



Universidad
Complutense
Madrid

Universidad
Rey Juan Carlos



POLITÉCNICA

**EVALUACIÓN COMPARATIVA DE LOS REGIMENES DE
PRECIPITACIONES Y DE CAUDALES EN LOS PRINCIPALES RÍOS DE
LAS CUENCAS DE LOS RÍOS TAJO ALTO Y GUADARRAMA EN EL
PERÍODO 1945-2005**

Máster Universitario en Restauración de Ecosistemas

Presentado por:

D^a. XIAOHAN SONG

Director:

Dr. DIEGO GARCÍA DE JALÓN

Tutor Académico:

Dr. DIEGO GARCÍA DE JALÓN

En China a 29 de octubre de 2020

Índice

Abreviaturas.....	1
Resumen.....	2
Abstract.....	3
1. Introducción.....	4
2. Objetivos.....	5
2.1. Objetivos generales.....	5
2.2. Objetivos específicos.....	5
3. Descripción del área de estudio.....	6
3.1. Situación geográfica.....	6
3.2. Geología y litología.....	7
3.3. Usos del suelo.....	8
3.4. Climatología.....	9
3.5. Principales poblaciones.....	11
3.6. Embalses y presas.....	12
4. Datos y metodología.....	13
4.1 Datos y delimitaciones de las principales cuencas y subcuencas.....	13
4.2.Métodos de investigación.....	15
5. Resultados y discusiones.....	19
5.1. Análisis de la tendencia de las precipitaciones en la cuenca del Tajo Alto.....	19
5.1.1. Distribución de las precipitaciones intra-anual.....	19
5.1.2 Distribución de las precipitaciones interanual.....	20
5.1.3. Cambio de tendencia de precipitación interanual.....	23
5.1.4. Predicción futura de precipitación interanual.....	24
5.2. Análisis de la tendencia de los caudales en la cuenca del Tajo Alto.....	25
5.2.1. Distribución de los caudales intra-anual.....	25
5.2.2. Distribución de los caudales interanual.....	29
5.2.3. Cambio de tendencia de caudal interanual.....	32
5.2.4. Predicción futura de caudal interanual.....	33
5.3. Comparación de la relación interanual entre precipitaciones y caudales.....	34
5.4. Análisis de la tendencia de las precipitaciones en la cuenca del Guadarrama.....	44
5.4.1. Distribución de las precipitaciones intra-anual.....	44
5.4.2. Distribución de las precipitaciones interanual.....	46
5.4.3. Cambio de tendencia de precipitación interanual.....	47
5.4.4. Predicción futura de precipitación interanual.....	48
5.5. Análisis de la tendencia de los caudales en la cuenca del Guadarrama.....	49
5.5.1. Distribución de los caudales intra-anual.....	49
5.5.2. Distribución de los caudales interanual.....	50
5.5.3. Cambio de tendencia de caudal interanual.....	51
5.5.4. Predicción futura de caudal interanual.....	52
5.6. Comparación de la relación interanual entre precipitaciones y caudales.....	53
5.7. Autocrítica metodológica.....	57
6. Conclusiones.....	58

7. Las metodologías de afrontar el cambio climático durante una restauración fluvial.....	58
Bibliografía.....	61
Agradecimientos.....	64

Índice de figuras

Figura 1 . Ubicación geográfica de las cuencas de los ríos Tajo Alto (Cabecera) y Guadarrama , España. Modificado: Evaluación preliminar del riesgo de inundación (SNCZI 2012).....	7
Figura 2 . Altitud de las cuencas de los ríos Tajo Alto (Cabecera) y Guadarrama, España. Modificado: Evaluación preliminar del riesgo de inundación (SNCZI 2012).....	7
Figura 3 . Usos del suelo de las cuencas de los ríos Tajo Alto (Cabecera) y Guadarrama, España. Modificado: Evaluación preliminar del riesgo de inundación (SNCZI 2012).....	9
Figura 4 . Temperaturas medias diurnas y nocturnas en Castilla - La Mancha. Fuente: www.datosmundial.com	10
Figura 5 . Precipitación en mm/día en Castilla - La Mancha. Fuente: www.datosmundial.com .	10
Figura 6 . Temperaturas medias diurnas y nocturnas en la Comunidad de Madrid.....	11
Figura 7 . Precipitación en mm/día en la Comunidad de Madrid. Fuente: www.datosmundial.com	11
Figura 8 . La cuenca y las subcuencas del Tajo Alto según MOPREDAS.....	14
Figura 9 . La cuenca y las subcuencas del Guadarrama según MOPREDAS	15
Figura 10 . De 1945 a 2005, las precipitaciones mensuales en las subcuencas del Tajo Alto.....	19
Figura 11 . De 1945 a 2005, las proporciones de las precipitaciones mensuales en las subcuencas del Tajo Alto.....	20
Figura 12 . De 1945 a 2005, las precipitaciones anuales de la subcuenca 1 del Tajo Alto.....	21
Figura 13 . De 1945 a 2005, las precipitaciones anuales de la subcuenca 2 del Tajo Alto.....	21
Figura 14 . De 1945 a 2005, las precipitaciones anuales de la subcuenca 3 del Tajo Alto.....	22
Figura 15 . De 1945 a 2005, las precipitaciones anuales de la subcuenca 4 del Tajo Alto.....	22
Figura 16 . De 1945 a 2005, las precipitaciones anuales de la subcuenca 5 del Tajo Alto.....	23
Figura 17 . De 1945 a 2005, los caudales medios mensuales del Tajo Alto en Peralejos de las Truchas (subcuenca 1).....	25
Figura 18 . De 1945 a 2005, los caudales medios mensuales del Tajo Alto en Trillo (subcuenca 2).....	26
Figura 19 . De 1945 a 1985, los caudales medios mensuales del Tajo Alto en Entrepeñas (subcuenca 3).....	27
Figura 20 . De 1945 a 1985, los caudales medios mensuales del Tajo Alto en Bolarque (subcuenca 4).....	27
Figura 21 . De 1955 a 1975, los caudales medios mensuales del Tajo Alto en Aranjuez (subcuenca 5).....	28
Figura 22 . De 1980 a 2002, los caudales medios mensuales del Tajo Alto en Embocador (subcuenca 5).....	29
Figura 23 . De 1945 a 2005, los caudales medios anuales del Tajo Alto en Peralejos de las Truchas (subcuenca 1).....	30
Figura 24 . De 1945 a 2005, los caudales medios anuales del Tajo Alto en Trillo (subcuenca 2).....	30
Figura 25 . De 1945 a 1985, los caudales medios anuales del Tajo Alto en Entrepeñas (subcuenca	

3).....	31
Figura 26 . De 1945 a 1985, los caudales medios anuales del Tajo Alto en Bolarque (subcuenca 4).....	31
Figura 27 . De 1954 a 2002, los caudales medios anuales del Tajo Alto en Aranjuez y Embocador (subcuenca 5).....	32
Figura 28 . Resultado de la prueba de Pettitt del caudal en la subcuenca 1 del Tajo Alto.....	35
Figura 29 . Resultado de la prueba de Pettitt del caudal en la subcuenca 2 del Tajo Alto.....	36
Figura 30 . Resultado de la prueba de Pettitt del caudal en la subcuenca 3 del Tajo Alto.....	38
Figura 31 . Resultado de la prueba de Pettitt del caudal en la subcuenca 4 del Tajo Alto.....	40
Figura 32 . Resultado de la prueba de Pettitt de Estación 3011 de la subcuenca 5 del Tajo Alto.	42
Figura 33 . Resultado de la prueba de Pettitt de Estación 3258 de la subcuenca 5 del Tajo Alto.	43
Figura 34 . De 1945 a 2005, las precipitaciones mensuales en las subcuencas del Guadarrama.	45
Figura 35 . De 1945 a 2005, las proporciones de las precipitaciones mensuales en las subcuencas del Guadarrama.....	45
Figura 36 . De 1945 a 2005, las precipitaciones anuales de la subcuenca 1 del Guadarrama.....	46
Figura 37 . De 1945 a 2005, las precipitaciones anuales de la subcuenca 2 del Guadarrama.....	47
Figura 38 . De 1963 a 2001, los caudales medios mensuales del Guadarrama en Villalba (subcuenca 1).....	49
Figura 39 . De 1963 a 1992, los caudales medios mensuales del Guadarrama en Bargas (subcuenca 2).....	50
Figura 40 . De 1963 a 2001, los caudales medios anuales del Guadarrama en Villalba (subcuenca 1).....	51
Figura 41 . De 1963 a 1992, los caudales medios anuales del Guadarrama en Bargas (subcuenca 2).....	51
Figura 42 . Resultado de la prueba de Pettitt del caudal en la subcuenca 1 del Guadarrama.....	54
Figura 43 . Resultado de la prueba de Pettitt del caudal en la subcuenca 2 del Guadarrama.....	56
Figura 44 . La dispersión de las tasas de cambio de precipitación y caudal.....	57

Índice de tablas

Tabla 1 . Listado de embalses en el Tajo Alto. Fuente: www.iagua.es/data	13
Tabla 2 . Listado de presas en el Tajo Alto. Fuente: www.iagua.es/data	13
Tabla 3 . Listado de presas en el Guadarrama. Fuente: www.iagua.es/data	13
Tabla 4 . Interpretación de los valores de los coeficientes de correlación según el rango de valores. Fuente: Medidas de asociación (Peláez 2006).....	18
Tabla 5 . Estadísticas de precipitación de Mann-Kendall (valor Z) de las subcuencas del Tajo Alto (1945-2005).....	24
Tabla 6 . Predicción futura de precipitación interanual de las subcuencas del Tajo Alto (1945-2005).....	24
Tabla 7 . Estadísticas de caudales de Mann-Kendall (valor Z) de las subcuencas del Tajo Alto..	33
Tabla 8 . Predicción futura de caudal interanual de las subcuencas del Tajo Alto (1945-2005)...	34
Tabla 9 . Estadísticas de Mann-Kendall (valor Z) de precipitación y caudal de 1945-2005 de la subcuenca 1 del Tajo Alto.....	35
Tabla 10 . Análisis de los cambios de precipitación y caudal anuales antes y después del cambio	

abrupto en 1945-2005 de la subcuenca 1 del Tajo Alto.....	35
Tabla 11 . Estadísticas de Mann-Kendall (valor Z) de precipitación y caudal de 1945-2005 de la subcuenca 2 del Tajo Alto.....	36
Tabla 12 . Análisis de los cambios de precipitación y caudal anuales antes y después del cambio abrupto en 1945-2005 de la subcuenca 2 del Tajo Alto.....	37
Tabla 13 . Estadísticas de Mann-Kendall (valor Z) de precipitación y caudal de 1945-1985 de la subcuenca 3 del Tajo Alto.....	38
Tabla 14 . Análisis de los cambios de precipitación y caudal anuales antes y después del cambio abrupto en 1945-1985 de la subcuenca 3 del Tajo Alto.....	38
Tabla 15 . Estadísticas de Mann-Kendall (valor Z) de precipitación y caudal de 1945-1985 de la subcuenca 4 del Tajo Alto.....	39
Tabla 16 . Análisis de los cambios de precipitación y caudal anuales antes y después del cambio abrupto en 1945-1985 de la subcuenca 4 del Tajo Alto.....	40
Tabla 17 . Estadísticas de Mann-Kendall (valor Z) de precipitación y caudal de 1955-1975 de Estación 3011 de la subcuenca 5 del Tajo Alto.....	41
Tabla 18 . Análisis de los cambios de precipitación y caudal anuales antes y después del cambio abrupto en 1955-1975 de Estación 3011 de la subcuenca 5 del Tajo Alto.....	42
Tabla 19 . Estadísticas de Mann-Kendall (valor Z) de precipitación y caudal de 1980-2002 de Estación 3258 de la subcuenca 5 del Tajo Alto.....	43
Tabla 20 . Análisis de los cambios de precipitación y caudal anuales antes y después del cambio abrupto en 1980-2002 de Estación 3258 de la subcuenca 5 del Tajo Alto.....	44
Tabla 21 . Estadísticas de precipitación de Mann-Kendall (valor Z) de las subcuencas del Guadarrama (1945-2005).....	48
Tabla 22 . Predicción futura de precipitación interanual de las subcuencas del Guadarrama (1945-2005).....	48
Tabla 23 . Estadísticas de caudales de Mann-Kendall (valor Z) de las subcuencas del Guadarrama.....	52
Tabla 24 . Predicción futura de caudal interanual de las subcuencas del Guadarrama.....	53
Tabla 25 . Estadísticas de Mann-Kendall (valor Z) de precipitación y caudal de 1963-2001 de la subcuenca 1 del Guadarrama.....	54
Tabla 26 . Análisis de los cambios de precipitación y caudal anuales antes y después del cambio abrupto en 1963-2001 de la subcuenca 1 del Guadarrama.....	54
Tabla 27 . Estadísticas de Mann-Kendall (valor Z) de precipitación y caudal de 1963-1992 de la subcuenca 2 del Guadarrama.....	55
Tabla 28 . Análisis de los cambios de precipitación y caudal anuales antes y después del cambio abrupto en 1963-1992 de la subcuenca 2 del Guadarrama.....	56

Abreviaturas

Para ayudar en la comprensión de este Trabajo de Fin de Máster, a continuación se incluye una tabla con las abreviaturas presentes en el texto:

Abreviaturas	Definiciones
AEMET	Agencia Estatal de Meteorología
CEDEX	Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas
GRAMA	Grupo de Acción para el Medio Ambiente
IPCC	Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático
MOPREDAS	Monthly Precipitation Database of Spain
ONU	Organización de las Naciones Unidas
SNCZI	Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables
ZEC	Zona Especial de Conservación
ZEPA	Zonas de Especial Protección para las Aves

Resumen

En este estudio se lleva a cabo evaluación comparativa de los regímenes de precipitaciones y de caudales en de las cuencas de los ríos Tajo Alto y Guadarrama en el período 1945-2005. Para ello, se utilizan MOPREDAS (Monthly Precipitation Database of Spain) para delimitar las principales cuencas y subcuencas, la prueba de tendencia de Mann-Kendall para analizar los cambios en la serie hidrológica y el Coeficiente de Hurst para predecir las tendencias futura de los recursos hídricos. Se proceden a hacer la prueba de Pettitt a los datos de caudales para encontrar el punto de tiempo de mutación. Y se hacen análisis de regresión lineal de la precipitación y el caudal antes y después del cambio repentino. Los resultados muestran que de 1945 a 2005 las precipitaciones en cada subcuenca de las dos cuencas mostraron una tendencia decreciente y con continuación. En los años con datos registrados, los caudales en cada subcuenca de los dos ríos también mostraron una tendencia decreciente con cambios repentinos y continuará esta tendencia. Pero en las subcuencas 1 y 4 del Tajo y las 1 y 2 del Guadarrama, la tendencia decreciente de la precipitación fue mayor. En la subcuenca 5 del Tajo, el caudal disminuyó pero la precipitación aumentó. El resto de subcuencas tuvieron una mayor tendencia a la baja en el caudal. Esto indica que el caudal se vio afectada por las actividades humanas.

Palabras claves: MOPREDAS, Prueba de Mann-Kendall, Coeficiente de Hurst, Prueba de Pettitt, Análisis de regresión lineal, Precipitaciones-caudales

Abstract

In this study, a comparative evaluation of the rainfall and flow regimes in the basins of the Tajo Alto and Guadarrama rivers is carried out in the period 1945-2005. To do this, MOPREDAS (Monthly Precipitation Database of Spain) are used to delimit the main basins and sub-basins, the Mann-Kendall trend test to analyze changes in the hydrological series and the Hurst Coefficient to predict future trends in water resources. The Pettitt test is performed on the flow data to find the mutation time point. And linear regression analysis of precipitation and flow is done before and after the sudden change. The results show that from 1945 to 2005 the rainfall in each sub-basin of the two basins showed a decreasing trend and with continuation. In the years with recorded data, the flows in each sub-basin of the two rivers also showed a decreasing trend with sudden changes and this trend will continue. But in sub-basins 1 and 4 of the Tajo and 1 and 2 of the Guadarrama, the decreasing trend of precipitation was greater. In sub-basin 5 of the Tagus, flow decreased but precipitation increased. The rest of the sub-basins had a greater downward trend in flow. This indicates that the flow was affected by human activities.

Keywords: MOPREDAS, Mann-Kendall test, Hurst coefficient, Pettitt test, Linear regression analysis, Precipitation-flow

1. Introducción

La tendencia al calentamiento global ha sido notable en los últimos 100 años. El Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) en 2013 señaló que es muy probable que las actividades humanas sean la principal causa del calentamiento global desde mediados del siglo XX, con más del 95% de probabilidad. Durante los últimos 130 años, el mundo se ha calentado 0,85 °C. El aumento de la temperatura global afectará todo el ciclo del agua, lo que provocará cambios en la distribución de la precipitación, la escorrentía superficial y la frecuencia de los desastres por inundaciones.

Los recursos hídricos son un factor importante para el desarrollo coordinado del ecosistema y la economía. La precipitación atmosférica es la principal fuente de reabastecimiento de agua. La cantidad total anual de recursos hídricos tiene una fuerte correlación positiva con el clima y las precipitaciones. Los cambios en las precipitaciones son uno de los principales factores de la distribución desigual de los recursos hídricos en el tiempo y el espacio, y también es una parte importante de la investigación de evaluación de los recursos hídricos (Iglesias et al. 2005).

El ecosistema fluvial es uno de los tipos de ecosistemas acuáticos más importantes, ya que proporciona funciones de apoyo, regulación, suministro y estética a la sociedad humana. Un ecosistema fluvial saludable es una de las bases materiales para el bienestar humano. Con el fin de explorar formas efectivas y estrategias de gestión para la restauración del ecosistema fluvial, mantener la salud del sistema fluvial y realizar gradualmente un ciclo virtuoso del ecosistema acuático, la restauración del ecosistema fluvial es particularmente crítica.

En el contexto del calentamiento global, para aliviar la crisis de los recursos hídricos, comprender las características del ciclo del agua en la cuenca, desarrollar y utilizar sobre esta base es necesario, se puede realizar el uso sostenible de los recursos hídricos. Comprender si el cambio de las precipitaciones en la cuenca está aumentando o disminuyendo, su distribución en los tramos alto, medio y bajo, los cambios estacionales y otros temas, sentarán las bases para la investigación sobre cobertura vegetal, ambiente ecológico, producción y vida en la cuenca (ONU-Agua 2019). Por lo tanto, este artículo toma como ejemplo a los ríos Tajo Alto y Guadarrama, recopila estadísticas y analiza los datos de precipitaciones y caudales de la cuenca

durante 61 años (1945-2005), utiliza el método de prueba de tendencia de Mann-Kendall para estudiar la ley del cambio de precipitaciones-caudales y utiliza el coeficiente de Hurst para predecir tendencias futuras. Se combinan la prueba de Pettitt para averiguar el año de la mutación de los caudales y finalmente hace análisis de regresión lineal de la relación precipitaciones-caudales antes y después del punto de mutación.

En la última parte de este artículo, se propondrá una metodología o procedimiento para que los proyectos de restauración lo asuman combinado con el impacto del cambio climático en el caudal del río.

Las cuencas de los ríos Tajo Alto y Guadarrama pertenecen a la cuenca del Tajo. En este trabajo, la cuenca de Tajo Alto se divide en cinco subcuencas, y la cuenca de Guadarrama se divide en dos subcuencas, con el objetivo de restablecer la relación entre las precipitaciones y caudales en las dos cuencas a través del estudio de cada subcuenca.

2. Objetivos

2.1. Objetivos generales

Mediante el análisis de las precipitaciones y caudales en las subcuencas de los ríos Tajo Alto y Guadarrama, se investigan los cambios en la relación precipitaciones-caudales y se proponen las metodologías de afrontar el cambio climático durante una restauración fluvial.

2.2. Objetivos específicos

- Analizar los cambios en los datos de precipitaciones en cada subcuenca de los dos ríos desde 1945 hasta 2005.
- Analizar los cambios en los datos de caudales en cada subcuenca de los dos ríos desde 1945 hasta 2005 (solo los años con datos registrados).
- Analizar estadísticamente la correlación y los cambios de los datos históricos de precipitaciones y caudales, evaluar las tendencias temporales y predecir el futuro.
- Proponer las metodologías de afrontar el cambio climático durante una restauración fluvial.

3. Descripción del área de estudio

3.1. Situación geográfica

La ubicación específica de la cuenca del Tajo Alto se refiere a la delimitación en *Evaluación Preliminar del Riesgo de Inundación* (SNCZI 2012), se ve en la Figura 1 La cuenca del Tajo Alto comienza en el cabecera del Tajo y termina en la confluencia de los ríos Tajo y Jarama,, que se ubica en la parte oriental de la cuenca del Tajo con un área de drenaje de 9.401 km². Colinda con las cuencas de los ríos Ebro y Júcar al este y la cuenca del Guadiana al sur. La mayor parte de la cuenca cerca del Jarama tiene una altura de 500-1000 m, algunas partes del este tienen una altura de 1000-1,500m y un área pequeña junto al Júcar supera los 2000 m (Figura 2) (SNCZI 2012). El nacimiento del Tajo se encuentra en la Sierra de Albarracín (provincia de Teruel), que discurre por cinco comunidades autónomas. La mayor parte de la cuenca del Tajo Alto se encuentra en Castilla-La Mancha, la parte cercana a la cuenca del Jarama se encuentra en la Comunidad de Madrid y la pequeña parte junto a la cuenca de Júcar se encuentra en Aragón.

El Guadarrama nace en los Siete Picos (Madrid), con una longitud total de 131,80 km. La cuenca hidrográfica del Guadarrama tiene una extensión territorial de aproximadamente de 1.709 km². Se encuentra en el centro de la Península Iberica, especialmente entre el Sistema Central y el Tajo. El Guadarrama es un afluente de la margen derecha del Tajo, fluyendo en dirección N-SSW hasta el Tajo. La cuenca del Guadarrama presenta una forma marcadamente esbelta, distribuida en dos comunidades autónomas, dos tercios en la Comunidad de Madrid y un tercio en Castilla-La Mancha. La mayor parte de la cuenca se encuentra a 500-1,000 msnm, una pequeña parte de la parte norte está a 1,000-1,500 m y una parte muy pequeña supera los 2000 m, se ve en Figura 2 (SNCZI 2012).



Figura 1. Ubicación geográfica de las cuencas de los ríos Tajo Alto (Cabecera) y Guadarrama, España. Modificado: Evaluación preliminar del riesgo de inundación (SNCZI 2012).

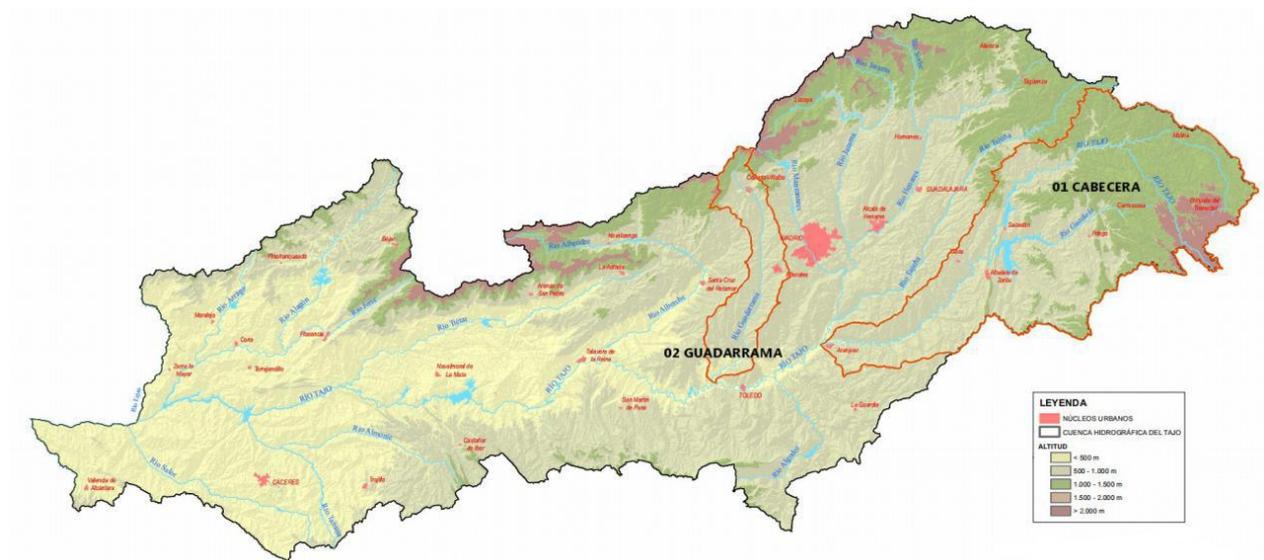


Figura 2. Altitud de las cuencas de los ríos Tajo Alto (Cabecera) y Guadarrama, España. Modificado: Evaluación preliminar del riesgo de inundación (SNCZI 2012).

