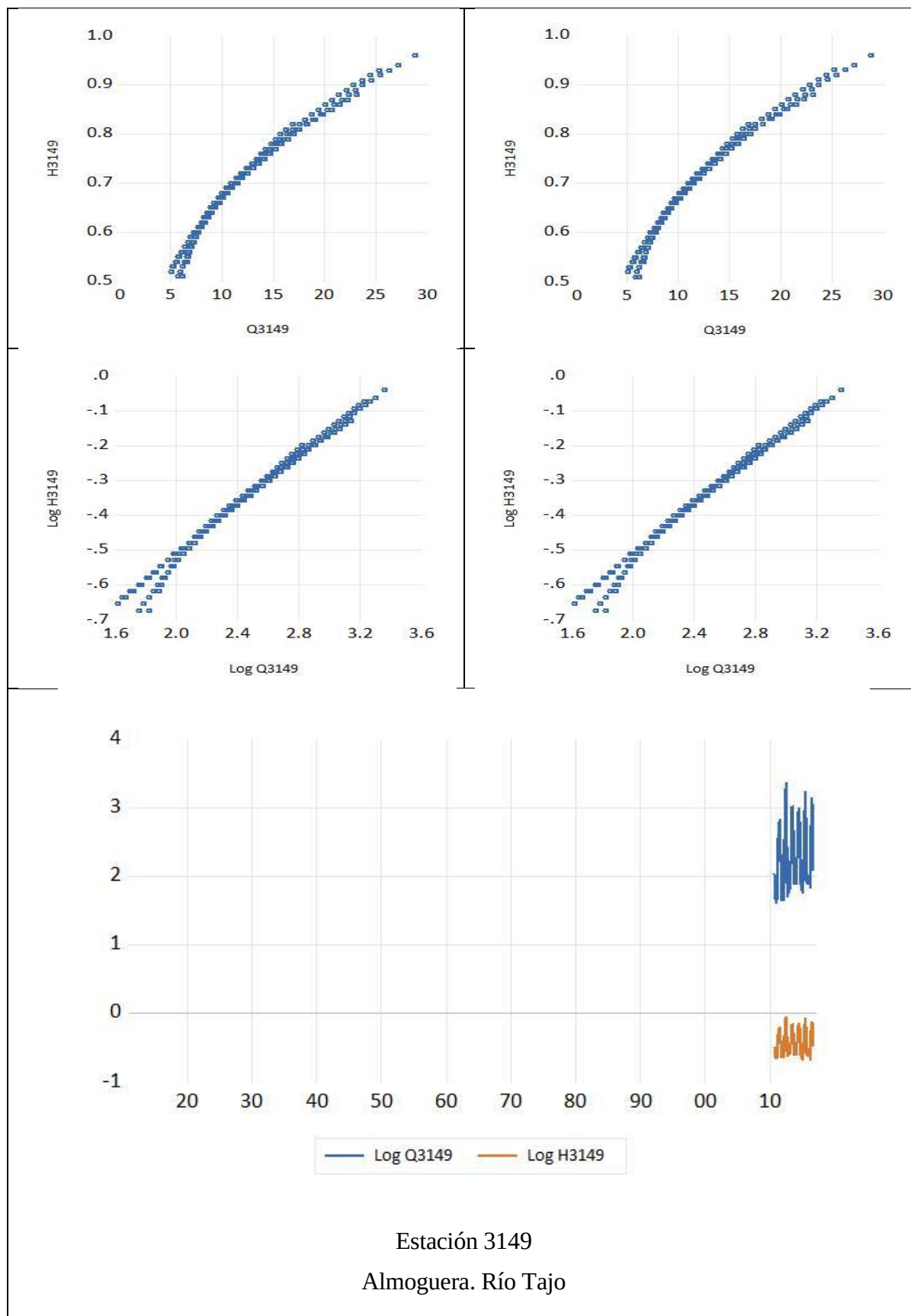


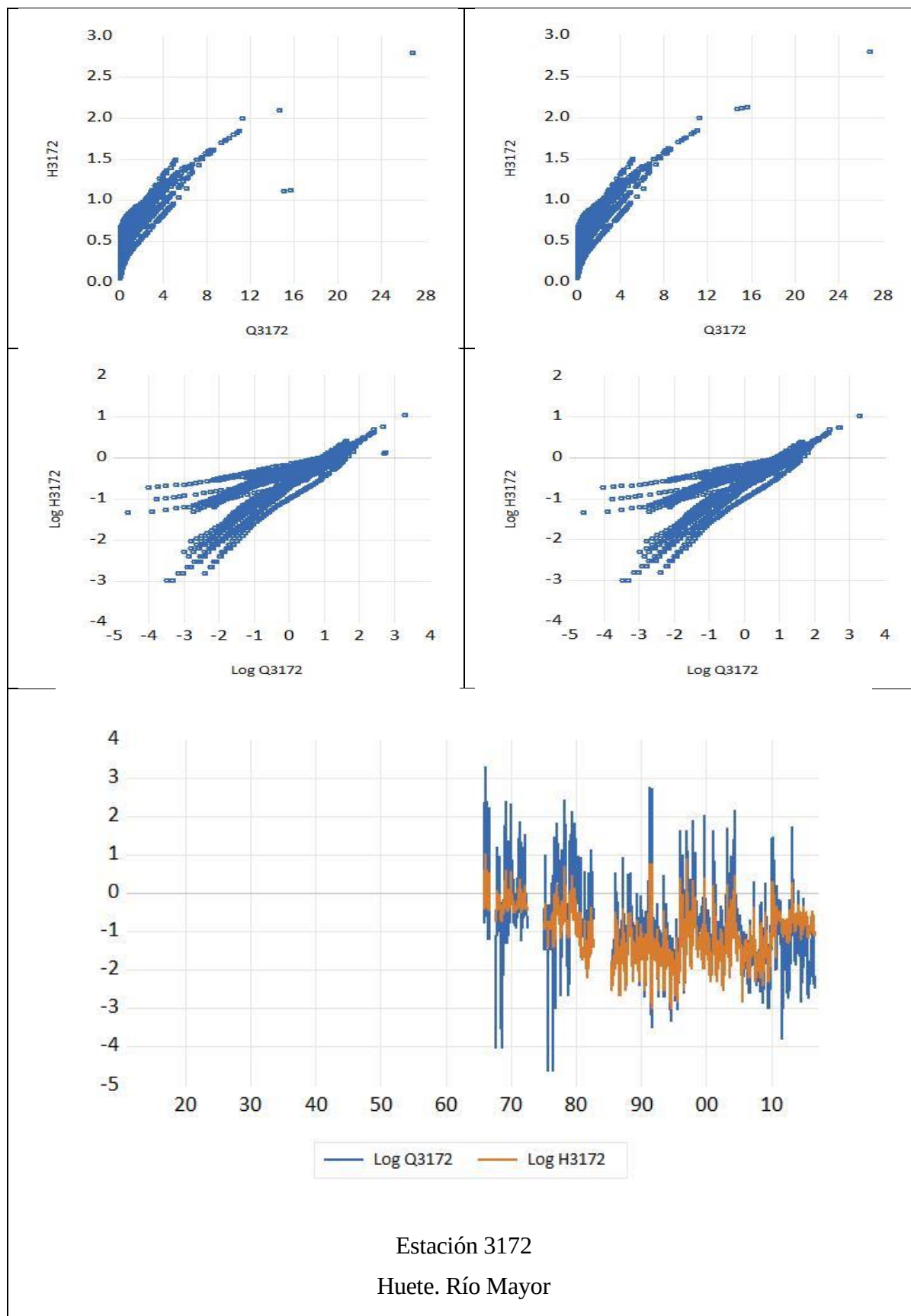


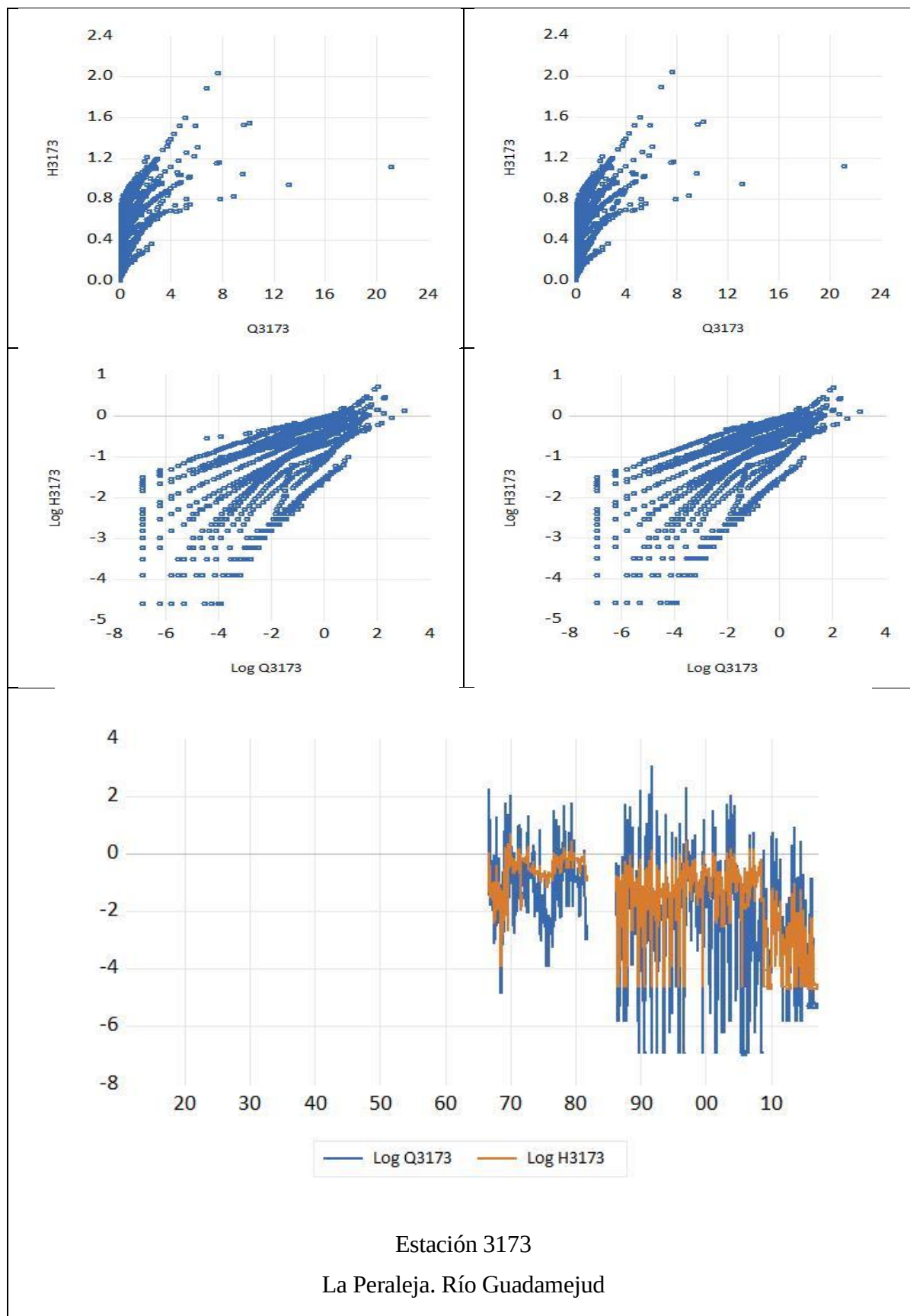


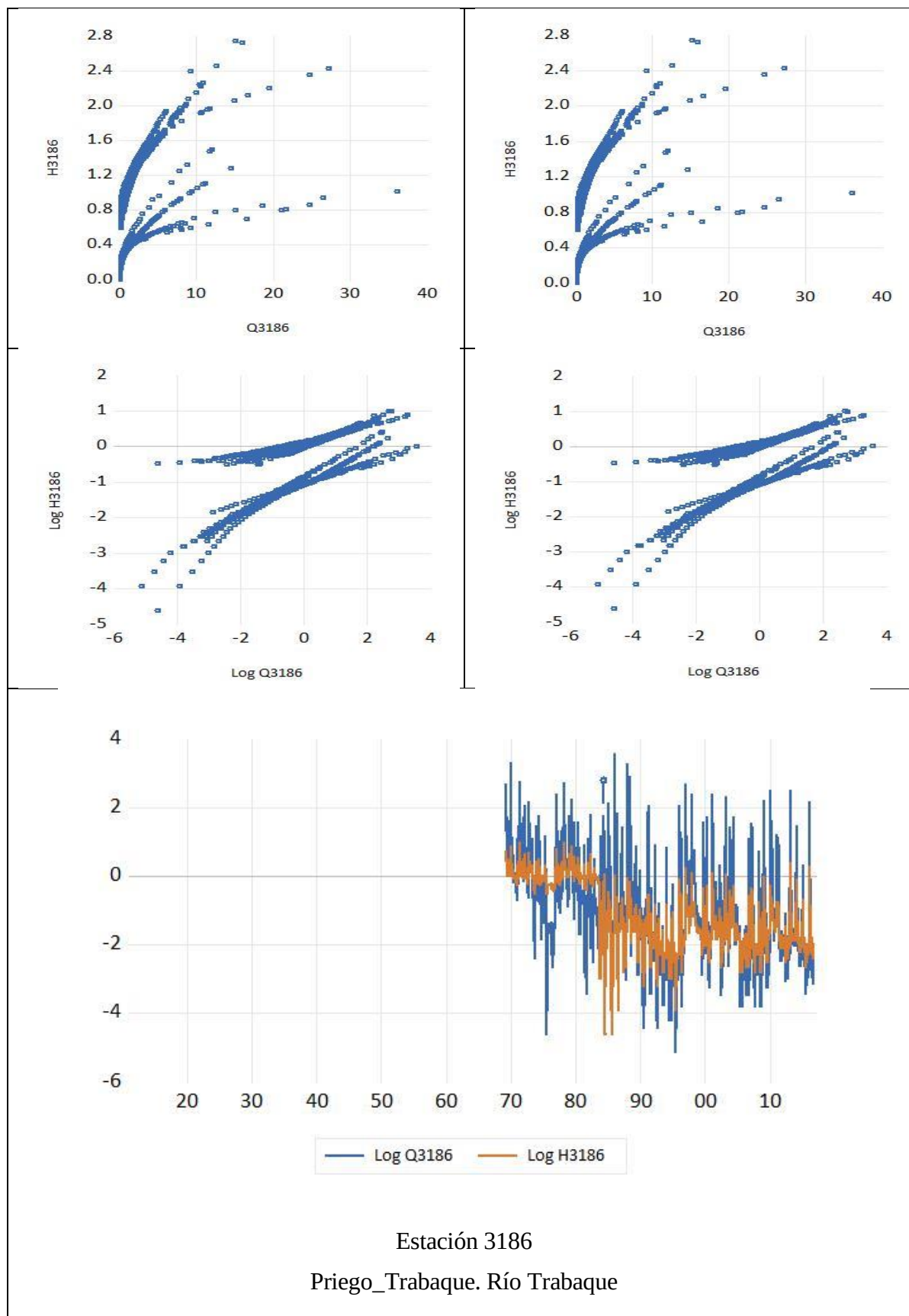


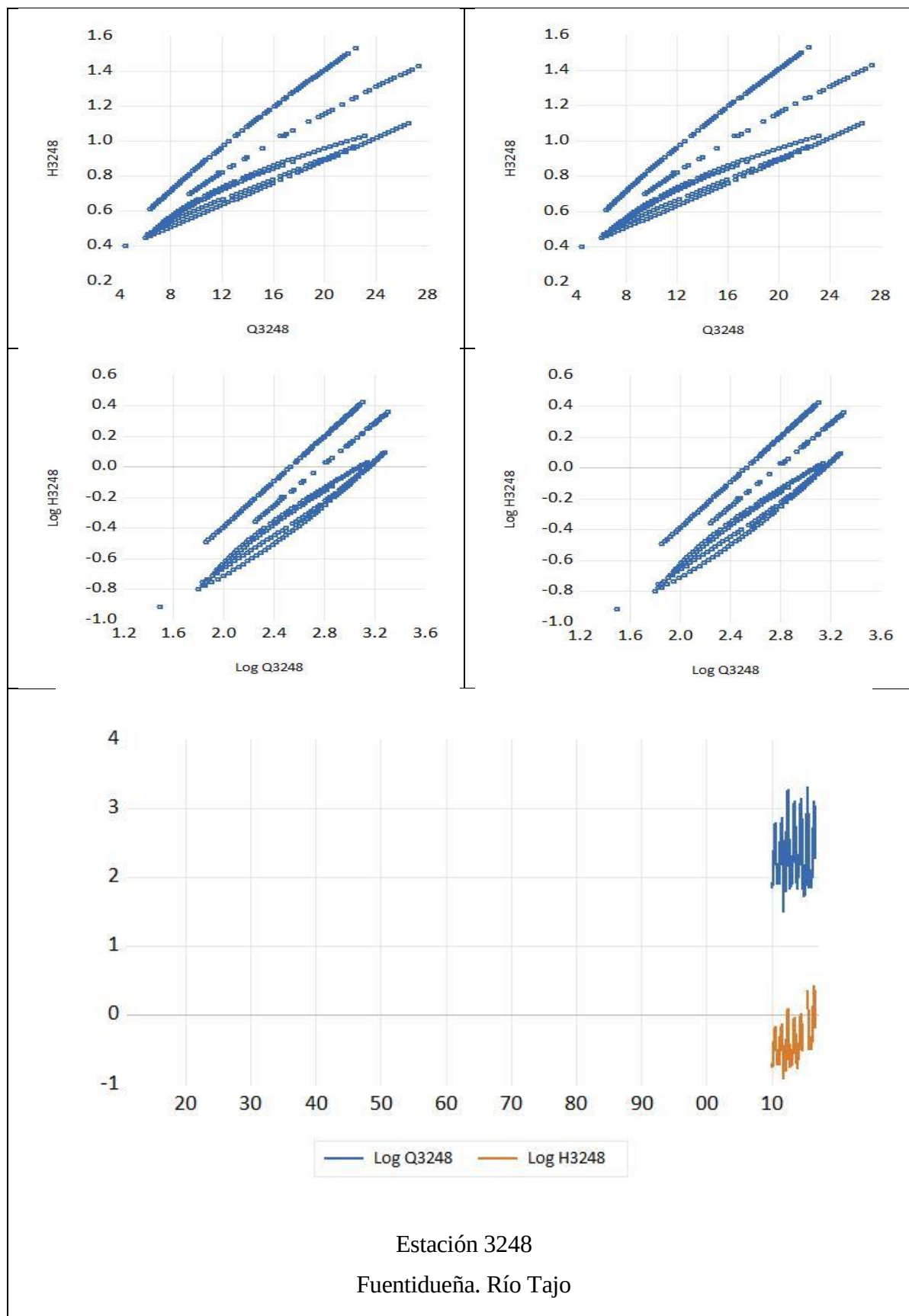


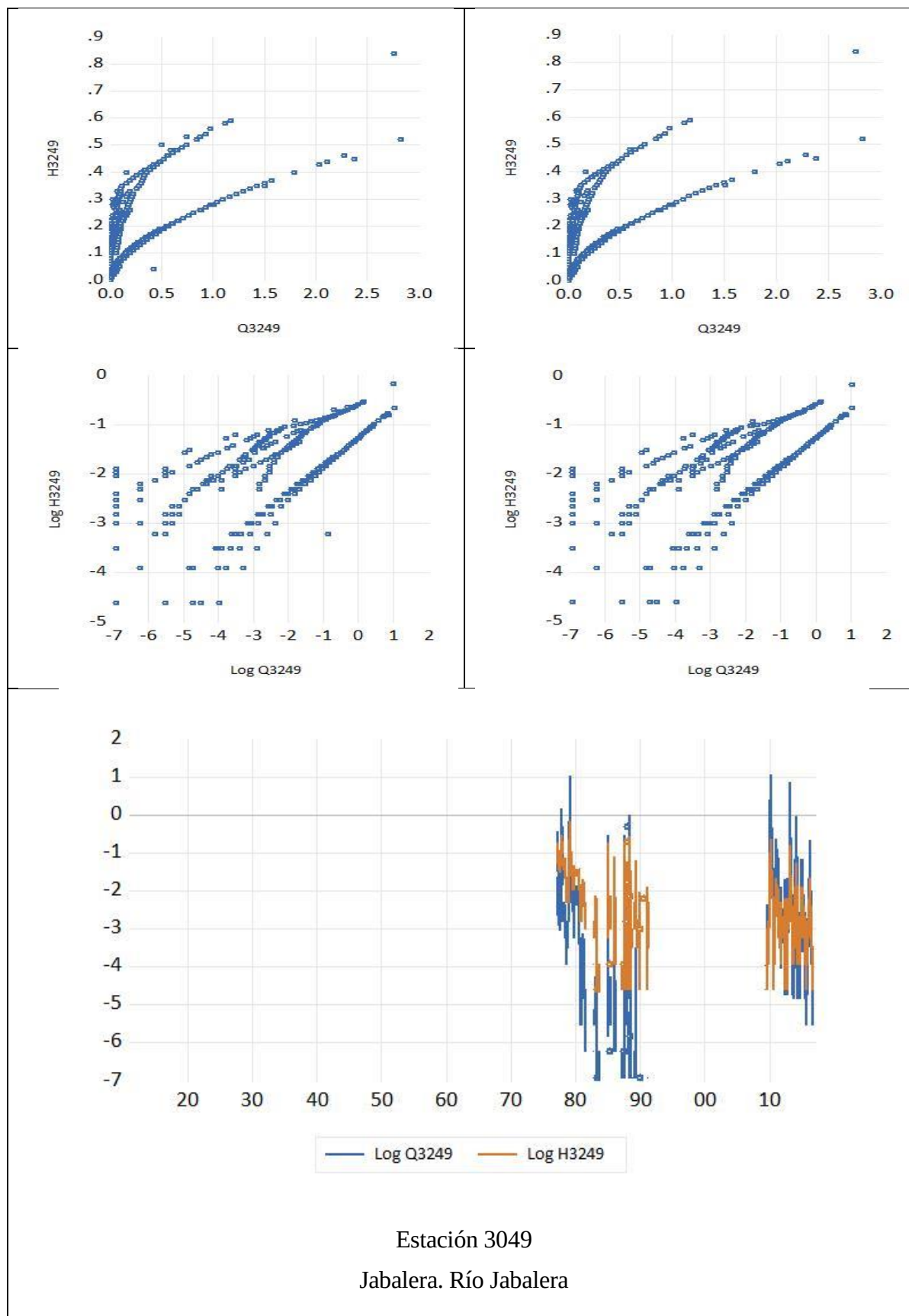


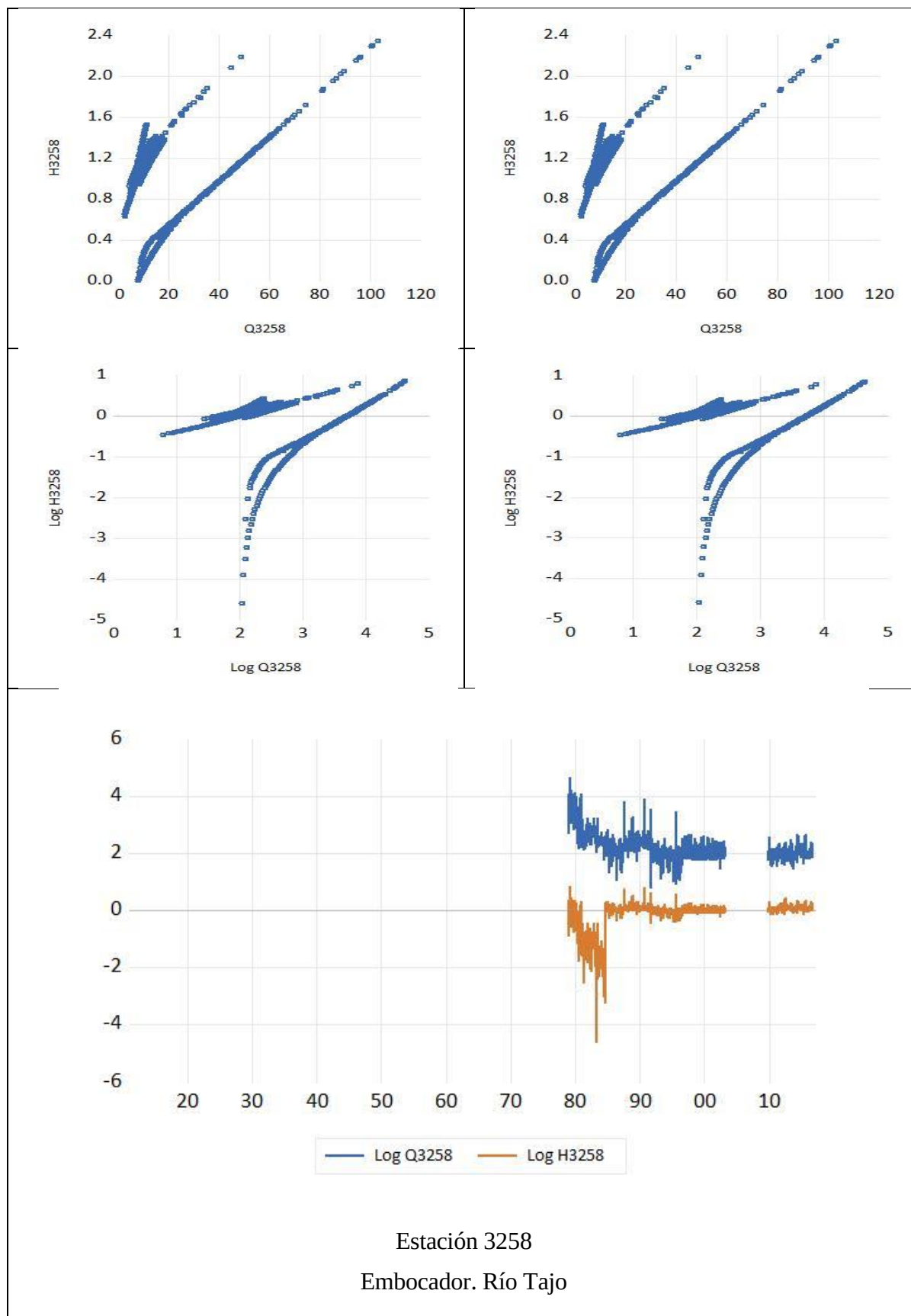


