



*Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales
y Puertos.*

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



Efectos del cambio climático en los ríos cántabros: el efecto del bosque en la cuenca

Trabajo realizado por:

Izaskun Oleaga Payo

Dirigido:

Alexia Maria González Ferreras

Jose Barquín Ortiz

Titulación:

**Máster Universitario en Gestión Integrada
de Sistemas Hídricos**

Santander, septiembre de 2021

TRABAJO FIN DE MÁSTER

RESUMEN

El cambio climático es uno de los temas que más preocupa a la sociedad en la actualidad, ya que se prevé un aumento generalizado de las temperaturas en todo el planeta y una disminución de las precipitaciones en algunas zonas (IPCC, 2016). Por ello, en este estudio se tratarán los efectos del cambio climático en la temperatura del agua y los caudales de los ríos en las cuencas Asón, Miera y Pas, situadas en Cantabria.

El objetivo de este estudio es analizar los cambios hidrológicos y térmicos y el efecto del bosque sobre la cuenca, para el escenario actual y el escenario futuro debido al cambio climático. Para ello se han analizado los resultados obtenidos de un modelo hidrológico y un modelo de temperatura del agua, aplicándolo a unos puntos de estudio seleccionados de las cuencas. El análisis de los resultados demuestra un aumento de la temperatura del agua y una disminución de los valores de caudales para el escenario de futuro, en todos los puntos estudiados. Además, analizando los resultados de caudales, se llega a la conclusión de que según aumenta el tamaño de cuenca aumenta la cantidad de caudal y que el punto con menor porcentaje de bosque presenta una mayor variación del caudal, pero por el contrario, el punto con mayor porcentaje de bosque presenta la menor variación de caudal. Además, en cuanto a los índices hidrológicos calculados, se ha comprobado el aumento de eventos de mayor magnitud y la reducción de eventos de menor magnitud para el escenario de cambio climático. En cuanto a los resultados de temperatura, se han analizado los datos por porcentaje de bosque y tamaño de cuenca, donde analizando los resultados se ha obtenido la relación entre el valor medio de la temperatura y el porcentaje de bosque, donde para un tamaño de cuenca similar los puntos con mayor porcentaje de bosque presentan un menor valor de temperatura del agua.

Por último, los resultados muestran los efectos del cambio climático en la temperatura del agua y los caudales de los ríos cántabros, modulados por la cantidad de bosque o el tamaño de la cuenca.

Palabras clave: cambio climático, bosque, tamaño de cuenca, temperatura del agua, caudales

ABSTRACT

Climate change is one of the issues that most worries society today, since a general increase in temperatures is expected throughout the planet and a decrease in rainfall in some areas (IPCC, 2016). For this reason, this study will deal with the effects of climate change on water temperature and river flows in the Asón, Miera and Pas basins, located in Cantabria.

The objective of this study is to analyse the hydrological and thermal changes and the effect of the forest on the basin, for the current scenario and the future scenario due to climate change. For this, the results obtained from a hydrological model and a water temperature model have been analysed, applying them to selected study points of the basins. The analysis of the results shows an increase in the water temperature and a decrease in the flow values for the future scenario, in all the points studied. In addition, analysing the flow results, it is concluded that as the size of the basin increases, the amount of flow increases and that the point with the lowest percentage of forest presents a greater variation in the flow, but on the contrary, the point with the highest percentage of forest shows the lowest variation in flow. In addition, regarding the hydrological indices calculated, the increase in events of greater magnitude and the reduction of events of less magnitude have been verified for the climate change scenario. Regarding the temperature results, the data have been analysed by forest percentage and basin size, whereby analysing the results the relationship between the mean value of temperature and the forest percentage has been obtained, where for a basin size similarly, the points with the highest percentage of forest have a lower value of water temperature.

Finally, the results show the effects of climate change on the temperature of the water and the flows of Cantabrian rivers, modulated by the amount of forest or the size of the basin.