3.2. Geología y litología

La cuenca del Tajo Alto tiene unas características geológicas únicas, es difícil encontrar un espacio natural diverso en la Península Ibérica desde un punto de vista geológico como la cuenca del Tajo Alto. Las series estratigráficas que representan los períodos geológicos Silúrico, Ordovícico, Triásico Inferior, Jurásico y Cretácico Superior en la cuenca tienen un desempeño

sobresaliente y constituyen un conjunto de gran relevancia para la investigación científica. Esto también hace que los tramos superiores del Tajo, es decir, la cuenca del Tajo Alto se ha convertido en un referente estratigráfica a nivel regional, nacional e internacional. La cuenca también tiene la diversidad de rocas y una importante diversidad mineral, el aragonito y el cuarzo estos dos son particularmente únicos (Carcavilla et al. 2011).

La litología de la cuenca del Guadarrama tiene una gran homogeneidad, y los componentes solo pueden dividirse en dos grandes conjuntos. Una cuarta parte del área de la cuenca son granitos tardihercínicos. Las tres cuartas partes restantes de la cuenca están compuestas por las arenas arcósicas de la depresión terciaria del Tajo, estas arenas provienen de abanicos aluviales provenientes del Sistema Central. En estos sedimentos terciarios, debido a que la diferencia no es obvia, no basta con separar diferentes unidades litológicas. Pero con la disminución del tamaño del grano de las arenas y el aumento de la arcilla hacia los tramos inferiores del río, las litofacies cambiaron lateralmente (Anguiano Mañero, A.M. 2010).

3.3. Usos del suelo

La Figura 3 es un mapa de uso del suelo de las cuencas del Tajo Alto (cabecera) y Guadarrama. Como se puede ver en la imagen, la parte superior del Tajo Alto está principalmente boscosa a lo largo de ambas orillas del río, seguida de zonas verdes (no agrícolas). No hay pueblos densamente poblados alrededor de este tramo, y hay menos tierra labor con un mejor ambiente verde. En el tramo medio, a partir de Sacedón, hay mucha tierra de labor en la cuenca, y todavía quedan algunos bosques y zonas verdes a lo largo del río. La parte baja es principalmente tierra cultivada, hay muy pocos bosques a lo largo del río, y debido a que esta zona está contenido en la Comunidad de Madrid, también hay algunas zonas urbanas en las orillas.

La parte alta de la cuenca del Guadarrama, aproximadamente al Móstoles, se encuentra próxima a Madrid, por lo que un gran número de zonas urbanas aparecen a lo largo de las márgenes del río, y el resto de la cuenca es principalmente tierra de labor y espacios de vegetación arbustiva o herbácea. Solo en la parte superior hay bosque. La parte inferior es principalmente tierras de labor y cultivos asociados, la parte forestal es muy pequeña.

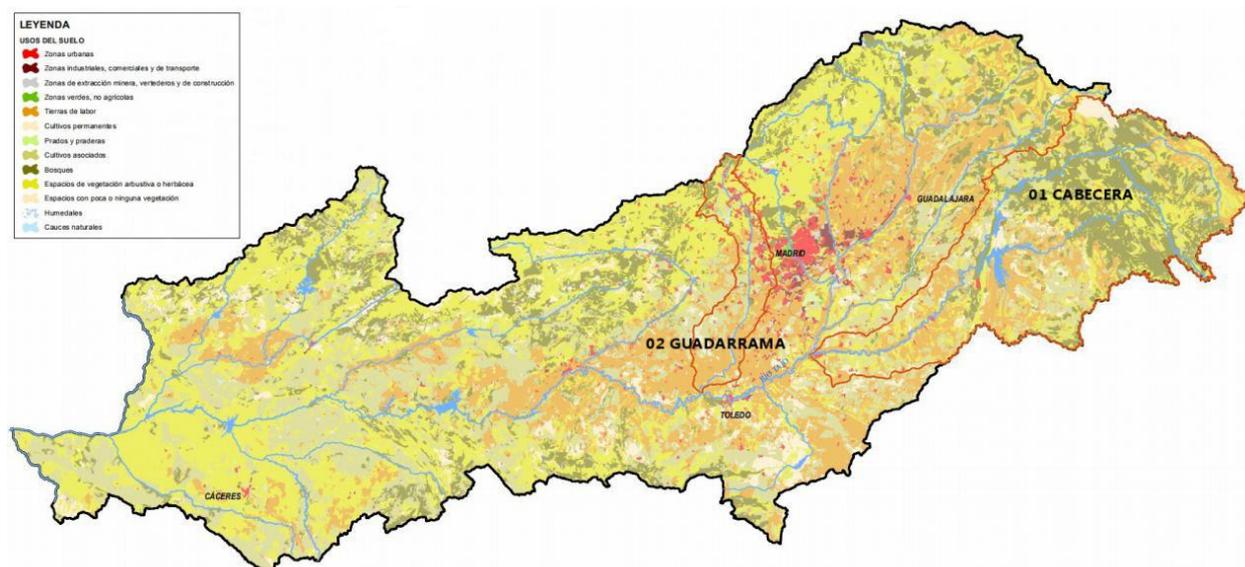


Figura 3. Usos del suelo de las cuencas de los ríos Tajo Alto (Cabecera) y Guadarrama, España. Modificado: Evaluación preliminar del riesgo de inundación (SNCZI 2012).

3.4. Climatología

El clima principal de la cuenca del Tajo es un clima mediterráneo-continental, con una estación seca clara y fluctuaciones de temperatura muy evidentes. Está con inviernos fríos y veranos calurosos y secos, lo que trae una fuerte sequía. Según una serie de datos de 1940 a 2011, las zonas montañosas de la parte occidental de la cuenca y en otoño y primavera presentan las mayores precipitaciones, con una precipitación media anual de 636 mm, y las menores precipitaciones registradas en Toledo (<400 mm) (Confederación Hidrográfica del Tajo 2017).

La mayor parte de la cuenca del Tajo Alto se encuentra en Castilla-La Mancha. Según los datos recogidos en 14 estaciones de medición en Castilla-La Mancha (todos los datos corresponden a la media mensual de los últimos 20 años), se puede observar que la temperatura es la más alta en julio y agosto, alcanzando unos 32 ° C, y la diferencia de temperatura entre el día y la noche también es mayor que otros meses. Sin embargo, las precipitaciones de verano son las menores durante todo el año, y la precipitación media diaria en julio y agosto es inferior a 0,3 mm. La precipitación en primavera y otoño es relativamente alta, y la precipitación máxima diaria se produce en octubre, superando los 1,9 mm. Consulte la Figura 4 y 5 a continuación.

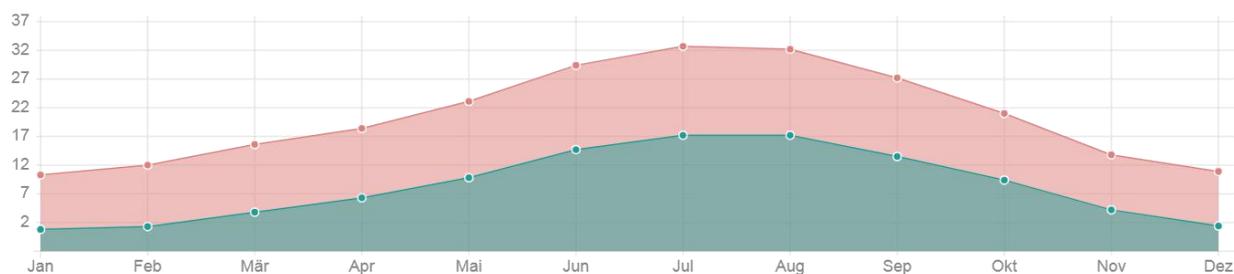


Figura 4. Temperaturas medias diurnas y nocturnas en Castilla - La Mancha. Fuente: www.datosmundial.com

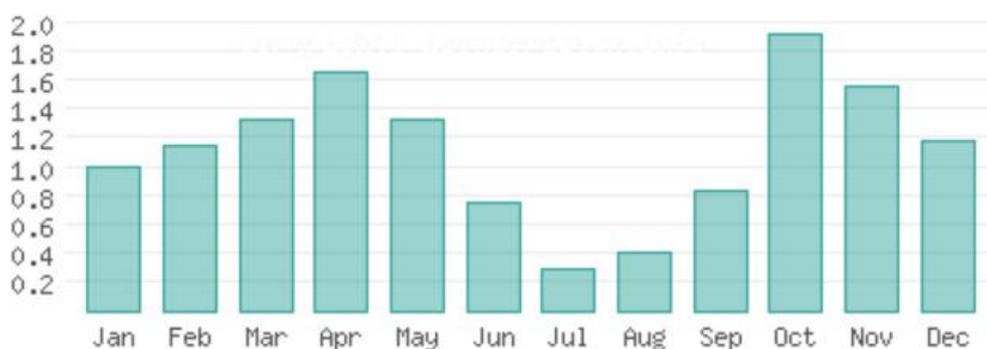


Figura 5. Precipitación en mm/día en Castilla - La Mancha. Fuente: www.datosmundial.com

Un tercio de la cuenca del Guadarrama se encuentra en Castilla-La Mancha, y el clima es el descrito anteriormente. Los dos tercios restantes se encuentran en la Comunidad de Madrid. Según los datos recogidos en 7 estaciones de medición de la Comunidad de Madrid (todos los datos corresponden a la media mensual de los últimos 20 años), se puede observar que la temperatura en julio y agosto es la más alta, alcanzando los 33 ° C, y la diferencia de temperatura entre el día y la noche también ha aumentado respecto a otros meses. Alcanza los 15 ° C; la precipitación media diaria en julio y agosto sigue siendo la más baja de todo el año, ambos por debajo de 0,3 mm. La precipitación en primavera y otoño es relativamente alta, y la precipitación máxima diaria se produce en octubre, que puede alcanzar los 2,1 mm. Vea la Figura 6 y 7 a continuación.

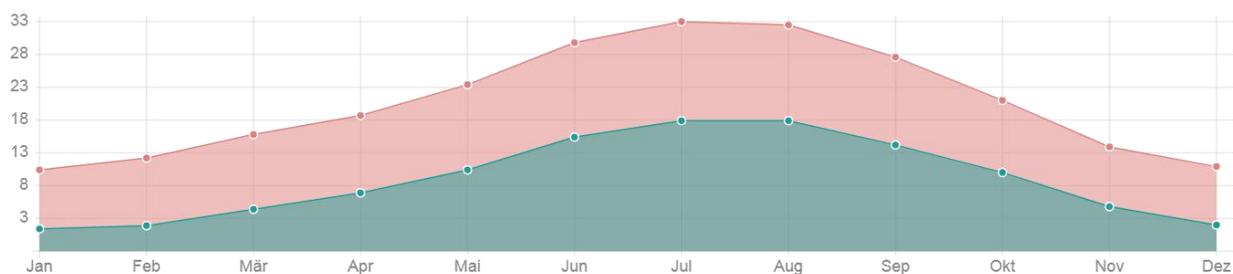


Figura 6. Temperaturas medias diurnas y nocturnas en la Comunidad de Madrid.

Fuente: www.datosmundial.com

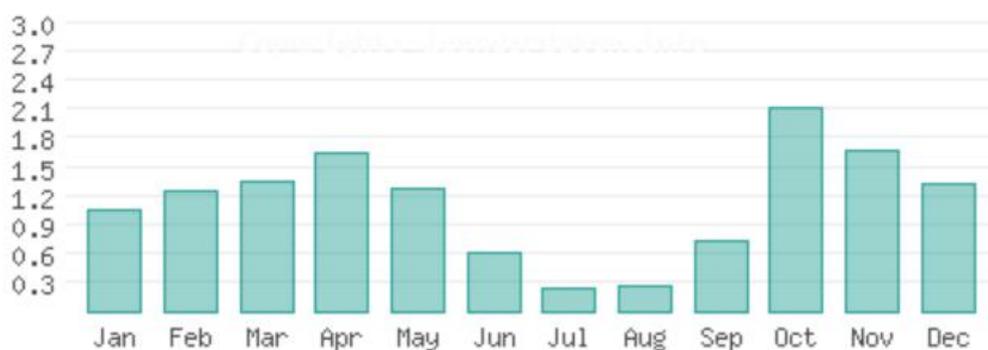


Figura 7. Precipitación en mm/día en la Comunidad de Madrid. Fuente: www.datosmundial.com

3.5. Principales poblaciones

En la cuenca del Tajo Alto hay las principales localidades siguientes:

Orihuela del Tremedal

- Población: 463 habitantes.
- Distancia a Madrid: 174,28 km.
- Altitud: 1.447 msnm.
- Superficie: 71,40 km².

Priego

- Población: 896 habitantes.
- Distancia a Madrid: 117,56 km.
- Altitud: 652 msnm.
- Superficie: 288,30 km².

Sacedón

- Población: 1533 habitantes.
- Distancia a Madrid: 82,56 km.
- Altitud: 740 msnm.
- Superficie: 113,28 km².

Aranjuez

- Población: 59.037 habitantes.
- Distancia a Madrid: 43,78 km.
- Altitud: 495 msnm.
- Superficie: 201,11 km².

En la cuenca del Guadarrama hay las principales localidades siguientes:

Cercedilla

- Población: 6.751 habitantes.
- Distancia a Madrid: 59 km.
- Altitud: 1.188 msnm.
- Superficie: 35,76 km².

Collado Villalba

- Población: 63.074 habitantes.
- Distancia a Madrid: 34,89 km.
- Altitud: 917 msnm.
- Superficie: 25,22 km².

Móstoles

- Población: 207.095 habitantes.
- Distancia a Madrid: 34,89 km.
- Altitud: 660msnm.
- Superficie: 17,35 km².

3.6. Embalses y presas

Todos los embalses y presas del Tajo Alto se muestran en las dos tablas siguientes.

Tabla 1. Listado de embalses en el Tajo Alto. Fuente: www.iagua.es/data

Nombre	Demarcación hidrográfica	Capacidad total (hm3)	Volumen actual (hm3)	Porcentaje (%)	Energía disponible (GWh)	Capacidad energética (GWh)
Almoguera	Tajo	7	6	86	1	2
Bolarque	Tajo	31	28	90	11	15
Entrepeñas	Tajo	813	314	39	222	782

Tabla 2. Listado de presas en el Tajo Alto. Fuente: www.iagua.es/data

Nombre	Demarcación hidrográfica	Aportación media anual (hm3)	Precipitación media anual (mm)	Tipo de presa	Volumen del cuerpo presa (1000 m3)
Almoguera	Tajo	1182	484	Gravedad	29,00
Zorita	Tajo	1128	484	Gravedad	21,44

Todas las presas del Guadarrama se muestran en la tabla siguientes.

Tabla 3. Listado de presas en el Guadarrama. Fuente: www.iagua.es/data

Nombre	Demarcación hidrográfica	Aportación media anual (hm3)	Precipitación media anual (mm)	Tipo de presa	Volumen del cuerpo presa (1000 m3)
Molino De La Hoz	Tajo			Materiales sueltos homogénea	28,00
Presa de Nieves, Las (Azud Derivacion)	Tajo	116	484	Gravedad	5,83

4. Datos y metodología

4.1 Datos y delimitaciones de las principales cuencas y subcuencas

Los datos de precipitaciones utilizados en este artículo proceden de la base de datos MOPREDAS (Monthly Precipitation Database of Spain) que está creada por un equipo internacional liderado por la Universidad de Zaragoza. Es la base de datos de precipitación

homogénea más completa de la Península Ibérica establecida hasta el momento. La base de datos MOPREDAS se basa en la información de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET), que proporciona 2.670 secuencias homogéneas distribuidas por toda la península desde 1945 hasta 2005. Es una base de datos de alta calidad que puede ayudar a procesar datos estadísticos y convertirse en una herramienta para analizar el cambio climático en la Península Ibérica, e incluso, establecer la Península Ibérica como un lugar para la investigación del cambio climático cuando sea posible (González-Hidalgo et al. 2011).

De acuerdo con la distribución de la ubicación de cada estación, el método de conectar dos puntos adyacentes se utiliza para delimitar las principales cuencas y subcuencas del Tajo Alto y Guadarrama. La cuenca del Tajo Alto se divide en 5 subcuencas y la cuenca del Guadarrama se divide en 2 subcuencas, consulte la Figura 8 y 9. Los datos de precipitación de cada área de subcuenca se obtienen del promedio ponderado de la precipitación de 1945-2005 del límite y las estaciones internas (los puntos que limitan la cuenca ponderando con 0,5).

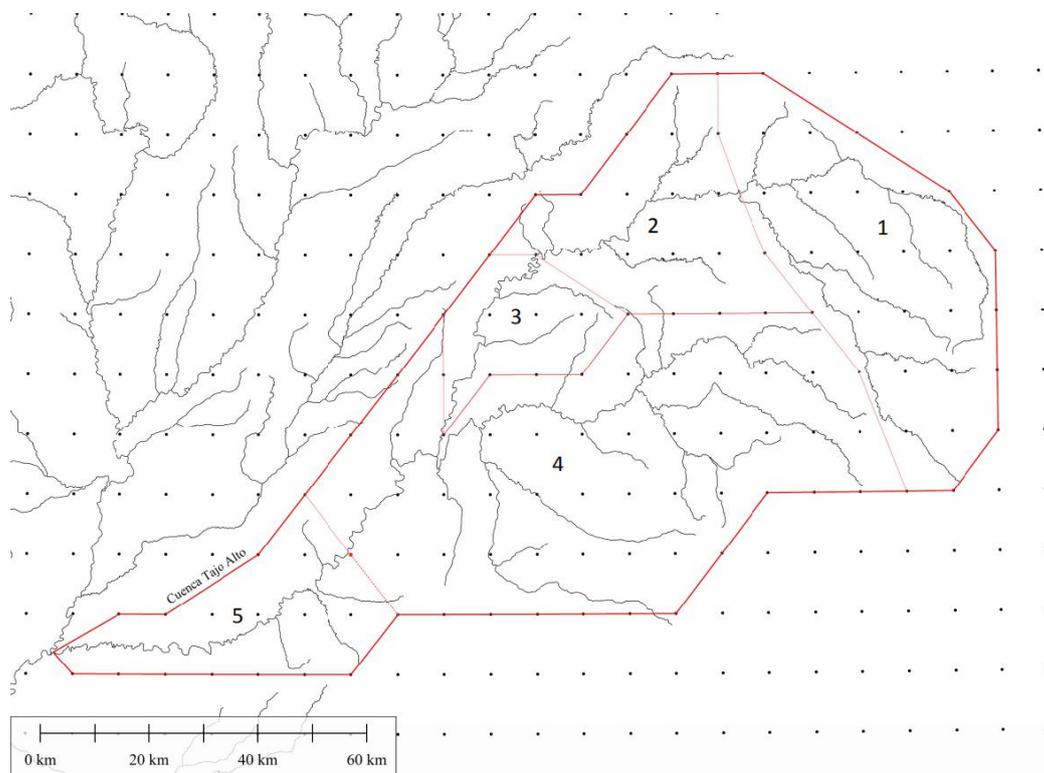


Figura 8. La cuenca y las subcuencas del Tajo Alto según MOPREDAS.

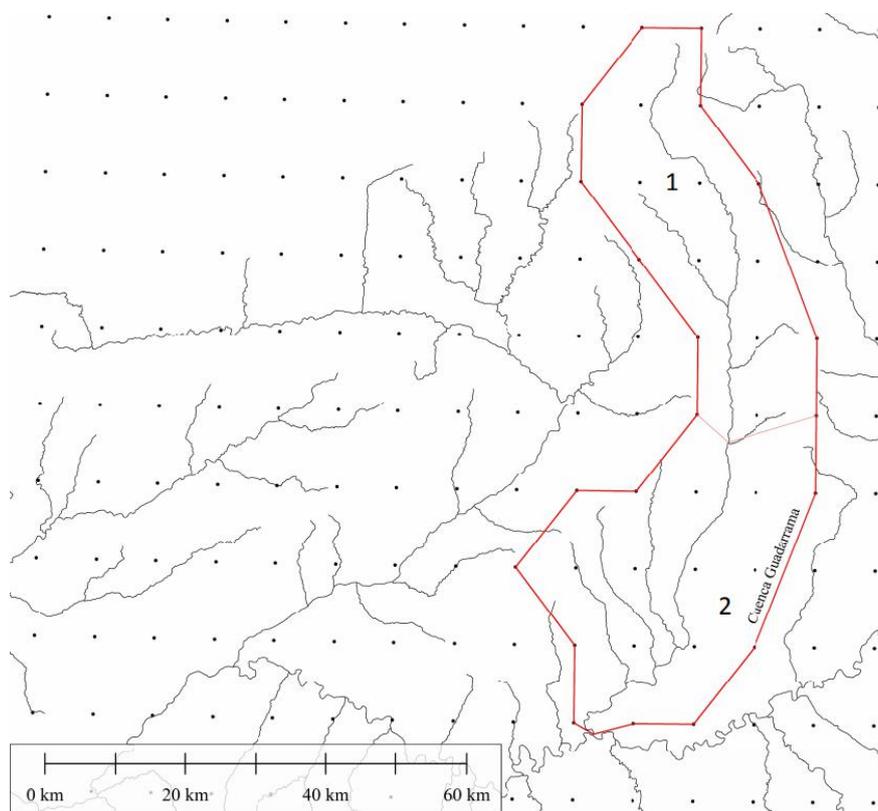


Figura 9. La cuenca y las subcuencas del Guadarrama según MOPREDAS.

Los datos de caudales utilizados en este estudio provienen del Anuario de Aforos 2016-2017 del Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX). Se seleccionan los datos de Estación 3001 (en Peralejos de las Truchas), 3005 (en Trillo), 3006 (en Entrepeñas), 3007 (en Bolarque), 3011 (en Aranjuez) y 3258 (en Embocador) del Tajo y Estación 3100 (en Villalba) y 3012 (en Bargas) en Guadarrama para hacer análisis estadístico. Como no hay datos en algunos años, solo se toman las estaciones que tengan años más largos con datos válidos, y algunos datos faltantes se obtienen por imputación.

4.2 Métodos de investigación

Este trabajo analiza los datos de precipitaciones y caudales de las dos cuencas del Tajo Alto y Guadarrama desde dos perspectivas, a saber, intra-anual e interanual. De acuerdo con la delimitación de subcuencas de 4.1, se analizan las subcuencas una por una.

En este trabajo se utiliza la prueba de tendencia de Mann-Kendall para determinar la tendencia

de cambios de las series de las precipitaciones y caudales en la cuenca. Esta prueba es uno de los métodos efectivos para probar la tendencia de cambios de la serie. Su ventaja es que la serie probada no necesita cumplir con una determinada distribución y es resistente a la interferencia (Villarreal et al. 2018).

En la prueba de Mann-Kendall, la hipótesis nula H_0 son los datos de la serie de tiempo (x_1, x_2, \dots, x_n) , que es n independiente y variable aleatoriamente todo $k, j \leq n$, y $k \neq j$, la distribución de x_k y x_j no son lo mismo. La fórmula para definir el estadístico de prueba S es:

$$S = \sum_{i=2}^n \sum_{j=1}^{i-1} \text{sign}(X_i - X_j)$$

En la fórmula:

$$\text{Sgn}(X_i - X_j) = \begin{cases} +1, X_i - X_j > 0 \\ 0, X_i - X_j = 0 \\ -1, X_i - X_j < 0 \end{cases}$$

S es una distribución normal, su media es 0 y la varianza es $\text{Var}(S) = n(n-1)(2n+5)/18$.