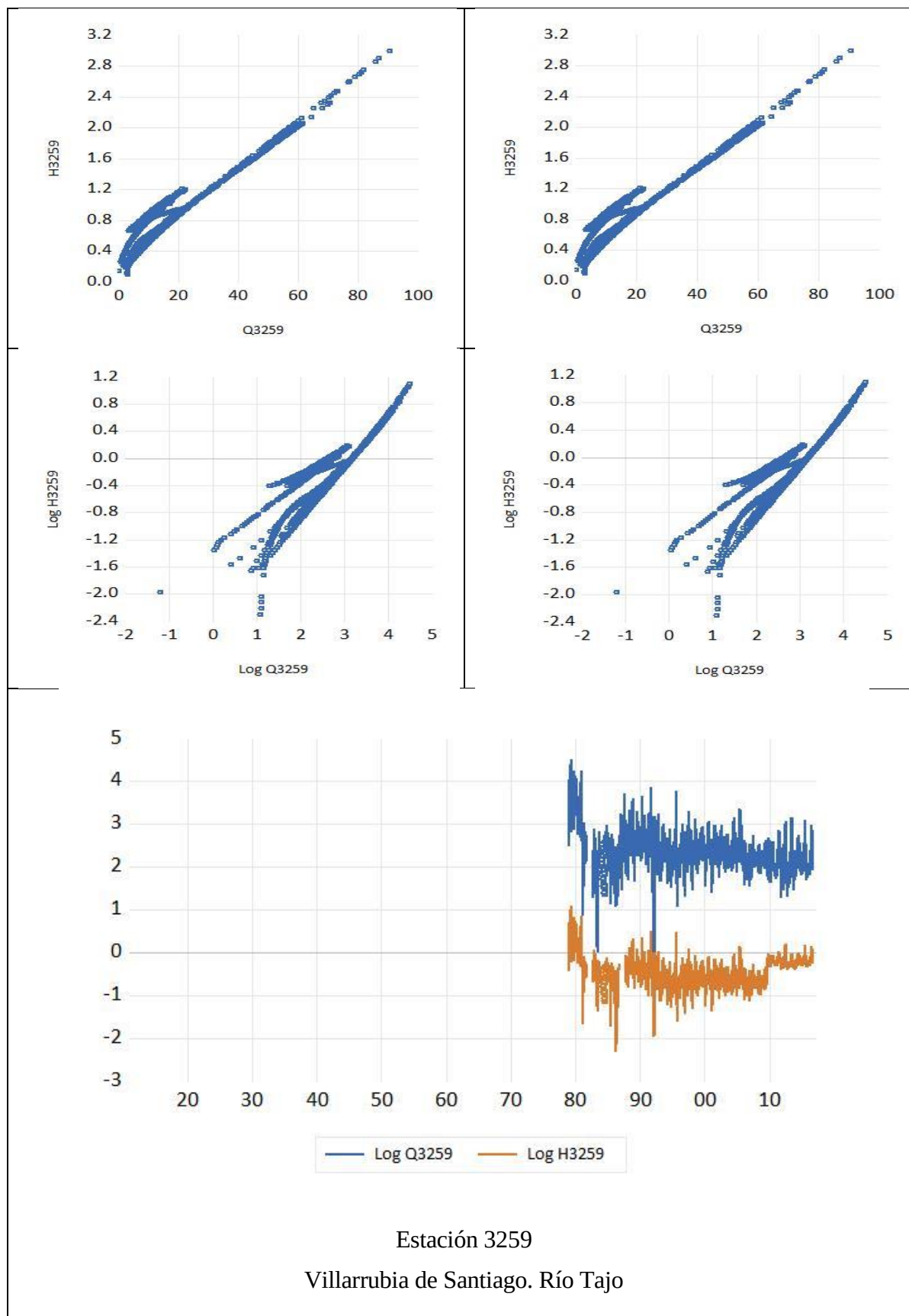


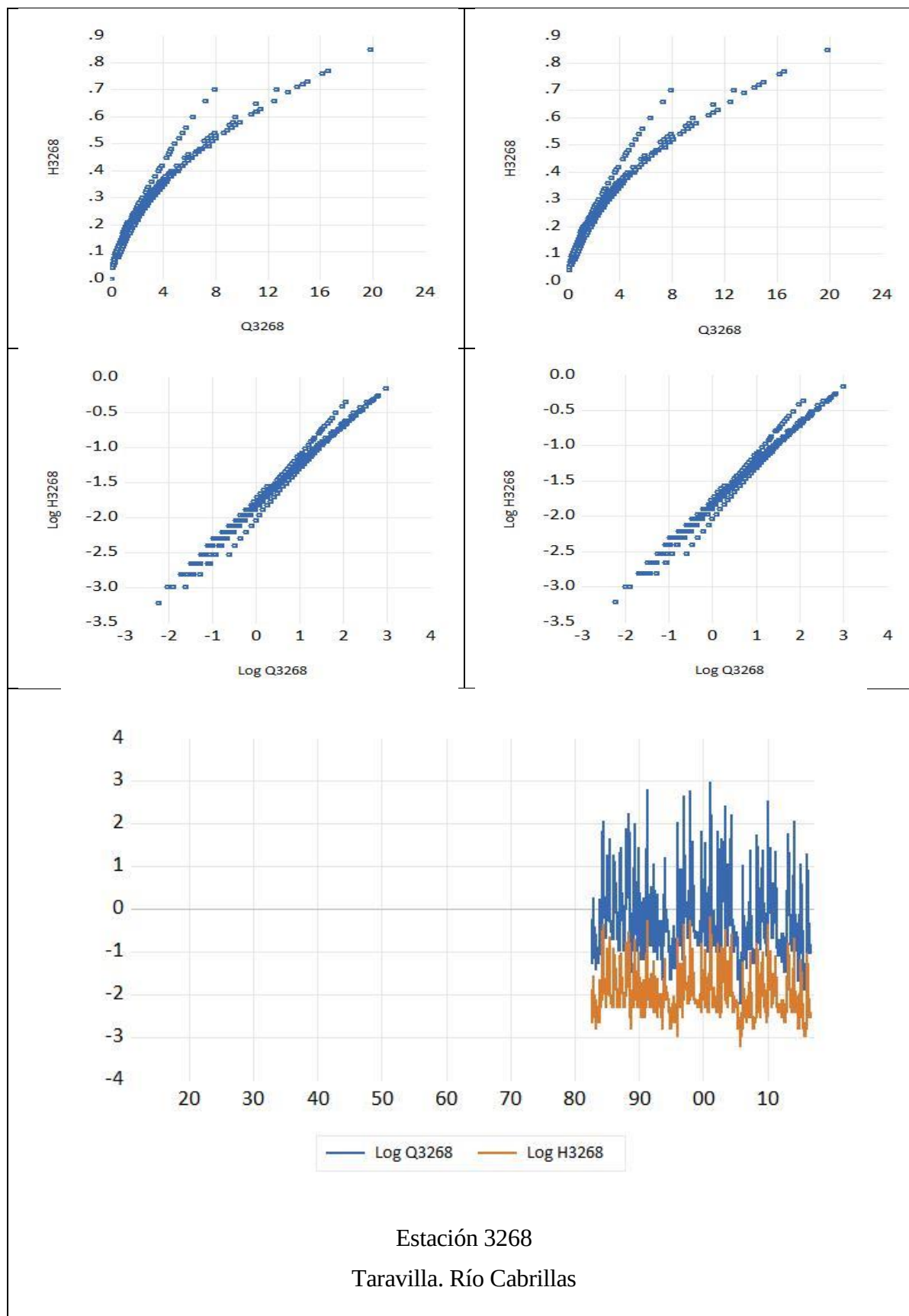


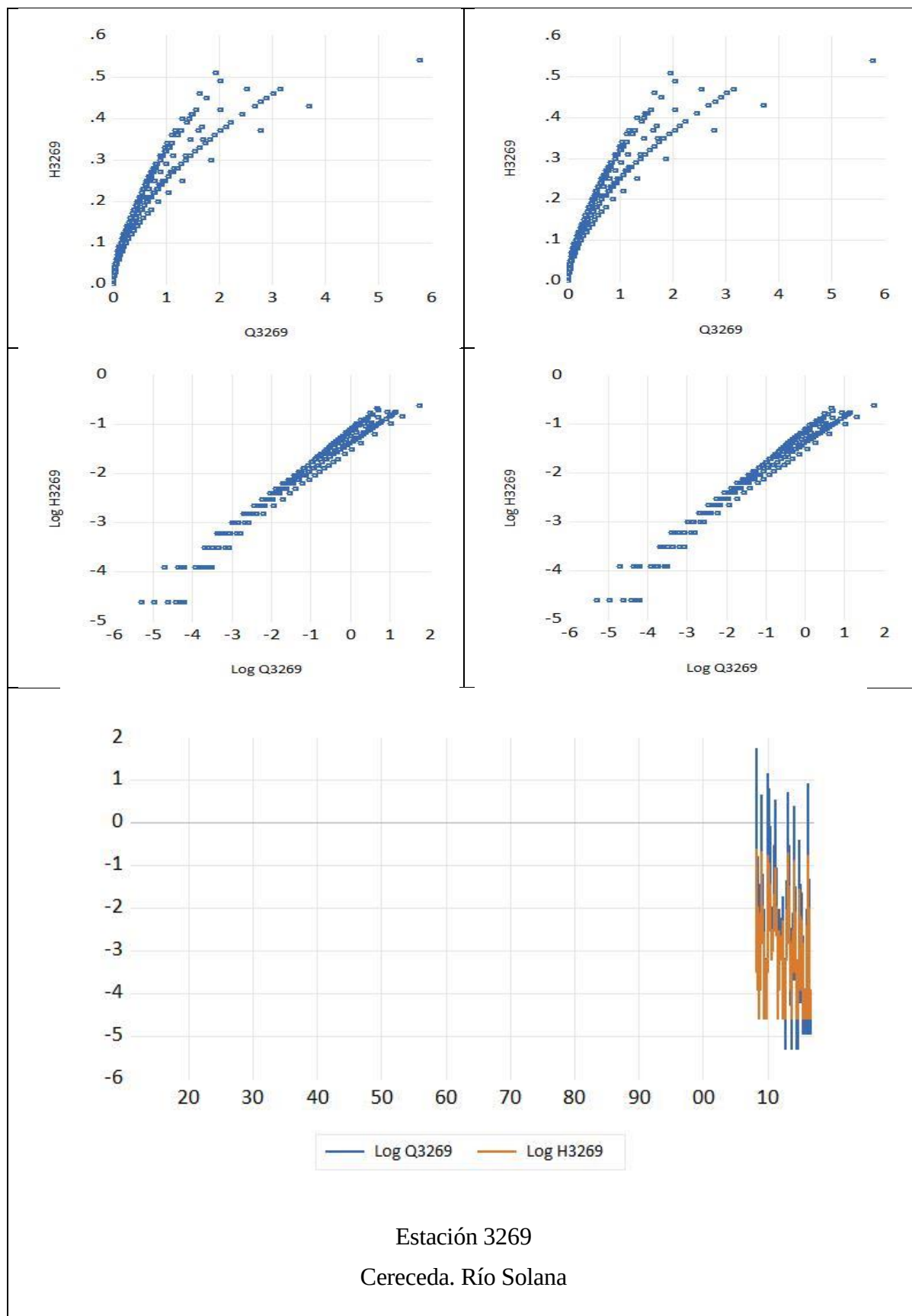


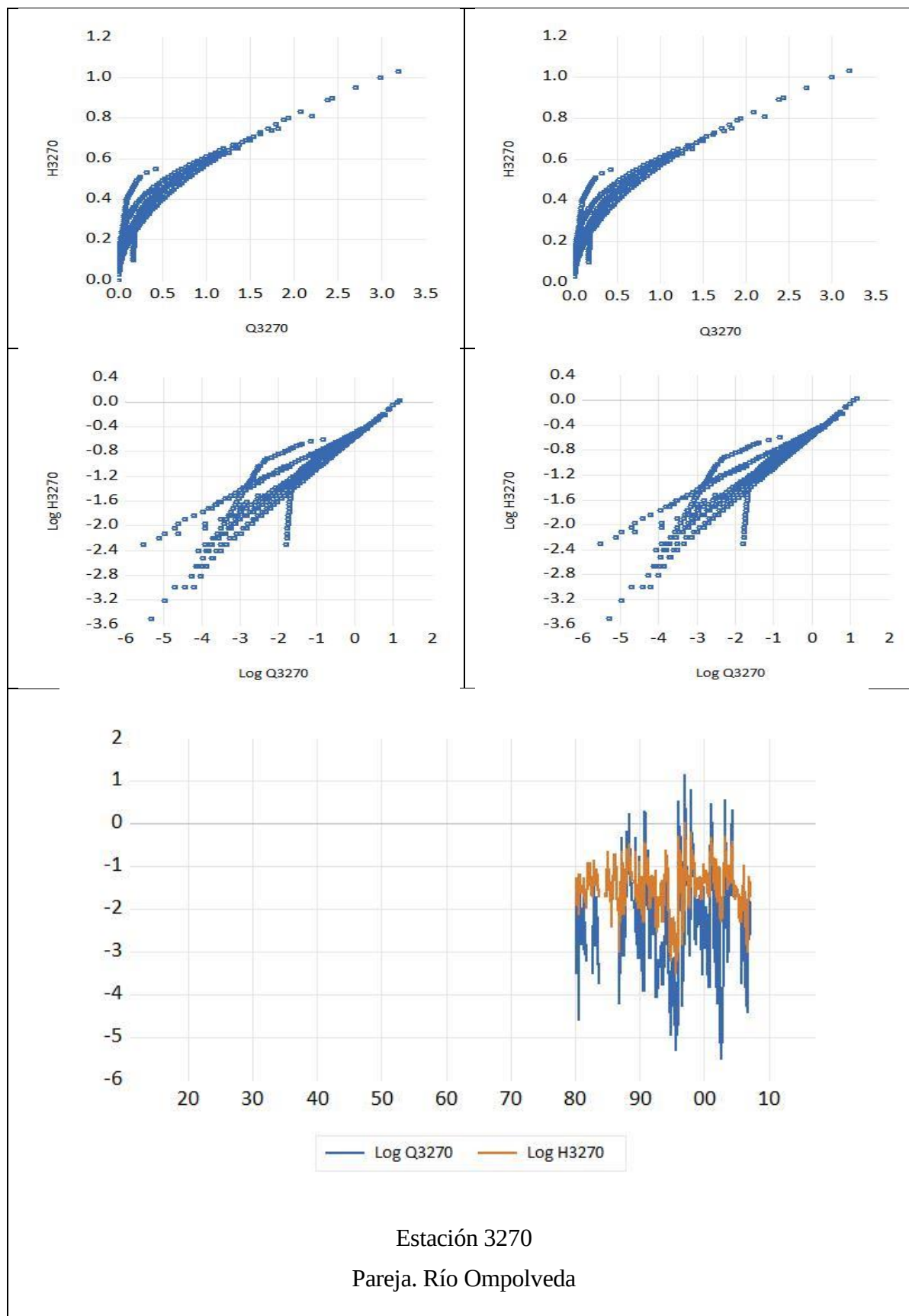


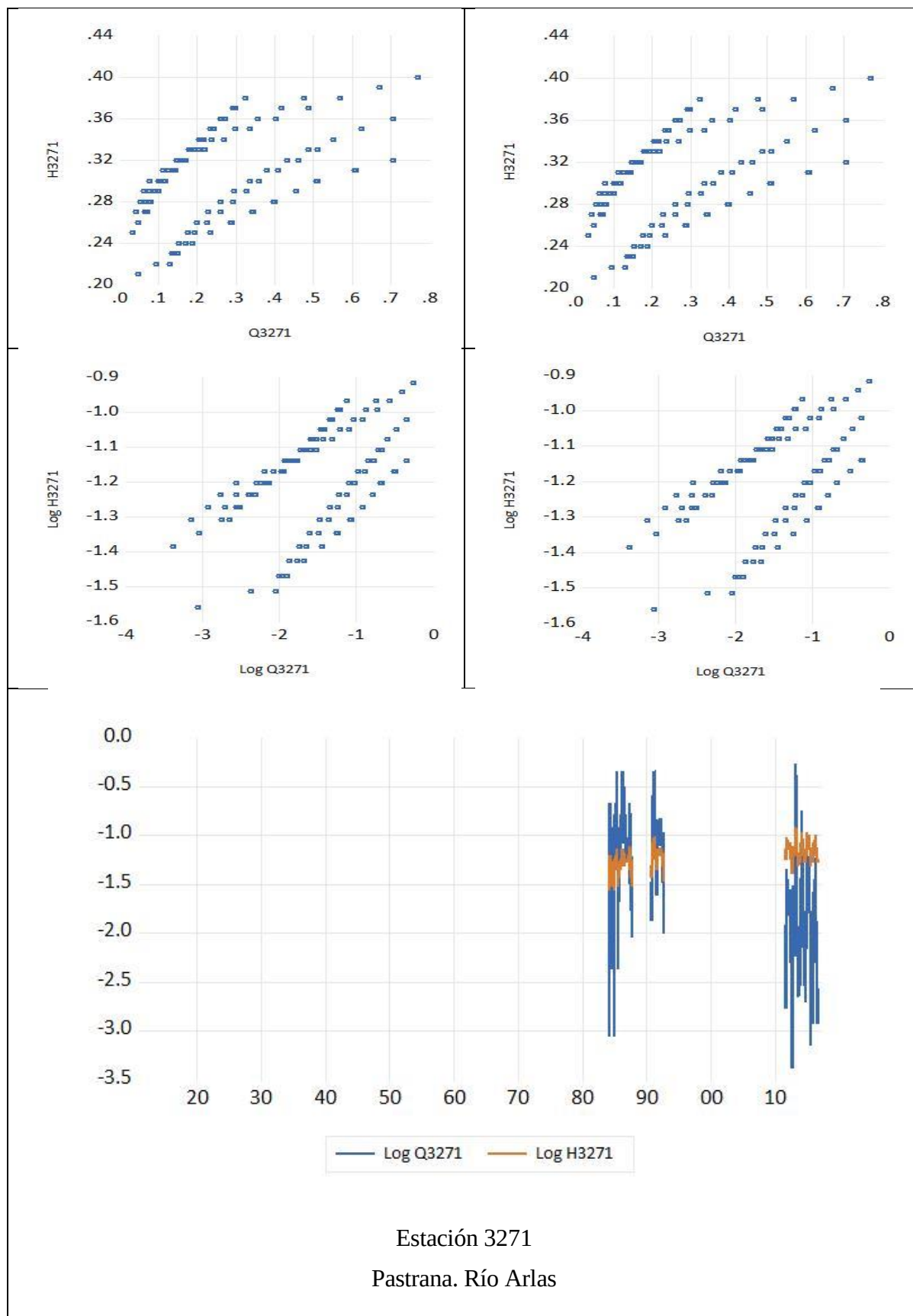


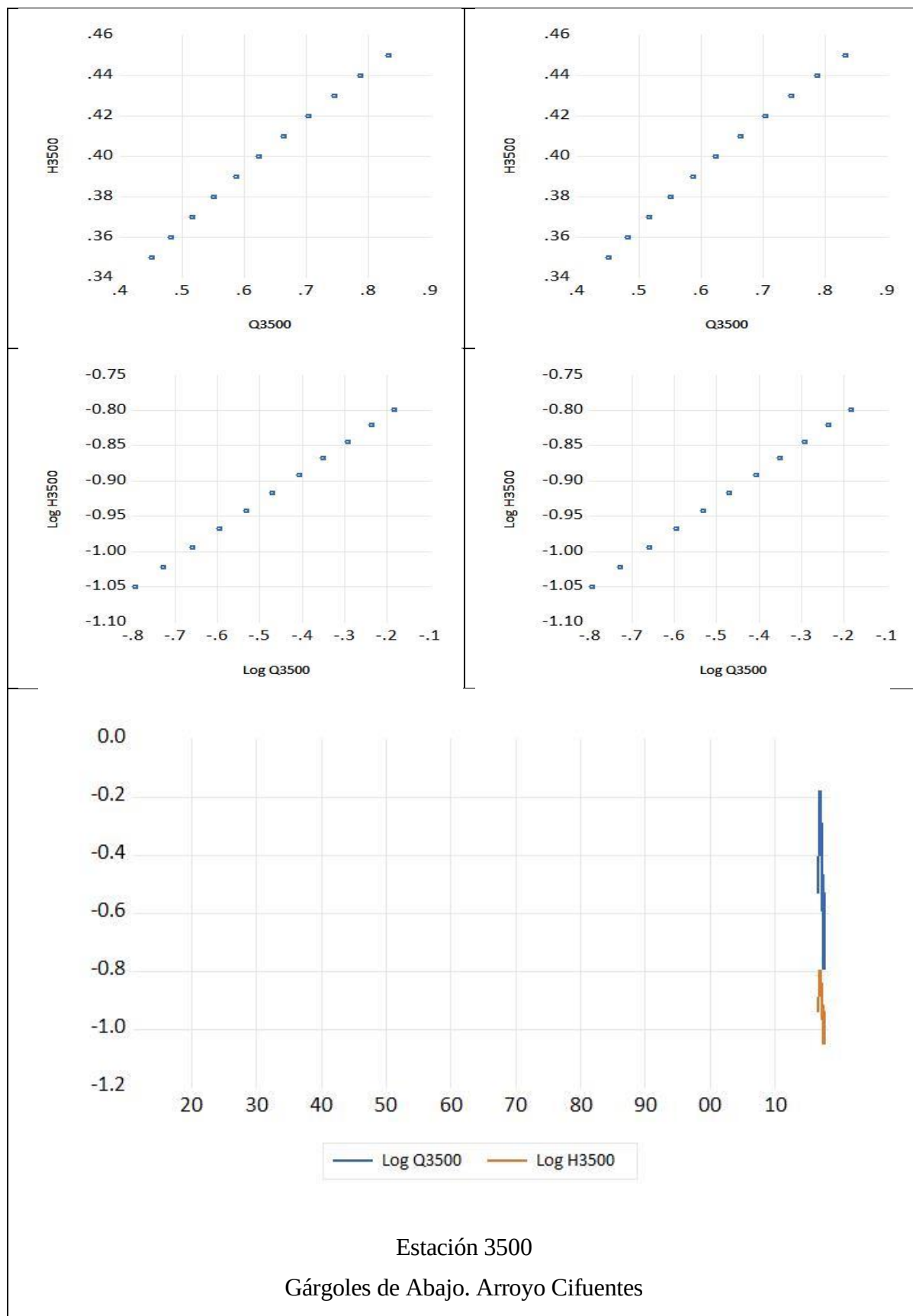


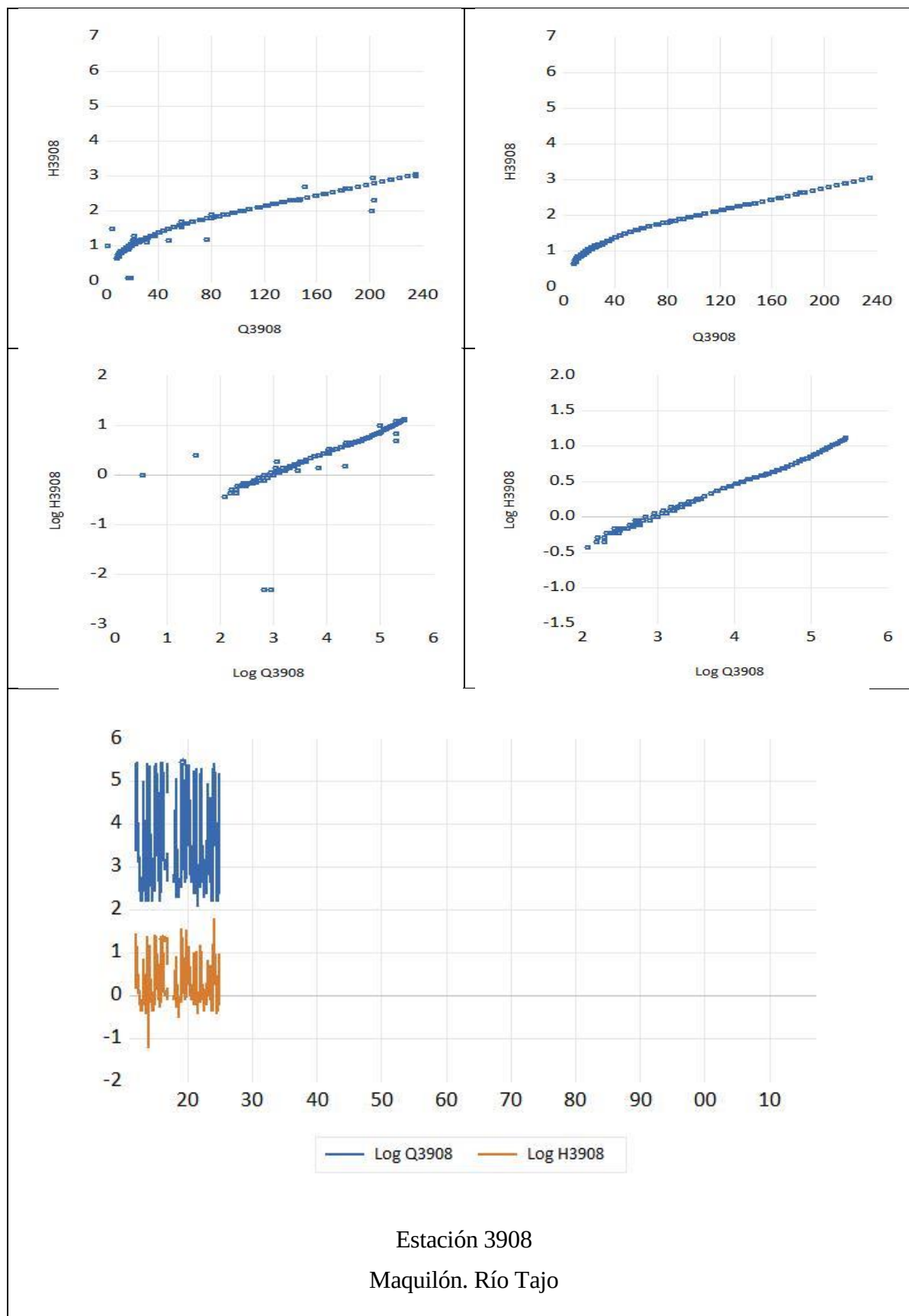


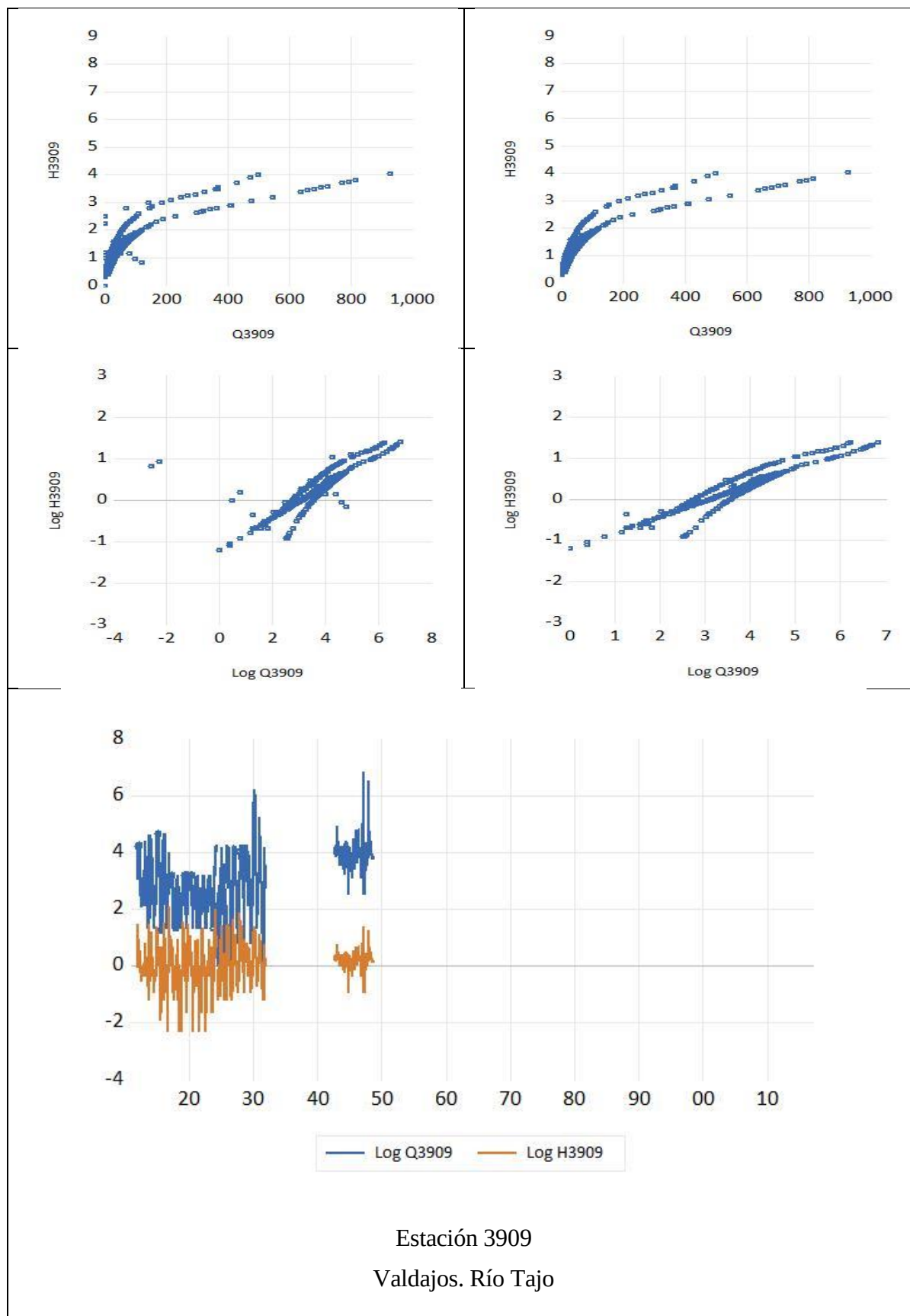












7. ANEXO II. EMBALSES

Datos de embalses

En el presente Anexo se muestran diferentes gráficos descriptivos del balance hídrico para todas las estaciones de embalse existentes en el área estudiada.