Cuando $n > 10$, la variable estadística normal estándar se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$Z = \begin{cases} (S-1)/\sqrt{\text{Var}(S)}, S > 0 \\ 0, S = 0 \\ (S+1)/\sqrt{\text{Var}(S)}, S < 0 \end{cases}$$

En la prueba de tendencia bilateral, para un nivel de confianza dado α , si $|Z| \geq Z_{1-\alpha/2}$, la hipótesis nula H_0 es inaceptable, es decir, en el nivel de confianza α , hay un aumento significativo o tendencia a la baja. Un valor positivo de Z indica una tendencia creciente y un valor negativo indica una tendencia decreciente. Cuando el valor absoluto de Z es mayor o igual a 1,65, 1,96, 2,58, significa que ha pasado la prueba de significancia del 90%, 95% y 99% respectivamente (Zhang et al. 2014).

Este artículo intenta combinar la prueba de Mann-Kendall con el Coeficiente de Hurst. Primero,

la prueba de tendencia de Mann-Kendall se usa para analizar las tendencias de cambios de precipitaciones y caudales de cada subcuenca, y luego se usa el Coeficiente de Hurst para predecir su tendencia de cambio futuro (Yang et al. 2017). El principio básico del Coeficiente de Hurst es:

Para series de tiempo x_1, x_2, \dots, x_n (n es la longitud de la secuencia de datos), para cualquier entero positivo $f \geq 1$, la secuencia media es

$$\bar{x}_f = \frac{1}{f} \sum_{t=1}^f x_t, f = 1, 2, \dots, n$$

La desviación acumulada es

$$X(t, f) = \sum_{u=1}^t (x_u - \bar{x}_f), 1 \leq t \leq f$$

El rango es

$$R(f) = \max_{1 \leq t \leq f} X(t, f) - \min_{1 \leq t \leq f} X(t, f), f = 1, 2, \dots, n$$

La desviación Estándar es

$$S(f) = \left[\frac{1}{f} \sum_{u=1}^f (x_u - \bar{x}_f)^2 \right]^{\frac{1}{2}}, f = 1, 2, \dots, n$$

Coeficiente de Hurst es

$$\frac{R(f)}{S(f)} = (cf)^H$$

En la fórmula, C es una constante. Tomando logaritmos de ambos lados de la ecuación se obtiene

$$H \ln f + H \ln c = \ln[R(f)/S(f)]$$

De acuerdo con diferentes valores de f , use el método de mínimos cuadrados para estimar H . Las diferentes estimaciones de H representan diferentes tendencias en el pasado y el futuro de la serie de tiempo. Cuando $H=0,5$, significa que la serie de tiempo es completamente independiente

y un proceso aleatorio, y el futuro no tiene nada que ver con el pasado; cuando $0 < H < 0,5$, significa que la tendencia de cambio futuro de la serie de tiempo es opuesta al pasado, es decir, anti-continuidad, el menor H , Cuanto más fuerte es la anti-persistencia, cuando $0,5 < H < 1$, significa que los cambios futuros de la serie temporal son consistentes con el pasado, es decir, la continuidad, cuanto mayor es H , más fuerte es la continuidad.

Para encontrar el punto temporal de una posible mutación en la secuencia hidrológica, en este artículo se utiliza la prueba de Pettitt. La prueba de mutación de Mann Whitney Pettitt (abreviado como prueba de Pettitt), es una prueba no paramétrica, originalmente utilizado por Pettitt para probar puntos de mutación, por lo que se denomina la prueba de Pettitt (Pettitt 1979). El principio de la prueba de Pettitt es: para una serie climática con un tamaño de muestra de n , se da la columna de orden correspondiente y se construyen estadísticas. Si hay un cambio repentino en un año determinado, el año se utilizará como punto de mutación y la serie climática se dividirá en dos partes antes y después de eso. Finalmente, se realizan un análisis de regresión lineal en las dos partes para estudiar más a fondo el cambio de la relación precipitaciones-caudales. La interpretación de los valores de los coeficientes de correlación según el rango de valores como se muestra en la Tabla 4 .

Tabla 4. Interpretación de los valores de los coeficientes de correlación según el rango de valores. Fuente: Medidas de asociación (Peláez 2006).

Coeficiente	Interpretación
0	Relación nula
0 - 0,2	Relación muy baja
0,2 - 0,4	Relación baja
0,4 - 0,6	Relación moderada
0,6 - 0,8	Relación alta
0,8 - 1	Relación muy alta
1	Relación perfecta

5. Resultados y discusiones

5.1. Análisis de la tendencia de las precipitaciones en la cuenca del Tajo Alto

5.1.1. Distribución de las precipitaciones intra-anual

Se hacen las estadísticas de precipitación mensual (promedio multianual) de cada estación (MOPREDAS) en cada subcuenca del Tajo Alto desde 1945 hasta 2005. Las Figuras 10 y 11 muestran las precipitaciones mensuales y las proporciones de las cinco subcuencas. Los datos muestran que la distribución intra-anual fue extremadamente desigual. Se puede ver que las tendencias de las precipitaciones en las cinco subcuencas fueron aproximadamente las mismas. Los períodos de mayor precipitación en el año fueron abril-mayo (primavera) y octubre-diciembre (otoño), representando aproximadamente el 20% y el 30% de la precipitación anual. Julio y agosto (verano) fueron los meses con menos precipitaciones del año, y representaban alrededor del 5% - 8% de la precipitación anual.

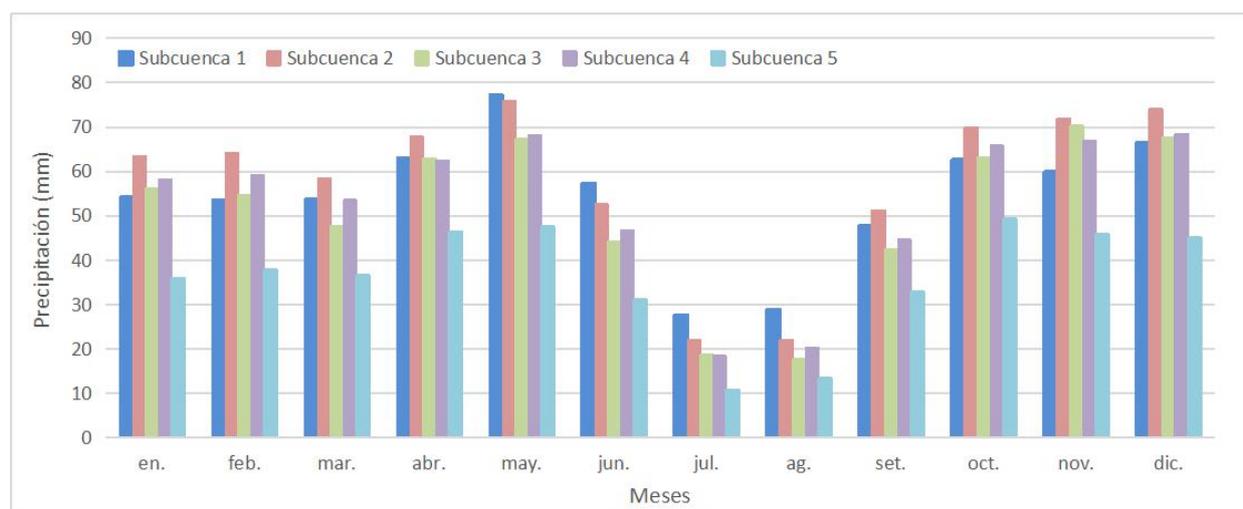


Figura 10. De 1945 a 2005, las precipitaciones mensuales en las subcuencas del Tajo Alto.

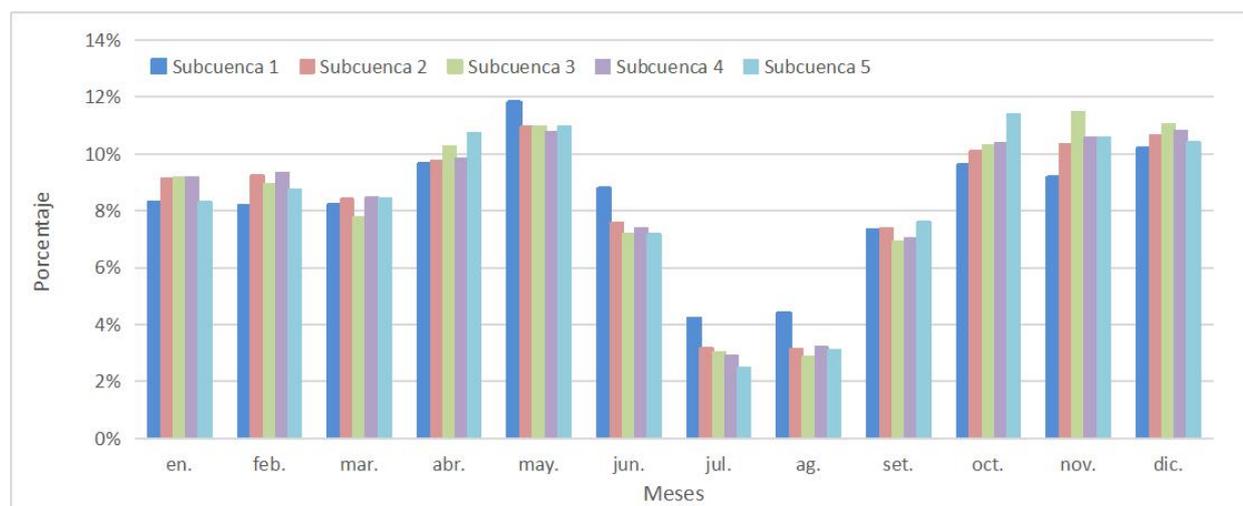


Figura 11. De 1945 a 2005, las proporciones de las precipitaciones mensuales en las subcuencas del Tajo Alto.

5.1.2. Distribución de las precipitaciones interanual

Haciendo estadísticas sobre la precipitación anual de cada estación (MOPREDAS) en cada subcuenca del Tajo Alto desde 1945 hasta 2005, se encuentra que la distribución interanual fue desigual. Las siguientes Figuras 12-16 muestran la precipitación anual y el promedio anual de las cinco subcuencas. Se puede observar que la precipitación fluctuó entre años. Las precipitaciones máximas anuales en las subcuencas 1 y 2 se aparecieron en 1979, que fueron de 952,23 mm y 1078,07 mm respectivamente. La máxima en la subcuenca 3 apareció en 1959 y fue de 1048,33 mm. La máxima en la subcuenca 4 apareció en 1960 que fue de 983,56. Y la máxima en la subcuenca 5 ocurrió en 1947 que fue 669,45 mm. Las precipitaciones menores en las cinco subcuencas fueron en 2005, todas por debajo de 400 mm, y la más baja fue en la subcuenca 5 de 215,27 mm en 2005.

Desde un punto de vista general, la precipitación en estas cinco subcuencas ha disminuido desde la década de 1980. Y desde entonces, la mayoría de los datos en cada subcuenca estaban por debajo del promedio suyo. Desde la perspectiva del promedio de 61 años, las precipitaciones en la subcuenca 5 es menor y lo de la subcuenca 2 es mayor.

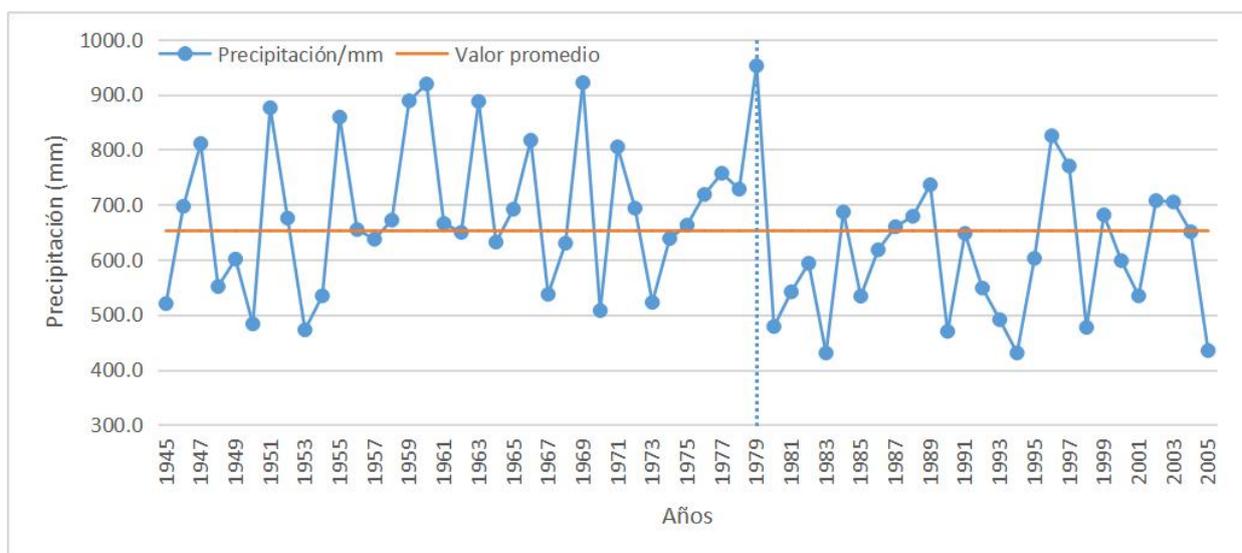


Figura 12. De 1945 a 2005, las precipitaciones anuales de la subcuenca 1 del Tajo Alto.

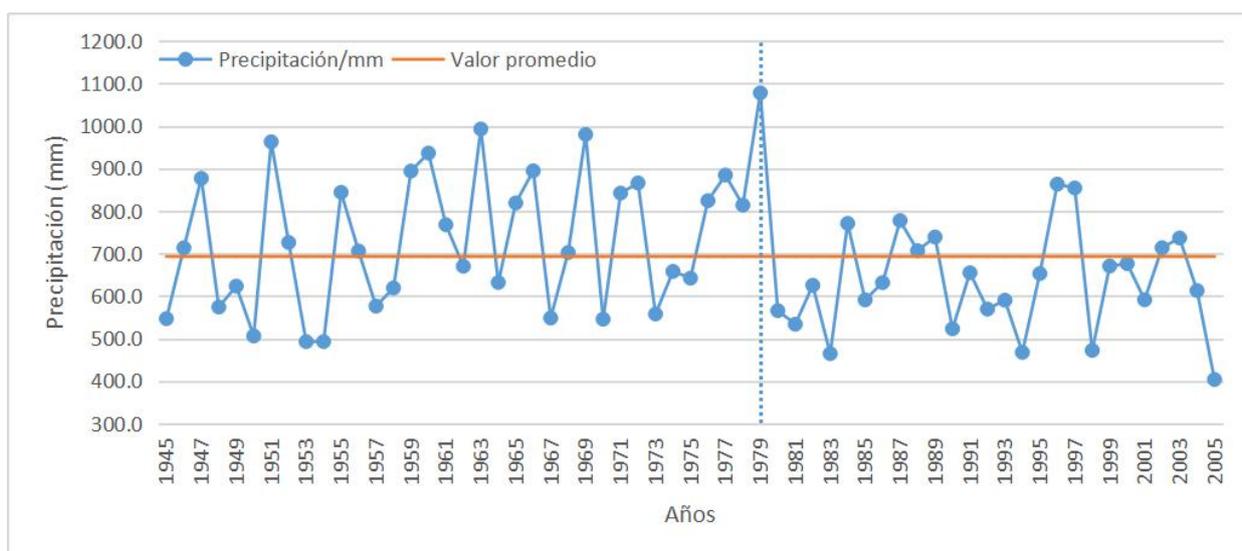


Figura 13. De 1945 a 2005, las precipitaciones anuales de la subcuenca 2 del Tajo Alto.

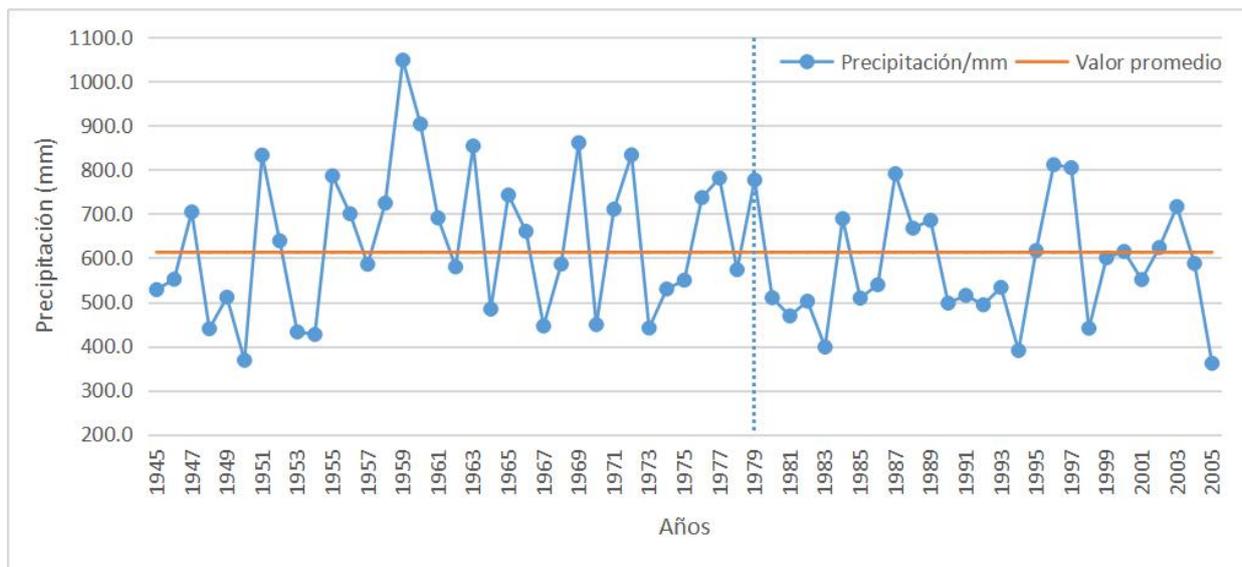


Figura 14. De 1945 a 2005, las precipitaciones anuales de la subcuenca 3 del Tajo Alto.

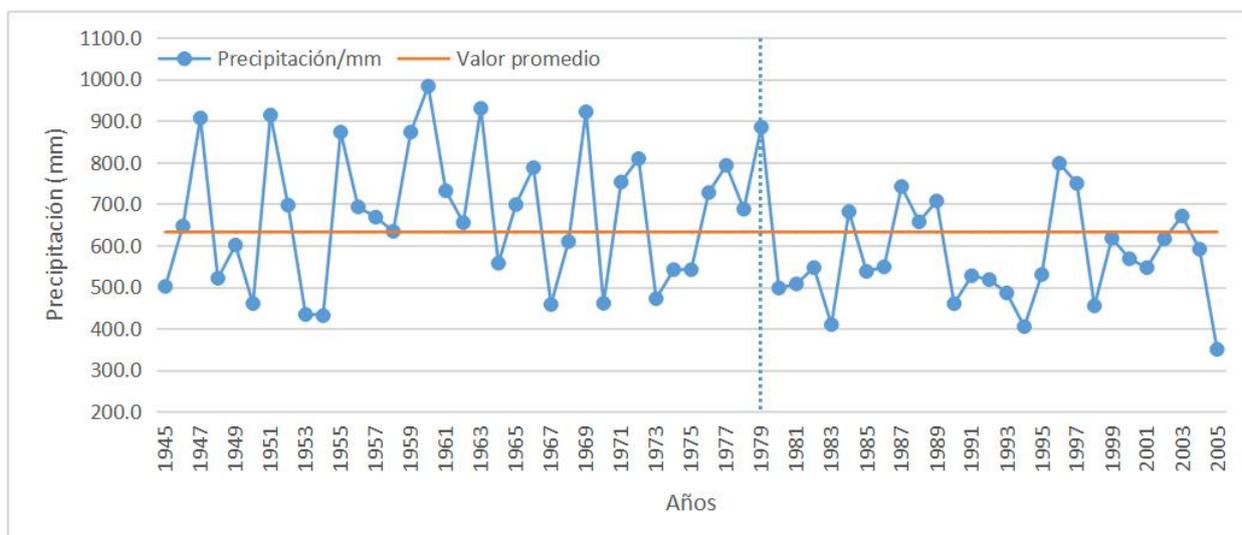


Figura 15. De 1945 a 2005, las precipitaciones anuales de la subcuenca 4 del Tajo Alto.

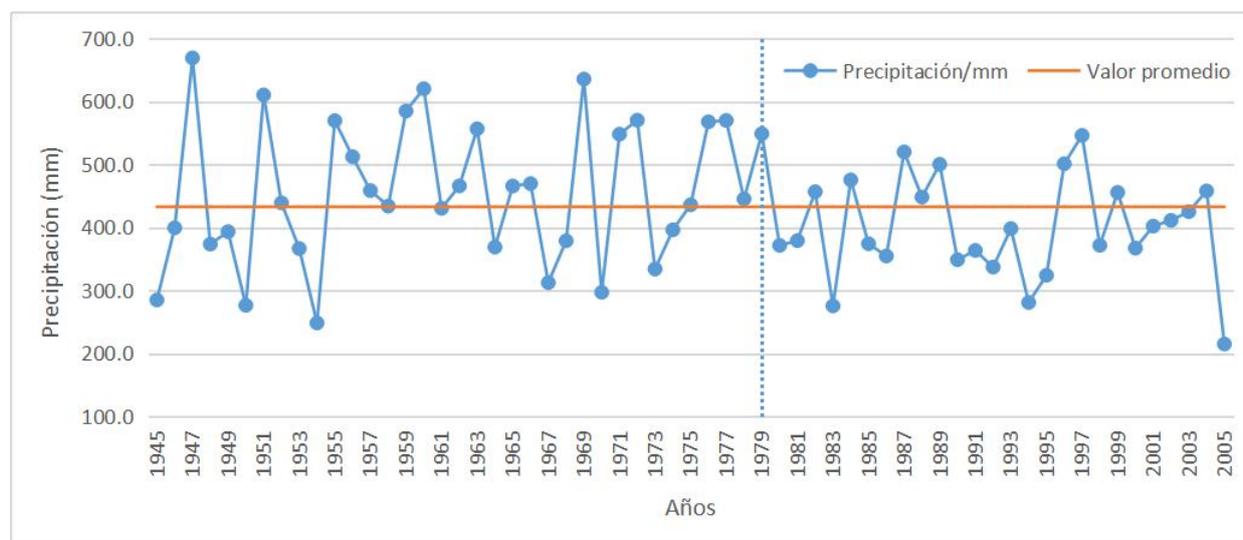


Figura 16. De 1945 a 2005, las precipitaciones anuales de la subcuenca 5 del Tajo Alto.

5.1.3. Cambio de tendencia de precipitación interanual

Se realiza la prueba de tendencia Mann-Kendall en los datos de precipitaciones interanual de cada subcuenca. Se puede observar en la Tabla 5 que la Z de cada subcuenca del Tajo Alto es negativa durante todo el año, lo que indica que las precipitaciones de todas las subcuencas tuvieron una tendencia decreciente entre 1945 y 2005. Pero ninguna de ellas ha superado el valor de significancia del 95%, esto muestra que la tendencia a la baja no fue significativa.

Mediante la prueba de cada mes, se puede encontrar que la precipitación en las subcuencas 1-4 tuvo una tendencia decreciente en enero-marzo, mayo-septiembre y diciembre. Las precipitaciones en los meses restantes mostraron una tendencia creciente. Es levemente diferente en la subcuenca 5, con una tendencia decreciente en enero-abril, junio-septiembre y diciembre, y una tendencia creciente en los meses restantes. La precipitación en cada subcuenca en marzo pasó la prueba del 95% y fue negativa, lo que indica que la variabilidad interanual en marzo se redujo significativamente. La precipitación en la subcuenca 2-4 disminuyó significativamente en junio y superó el valor de la prueba de significación del 99% en la subcuenca 3.