Para cada estación se ofrecen 11 gráficos representados en tres páginas.

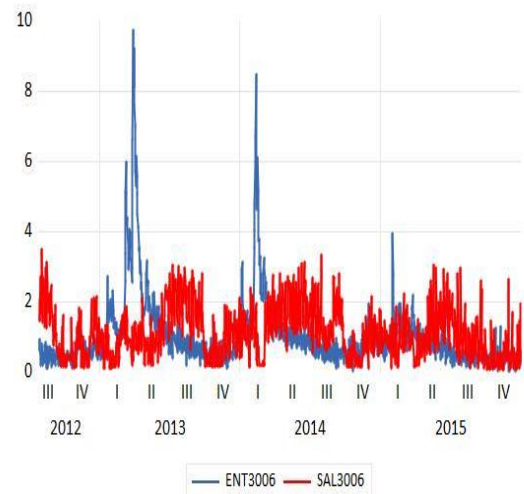
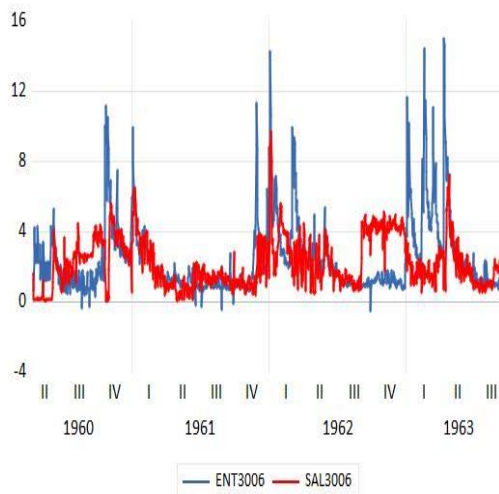
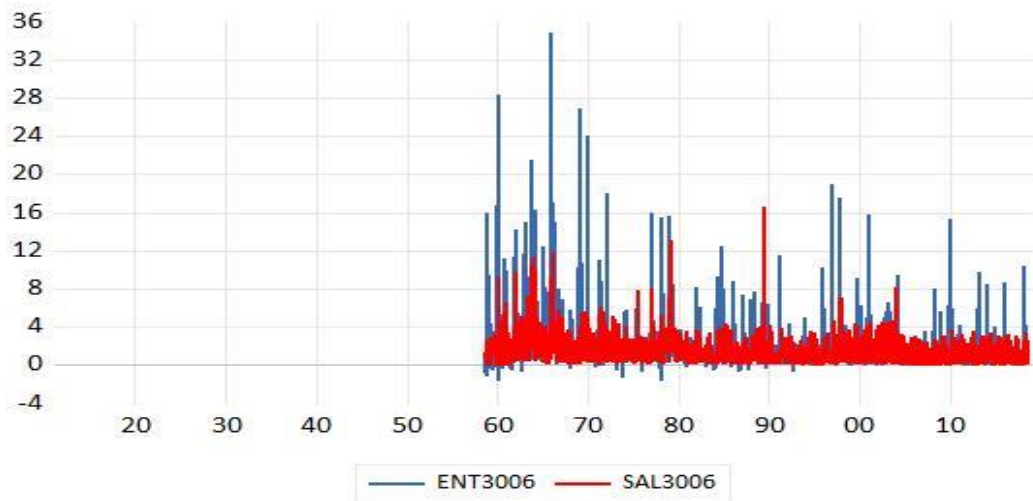
En la primera página, con datos a escala diaria, se muestra en primer lugar un gráfico de las series de entradas (líneas azules) y salidas (líneas rojas) del embalse, junto con dos gráficos de detalle de estas series. La viñeta inferior representa la serie de existencias diarias embalsadas.

La segunda página repite el esquema anterior pero ahora con datos a escala mensual y anual. Un primer gráfico muestra las series mensuales completas de series de entradas y salidas, junto con dos detalles de estas series, y un gráfico inferior muestra los datos de entradas y salidas a escala anual.

Finalmente la tercera página muestra tres gráficos con las series de evaporaciones del embalse a las tres escalas, diaria, mensual y anual.

Se muestran los datos de todos los embalses del Anuario, incluyendo el depósito de La Bujeda. Este depósito artificial carece de cuenca vertiente y no se sitúa sobre ningún cauce, por lo que es irrelevante para la caracterización hidrológica del área. No obstante se ha decidido incluirlo porque resulta necesario para comprender la dinámica del sistema, y además permite contrastar sus datos con el resto, verificando así la coherencia de todo el conjunto.

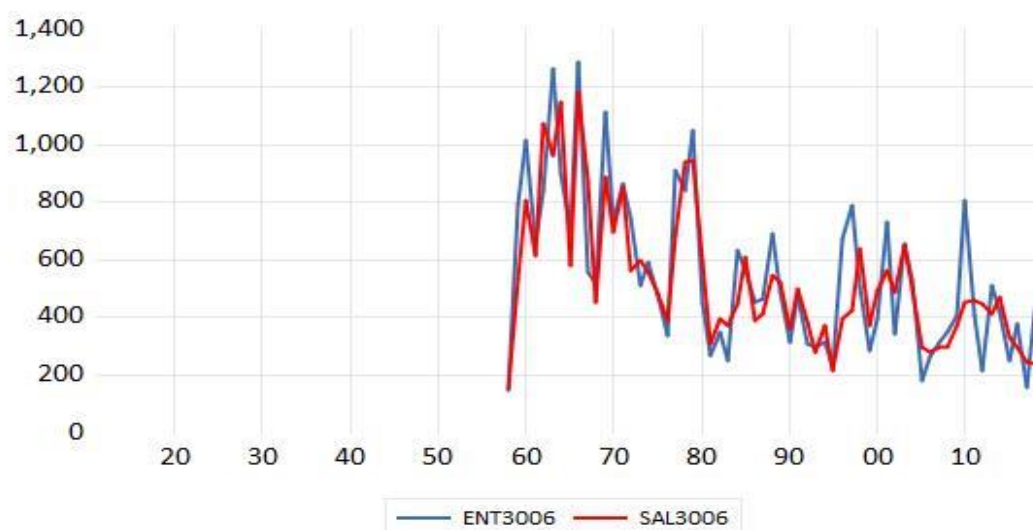
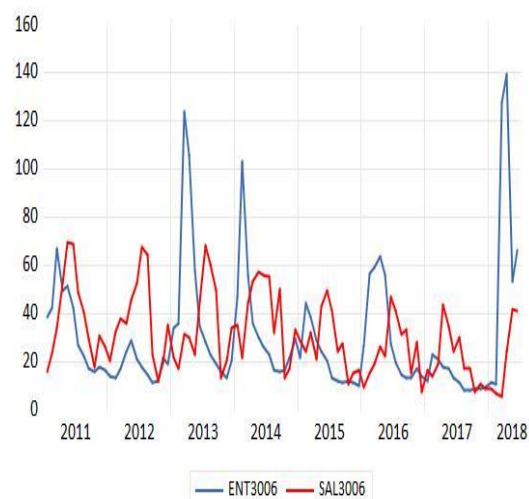
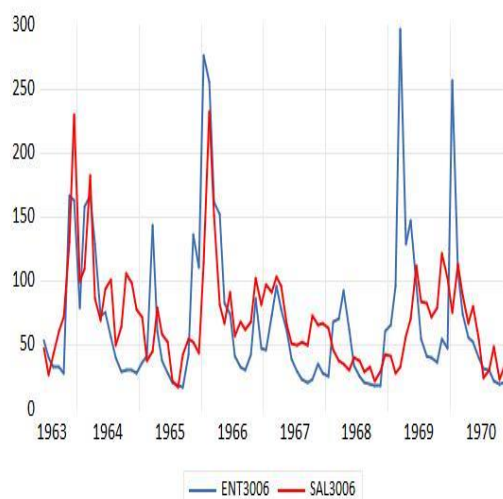
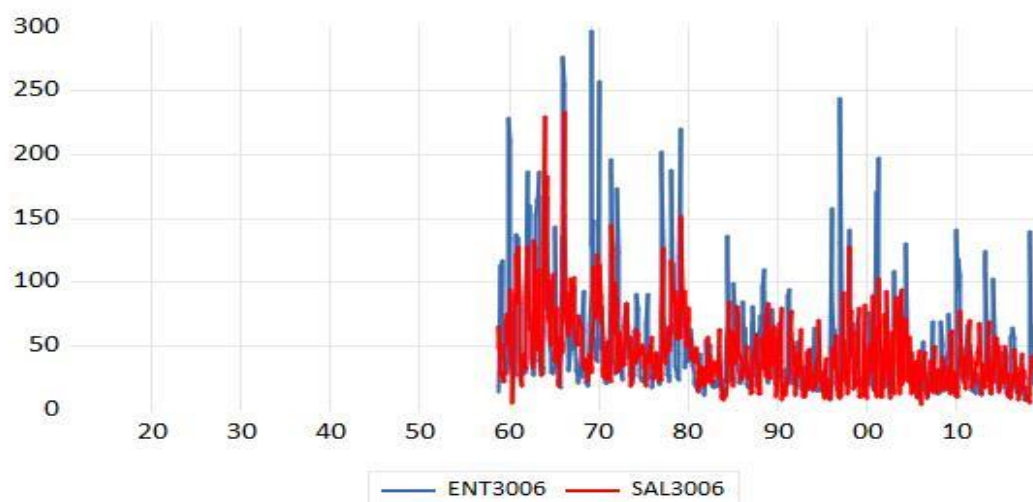
Estación 3006. Embalse de Entrepeñas. Río Tajo. Datos diarios



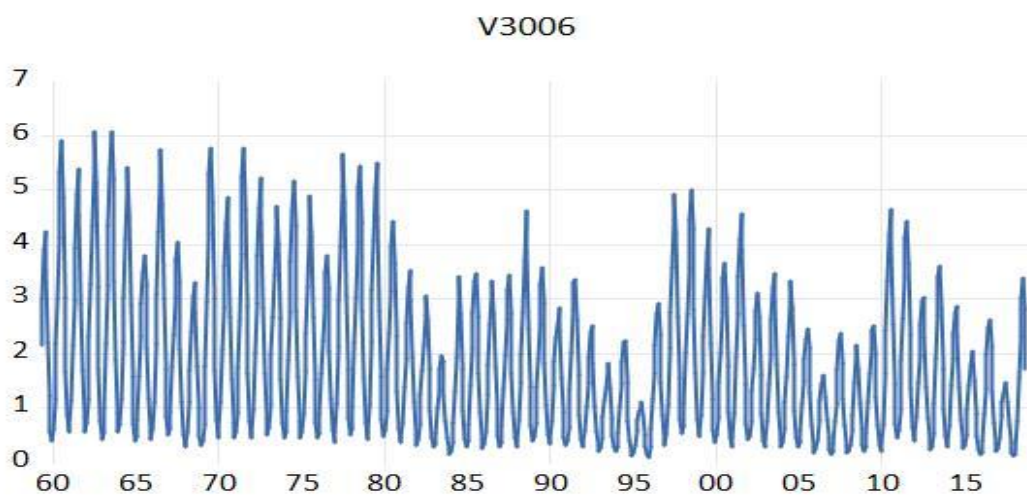
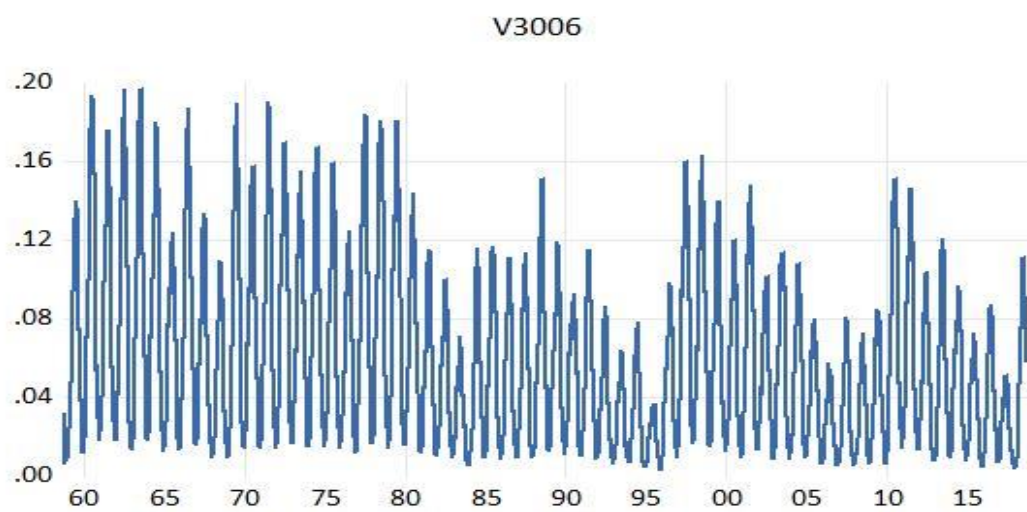
R3006



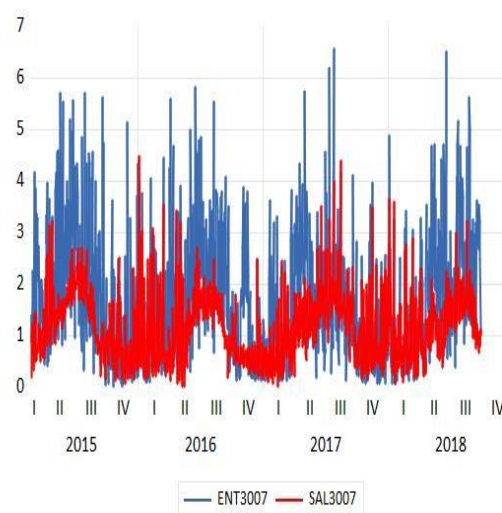
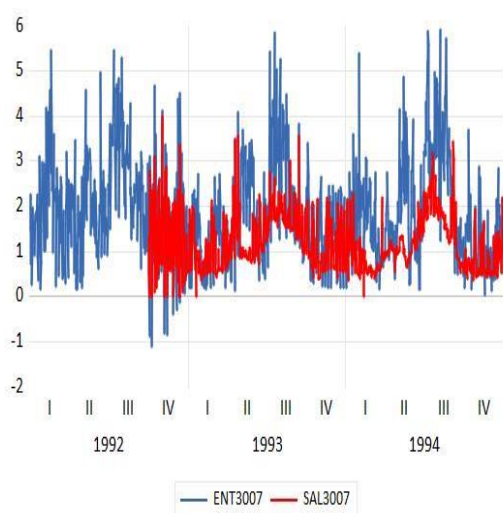
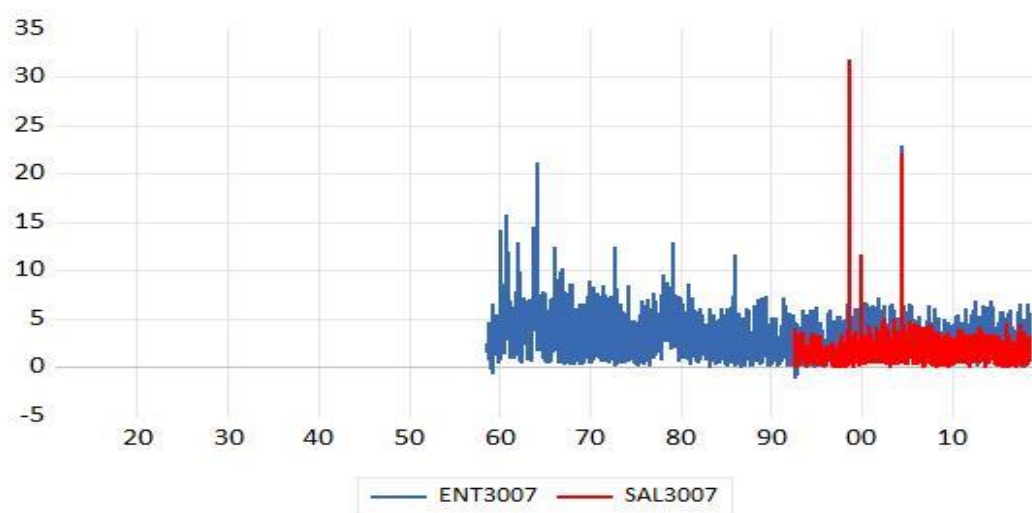
Estación 3006. Embalse de Entrepeñas. Río Tajo. Datos mensuales y anuales



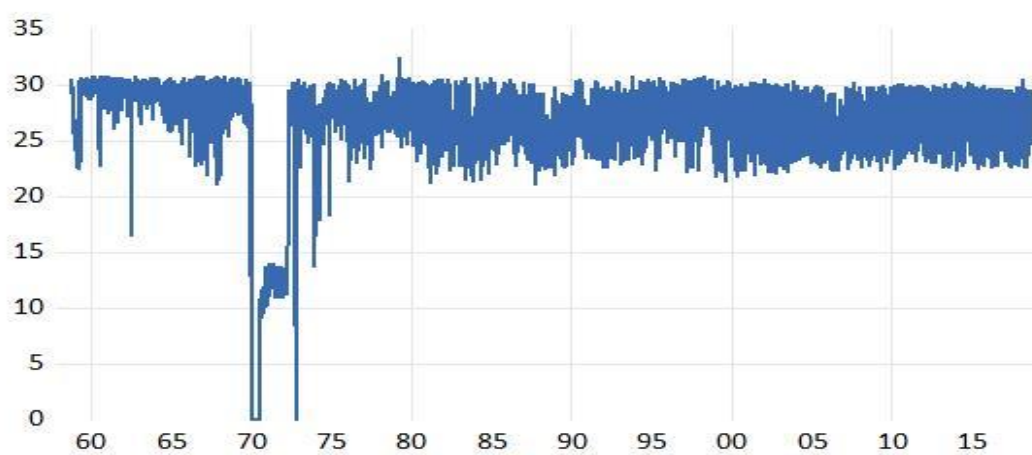
Estación 3006. Embalse de Entrepeñas. Río Tajo. Evaporaciones



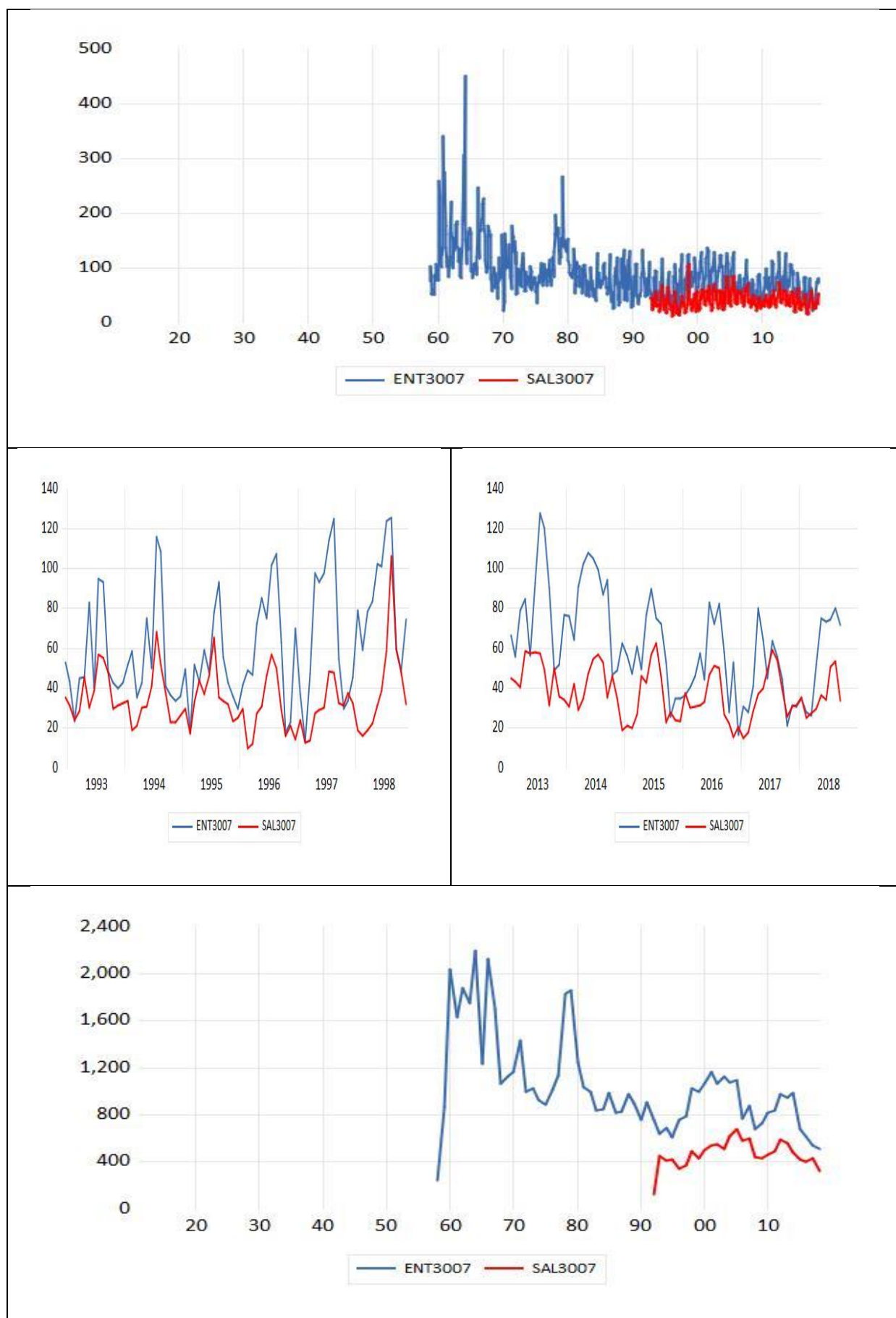
Estación 3007. Embalse de Bolarque. Río Tajo. Datos diarios



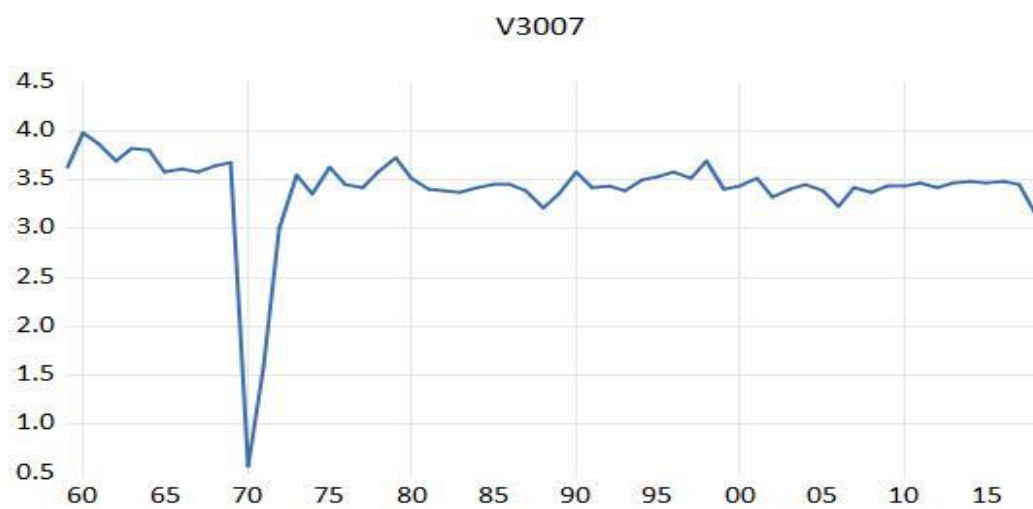
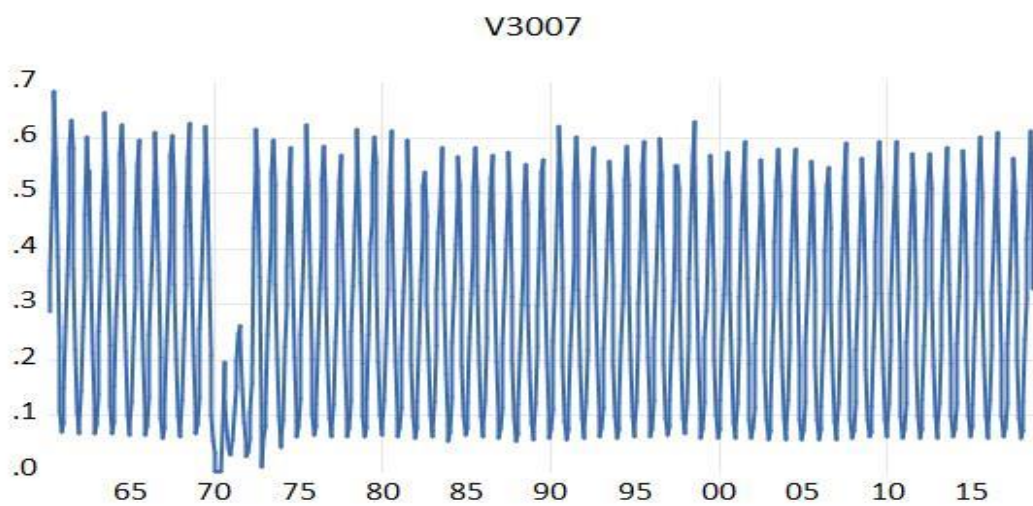
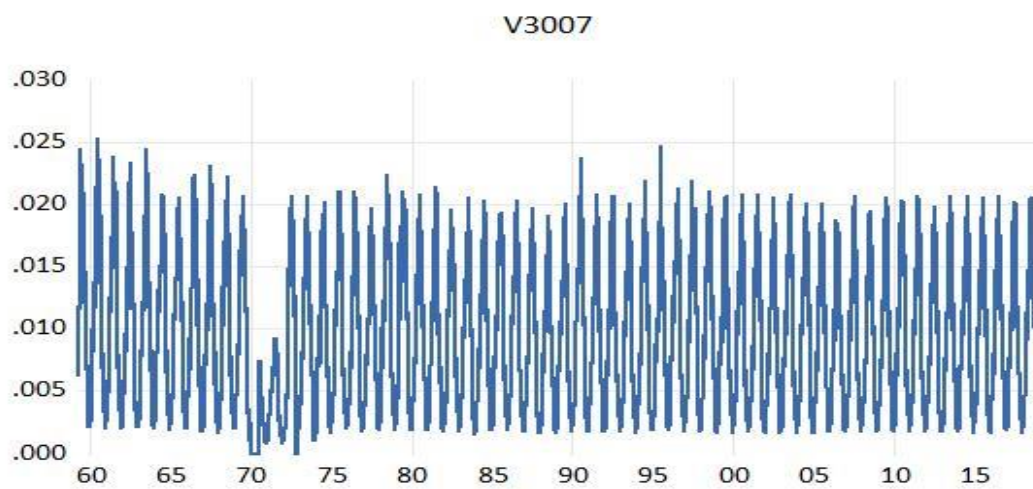
R3007



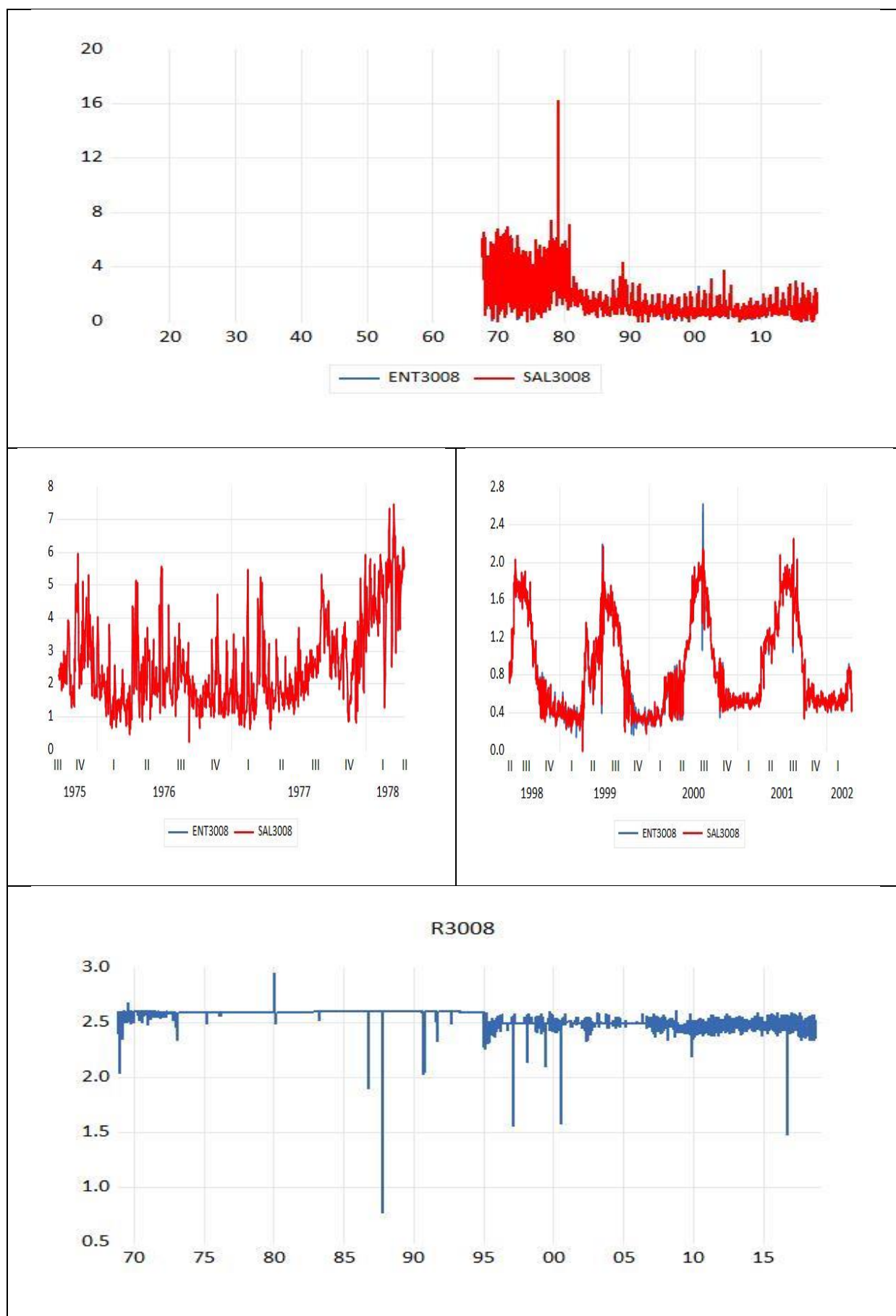
Estación 3007. Embalse de Bolarque. Río Tajo. Datos mensuales y anuales



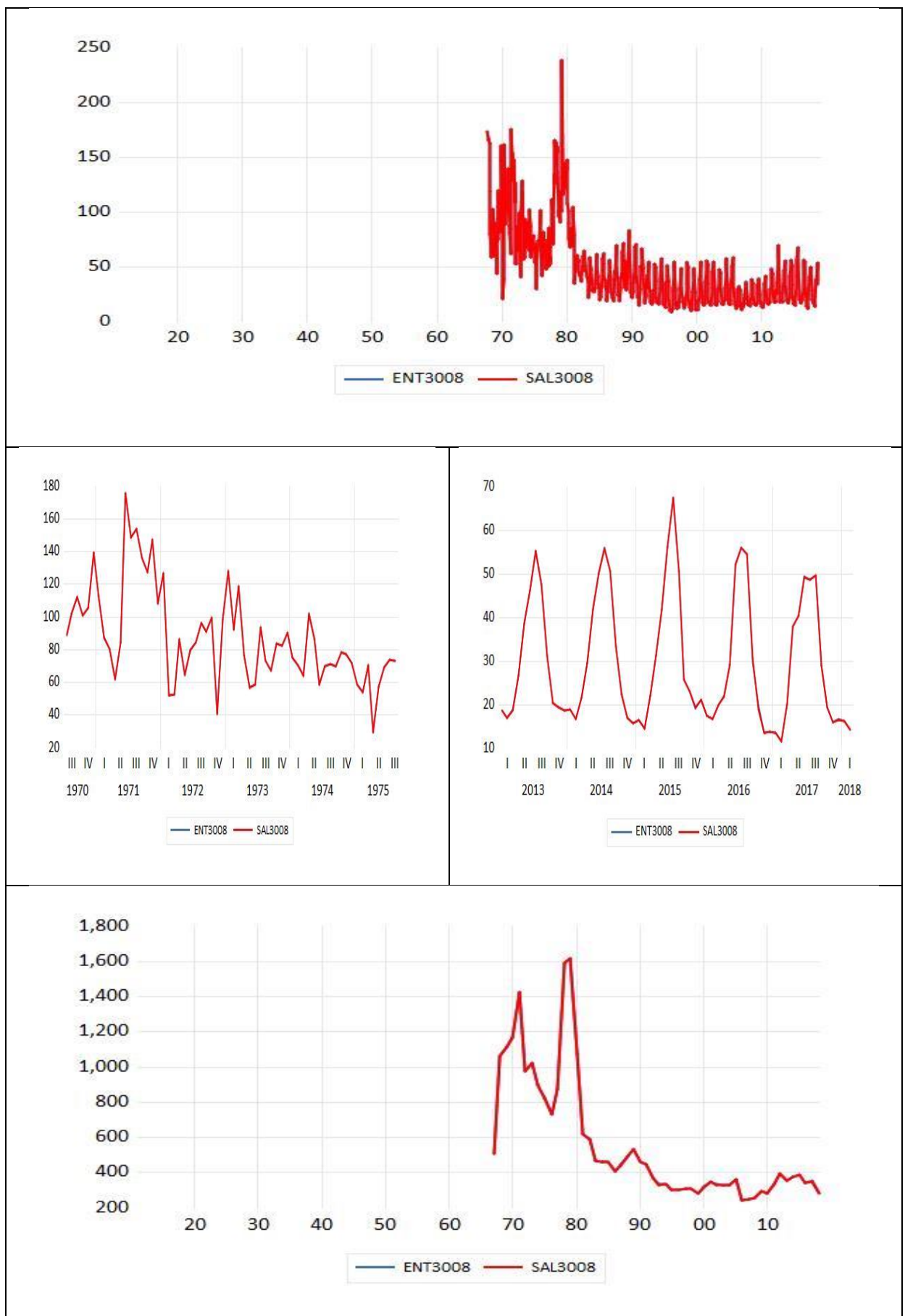
Estación 3007. Embalse de Bolarque. Río Tajo. Evaporaciones