Tabla 5. Estadísticas de precipitación de Mann-Kendall (valor Z) de las subcuencas del Tajo Alto (1945-2005)

Subcuencas del Tajo Alto	Todo el año	en.	feb.	mar.	abr.	may.	jun.	jul.	ag.	set.	oct.	nov.	dic.
1	-1,25	-1,01	-1,36	-2,20*	0,29	-0,27	-1,08	-0,90	-0,79	-0,11	0,85	0,78	-0,63
2	-1,04	-0,78	-1,13	-2,27*	0,77	-0,12	-2,20*	-0,73	-0,90	-0,57	1,44	0,34	-0,70
3	-0,95	-0,55	-1,05	-2,00*	0,58	-0,72	-2,83**	-0,60	-0,32	-0,82	1,67	0,27	-0,59
4	-1,72	-0,85	-1,09	-2,51*	0,31	-0,53	-2,31*	-1,55	-0,82	-1,00	1,16	0,02	-0,70
5	-1,21	-0,88	-1,05	-2,10*	-0,04	0,27	-1,40	-0,72	-0,43	-0,35	1,10	0,32	-0,47

Nota: * significa pasar la prueba de significancia con un 95% de confiabilidad.

** indica pasar la prueba de significancia con un 99% de confiabilidad.

5.1.4. Predicción futura de precipitación interanual

Se puede observar en la Tabla 6 que todos los valores de H (Coeficiente de Hurst) de la secuencia de precipitaciones son mayores a 0,5, lo que indica que la secuencia de precipitaciones tendrá la misma tendencia en el futuro que en el pasado. Y en la Tabla 5 en 5.1.3., se puede ver que la Z de cada subcuenca es negativa, lo que indica que la precipitación en la cuenca del Tajo Alto entre 1945 y 2005 mostró una tendencia decreciente. Se puede predecir que las precipitaciones seguirán disminuyendo después de 2005.

Tabla 6. Predicción futura de precipitación interanual de las subcuencas del Tajo Alto (1945-2005)

Subcuencas del Tajo Alto	H	Z
1	0,80	-1,25
2	0,79	-1,04
3	0,68	-0,95
4	0,74	-1,72
5	0,69	-1,21

Nota: H- Coeficiente de Hurst; Z-Estadísticas de Mann-Kendall (1945-2005)

5.2. Análisis de la tendencia de los caudales en la cuenca del Tajo Alto

5.2.1. Distribución de los caudales intra-anual

Las estadísticas del caudal medio mensual en la subcuenca 1 del Tajo Alto desde 1945 hasta 2005 revelan que la distribución fue extremadamente desigual durante el año, como se muestra en la Figura 17. Se puede ver que el caudal aumentó de enero a marzo y de septiembre a diciembre, mientras que el caudal de marzo a septiembre disminuyó gradualmente. El caudal máximo del año fue en marzo a $9,13 \text{ m}^3/\text{s}$, el mínimo fue en septiembre a $1,68 \text{ m}^3/\text{s}$.

La Figura 18 presenta el caudal medio mensual en la subcuenca 2. Se puede encontrar que la tendencia de cambio durante el año fue casi la misma que la de la subcuenca 1, y la distribución fue extremadamente desigual. El caudal máximo del año fue en marzo a $30,49 \text{ m}^3/\text{s}$, el mínimo fue en septiembre a $7,42 \text{ m}^3/\text{s}$.

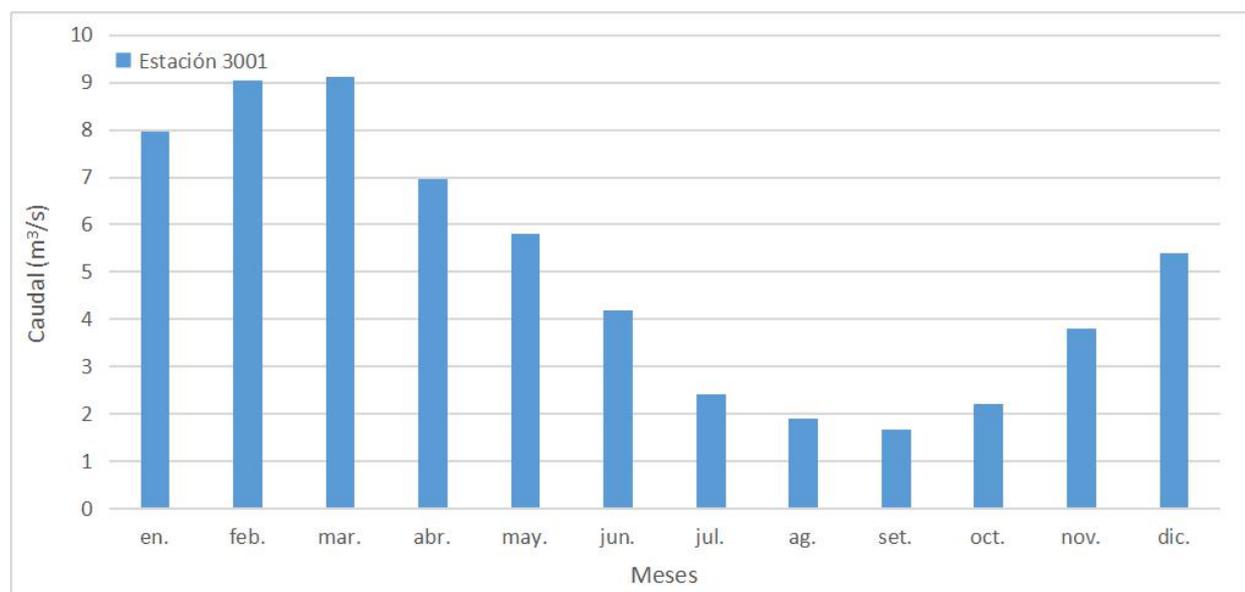


Figura 17. De 1945 a 2005, los caudales medios mensuales del Tajo Alto en Peralejos de las Truchas (subcuenca 1).

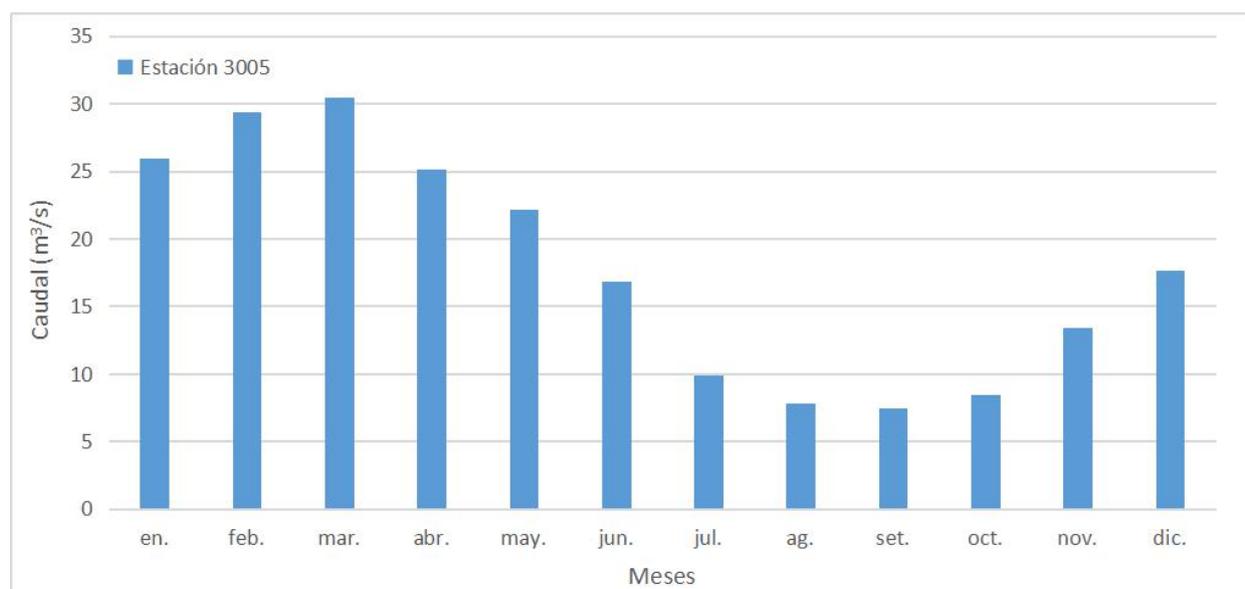


Figura 18. De 1945 a 2005, los caudales medios mensuales del Tajo Alto en Trillo (subcuenca 2).

Se hacen estadísticas del caudal medio mensual en la subcuenca 3 del Tajo Alto de 1945 a 1985, como se muestra en la Figura 19. Se puede ver a partir de esto que la tendencia de cambio durante el año fue aproximadamente la misma que la de la subcuenca 1, pero las tasas del aumento y de la reducción fueron ligeramente menores y la distribución fue desigual. En marzo, fue el caudal máximo del año a 28,95 m³/s. En agosto, fue el caudal mínimo del año a 15,43 m³/s.

La Figura 20 presenta el caudal medio mensual en la subcuenca 4. Se puede ver que la tendencia de cambio fue diferente a las tres subcuencas anteriores, la distribución fue más uniforme durante el año. El caudal fluctuó de enero a mayo, disminuyendo gradualmente de mayo a agosto y aumentando gradualmente de agosto a diciembre. En marzo, fue el caudal máximo del año a 46,56 m³/s. En agosto, fue el caudal mínimo del año a 32,69 m³/s.

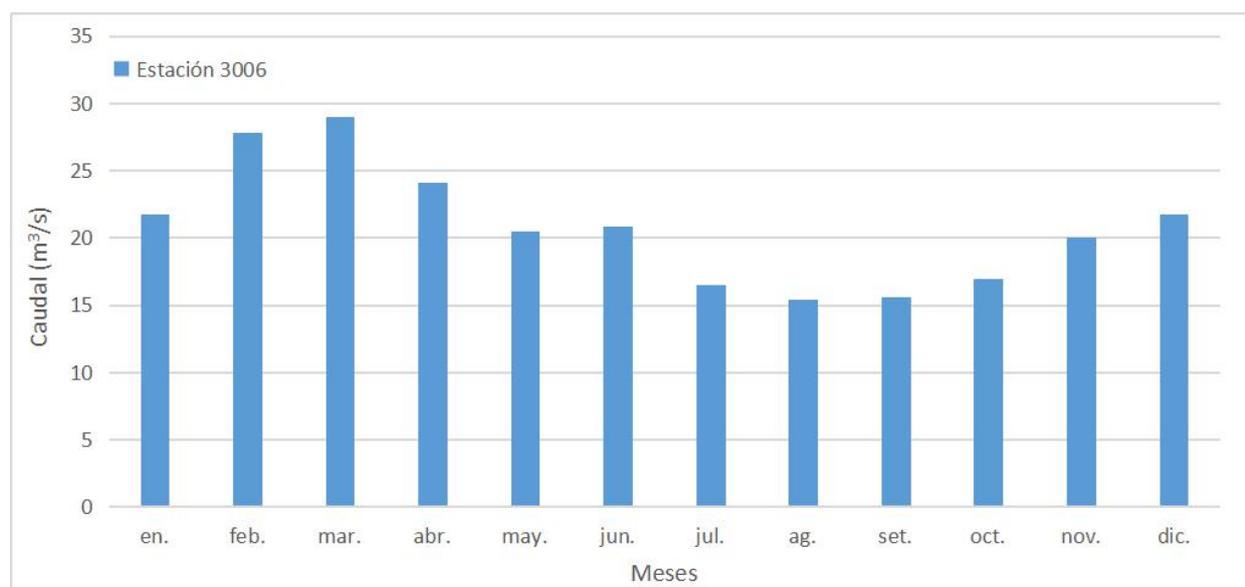


Figura 19. De 1945 a 1985, los caudales medios mensuales del Tajo Alto en Entrepeñas (subcuenca 3).



Figura 20. De 1945 a 1985, los caudales medios mensuales del Tajo Alto en Bolarque (subcuenca 4).

Dado que la Estación 3011 tuvo datos registrados de 1955 a 1975 en la subcuenca 5 y la Estación 3258 tuvo registros de datos de 1980 a 2002, los datos de 3011 se consideran la referencia para la primera mitad de la subcuenca 5 durante 1945-2005, y los de 3258 se considera como referencia para la segunda mitad.

Se hacen las estadísticas del caudal medio mensual en la Estación 3011 de 1955 a 1975, muestran que la distribución durante el año fue extremadamente desigual, como se muestra la Figura 21.

Se ve que salvo un ligero aumento en marzo y junio, los otros meses antes de agosto estaban disminuyendo y de agosto a diciembre estaban aumentando gradualmente. El caudal máximo del año se presentó en diciembre, que fue de 52,00 m³/s. El caudal mínimo apareció en agosto, que fue a 23,63 m³/s.

De acuerdo con las estadísticas del caudal medio mensual de la Estación 3258 de 1978 a 2002, se encuentra que la distribución durante el año fue relativamente uniforme, como en Figura 22. Se puede encontrar que el caudal pico apareció en enero, que fue a 12,69 m³/s. El caudal mínimo apareció en junio, que fue a 8,55 m³/s. Desde un punto de vista integral, la distribución del caudal de la subcuenca 5 en la primera mitad del período de 1945 a 2005 fue relativamente desigual y la segunda mitad fue relativamente uniforme.

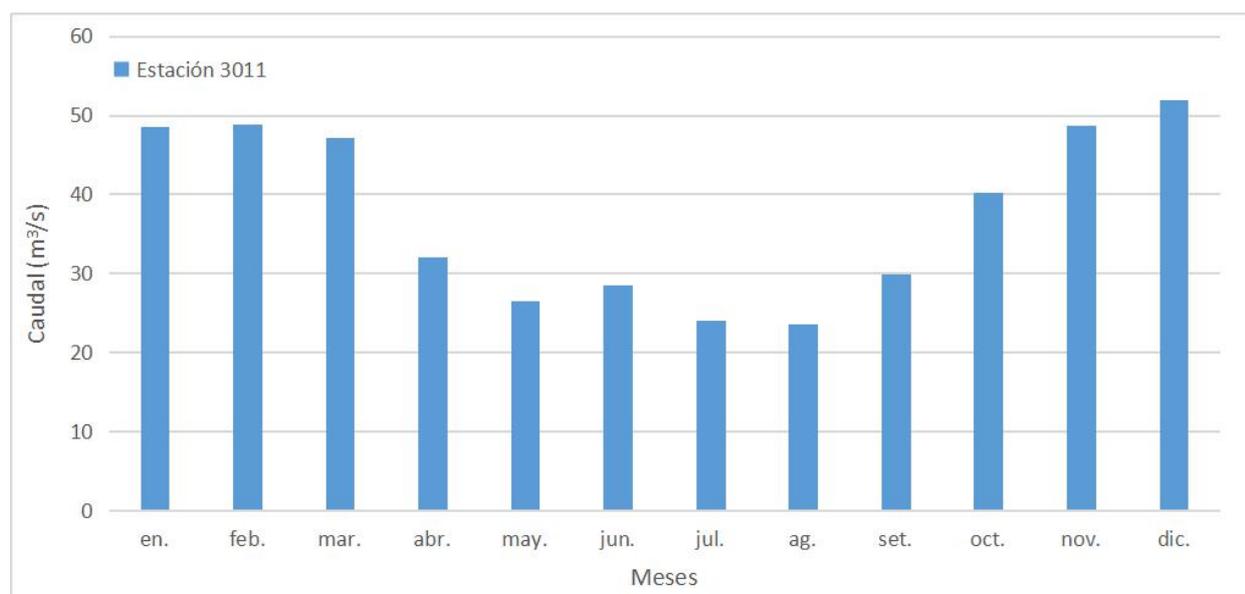


Figura 21. De 1955 a 1975, los caudales medios mensuales del Tajo Alto en Aranjuez (subcuenca 5).

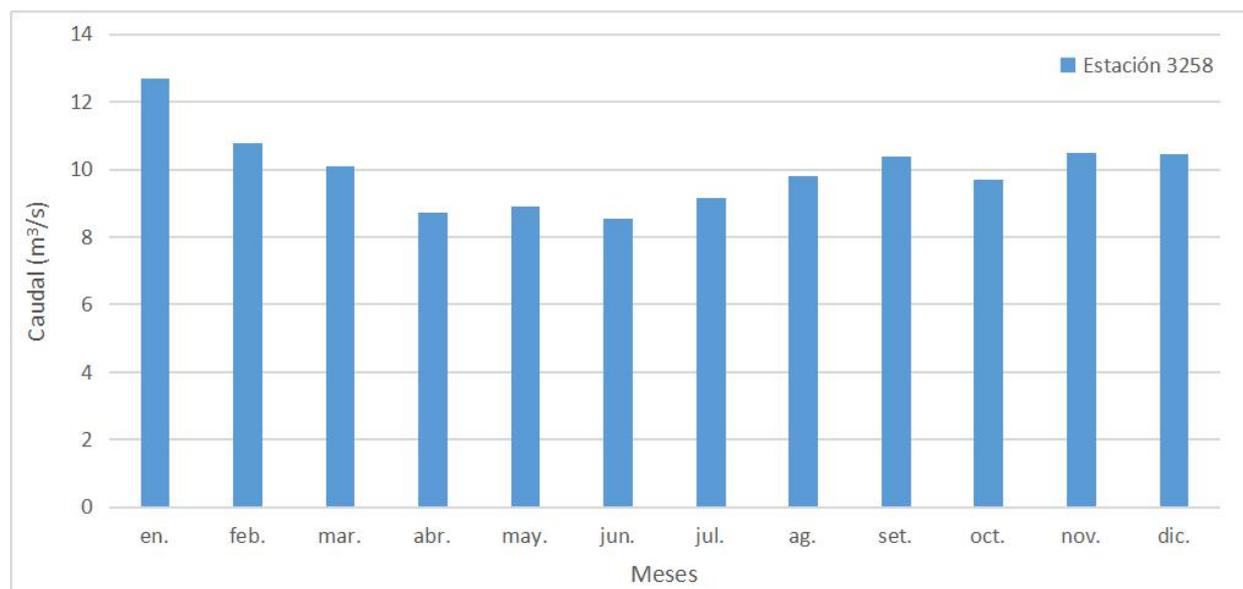


Figura 22. De 1980 a 2002, los caudales medios mensuales del Tajo Alto en Embocador (subcuenca 5).

5.2.2. Distribución de los caudales interanual

Las figuras 23-27 a continuación muestran los caudales medios anuales y los promedios en cada subcuenca en el año con datos registrados, no se muestra un patrón obvio en cada figura. Pero el caudal de cada subcuenca ha estado fluctuando, lo de la subcuenca 1 fue más alta que el promedio durante 6 años consecutivos desde 1973 a 1978. En cada estación hubo gran caudal alrededor de la década de 1960, la mayoría de los cuales fueron mayores que el valor promedio del año y los picos aparecieron continuamente. A partir de gráficos con años más largos de datos registrados (como subcuenca 1, 2 y 5), se puede encontrar que desde la década de 1980 el caudal ha disminuido significativamente. Y desde entonces, la mayoría de los datos estaban por debajo del promedio. En el mismo período de tiempo respectivo, el caudal promedio en la subcuenca 2 fue aproximadamente tres veces mayor que el de la subcuenca 1, y el de la subcuenca 4 fue aproximadamente el doble que el de la subcuenca 3.

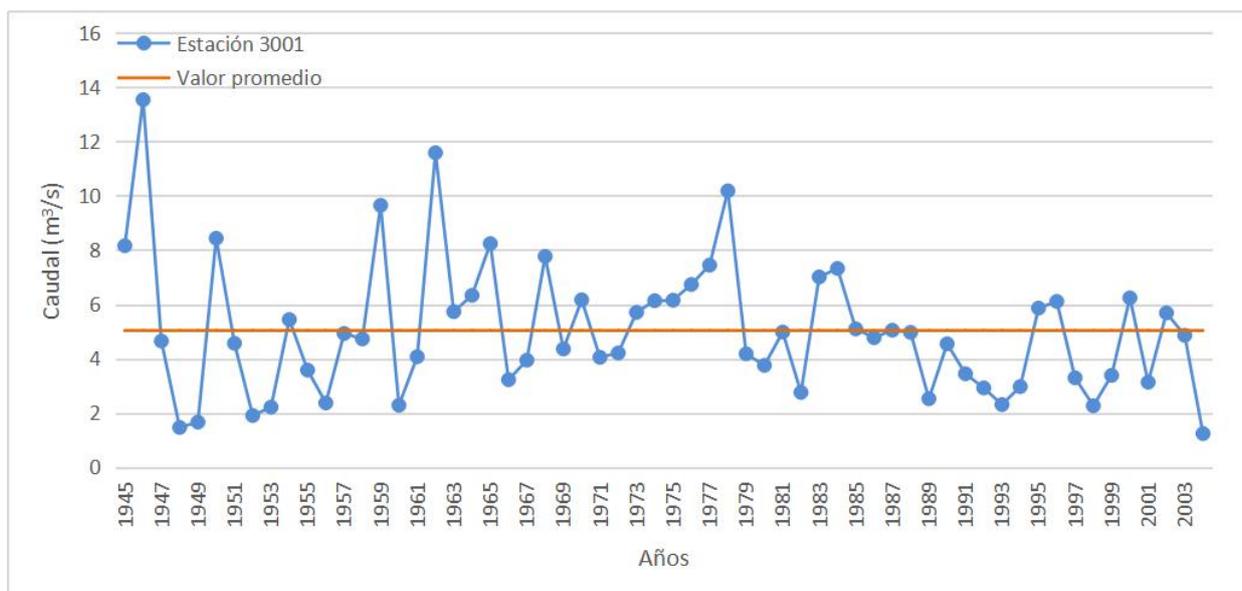


Figura 23. De 1945 a 2005, los caudales medios anuales del Tajo Alto en Peralejos de las Truchas (subcuenca 1).

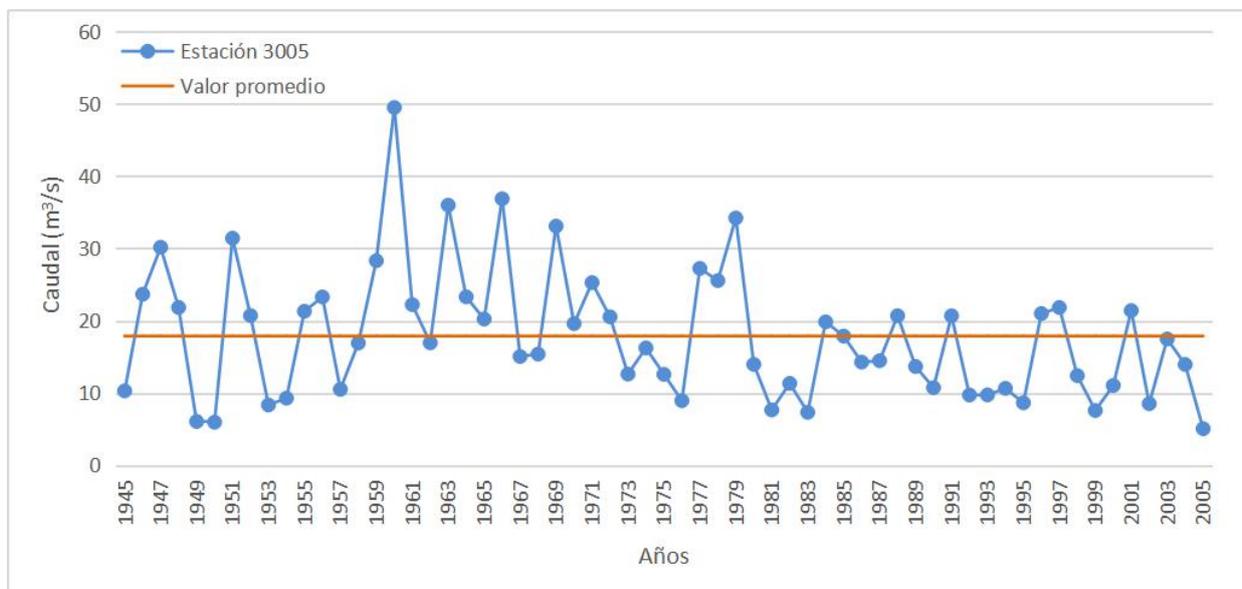


Figura 24. De 1945 a 2005, los caudales medios anuales del Tajo Alto en Trillo (subcuenca 2).