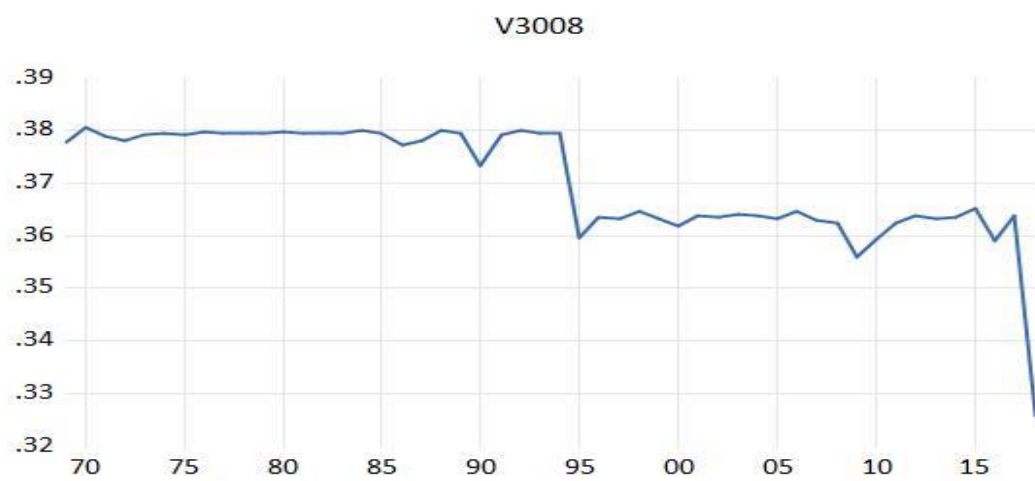
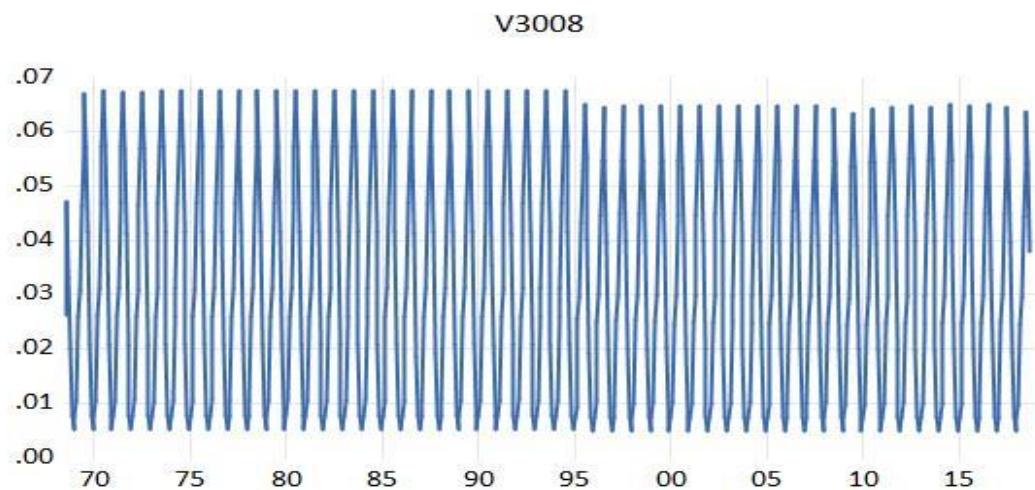
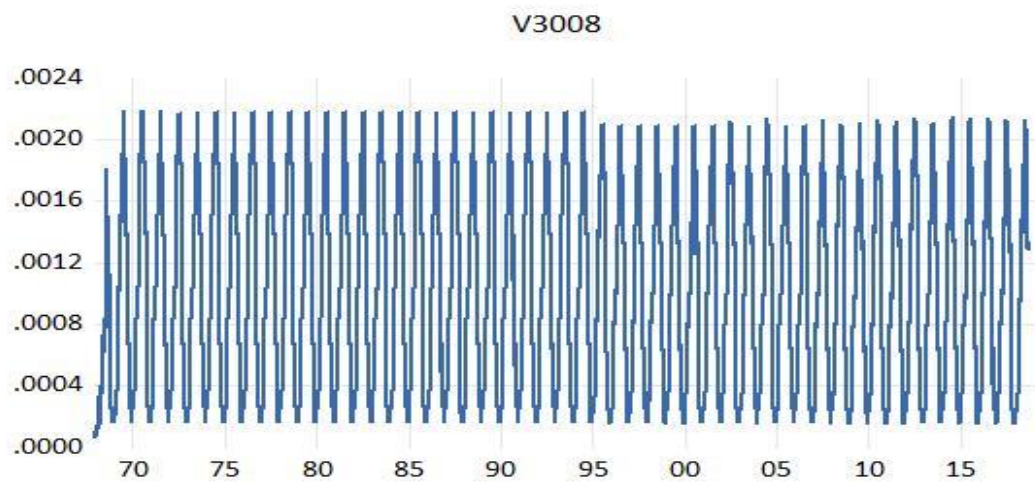
Estación 3008. Embalse de Zorita. Río Tajo. Datos diarios



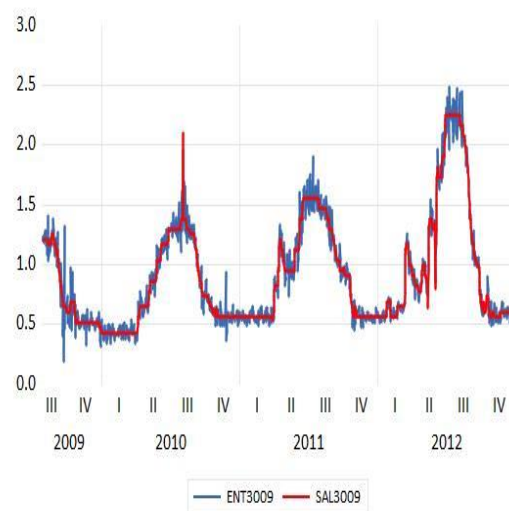
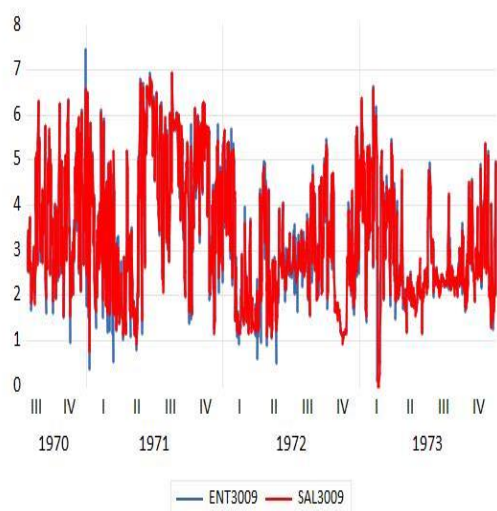
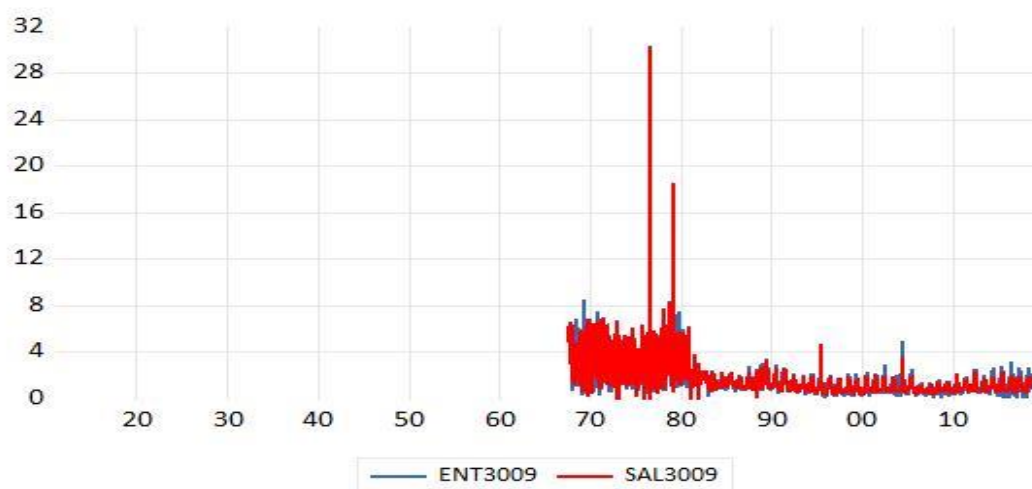
Estación 3008. Embalse de Zorita. Río Tajo. Datos mensuales y anuales



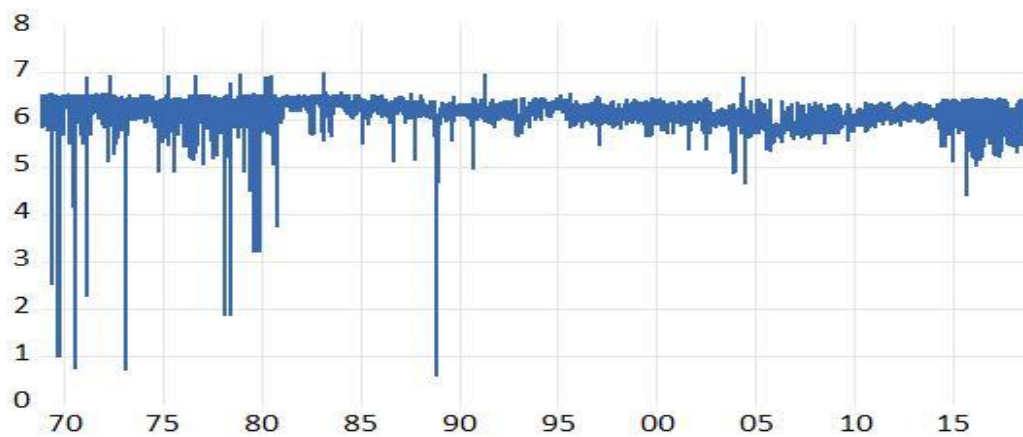
Estación 3008. Embalse de Zorita. Río Tajo. Evaporaciones



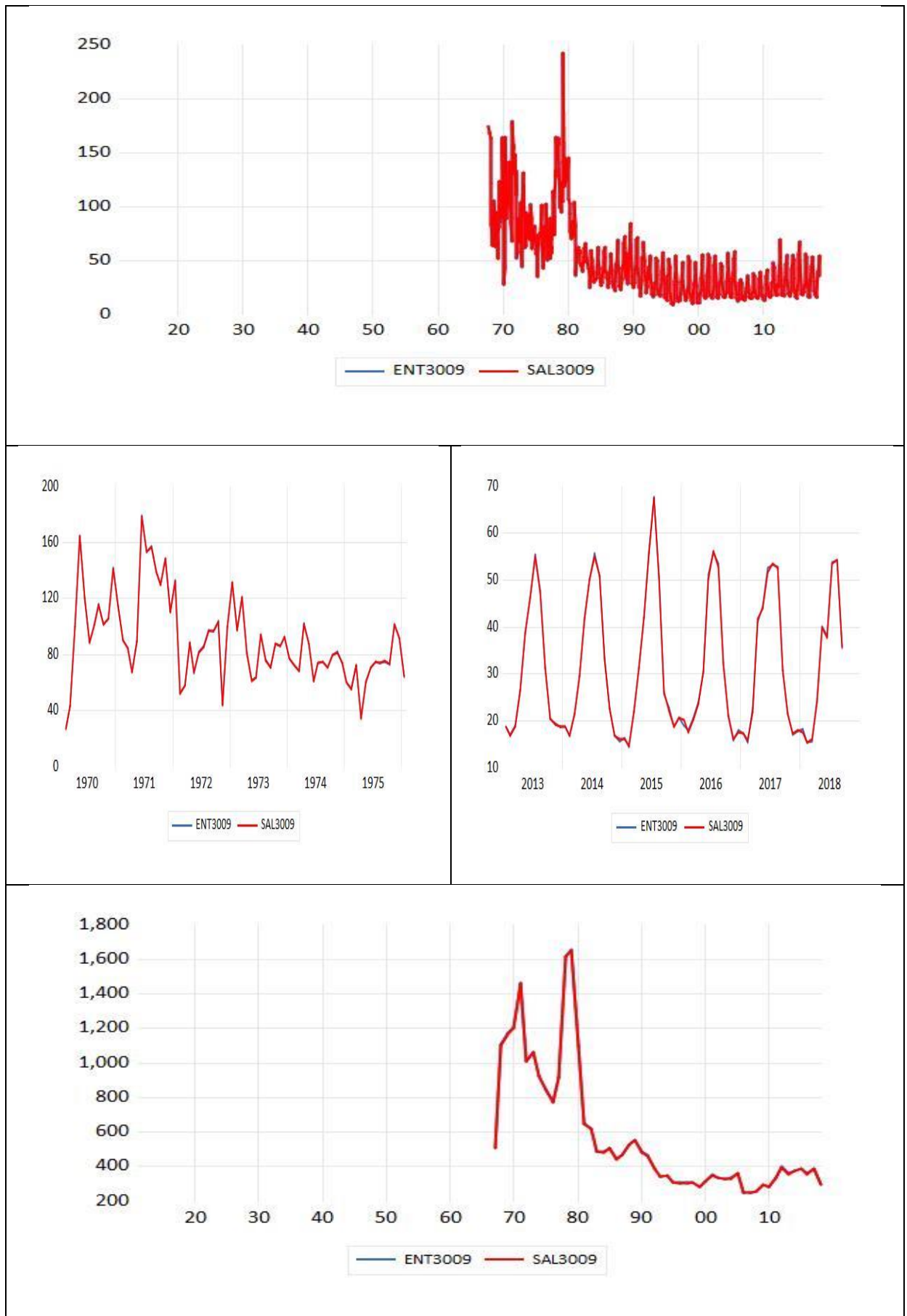
Estación 3009. Embalse de Almoguera. Río Tajo. Datos diarios



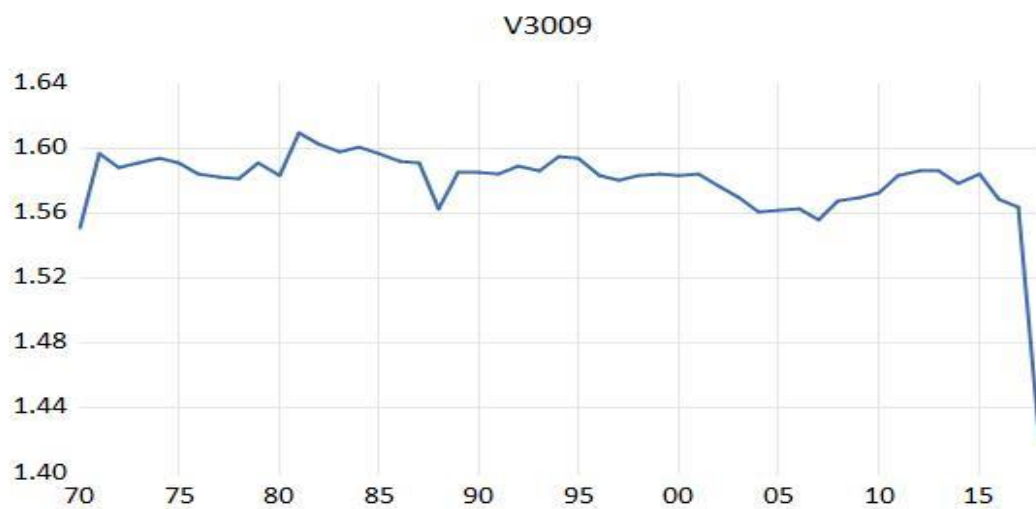
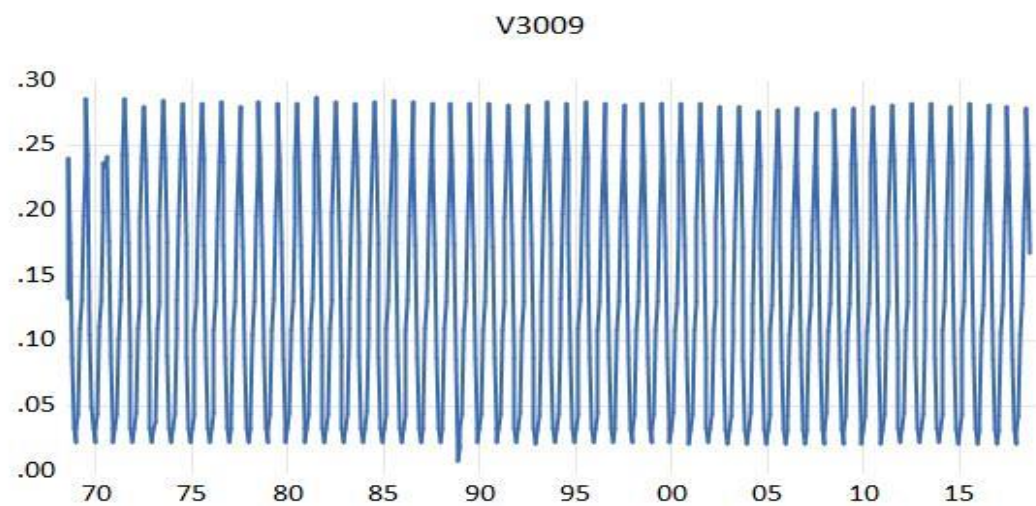
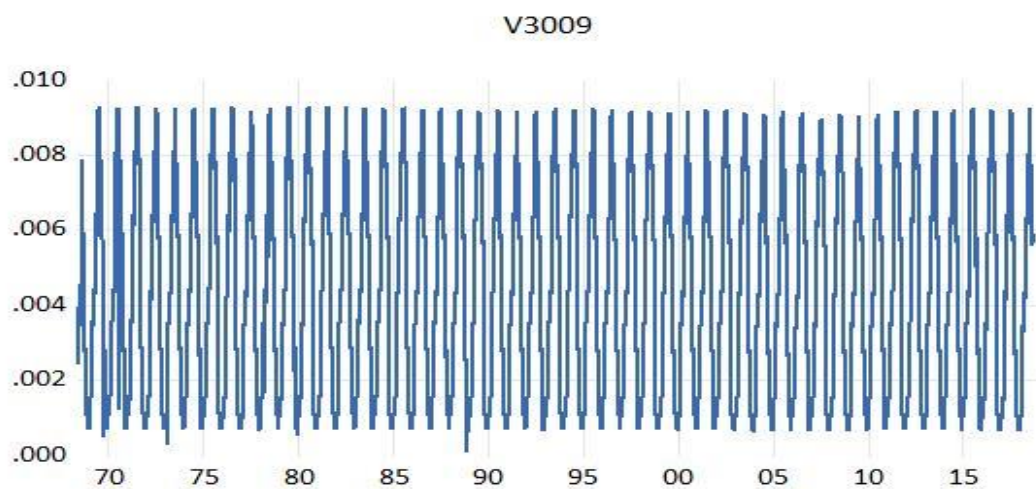
R3009