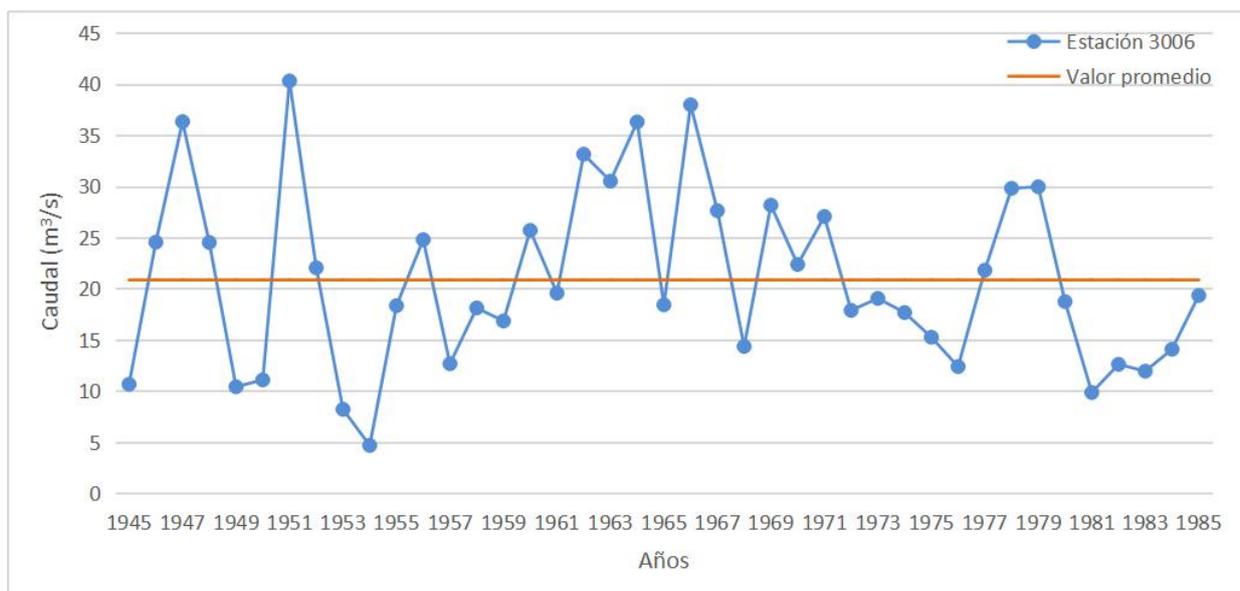


Figura 25. De 1945 a 1985, los caudales medios anuales del Tajo Alto en Entrepeñas (subcuenca 3).

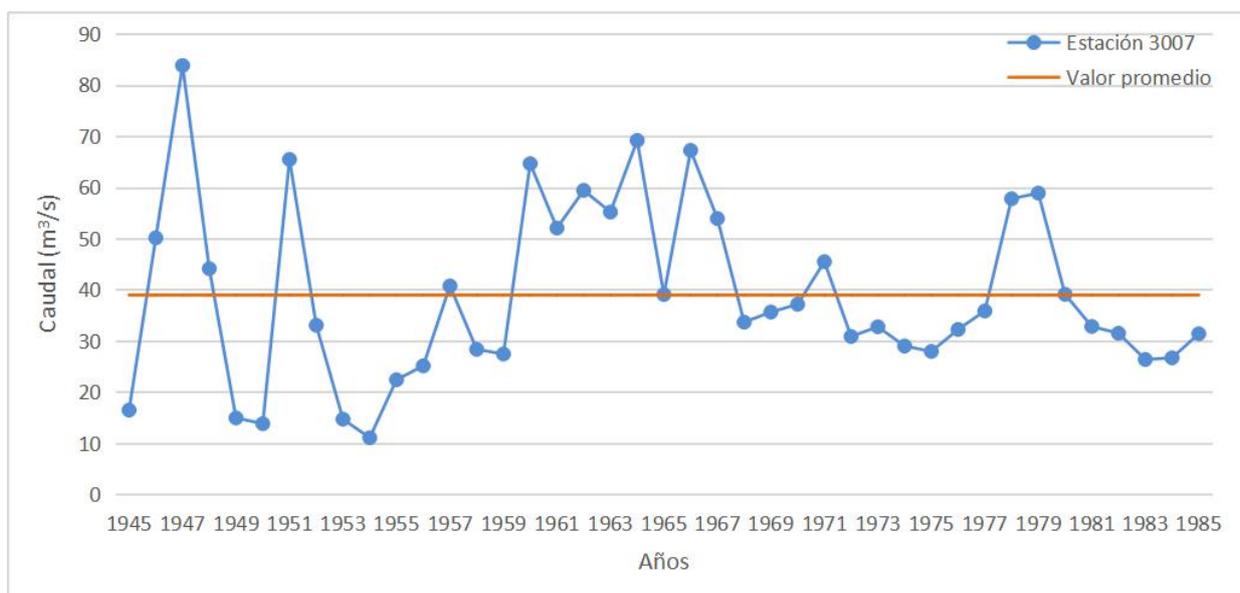


Figura 26. De 1945 a 1985, los caudales medios anuales del Tajo Alto en Bolarque (subcuenca 4).

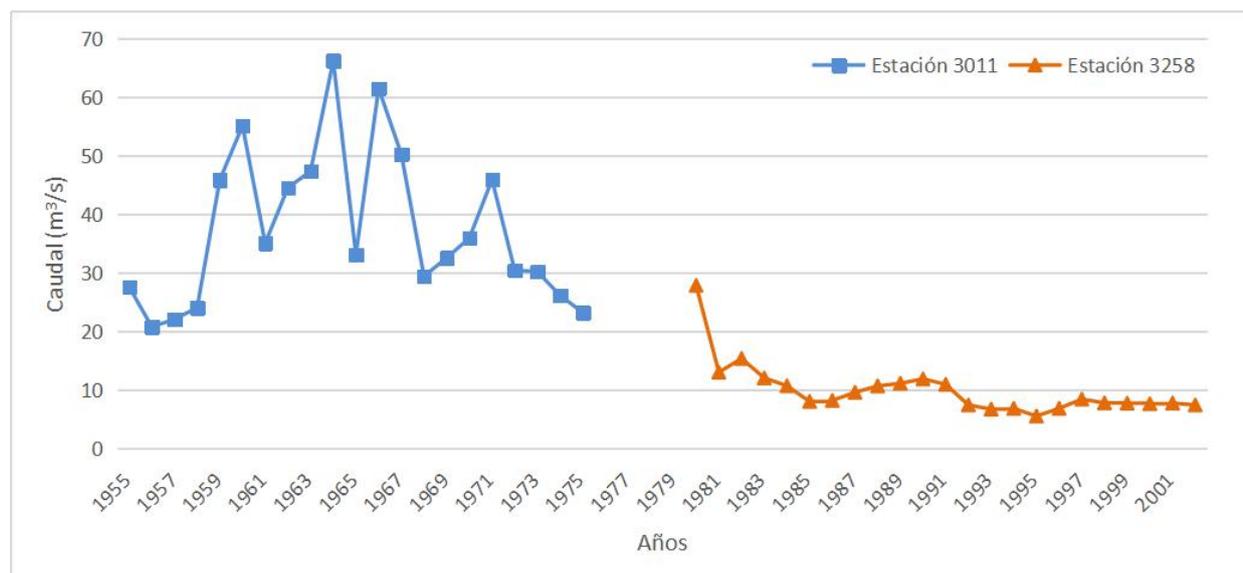


Figura 27. De 1954 a 2002, los caudales medios anuales del Tajo Alto en Aranjuez y Embocador (subcuenca 5).

5.2.3. Cambio de tendencia de caudal interanual

La Tabla 7 muestra los valores de la prueba Mann-Kendall del caudal de cada subcuenca en la cuenca del Tajo Alto. Se puede observar que la Z de subcuenca 1 es negativa y no pase el valor de la prueba de significancia del 95% , lo que indica que el caudal de la subcuenca 1 mostró una tendencia decreciente np significativa durante 1945-2005. Hubo una tendencia decreciente en el caudal de enero a junio y fue significativa en marzo. Hubo un aumento menos significativo en otros meses.

Sin embargo, el caudal en la subcuenca 2 mostró una disminución significativa. Salvo el ligero aumento en noviembre y diciembre, en los demás meses los caudales tuvieron una tendencia decreciente, una disminución significativa en febrero y julio, y una disminución muy significativa en marzo, agosto y septiembre.

De 1945 a 1985, el caudal en la subcuenca 3 mostró una tendencia decreciente pero no significativa. Porque aunque hubo una tendencia decreciente en enero-mayo y diciembre, hubo un aumento muy significativo en julio y agosto.

Se observa en la subcuenca 4, el caudal tuvo una tendencia decreciente pero no significativa. Estaba con una leve disminución en febrero-abril y diciembre, un aumento en los meses restantes y un aumento significativo en julio-septiembre.

Sobre la subcuenca 5, los datos de la Estación 3011 se consideran la primera mitad del período alrededor de 1945-2005 y los de Estación 3258 se consideran la segunda mitad. El caudal de la Estación 3011 mostró una disminución no significativa en el período de 1955 a 1975. Hubo una tendencia decreciente en febrero-marzo y octubre-diciembre. También hubo un aumento en los meses restantes y un aumento significativo en julio. De 1980 a 2002, el caudal de la Estación 3258 mostró una tendencia decreciente muy significativa en su conjunto, disminuyó en cada mes. Hubo una tendencia decreciente muy significativa de enero a marzo y de octubre a diciembre.

Tabla 7. Estadísticas de caudales de Mann-Kendall (valor Z) de las subcuencas del Tajo Alto.

Subcuencas del Tajo Alto	Estación	Todo el año	en.	feb.	mar.	abr.	may.	jun.	jul.	ag.	set.	oct.	nov.	dic.
1	3001	-1,04	-0,27	-1,01	-2,33*	-0,83	-0,13	-0,13	0,34	0,89	1,09	0,66	0,70	0,66
2	3005	-2,48*	-0,09	-2,00*	-3,06**	-1,74	-1,86	-1,52	-2,15*	-2,68**	-2,72**	-0,68	0,78	0,01
3	3006	-0,48	-0,98	-1,52	-1,40	-1,13	-0,08	1,40	3,27**	3,52**	1,59	1,38	1,34	-0,37
4	3007	-0,08	0,03	-0,15	-0,33	-0,15	0,19	0,93	3,97*	3,96*	2,33*	1,76	1,07	-0,48
5	3011	-0,09	0,27	-1,90	-1,30	0,21	0,82	1,06	2,02*	1,84	1,30	-0,15	-0,03	-1,18
	3258	-3,43**	-4,07**	-3,94**	-3,64**	-2,43*	-2,22*	-2,32*	-2,06*	-2,38*	-1,95	-3,59**	-3,49**	-3,62**

Nota: (1)* significa pasar la prueba de significancia con un 95% de confiabilidad. ** indica pasar la prueba de significancia con un 99% de confiabilidad. (2) Año de registro de datos: Estación 3001 1945-2005, Estación 3005 1945-2005, Estación 3006 1945-1985, Estación 3007 1945-1985, Estación 3011 1955-1975 y Estación 3258 1980-2002.

5.2.4. Predicción futura de caudal interanual

Se puede observar en la Tabla 8 que todos los valores de H (Coeficiente de Hurst) de la secuencia de caudal son mayores que 0,5, lo que indica que la secuencia de caudal tendrá la misma tendencia en el futuro que el pasado. Y en la Tabla 7 de 5.2.3. se ve que la Z de cada subcuenca es negativa. Indica que cada estación o subcuenca mantendrá una tendencia decreciente después del año en que hay los datos registrados.

Tabla 8. Predicción futura de caudal interanual de las subcuencas del Tajo Alto (1945-2005).

Subcuencas del Tajo Alto	Estación	H	Z
1	3001	0,71	-1,04
2	3005	0,81	-2,48
3	3006	0,70	-0,48
4	3007	0,77	-0,08
5	3011	0,92	-0,09
	3258	0,84	-3,43

Nota: H- Coeficiente de Hurst; Z-Estadísticas de Mann-Kendall (1945-2005)

5.3. Comparación de la relación interanual entre precipitaciones y caudales

En este estudio se hace la prueba de Pettit a los datos de caudales para encontrar el punto de tiempo de mutación. Y se realizan análisis de regresión lineal antes y después del cambio repentino para estudiar más a fondo el cambio de la relación precipitación - caudal.

Se puede ver en la Tabla 9 que durante 1945-2005, la precipitación y el caudal de la subcuenca 1 mostraron una tendencia decreciente no significativa. Pero la tendencia decreciente de las precipitaciones fue mayor. La Figura 28 muestra los resultados de la prueba Pettitt en la subcuenca 1. Se encuentra que el caudal tuvo un cambio repentino significativo en 1990. Se realiza un análisis de regresión lineal de la precipitación y el caudal durante 1945-1990 y 1991-2005, como se muestra en la Tabla 10. La precipitación de 1945 a 1990 disminuyó a una tasa de 1,645 mm/a y el caudal disminuyó a una tasa de 0,0031 m³/s/a. El coeficiente de correlación entre los dos fue 0,72 (relación alta). Como en 5.1.2. que las precipitaciones se han reducido considerablemente desde 1979. Por lo tanto, la disminución del caudal entre 1945 y 1990 se vio afectada en gran medida por la disminución de las precipitaciones. De 1991 a 2005, la precipitación aumentó a una tasa de 1,9755 mm/a y el caudal aumentó a una tasa de 0,0124 m³/s/a. El coeficiente de correlación entre los dos fue de 0,62 (relación alta). Esto indica que el aumento del caudal tuvo una fuerte correlación con un aumento de la precipitación.

Tabla 9. Estadísticas de Mann-Kendall (valor Z) de precipitación y caudal de 1945-2005 de la subcuenca 1 del Tajo Alto.

Z de Precipitación	Z de Caudal
-1,25	-1,04

Nota: * significa pasar la prueba de significancia con un 95% de confiabilidad.

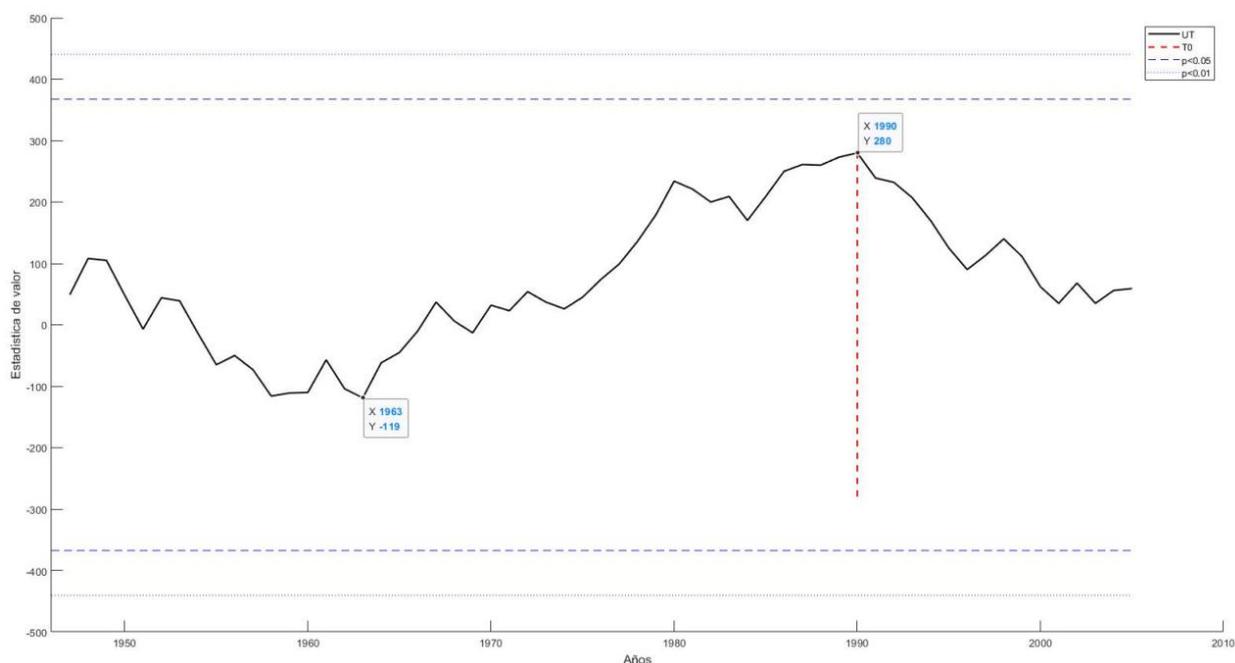


Figura 28. Resultado de la prueba de Pettitt del caudal en la subcuenca 1 del Tajo Alto.

Tabla 10. Análisis de los cambios de precipitación y caudal anuales antes y después del cambio abrupto en 1945-2005 de la subcuenca 1 del Tajo Alto.

Años	Resultados del análisis de regresión lineal de precipitación		Tasa ¹ de cambio de precipitación mm/a	Resultados del análisis de regresión lineal de caudal		Tasa ² de cambio de caudal m ³ /s /a	Coeficiente de correlación de Pearson
	b	a		b	a		
1945-1990	-1,645	708,42	-1,645	-0,0031	5,4959	-0,0031	0,72
1991-2005	1,9755	591,09	1,9755	0,0124	3,7864	0,0124	0,62

Se puede ver en la Tabla 11 que durante 1945-2005, la precipitación y el caudal en la subcuenca 2 mostraron una tendencia decreciente y la del caudal fue significativa. La Figura 29 muestra los

resultados de la prueba Pettitt de la subcuenca 2. Se puede ver que el caudal hubo un cambio repentino significativo en 1980. Se realiza un análisis de regresión lineal sobre precipitación y caudal durante 1945-1980 y 1981-2005, como se muestra en la Tabla 12. La precipitación aumentó a una tasa de 3,8891 mm/a desde 1945 a 1980, y el caudal fue a una tasa de 0,102 m³/s/a. El coeficiente de correlación entre los dos fue 0,81 (relación muy alta). Aunque las precipitaciones se han reducido considerablemente desde 1979, no han tenido un gran impacto hasta 1980. Por tanto, el aumento del caudal entre 1945 y 1980 se vio afectado en gran medida por el aumento de las precipitaciones. De 1981 a 2005, la precipitación disminuyó a una tasa de 0,2946 mm/a, y el caudal disminuyó a una tasa de 0,0305 m³/s/a. El coeficiente de correlación entre los dos fue de 0,75 (relación alta). Se puede observar que la reducción sustancial de las precipitaciones iniciada en 1979 ha afectado el caudal.

Tabla 11. Estadísticas de Mann-Kendall (valor Z) de precipitación y caudal de 1945-2005 de la subcuenca 2 del Tajo Alto.

Z de Precipitación	Z de Caudal
-1,04	-2,48*

Nota: * significa pasar la prueba de significancia con un 95% de confiabilidad.

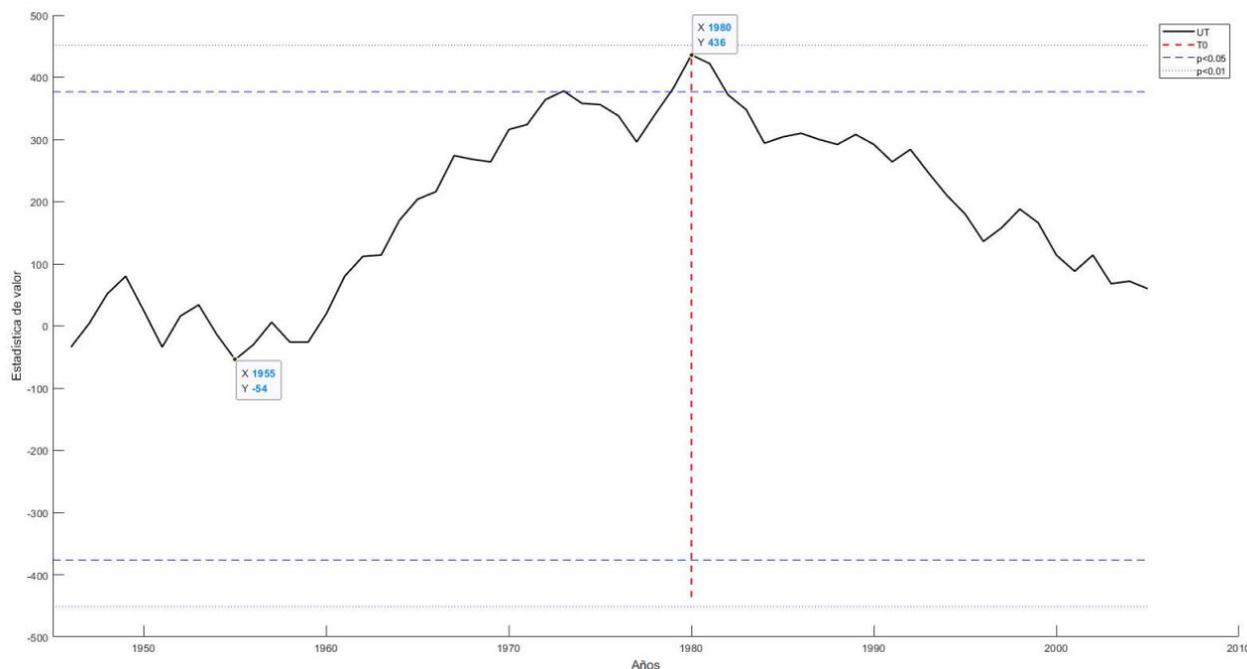


Figura 29. Resultado de la prueba de Pettitt del caudal en la subcuenca 2 del Tajo Alto.

Tabla 12. Análisis de los cambios de precipitación y caudal anuales antes y después del cambio abrupto en 1945-2005 de la subcuenca 2 del Tajo Alto.

Años	Resultados del análisis de regresión lineal de precipitación		Tasa de cambio de precipitación mm/a	Resultados del análisis de regresión lineal de caudal		Tasa de cambio de caudal m ³ /s /a	Coeficiente de correlación de Pearson
	b	a		b	a		
	1945-1980	3,8891		660,98	3,8891		
1981-2005	-0,2946	632,14	-0,2946	-0,0305	13,909	-0,0305	0,75

Del análisis anterior se sabe que en la parte alta de la cuenca del Tajo Alto (subcuenca 1, 2), existe una fuerte correlación entre el caudal y la precipitación en diferentes períodos de tiempo. Además, a partir del 3.3. se observa que en la parte alta hay principalmente bosques y zonas verdes a lo largo del río, no hay pueblos poblados alrededor de la cuenca y hay poca tierra cultivable. Por lo tanto, el medio ambiente circundante se vio menos perturbado por otras actividades humanas extractivas de agua. Los cambios de caudal en las subcuencas 1 y 2 fueron causados en gran medida por cambios de las precipitaciones.

Se encuentra en la Tabla 13 que durante 1945-1985, la precipitación y el caudal de la subcuenca 3 mostraron una tendencia decreciente no significativa. Pero la tendencia decreciente del caudal fue mayor. La Figura 30 muestra los resultados de la prueba Pettitt de la subcuenca 3. Se ve que el caudal hubo un cambio repentino significativo en 1972. Se realiza un análisis de regresión lineal sobre la precipitación y el caudal durante 1945-1972 y 1973-1985, como se muestra en la Tabla 14. La precipitación aumentó a una tasa de 5,7194 mm/a desde 1945 a 1972 y el caudal aumentó a una tasa de 0.2584 m³/s/a. El coeficiente de correlación entre los dos fue 0,31 (relación baja). Se puede ver que el aumento de caudal se vio afectado en menor medida por el aumento de precipitaciones. De 1973 a 1985, la precipitación disminuyó a una tasa de 0,3504 mm/a y el caudal disminuyó a una tasa de 0,6133 m³/s/a. El coeficiente de correlación entre los dos fue de 0,40 (relación moderada). La drásticamente reducidas de las precipitaciones desde 1979 tuvo un impacto parcial en el caudal.

Tabla 13. Estadísticas de Mann-Kendall (valor Z) de precipitación y caudal de 1945-1985 de la subcuenca 3 del Tajo Alto.

Z de Precipitación	Z de Caudal
-0,30	-0,48

Nota: * significa pasar la prueba de significancia con un 95% de confiabilidad.