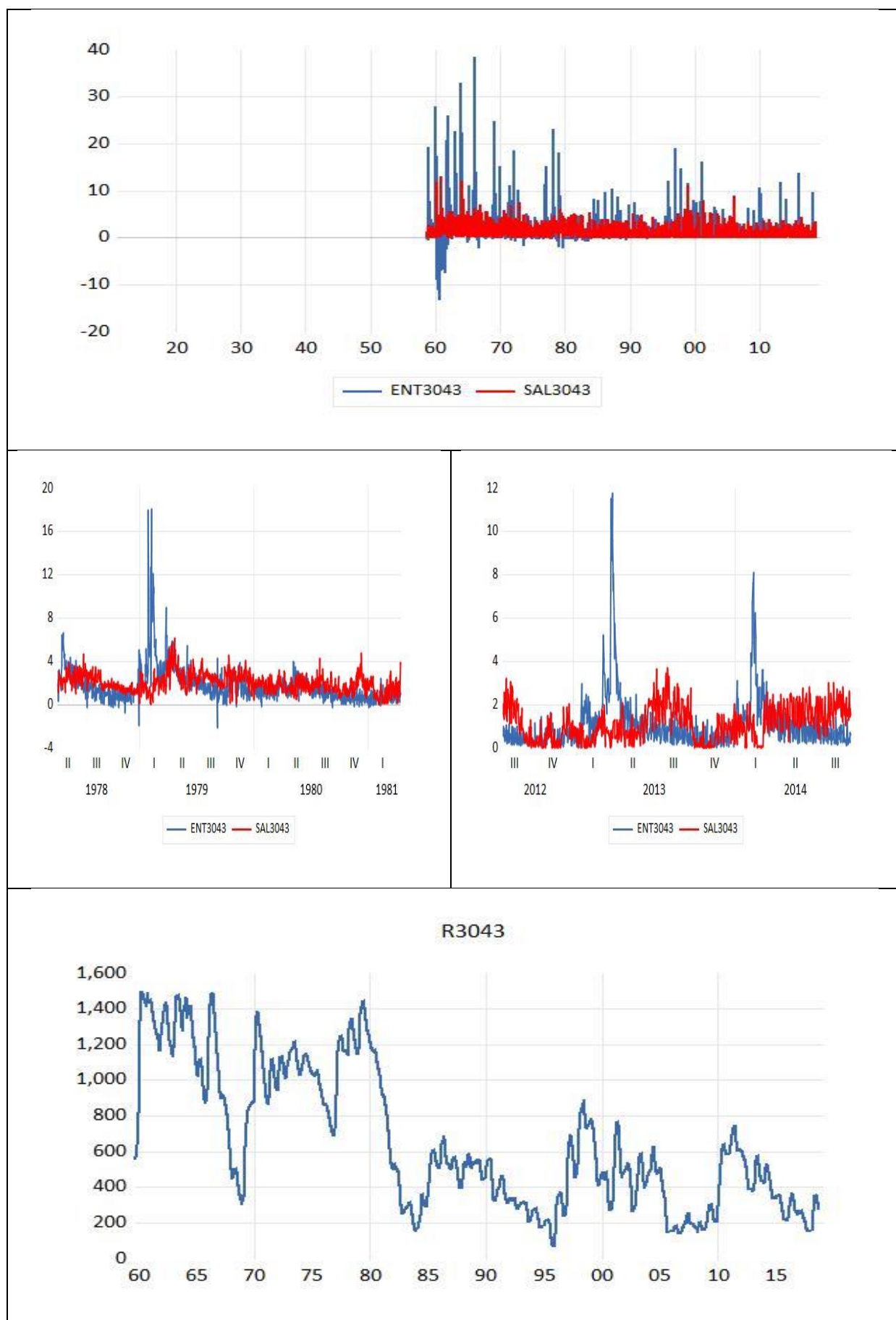
Estación 3009. Embalse de Almoguera. Río Tajo. Datos mensuales y anuales



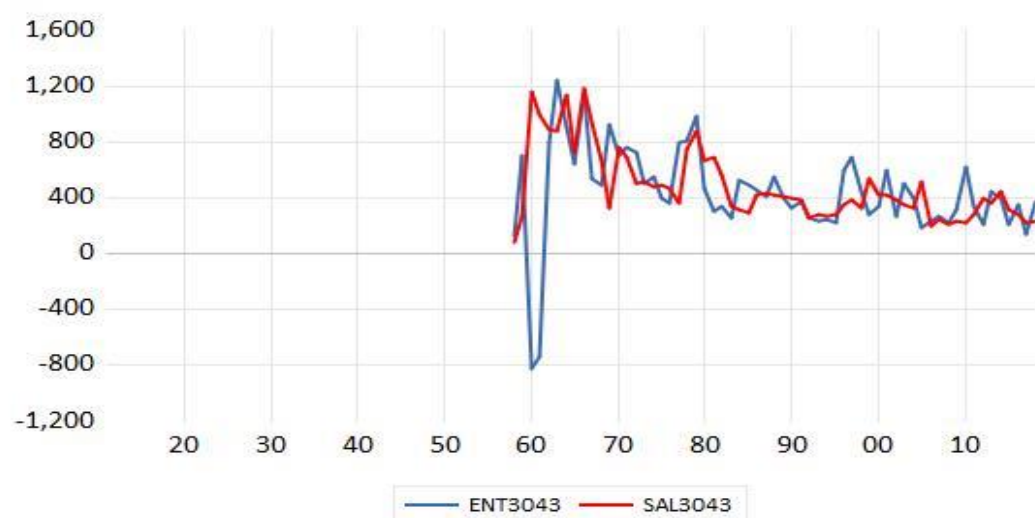
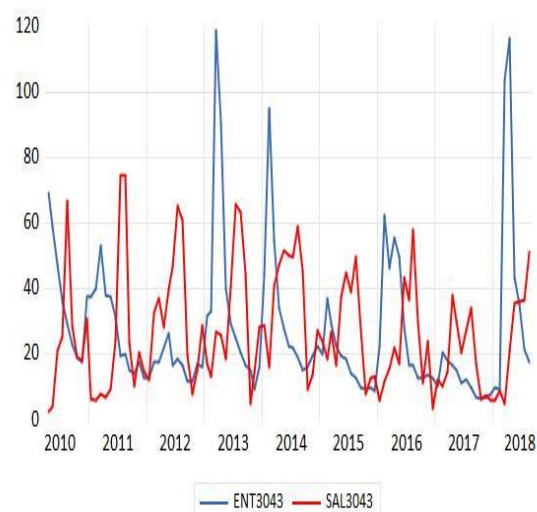
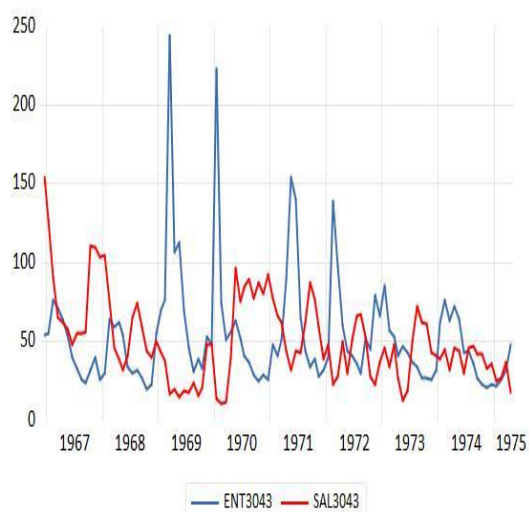
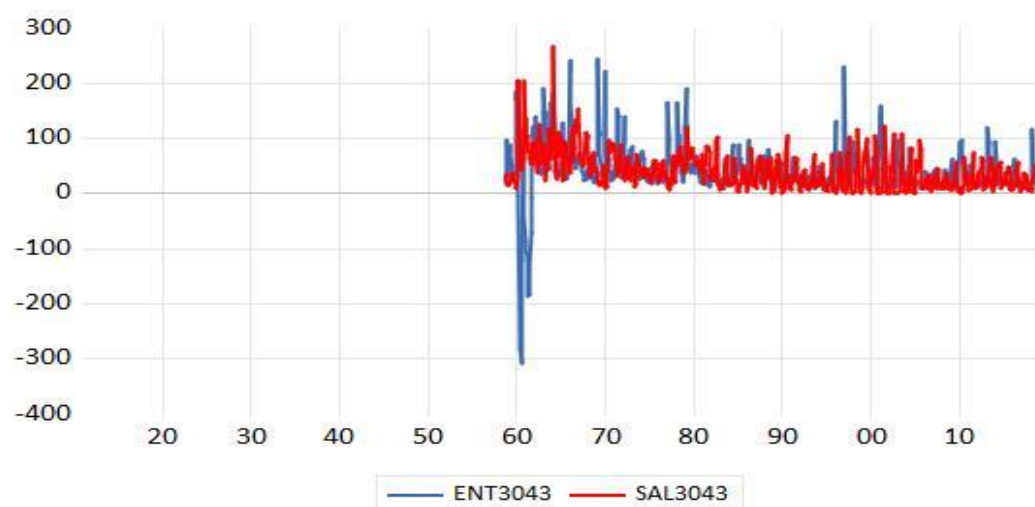
Estación 3009. Embalse de Almoguera. Río Tajo. Evaporaciones



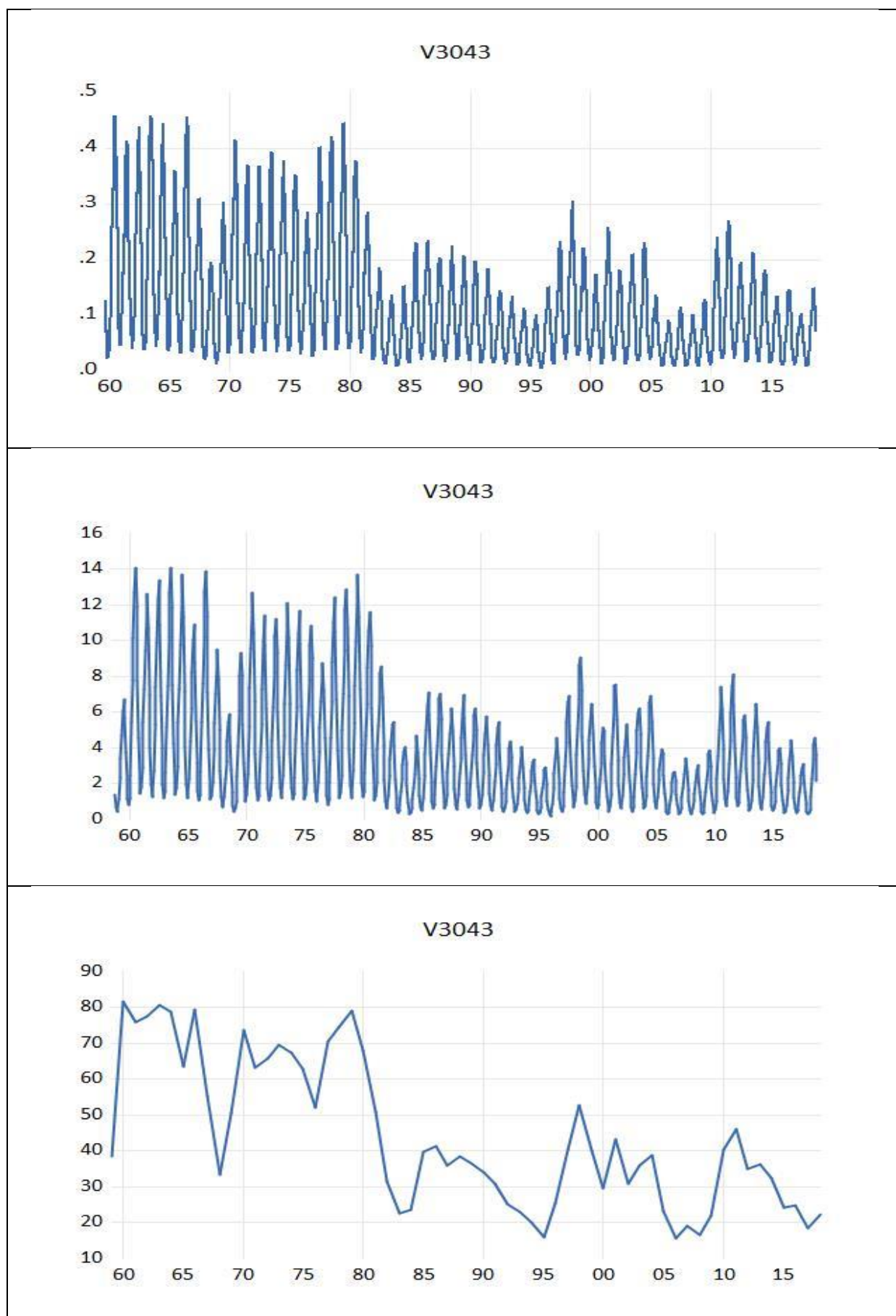
Estación 3043. Embalse de Buendía. Río Guadiela. Datos diarios



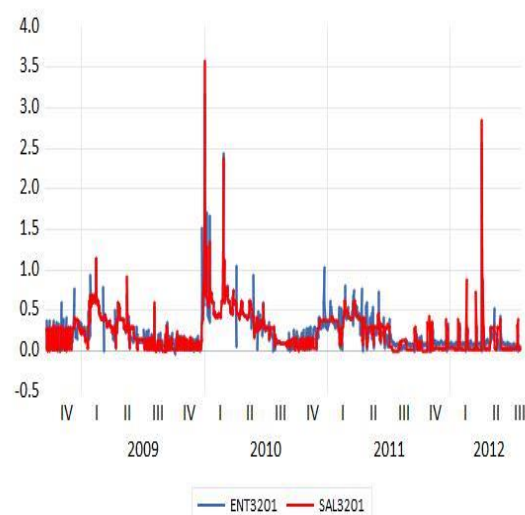
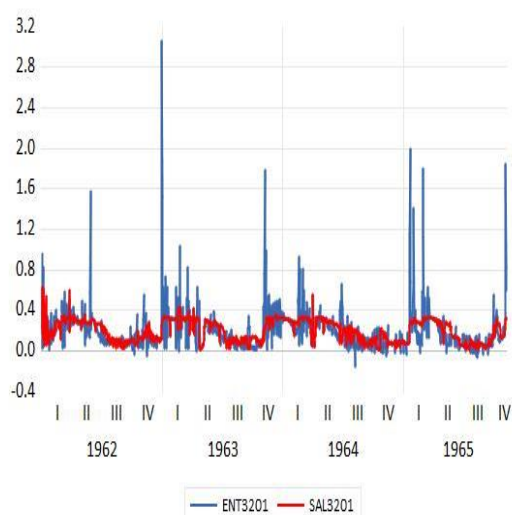
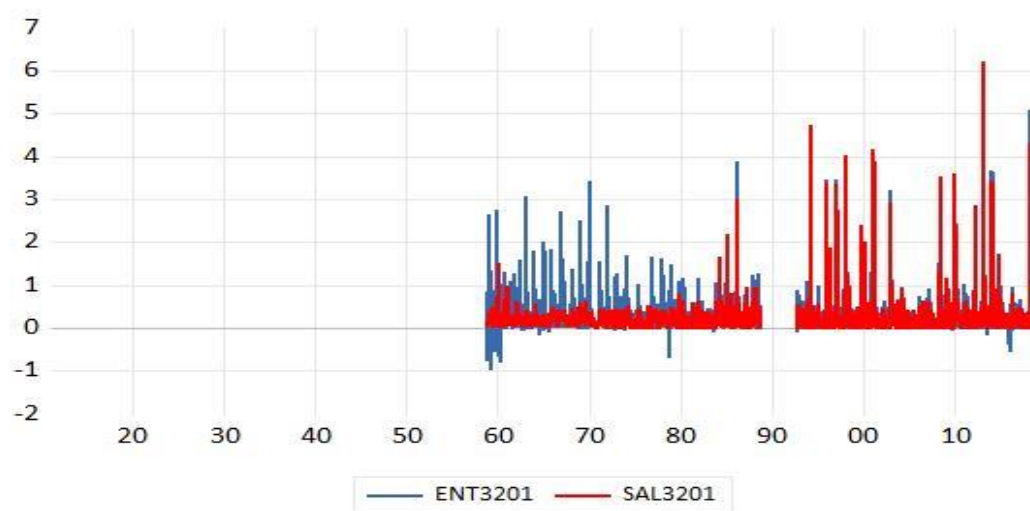
Estación 3043. Embalse de Buendía. Río Guadiela. Datos mensuales y anuales