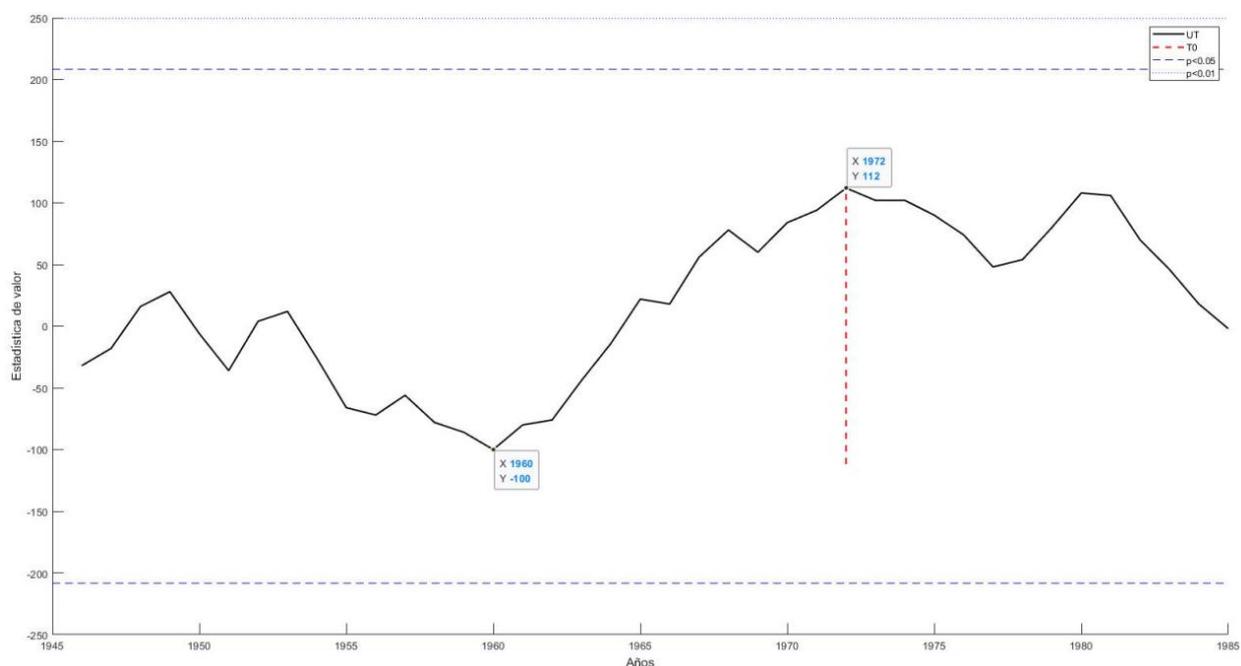


Figura 30. Resultado de la prueba de Pettitt del caudal en la subcuenca 3 del Tajo Alto.

Tabla 14. Análisis de los cambios de precipitación y caudal anuales antes y después del cambio abrupto en 1945-1985 de la subcuenca 3 del Tajo Alto.

Años	Resultados del análisis de regresión lineal de precipitación		Tasa de cambio de precipitación mm/a	Resultados del análisis de regresión lineal de caudal		Tasa de cambio de caudal m ³ /s /a	Coeficiente de correlación de Pearson
	b	a		b	a		
1945-1972	5,7194	562,76	5,7194	0,2584	18,486	0,2584	0,31
1973-1985	-0,3504	20,334	-0,3504	-0,6133	23,412	-0,6133	0,40

Se muestra en la Tabla 15 que durante 1945-1985, la precipitación y el caudal de la subcuenca 4 mostraron una tendencia decreciente no significativa. Pero la tendencia decreciente de la

precipitación fue mayor. La Figura 31 muestra el resultado de la prueba Pettitt de la subcuenca 4. Se ve que el caudal hubo un cambio repentino significativo en 1960. Se hace un análisis de regresión lineal sobre la precipitación y el caudal durante 1945-1960 y 1961-1985, como se muestra en la Tabla 16. La precipitación aumentó a una tasa de 13,953 mm/a de 1945 a 1960, mientras que el caudal disminuyó a una tasa de 0,4125 m³/s/a. El coeficiente de correlación entre los dos fue 0,70 (relación alta). Esto muestra que aunque los dos tuvo una fuerte correlación, el aumento de las precipitaciones no ha superado la disminución del caudal. Otros factores también tuvieron gran impacto. Se encuentra en 3.3. que hay una gran cantidad de tierras de trabajo y cultivos permanentes en la subcuenca 4. Por tanto, la disminución del caudal se vio afectada por el riego agrícola. De 1961 a 1985, la precipitación disminuyó a una tasa de 6,4201 mm/a y el caudal disminuyó a una tasa de 1,0637 m³/s/a. El coeficiente de correlación entre los dos fue 0,33 (relación baja). Esto muestra que la disminución del caudal se vio menos afectada por la disminución de las precipitaciones, pero se vio muy afectada por otros factores.

Tabla 15. Estadísticas de Mann-Kendall (valor Z) de precipitación y caudal de 1945-1985 de la subcuenca 4 del Tajo Alto.

Z de Precipitación	Z de Caudal
-0,57	-0,08

Nota: * significa pasar la prueba de significancia con un 95% de confiabilidad.

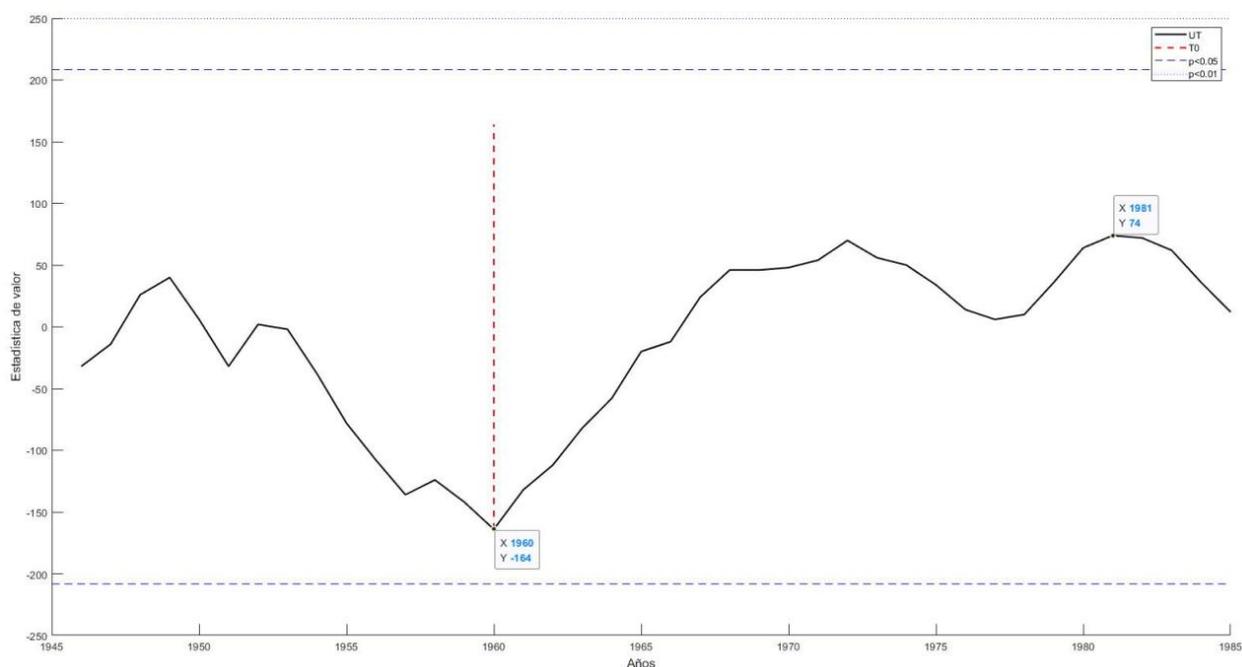


Figura 31. Resultado de la prueba de Pettitt del caudal en la subcuenca 4 del Tajo Alto.

Tabla 16. Análisis de los cambios de precipitación y caudal anuales antes y después del cambio abrupto en 1945-1985 de la subcuenca 4 del Tajo Alto.

Años	Resultados del análisis de regresión lineal de precipitación		Tasa de cambio de precipitación mm/a	Resultados del análisis de regresión lineal de caudal		Tasa de cambio de caudal m ³ /s /a	Coeficiente de correlación de Pearson
	b	a		b	a		
	1945-1960	13,953		558,78	13,953		
1961-1985	-6,4201	731,47	-6,4201	-1,0637	55,461	-1,0637	0,33

Un factor importante que afectaba el caudal en las subcuencas 3 y 4 fue el trasvase Tajo-Segura. Comienza en los embalses de Entrepeñas y Buendía, abajo se encuentra el embalse de Bolarque. Cuando se pone en funcionamiento el trasvase a finales de 1970s, la cabecera del Tajo perdió mucha aportación. Las subcuencas 3 y 4 e incluso la integración de la cuenca del Tajo Alto se han visto muy afectadas. Bernad, G. et al. (2006) señalaron que la disminución del caudal del Tajo Alto no se debe solo a la disminución de las aportaciones naturales, sino que el Trasvase Tajo-Segura transfiere el 70% del agua del Tajo Alto. Se ha enviado más agua por el canal del trasvase que por el propio cauce natural del Tajo.

Se ve en la Tabla 17 que la precipitación y el caudal de la estación 3011 de la subcuenca 5 en 1955-1975 no mostraron una disminución significativa. Pero la tendencia decreciente del caudal fue mayor. La Figura 32 muestra el resultado de la prueba de Pettitt de la estación 3011 en la subcuenca 5. S sabe que en la estación 3011 hubo un cambio repentino significativo en 1959. Se realiza un análisis de regresión lineal sobre la precipitación y el caudal durante 1955-1959 y 1960-1975, como se muestra en la Tabla 18. La precipitación disminuyó a una tasa de 4,7818 mm/a desde 1955-1959, mientras que el caudal anual aumentó a 3,9865 m³/s/a. El coeficiente de correlación entre los dos fue 0,70 (relación alta). Esto muestra que los dos estaban altamente correlacionados. Sin embargo, el espacio de tiempo de los datos es de solo 5 años, se especula que algunas actividades humanas durante estos cinco años han causado el aumento del caudal. De 1960 a 1975, la precipitación disminuyó a una tasa de 5,2395 mm/a y el caudal disminuyó a una tasa de 1,6769 m³/s/a. El coeficiente de correlación fue 0,09 (relación muy baja). La disminución del caudal tras el cambio brusco se vio afectada principalmente por otros factores además de la precipitación. Porque la subcuenca 5 pertenece a la Comunidad de Madrid, una comunidad grande y densamente poblada. El Tajo abastece de agua a los pueblos de los alrededores y también proporciona riego agrícola, lo que conduce a un aumento en la extracción de agua del río.

Tabla 17. Estadísticas de Mann-Kendall (valor Z) de precipitación y caudal de 1955-1975 de Estación 3011 de la subcuenca 5 del Tajo Alto.

Z de Precipitación	Z de Caudal
-0,03	-0,09

Nota: * significa pasar la prueba de significancia con un 95% de confiabilidad.

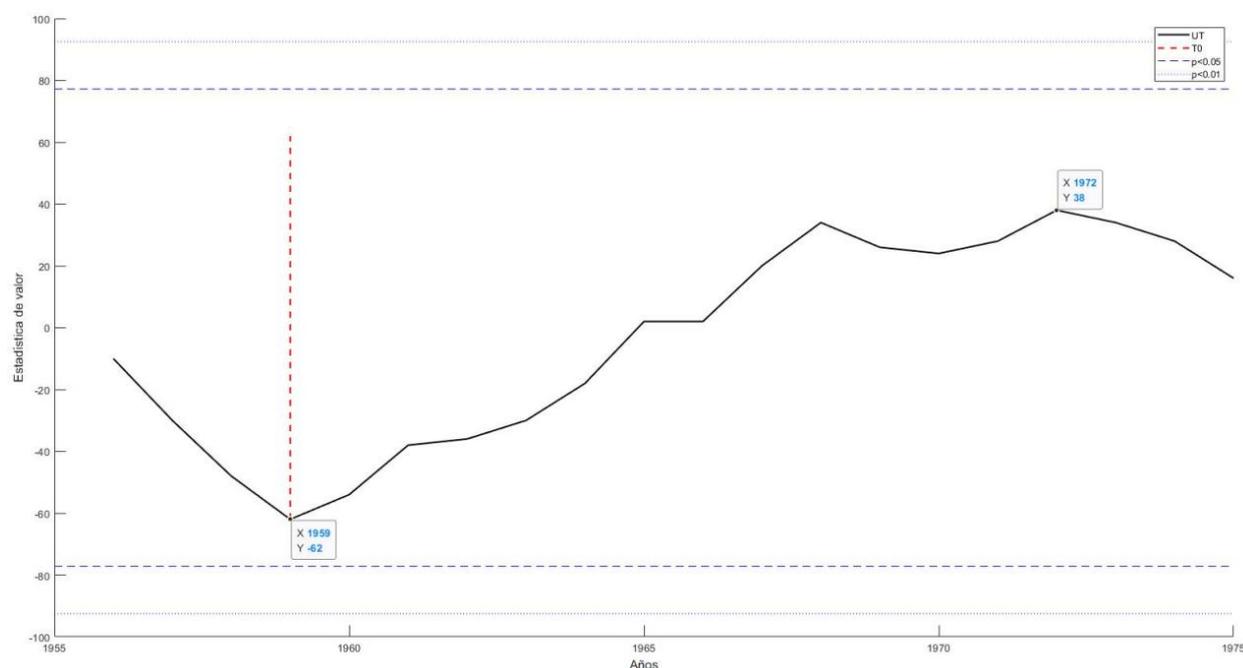


Figura 32. Resultado de la prueba de Pettitt de Estación 3011 de la subcuenca 5 del Tajo Alto.

Tabla 18. Análisis de los cambios de precipitación y caudal anuales antes y después del cambio abrupto en 1955-1975 de Estación 3011 de la subcuenca 5 del Tajo Alto.

Años	Resultados del análisis de regresión lineal de precipitación		Tasa de cambio de precipitación mm/a	Resultados del análisis de regresión lineal de caudal		Tasa de cambio de caudal m ³ /s/a	Coeficiente de correlación de Pearson
	b	a		b	a		
1955-1959	-4,7818	526,54	-4,7818	3,9865	16,126	3,9865	0,70
1960-1975	-5,2395	500,27	-5,2395	-1,6769	54,705	-1,6769	0,09

Se encuentra en la Tabla 19 que durante 1980-2002, la precipitación en la estación 3258 en la subcuenca 5 mostró un aumento no significativo y el caudal mostró una disminución muy significativa. La Figura 33 muestra el resultado de la prueba Pettitt de la estación 3258 en la subcuenca 5. Se muestra que en la estación 3258 hubo un cambio repentino significativo en 1992. Se realiza un análisis de regresión lineal sobre la precipitación y el caudal durante 1980-1992 y 1993-2002, como se muestra en la Tabla 20. La precipitación aumentó a una tasa de 0,2707 mm/a de 1980 a 1992, y el caudal disminuyó a 0,8143 m³/s/a. El coeficiente de correlación entre los dos fue 0,05 (relación muy baja). Esto muestra que la disminución del

caudal se vio afectada principalmente por otros factores además de la precipitación, como la extracción de agua para la industria y la agricultura. Durante 1993-2002, la precipitación aumentó a una tasa de 5,2785 mm/a y el caudal aumentó a una tasa de 0,1538 m³/s/a. El coeficiente de correlación fue 0,54 (relación moderada). Esto muestra que el aumento del caudal se vio moderadamente afectado por el aumento de las precipitaciones.

Tabla 19. Estadísticas de Mann-Kendall (valor Z) de precipitación y caudal de 1980-2002 de Estación 3258 de la subcuenca 5 del Tajo Alto.

Z de Precipitación	Z de Caudal
0,32	-3,43**

Nota: * significa pasar la prueba de significancia con un 95% de confiabilidad.

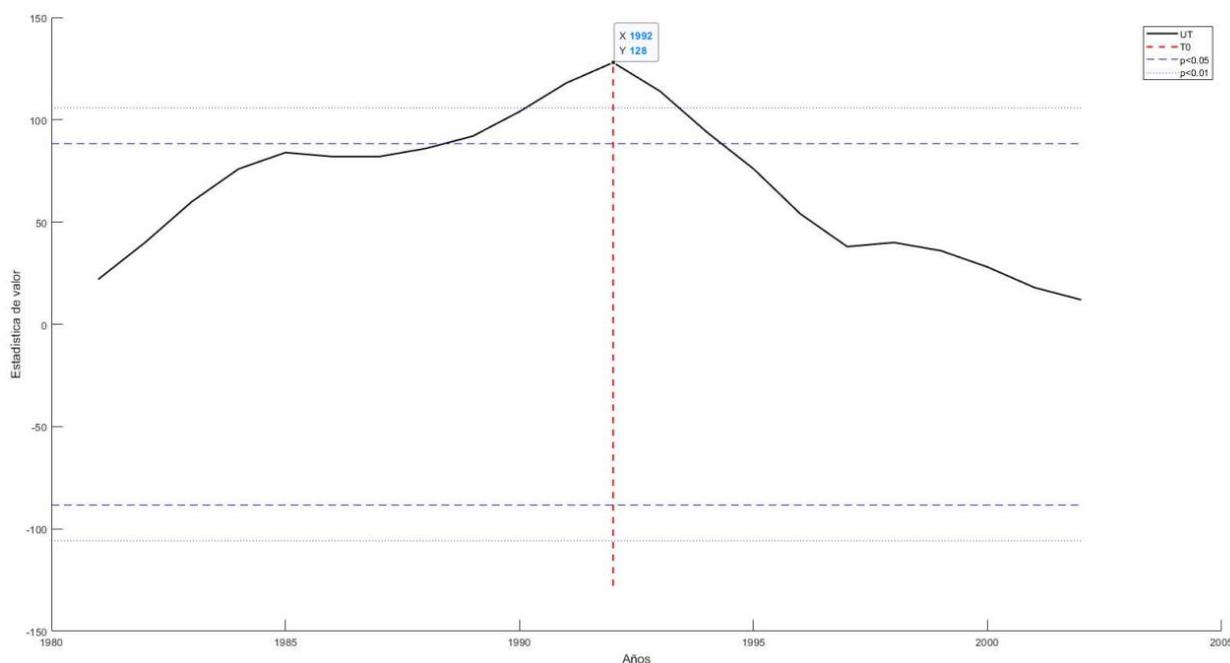


Figura 33. Resultado de la prueba de Pettitt de Estación 3258 de la subcuenca 5 del Tajo Alto.

Tabla 20. Análisis de los cambios de precipitación y caudal anuales antes y después del cambio abrupto en 1980-2002 de Estación 3258 de la subcuenca 5 del Tajo Alto.

Años	Resultados del análisis de regresión lineal de precipitación		Tasa de cambio de precipitación mm/a	Resultados del análisis de regresión lineal de caudal		Tasa de cambio de caudal m ³ /s /a	Coeficiente de correlación de Pearson
	b	a		b	a		
	1980-1992	0,2707		398,06	0,2707		
1993-2002	5,2785	377,17	5,2785	0,1538	6,4195	0,1538	0,54

Desde un punto de vista integral, excepto en Estación 3258, la precipitación y el caudal de cada subcuenca del Tajo Alto mostraron una tendencia decreciente. La disminución de las precipitaciones se debe principalmente al cambio climático. Bernad, G. et al. (2006) señalaron que debido a la acusada inercia de la Oscilación del Atlántico Norte a estancarse en una fase positiva recurrente en las últimas décadas, la Península Ibérica está bajo la influencia de la circulación anticiclónica, por lo que las precipitaciones han disminuido significativamente (especialmente desde la década de 1970). Este fenómeno es particularmente evidente en la cuenca del Tajo, lo que ha provocado una disminución de las aportaciones naturales del Tajo Alto. Además, la temperatura media aumentó en 1,5°C de 1971 a 2000, el aumento de la evaporación, la disminución de la nieve y las heladas, todo lo cual afectó negativamente el caudal del Tajo. El trasvase masivo de recursos hídricos del trasvase Tajo-Segura también juega un gran papel en la reducción del caudal.

5.4. Análisis de la tendencia de las precipitaciones en la cuenca del Guadarrama

5.4.1. Distribución de las precipitaciones intra-anual

Las estadísticas de precipitación mensual (promedio multianual) de cada estación (MOPREDAS) en cada subcuenca del Guadarrama desde 1945 hasta 2005 mostraron que la distribución durante el año fue sumamente desigual. Las figuras 34 y 35 muestran las precipitaciones mensuales y las proporciones de las dos subcuencas. De ellas se puede ver que las tendencias de las

precipitaciones en las dos subcuencas fueron aproximadamente mismas. El período de mayor precipitación del año fue de octubre a diciembre (otoño), lo que representaba aproximadamente el 35% de la precipitación anual. Julio y agosto fueron los meses con menos precipitaciones del año, representando alrededor del 4% de las precipitaciones del año. La precipitación en abril y mayo en la subcuena 2 fue mayor, segundo solo de octubre a diciembre.

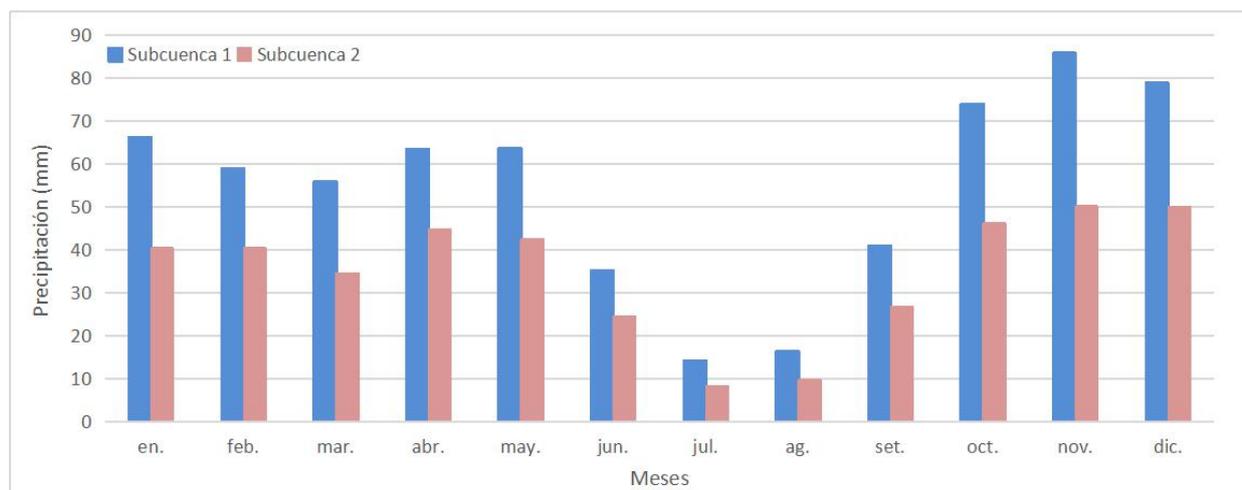


Figura 34. De 1945 a 2005, las precipitaciones mensuales en las subcuencas del Guadarrama.

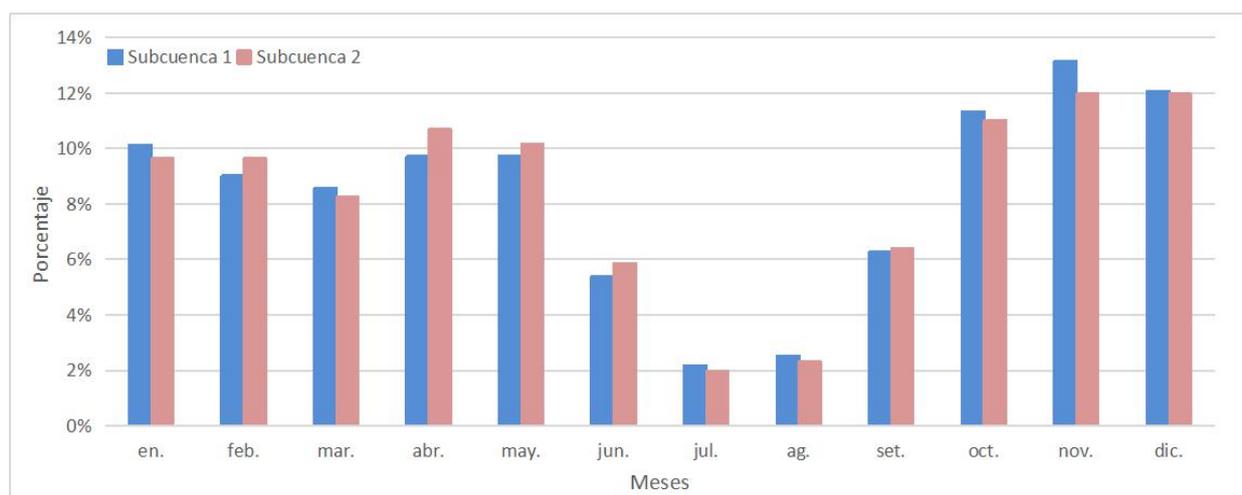


Figura 35. De 1945 a 2005, las proporciones de las precipitaciones mensuales en las subcuencas del Guadarrama.