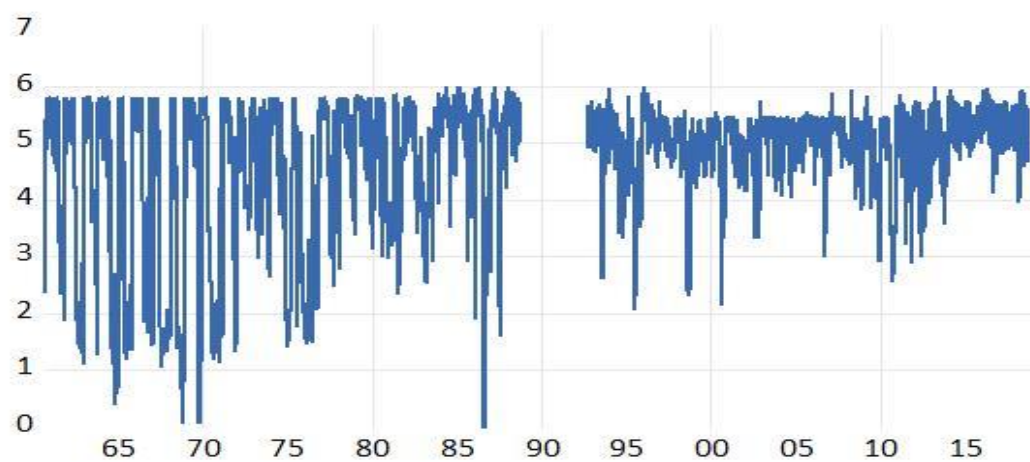
Estación 3043. Embalse de Buendía. Río Guadiela. Evaporaciones



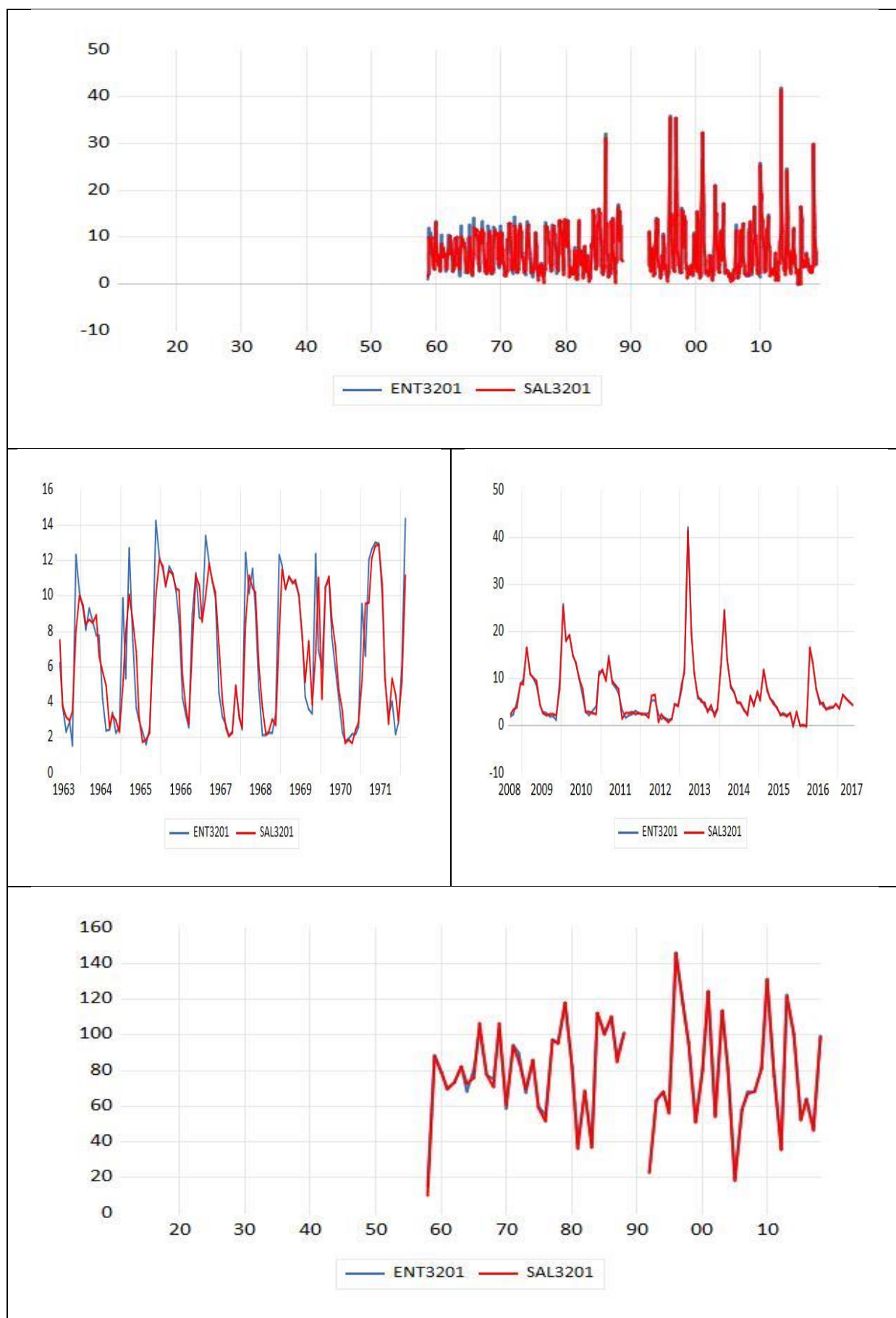
Estación 3201. Embalse de Molino de Chíncha. Río Guadiela. Datos diarios



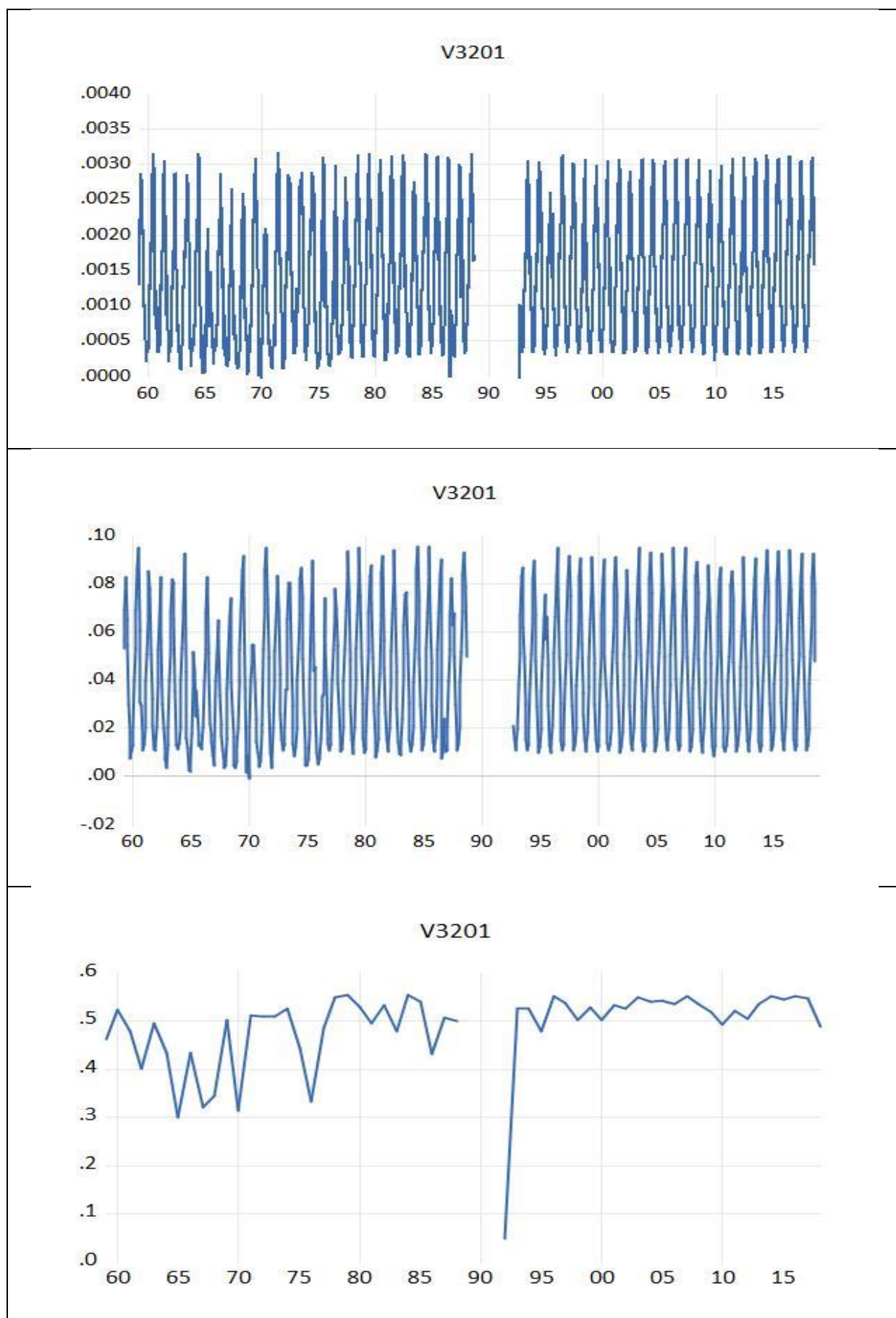
R3201



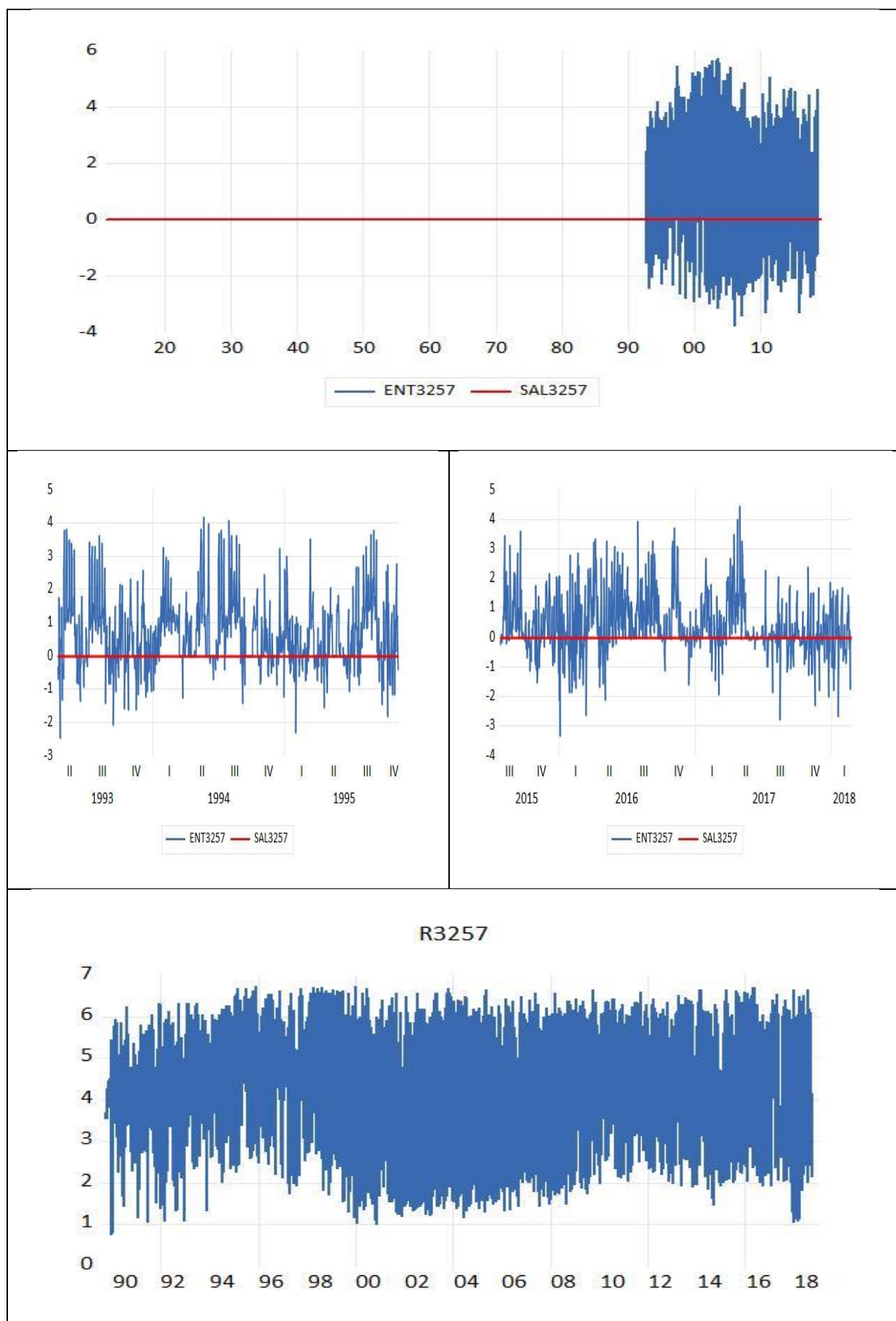
Estación 3201. Embalse de Molino de Chíncha. Río Guadalupe. Datos mensuales y anuales



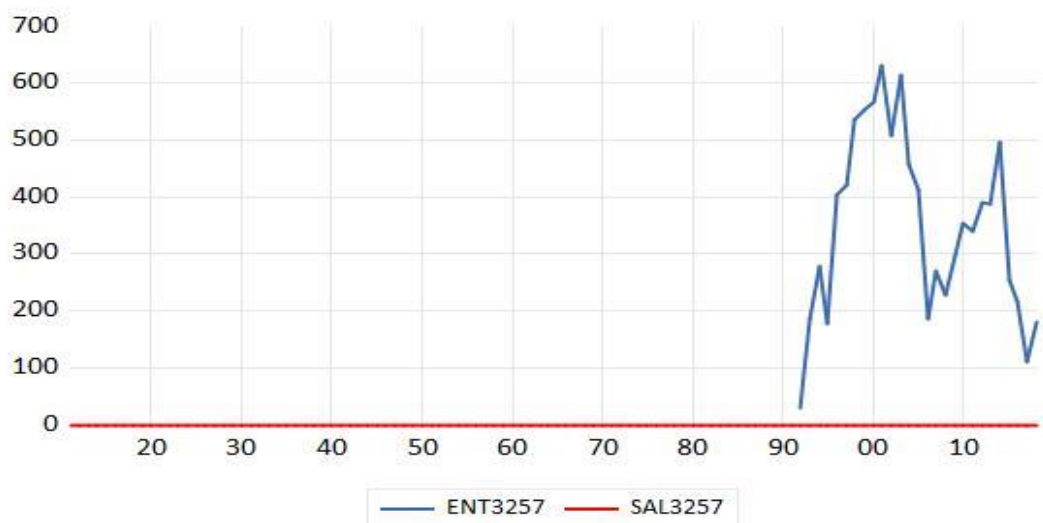
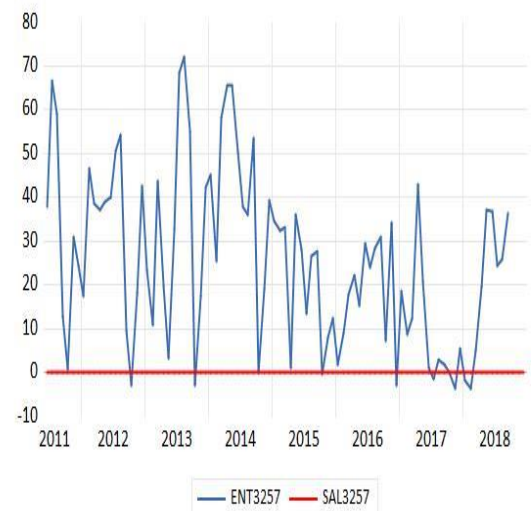
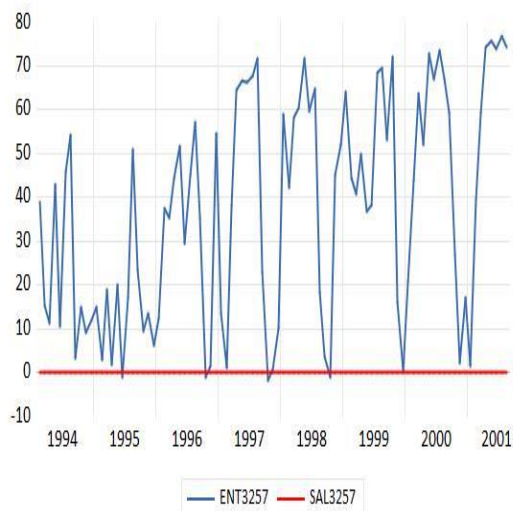
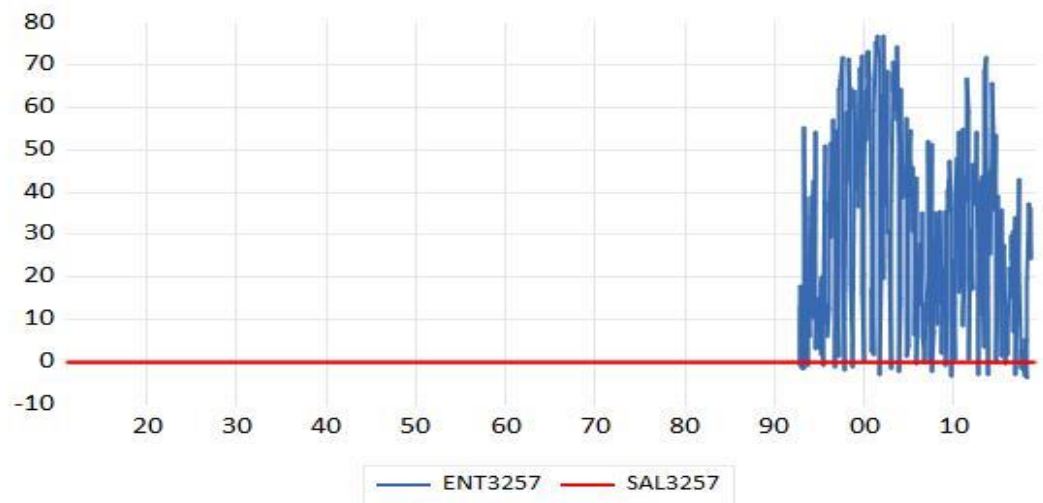
Estación 3201. Embalse de Molino de Chinchá. Río Guadalupe. Evaporaciones



Estación 3257. Embalse de La Bujeda. Río Tajo. Datos diarios



Estación 3257. Embalse de La Bujeda. Río Tajo. Datos mensuales y anuales



Estación 3257. Embalse de La Bujeda. Río Tajo. Evaporaciones