5.4.2. Distribución de las precipitaciones interanual

Las estadísticas de precipitación anual de cada estación (MOPREDAS) en cada subcuenca del Guadarrama desde 1945 hasta 2005 mostraron que la distribución interanual fue desigual. Las figuras 36 y 37 muestran la precipitación anual y el promedio anual de las dos subcuencas, se puede ver que la precipitación fluctuó entre diferentes años. La precipitación máxima anual de la subcuenca 1 apareció en 1972, que fue de 1032,8 mm, la máxima anual de la subcuenca 2 apareció en 1955 que fue de 704,0 mm. La precipitación media anual de la subcuenca 2 fue aproximadamente 200 mm menor que la de la subcuenca 1.

Desde un punto de vista general, la precipitación en estas dos subcuencas ha disminuido desde la década de 1980. Y desde entonces, la mayoría de los datos en cada subcuenca estaban por debajo del promedio suyo. Desde la perspectiva del promedio de 61 años, la precipitación desde arriba (subcuenca 1) hasta abajo (subcuenca 2) ha disminuido.

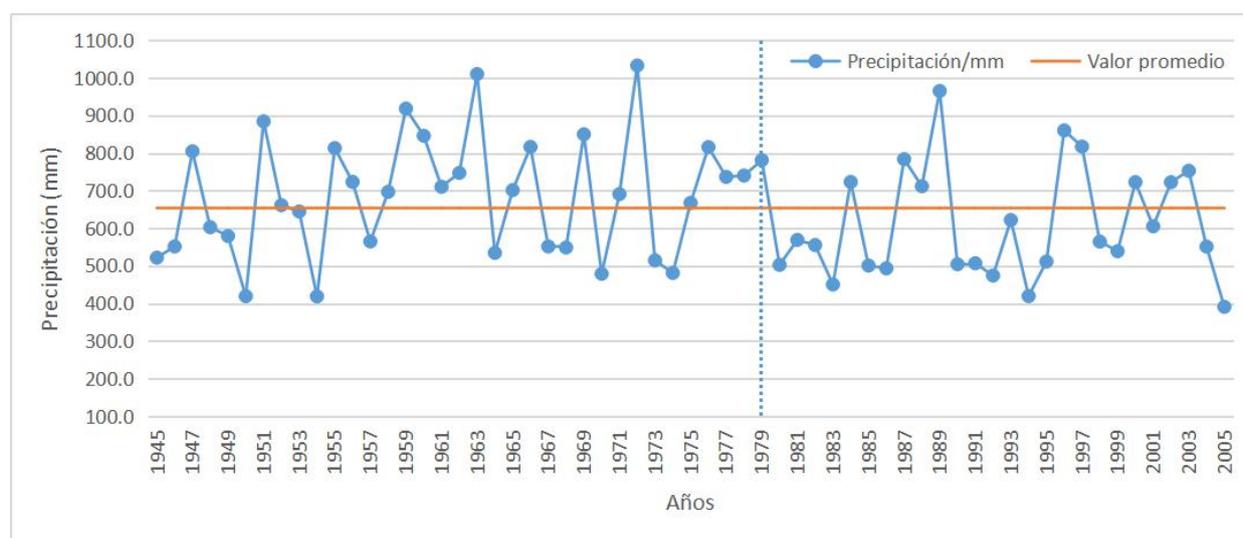


Figura 36. De 1945 a 2005, las precipitaciones anuales de la subcuenca 1 del Guadarrama.

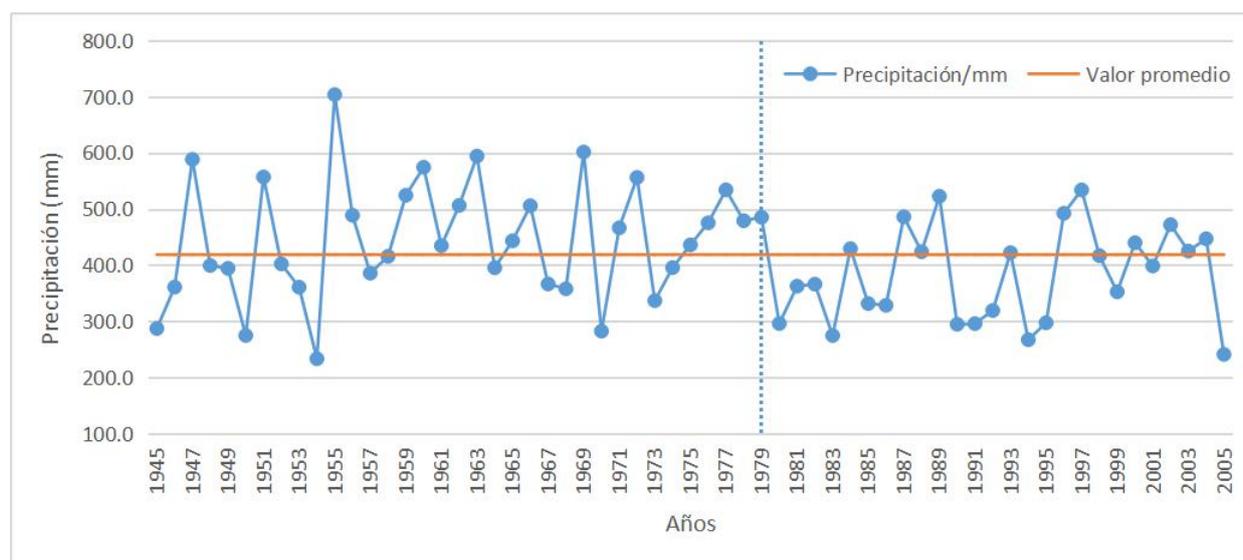


Figura 37. De 1945 a 2005, las precipitaciones anuales de la subcuenca 2 del Guadarrama.

5.4.3. Cambio de tendencia de precipitación interanual

Se puede observar en la Tabla 21 que la Z de cada subcuenca del Guadarrama es negativa durante todo el año, lo que indica que la precipitación en la cuenca del Guadarrama entre 1945 y 2005 tuvo una tendencia decreciente, pero ninguna de ellas ha superado el valor de la prueba de significancia del 95%. La tendencia menor no fue significativa.

Mediante la prueba de significancia y análisis de los datos mensuales, se puede encontrar que las dos subcuencas del Guadarrama tuvieron una tendencia decreciente en enero-abril, junio-julio, septiembre y diciembre, y un incremento no significativo en los meses restantes. La tendencia decreciente en marzo fue significativa.

Tabla 21. Estadísticas de precipitación de Mann-Kendall (valor Z) de las subcuencas del Guadarrama (1945-2005)

Subcuencas del Guadarrama	Todo el año	en.	feb.	mar.	abr.	may.	jun.	jul.	ag.	set.	oct.	nov.	dic.
1	-0,92	-0,29	-0,48	-2,51*	-0,91	0,36	-1,83	-0,22	0,01	-0,60	1,26	0,05	-0,38
2	-1,06	-1,01	-0,93	-2,13*	-0,71	0,04	-1,91	-1,01	0,33	-0,73	1,52	0,55	-0,32

Nota: * significa pasar la prueba de significancia con un 95% de confiabilidad.

** indica pasar la prueba de significancia con un 99% de confiabilidad.

5.4.4. Predicción futura de precipitación interanual

Se puede observar en la Tabla 22 que todos los valores de H (Coeficiente de Hurst) son mayores a 0,5, lo que indica que la secuencia de precipitaciones tendrá la misma tendencia cambiante en el futuro que el pasado. Y en la Tabla 21 en 5.4.3, se ve que la Z de cada subcuenca es negativa, lo que indica que la precipitación en la cuenca del Guadarrama entre 1945 y 2005 mostró una tendencia decreciente. Se puede predecir que las precipitaciones seguirán disminuyendo después de 2005.

Tabla 22. Predicción futura de precipitación interanual de las subcuencas del Guadarrama (1945-2005)

Subcuencas del Tajo Alto	H	Z
1	0,65	-0,92
2	0,78	-1,06

Nota: H- Coeficiente de Hurst; Z-Estadísticas de Mann-Kendall (1945-2005)

5.5. Análisis de la tendencia de los caudales en la cuenca del Guadarrama

5.5.1. Distribución de los caudales intra-anual

Las estadísticas del caudal medios mensual en la subcuenca 1 del Guadarrama de 1963 a 2001 mostraron que la distribución fue extremadamente desigual, como en la Figura 38. Se muestra que aumentaron gradualmente de enero a febrero y de agosto a diciembre, disminuyeron gradualmente de febrero a agosto. El caudal máximo del año fue en febrero a 4,97 m³/s, el mínimo fue en agosto a 0,12 m³/s.

La Figura 39 presenta un diagrama estadístico del caudal medio mensual en la subcuenca 2 del Guadarrama de 1963 a 1992. Se encuentra que la distribución durante el año también fue extremadamente desigual. La tendencia de cambio fue aproximadamente la misma que la de la subcuenca 1 pero el valor de cada mes fue solo aproximadamente la mitad del valor de la subcuenca 1. El caudal máximo anual fue en febrero a 9,41 m³/s y el mínimo fue en agosto a 1,67 m³/s.

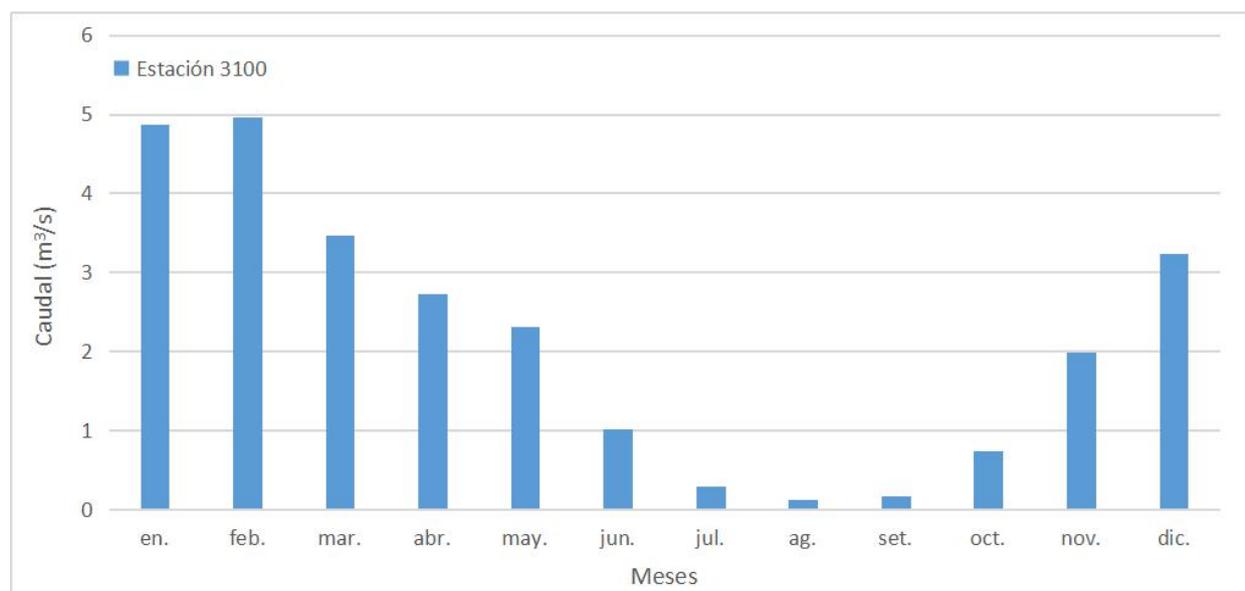


Figura 38. De 1963 a 2001, los caudales medios mensuales del Guadarrama en Villalba (subcuenca 1).

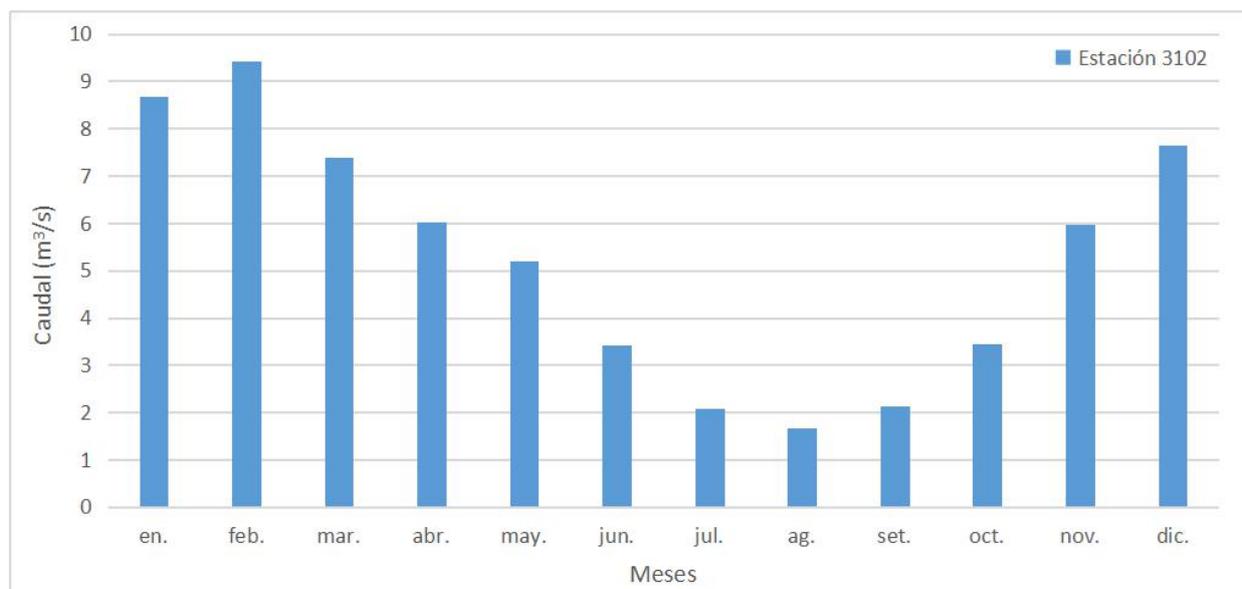


Figura 39. De 1963 a 1992, los caudales medios mensuales del Guadarrama en Bargas (subcuenca 2).

5.5.2. Distribución de los caudales interanual

Las siguientes figuras muestran el caudal medio anual y el promedio de cada estación en subcuencas 1 y 2. El caudal máximo de la subcuenca 1 apareció en 1972, que estuvo cerca de los $5,32 \text{ m}^3 / \text{s}$. El caudal máximo de la subcuenca 2 apareció en 1979, que fue de $18,02 \text{ m}^3 / \text{s}$. No se encuentra ninguna ley obvia a partir de las dos figuras, y el caudal en cada subcuenca fluctuó en su conjunto. Sin embargo, el caudal promedio de la subcuenca 2 fue aproximadamente 2,5 veces mayor que el de la subcuenca 1.

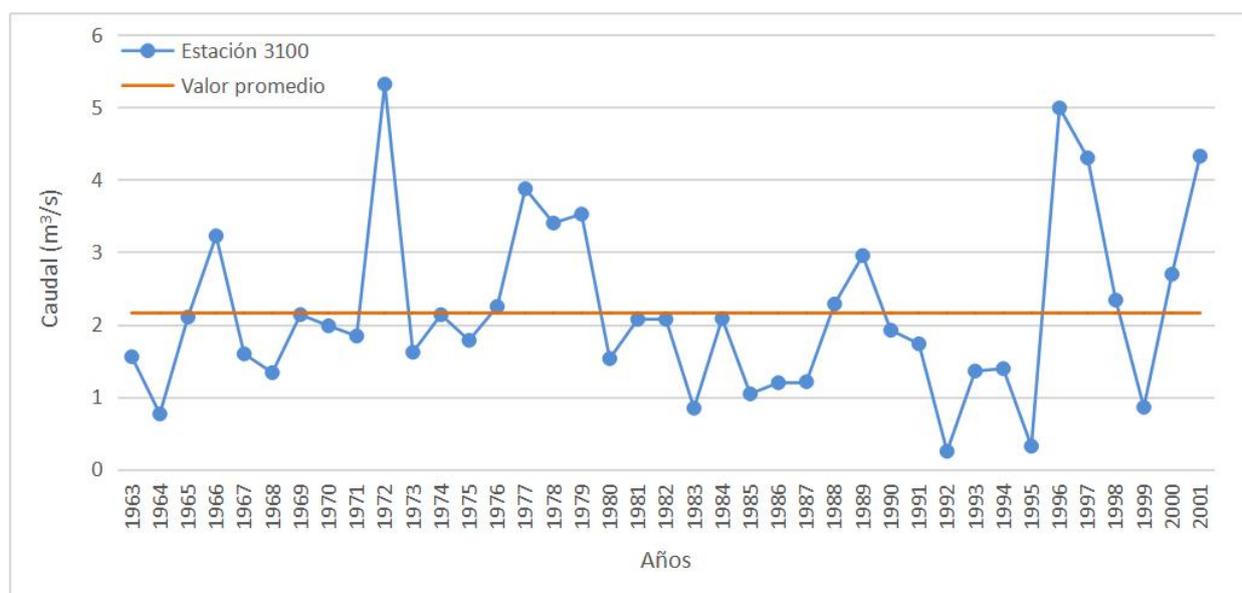


Figura 40. De 1963 a 2001, los caudales medios anuales del Guadarrama en Villalba (subcuenca 1).

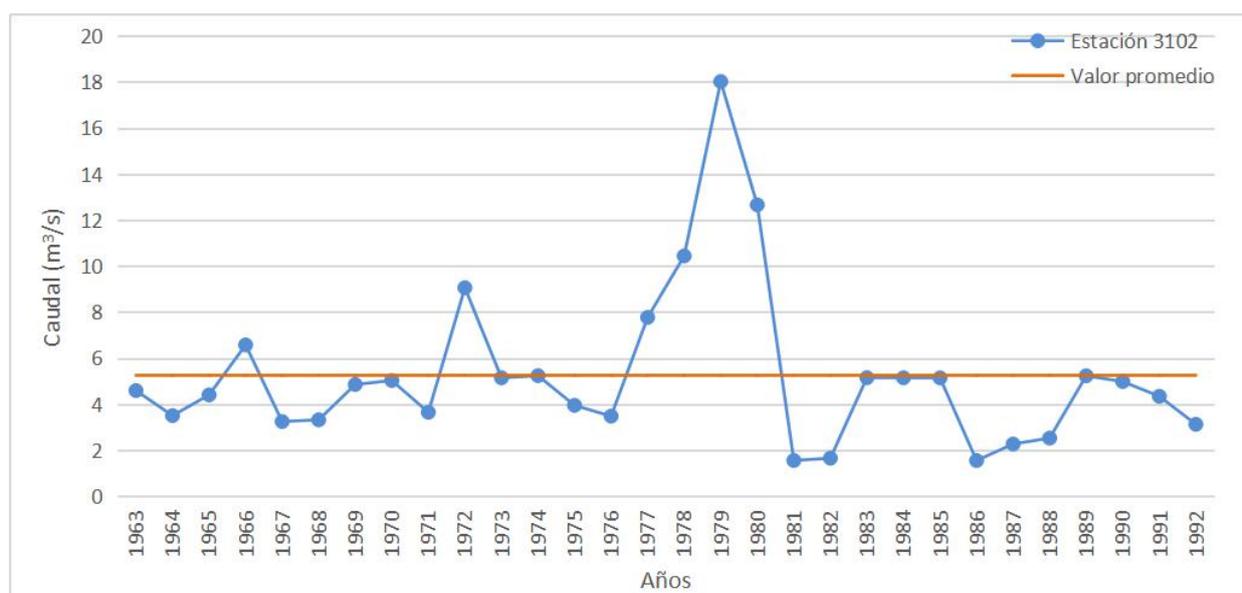


Figura 41. De 1963 a 1992, los caudales medios anuales del Guadarrama en Bargas (subcuenca 2).

5.5.3. Cambio de tendencia de caudal interanual

La Tabla 23 muestra los valores de la prueba Mann-Kendall del caudal de cada subcuenca en la cuenca del Guadarrama. Se puede observar que la Z de subcuenca 1 es negativa durante todo el año, lo que indica que los caudales de subcuenca 1 tuvieron una tendencia decreciente entre 1963 y 2001. Pero no pase el valor de la prueba de significancia del 95%, lo que significa que la

tendencia decreciente fue no significativa. Hubo una tendencia decreciente de febrero a junio y de octubre a diciembre. La tendencia a la disminución fue obvia en marzo. Hubo una tendencia de crecimiento en los meses restantes, especialmente en agosto y septiembre (verano) hubo un aumento significativo.

De 1963 a 1992, la subcuenca 2 mostró una tendencia decreciente pero no significativa. Hubo una tendencia decreciente no significativa en febrero-abril y octubre, una tendencia creciente en los meses restantes y un aumento muy significativo en julio-septiembre.

Tabla 23. Estadísticas de caudales de Mann-Kendall (valor Z) de las subcuencas del Guadarrama.

Subcuencas del Guadarrama	Estación	Todo el año	en.	feb.	mar.	abr.	may.	jun.	jul.	ag.	set.	oct.	nov.	dic.
1	3100	-0,19	0,33	-0,68	-2,44*	-0,80	-0,19	-0,10	0,16	2,38*	2,14*	-0,22	-0,85	-0,10
2	3102	-0,39	0,05	-1,50	-1,34	-0,27	0,16	1,52	2,60**	2,69**	2,59**	-1,94	0,55	0,91

Nota: (1)* significa pasar la prueba de significancia con un 95% de confiabilidad. ** indica pasar la prueba de significancia con un 99% de confiabilidad. (2) Año de registro de datos: Estación 3100 1963-2001 y Estación 3102 1963-1992.

5.5.4. Predicción futura de caudal interanual

En la Tabla 24 se ve que todos los valores de H (Coeficiente de Hurst) son mayores que 0,5, lo que indica que la secuencia de caudal tendrá la misma tendencia cambiante en el futuro que el pasado. Y en la Tabla 23 de 5.5.3. se ve que los valores Z de la subcuenca 1 y 2 son ambos negativos. Lo indica que la subcuenca 1 mantendrá una tendencia decreciente después de 2001 y la subcuenca 2 mantendrá una tendencia decreciente después de 1992.

Tabla 24. Predicción futura de caudal interanual de las subcuencas del Guadarrama.

Subcuencas del Guadarrama	Estación	H	Z
1	3100	0,75	-0,19
2	3102	0,78	-0,39

Nota: H- Coeficiente de Hurst; Z-Estadísticas de Mann-Kendall (1945-2005)

5.6. Comparación de la relación interanual entre precipitaciones y caudales

Se ve en la Table 25 que durante 1963-2001, la precipitación y el caudal de la subcuenca 1 mostraron una tendencia decreciente no significativa. Pero la tendencia decreciente de la precipitación fue mayor. La Figura 42 muestra los resultados de la prueba Pettitt de la subcuenca 1. Se ve que el caudal tuvo un cambio repentino significativo en 1996. Realizan un análisis de regresión lineal sobre la precipitación y el caudal durante 1963-1996 y 1997-2001, como se muestra en la Tabla 26. La precipitación disminuyó a una tasa de 4,1548 mm/a de 1963 a 1996, y el caudal disminuyó a una tasa de 0,0116 m³/s/a. El coeficiente de correlación entre los dos fue 0,67 (relación alta). En 5.4.2 se sabe que las precipitaciones han reducido considerablemente desde 1979. Por lo tanto, la disminución del caudal entre 1963 y 1996 se vio afectada en gran medida por la disminución de las precipitaciones. Durante 1997-2001, la precipitación disminuyó grandemente a una tasa de 26,756 mm/a y el caudal anual aumentó a una tasa de 0,0404 m³/s/a. El coeficiente de correlación entre los dos fue 0,63 (relación alta). La razón de este fenómeno opuesto es el aumento de población en la cuenca y la puesta en servicio de las depuradoras de aguas residuales que vierten al río. Parte del agua proviene de otras cuencas circundantes.

Tabla 25. Estadísticas de Mann-Kendall (valor Z) de precipitación y caudal de 1963-2001 de la subcuenca 1 del Guadarrama.

Z de Precipitación	Z de Caudal
-0,90	-0,19

Nota: * significa pasar la prueba de significancia con un 95% de confiabilidad.

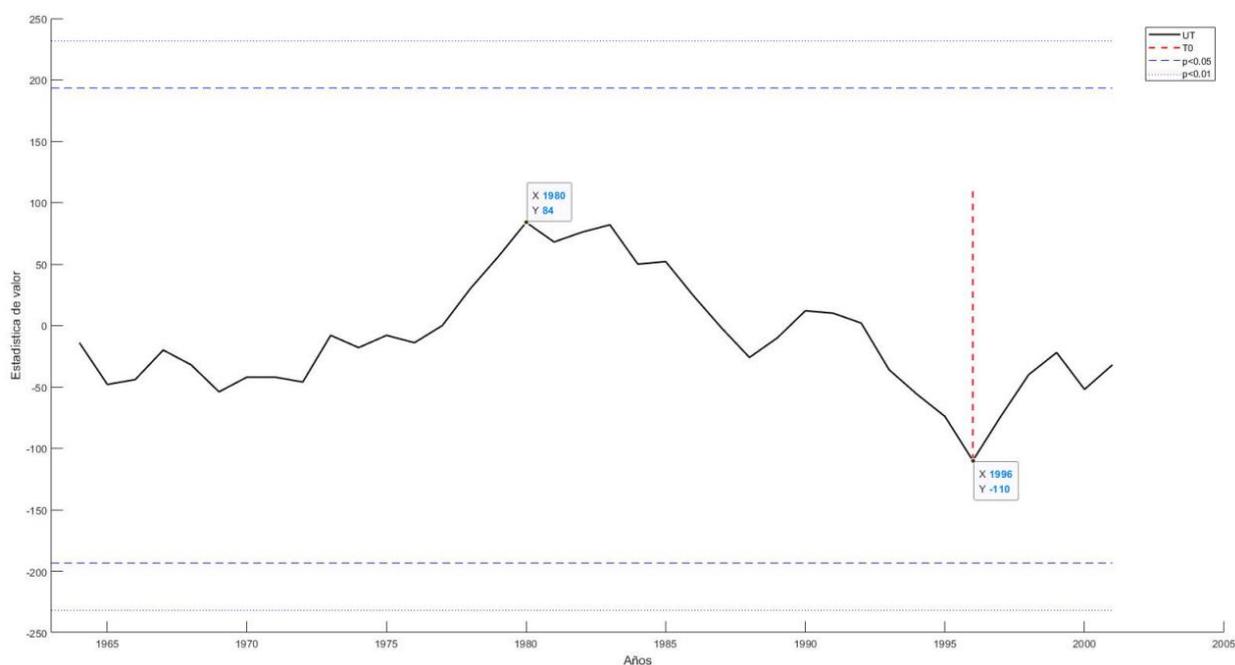


Figura 42. Resultado de la prueba de Pettitt del caudal en la subcuenca 1 del Guadarrama.

Tabla 26. Análisis de los cambios de precipitación y caudal anuales antes y después del cambio abrupto en 1963-2001 de la subcuenca 1 del Guadarrama.

Años	Resultados del análisis de regresión lineal de precipitación		Tasa de cambio de precipitación mm/a	Resultados del análisis de regresión lineal de caudal		Tasa de cambio de caudal m ³ /s/a	Coeficiente de correlación de Pearson
	b	a		b	a		
	1963-1996	-4,1548		722,81	-4,1548		
1997-2001	-26,756	729,4	-26,756	0,0404	2,7821	0,0404	0,63

Se muestra en la Tabla 27 que durante 1963-1992 la precipitación y el caudal de la subcuenca 2 mostraron una tendencia decreciente no significativa. Pero la tendencia decreciente de la precipitación fue mayor. La Figura 43 muestra los resultados de la prueba de Pettitt de la subcuenca 2. Se ve que el caudal hubo un cambio repentino significativo en 1981. Realizan un análisis de regresión lineal sobre la precipitación y el caudal durante 1963-1981 y 1982-1992, como se muestra en la Tabla 28. La precipitación disminuyó a una tasa de 3,2238 mm/a de 1963 a 1981, y el caudal aumentó a una tasa de 0,3278 m³/s/a. El coeficiente de correlación entre los dos fue 0,14 (relación muy baja). De 1982 a 1992, la precipitación anual disminuyó a una tasa de 0,6933 mm/a y el caudal disminuyó a una tasa de 0,0435 m³/s/a. El coeficiente de correlación entre los dos fue 0,09 (relación muy baja). Esto muestra que durante 1963-1992, el caudal de la subcuenca 2 antes y después del cambio repentino en 1981 fue extremadamente irrelevante para los cambios en las precipitaciones. Las actividades humanas han tenido un mayor impacto en los ríos en diferentes períodos.

Tabla 27. Estadísticas de Mann-Kendall (valor Z) de precipitación y caudal de 1963-1992 de la subcuenca 2 del Guadarrama.

Z de Precipitación	Z de Caudal
-0,97	-0,39

Nota: * significa pasar la prueba de significancia con un 95% de confiabilidad.

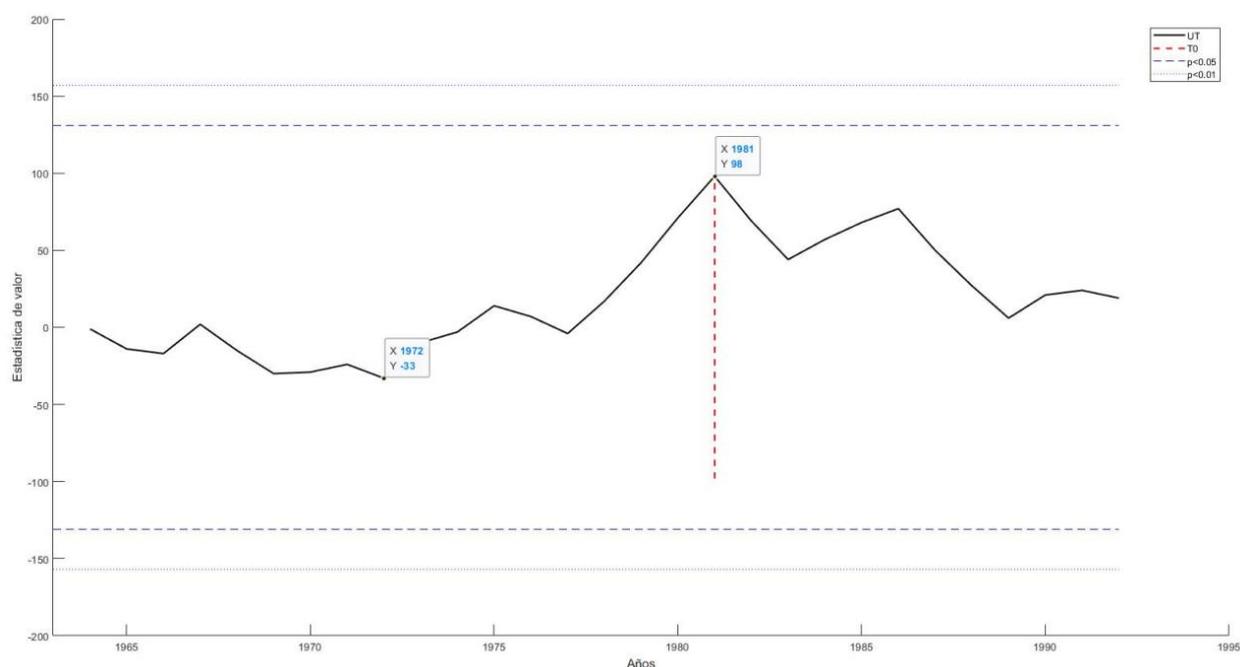


Figura 43. Resultado de la prueba de Pettitt del caudal en la subcuena 2 del Guadarrama.

Tabla 28. Análisis de los cambios de precipitación y caudal anuales antes y después del cambio abrupto en 1963-1992 de la subcuena 2 del Guadarrama.

Años	Resultados del análisis de regresión lineal de precipitación		Tasa de cambio de precipitación mm/a	Resultados del análisis de regresión lineal de caudal		Tasa de cambio de caudal m ³ /s/a	Coeficiente de correlación de Pearson
	b	a		b	a		
1963-1981	-3,2238	472,95	-3,2238	0,3278	2,8536	0,3278	0,14
1982-1992	-0,6933	374,49	-0,6933	-0,0435	3,4790	-0,0435	0,09

Del análisis anterior se desprende que los cambios de caudales y precipitaciones en la cuenca del Guadarrama fueron relativamente asincrónicos, y el cambio brusco estaba íntimamente relacionado con la interferencia de las actividades humanas. La subcuena 1 es adyacente a Madrid, lo que da lugar a un gran número de zonas urbanas a su alrededor, que está muy urbanizada. La subcuena 2 está rodeada principalmente de tierras de trabajo y cultivos asociados, con muy pocos bosques. Por lo tanto, las actividades humanas como la deforestación, la recuperación de tierras y el riego de tierras de cultivo tienen un impacto en el río.

Desde un punto de vista integral, la precipitación y el caudal de cada subcuena del Guadarrama

mostraron una tendencia decreciente. La disminución de las precipitaciones se vio afectada principalmente por el cambio climático, y la disminución de las precipitaciones condujo directamente a una disminución del caudal. Además, GRAMA (Grupo de Acción para el Medio Ambiente) (2009) señaló que , la ingeniería hidráulica (embalses, transporte de arena, riego ...) del Guadarrama han provocado los cambios más importantes en el sistema hídrico, que pueden hacer insuficiente el agua del río para antener los ecosistemas terrestres y acuáticos. El caudal del Guadarrama se ve afectado por las instalaciones de conservación de agua que se muestran en 3.6.

5.7. Autocrítica metodológica

La siguiente figura muestra la dispersión de las tasas de cambio de precipitación y caudal antes y después del punto de mutación en cada cuenca de los dos ríos. Como se ve, hay tres outliers. Se presume que la razón del outlier 1 y 2 es que el intervalo de tiempo es demasiado pequeño, los datos no pueden reflejar una ley. Ambos tienen 4 años como intervalo, que es extremadamente pequeño para la investigación del cambio climático. Esto también es causado por muy pocos años con datos registrados de caudal. El intervalo de tiempo del outlier 3 es de 15 años, aunque el tiempo es relativamente corto, se considera un nivel medio desde la perspectiva de todos los datos. Su existencia puede considerarse normal, es un fenómeno extremo que existe.

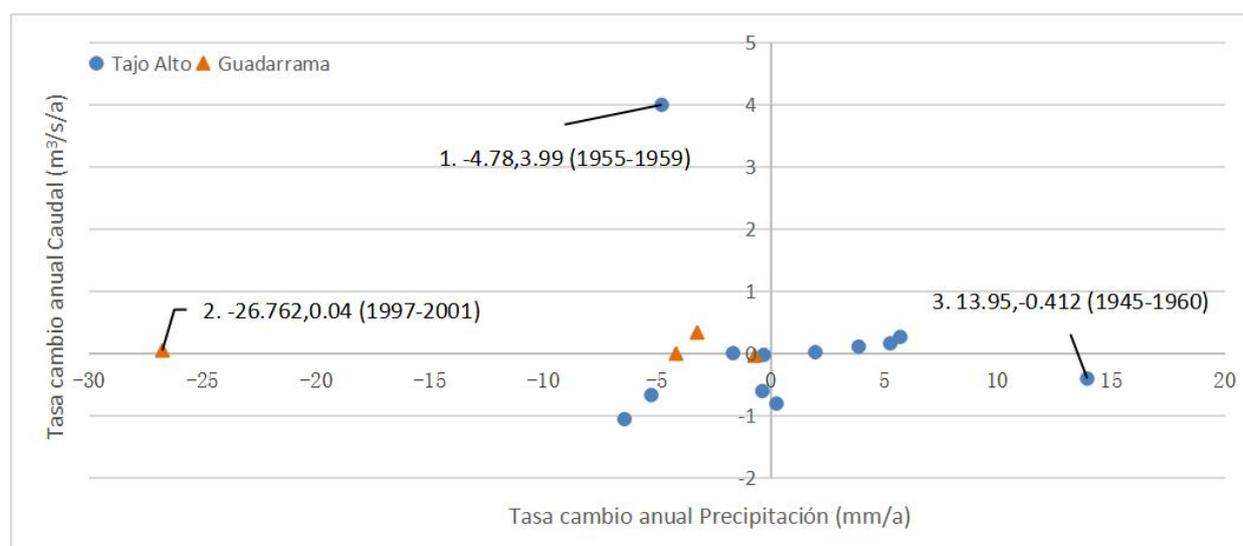


Figura 44. La dispersión de las tasas de cambio de precipitación y caudal.

6. Conclusiones

- Del análisis anterior, sabemos que las precipitaciones en las cuencas del Tajo Alto y Guadarrama mostraron una tendencia general a la baja desde 1945 hasta 2005 y continuarán en el futuro. La principal razón del descenso fue el impacto de la circulación anticiclónica y el aumento de la temperatura, es decir, el impacto del cambio climático.

- En la cuenca del Tajo de 1945 a 2005, los cambios intra-anales de precipitación en las subcuencas 1-4 fueron los mismos: todos disminuyeron en enero-marzo, mayo-septiembre y diciembre; aumentaron en abril, octubre y noviembre. En la subcuenca 5 fue ligeramente diferente: disminuyeron en enero-abril, junio-septiembre y diciembre; aumentaron en mayo octubre y noviembre.

- En la cuenca del Guadarrama de 1945 a 2005, los cambios intra-anales de precipitación en las dos subcuencas tuvieron el mismo patrón: disminuyeron en enero-abril, junio-julio, septiembre y diciembre, y aumentaron en los meses restantes.

- En los años válidos con datos registrados de caudal, la precipitación y el caudal en las subcuencas del Tajo Alto (excepto en la Estación 3258 de la subcuenca 5) y las subcuencas del Guadarrama mostraron una tendencia a la baja pero con diferente magnitud. En la estación 3258 las precipitaciones mostró un aumento no significativo 1955 y 1975. En cada subcuenca se produjeron cambios repentinos del caudal en sus respectivos intervalos de tiempo. En Tajo Alto precipitaciones y caudales van al unisono en las subcuencas 1-3. Pero en las subcuencas 4 y 5 encontramos ambos tipos de tendencias opuestas: aumentos de precipitación con disminución de caudales y disminución de precipitación con aumento de caudales. En el Guadarrama hay periodos en que la precipitación baja y los caudales suben.

7. Las metodologías de afrontar el cambio climático durante una restauración fluvial

El calentamiento global hará que la Península Ibérica sufra cada vez más escasez de agua, menos nieve y menos precipitación provocarán un menor caudal y, en última instancia,

provocarán graves pérdidas económicas. Para ríos como el Tajo que dependen del deshielo, se verán afectados por un mayor calentamiento global.

Para la restauración ecológica de los ríos, se debe considerar cómo mejorar la resiliencia del ecosistema fluvial en respuesta a los cambios en las condiciones climáticas. La restauración de la conectividad fluvial es particularmente importante. La conectividad del río es un prerrequisito y una base importante para que el río mantenga su estructura ecológica y realice sus funciones ecológicas básicas. Una buena conectividad puede promover el ciclo material y energético de los ecosistemas fluviales. Sin embargo, las presas y otras barreras transversales tiene un gran impacto en la conectividad del río, que es la principal causa de la fragmentación longitudinal. España se convirtió en uno de los cinco primeros países con mayor número de este tipo de infraestructuras y el primer país de la Unión Europea (Olivo del Amo et al. 2018).

Actualmente desde una perspectiva de mediano y largo plazo, la eliminación de presas su función se considera una de las herramientas más efectivas para restaurar la calidad ecológica de los ríos. Algunas presas descartadas quedarán bloqueadas por sedimentos y causarán daños. Los administradores de ríos deben formular estrategias y planes basados en las condiciones reales, considerar la rentabilidad para decidir cuales instalaciones deben eliminarse, cómo minimizar el impacto de las instalaciones en uso en el medio ambiente y maximizar sus beneficios económicos (Magdaleno 2018). La eliminación de las presas puede garantizar el flujo y la velocidad del río y mejorar la capacidad de autopurificación y dilución del río para proteger la calidad del agua (Ojeda 1995).

Para las presas importantes que sigan teniendo interés económico-social, se pueden construir pasos a peces para garantizar la conectividad vertical. Esto permite que los peces migratorios pasen de un lado del obstáculo al otro para asegurar la migración y reproducción. Se puede garantizar la calidad y cantidad de agua de los tramos superiores del río, por lo que se utilizan dispositivos de guía físicos para atraer especies objetivoas a la entrada del paso e incitarlas a los tramos superiores del río (Martínez de Azagra Paredes 1999). En el caso de los sedimentos fluviales que se han generado, conviene distribuirlos con el fin de evitar atascos o incluso mejorar la forma natural del río.

Para la conectividad transversal del río, se debe restaurar la orilla del río eliminando barreras

longitudinales y favoreciendo la regeneración natural. Plantan vegetaciones de acuerdo con los diferentes requisitos de agua para restaurar una zona de amortiguamiento ribereña completa. En ingeniería hidráulica ecológica, deben comenzar a mejorar los materiales de protección bancaria para evitar el endurecimiento de los materiales y obstaculizar el crecimiento y desarrollo de las vegetaciones (Guo 2012).

Bibliografía

- Anguiano Mañero, A. M. 2010. *Movilidad del nitrógeno, fosforo y metales pesados, su relación con la zona edáfica y la afección producida en la cuenca del río Guadarrama*. Tesis de Doctorado, Universidad Autónoma de Madrid, España.
- Bernad, G., Soledad, M., Pérez, S., Ángel, M. 2006. *La destrucción ambiental del río Tajo: orígenes, procesos y consecuencias*. Informe de V congreso Ibérico sobre Gestión y Planificación del Agua, Fundación Nueva Cultura del Agua, Faro, Portugal. Disponible en : www.justiciambiental.es/home.php/trabajos/La_destruccion_ambiental_del_rioTajo.pdf
- Carcavilla, L., Ruiz, R., Rodríguez, E. 2011. *Guía geológica del parque natural del alto tajo*. Instituto Geológico y Minero de España, Madrid, España.
- Confederación Hidrográfica del Tajo. 2017. *Memoria 2017*. Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente, Madrid, España. Disponible en : www.chtajo.es/Confederacion/Documents/memorias/MEMORIA%202017%20CHT.pdf.
- González-Hidalgo, J. C., Brunetti, M., De Luis, M. 2011. A new tool for monthly precipitation analysis in Spain: MOPREDAS database (monthly precipitation trends December 1945-November 2005). *International Journal of Climatology* 31: 715-731.
- Grupo de Acción para el Medio Ambiente. 2009. *Estado de conservación del Tramo medio del río Guadarrama*. GRAMA. Disponible en : [/www.elsoto.org/wp-content/uploads/2018/11/Informe-Estado-de-Conservacion-del-Tramo-Medio-del-Rio-Guadarrama-2009.pdf](http://www.elsoto.org/wp-content/uploads/2018/11/Informe-Estado-de-Conservacion-del-Tramo-Medio-del-Rio-Guadarrama-2009.pdf).
- Grupo de Expertos de ONU-Agua sobre el Agua y el Cambio Climático. 2019. *Informe de políticas de ONU-AGUA sobre el Cambio Climático y el Agua*. ONU-Agua. Disponible en : www.unwater.org/app/uploads/2019/12/UN-Water_PolicyBrief_Water_Climate-Change_ES.pdf.
- Guo, H. J. 2012. Investigación sobre el desarrollo y la situación actual de los ingeniería hidráulica ecológica. *Tecnología de ingeniería hidráulica de Heilongjiang* 40 : 277-279.
- Hurst, H. E. 1951. Long-Term Storage Capacity of Reservoirs. *Transactions of the American Society of Civil Engineers* 116(1): 770-799.
- Iglesias, A., Estrela, T., Gallart, F. 2005. Impactos sobre los recursos hídricos. En Moreno Rodríguez, J.M. (Coord.), *Evaluación preliminar de los impactos en España por efecto del cambio climático*, pp.

303-354, Ministerio de Medio Ambiente y Universidad de Castilla-La Mancha, España.

Li, G. X., Xu, X. X. 2006. Nueva discusión sobre si los bosques pueden incrementar la precipitación y el caudal anual total. *Revista de la Universidad Forestal del Noroeste* 12 (1): 1-6.

Magdaleno, F. 2018. Opinión. Presas y azudes en España: ¿cómo podemos mejorar la conectividad de nuestros ríos?. *Montes* 133 : 37-38.

Martínez de Azagra Paredes, A. 1999. *Escalas para peces*. Publicaciones E.T.S.II.AA. nº 26. Universidad de Valladolid, Palencia, España.

Ojeda, A. O. 1995. Restauración ambiental, social y territorial frente a los impactos generados por los embalses. *Geographicalia* (32) : 139-153.

Olivo del Amo, R., Garrido Espinosa, S., Rodríguez Ruíz, C., Dopico Rodríguez, E., García Vázquez, E., Fernández Garrido, P. et al. 2018. *El Proyecto Amber: Soluciones para la mejora de la conectividad fluvial basadas en la gestión de las barreras transversales. Comunicación técnica escrita* de congreso nacional del medio ambiente. World Fish Migration Foundation. España. Disponible en : www.conama2018.org/web/generico.php?idpaginas=&lang=es&menu=438&id=151&op=view&tipo=C

Peláez, I. M. 2006. Medidas de asociación. En Serra, A. G., Montero, R. C., *Métodos estadísticos para enfermería nefrológica*, pp. 185-194, SEDEN, España.

Pettitt, A. N. 1979. A non-parametric approach to the change-point problem. *Journal of the Royal Statistical Society. Series C (Applied Statistics)* 28 (2): 126-135.

SNCZI en la Demarcación Hidrográfica del Tajo. 2012. *Evaluación preliminar del riesgo de inundación*. Confederación Hidrográfica del Tajo, Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, Madrid, España. Disponible en : www.chtajo.es/LaCuenca/Planes/Riesgo_inundacion/Documents/EPRI/Memoria_EPRI_Tajo.pdf

Villarreal, F. G., Arriaga, J. A., Alaniz, L. 2018. *Análisis de tendencias para la identificación de la variabilidad climática en la cuenca del río Colorado, EUA-México*. Informe de XXVIII congreso latinoamericano de hidráulica, La Secretaría de Infraestructura y Política Hídrica y el Instituto Nacional del Agua, Buenos Aires, Argentina. Disponible en : www.ina.gov.ar/congreso_hidraulica/index.php?seccion=15.

Yang, J. Y., Zhao, C., Liu, G. S., X, Y. 2017. Análisis de la tendencia de cambio de series hidrológicas

basado en el método de Mann-Kendall y R / S — Tomando la ciudad de Suzhou como ejemplo.

Tecnología de conservación de agua y hidroeléctrica. 48(2): 27-30,137.

Zhang, S. L., Deng, G. Y., Huang, Y. Q. 2014. La realización y aplicación de la prueba de Mann-Kendall en Excel. *Artículos científicos chinos online* 2014-06-27.

Recursos web:

<https://www.datosmundial.com/>

<https://www.iagua.es/data>

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

Agradecimientos

En primer lugar, quiero agradecer a Diego García de Jalón por ejercer un excelente papel como director de este trabajo de fin de máster, por su disposición y apoyo. Además, estoy muy agradecida a todos los profesores del Master de Restauración de Ecosistemas, por todas sus enseñanzas perfectas. Muchísimas gracias a mis compañeros del máster por hacer del mismo una experiencia maravillosa. Finalmente, siendo lo más importante, quiero agradecer a mi familia porque es lo más grande en mi vida. Siempre me apoyan con amor.