Keywords: climate change, forest, basin size, water temperature, flows

ÍNDICE

1. Introducción	1
1.1. Antecedentes y justificación	1
1.2. Objetivos	3
1.2.1. Objetivo general	3
1.2.2. Objetivos específicos	3
2. Material y métodos	4
2.1. Área de estudio	4
2.1.1 Ubicación y topografía	4
2.1.2. Hidrología	5
2.1.3. Ocupación de suelo	8
2.1.4. Clima: escenario actual y futuro.....	11
2.2. Selección de datos.....	17
2.2.1. Selección de puntos de estudio	17
2.2.2. Modelo hidrológico	19
2.2.3. Modelo de temperatura del agua	20
3. Resultados	23
3.1. Modelo hidrológico	23
3.2. Modelo de temperatura del agua	35
4. Discusión	46
5. Conclusión	49
6. Referencias	50

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Cuencas de estudio en Cantabria.....	4
Figura 2. Principales ríos de la cuenca del Asón.....	6
Figura 3. Principales ríos de la cuenca del Miera.....	7
Figura 4. Principales ríos de la cuenca del Pas.....	8
Figura 5. Mapa de ocupación del suelo de la cuenca del Asón.....	9
Figura 6. Mapa de ocupación del suelo de la cuenca del Miera.....	10
Figura 7. Mapa de ocupación del suelo de la cuenca del Pas.....	11
Figura 8. Mapas de clima para la cuenca del Asón en el escenario actual. a) Precipitación media anual. b) Temperatura máxima diaria. c) Temperatura media diaria. d) Temperatura mínima diaria.....	12
Figura 9. Mapas de clima para la cuenca del Miera en el escenario actual. a) Precipitación media anual. b) Temperatura máxima diaria. c) Temperatura media diaria. d) Temperatura mínima diaria.....	13
Figura 10. Mapas de clima para la cuenca del Pas en el escenario actual. a) Precipitación media anual. b) Temperatura máxima diaria. c) Temperatura media diaria. d) Temperatura mínima diaria.....	14
Figura 11. Mapas de clima para la cuenca del Asón en el escenario futuro. a) Precipitación media anual. b) Temperatura máxima diaria. c) Temperatura media diaria. d) Temperatura mínima diaria.....	15
Figura 12. Mapas de clima para la cuenca del Miera en el escenario futuro. a) Precipitación media anual. b) Temperatura máxima diaria. c) Temperatura media diaria. d) Temperatura mínima diaria.....	16
Figura 13. Mapas de clima para la cuenca del Pas en el escenario futuro. a) Precipitación media anual. b) Temperatura máxima diaria. c) Temperatura media diaria. d) Temperatura mínima diaria.....	17
Figura 14. Localización de los puntos de estudio seleccionados.....	19
Figura 15. Caudales para el grupo de porcentaje de bosque <11% en el escenario actual.....	24
Figura 16. Caudales para el grupo de porcentaje de bosque <11% en el escenario futuro.....	25
Figura 17. Caudales para el grupo de porcentaje de bosque >11% <22% en el escenario actual.....	25
Figura 18. Caudales para el grupo de porcentaje de bosque >11% <22% en el escenario futuro.....	26
Figura 19. Caudales para el grupo de porcentaje de bosque >22% en el escenario actual.....	27

Figura 23. Caudales para el grupo de tamaño de cuenca $>75<250 \text{ km}^2$ en el escenario actual.	29
Figura 25. Caudales para el grupo de tamaño de cuenca $>250 \text{ km}^2$ en el escenario actual.....	31
Figura 26. Caudales para el grupo de tamaño de cuenca $>250 \text{ km}^2$ en el escenario futuro.....	31
Figura 30. Temperatura media anual en el escenario actual de cada punto de estudio. El valor medio viene dado por una X, la mediana se presenta con una línea, los límites superior e inferior de los cuadros muestran los percentiles 25 (primer cuartil) y 75 (tercer cuartil) y las rayas exteriores representan los valores máximos y mínimos.....	36
Figura 31. Temperatura media anual en el escenario futuro de cada punto de estudio. . El valor medio viene dado por una X, la mediana se presenta con una línea, los límites superior e inferior de los cuadros muestran los percentiles 25 (primer cuartil) y 75 (tercer cuartil) y las rayas exteriores representan los valores máximos y mínimos.....	36
Figura 32. Temperatura media anual de la serie actual del grupo con porcentaje de bosque menor a 11%.	38
Figura 33. Temperatura media anual de la serie futura del grupo con porcentaje de bosque menor a 11%.	38
Figura 34. Temperatura media anual de la serie actual del grupo con porcentaje de bosque mayor de 11% y menor de 22%.	39
Figura 35. Temperatura media anual de la serie futura del grupo con porcentaje de bosque mayor de 11% y menor de 22%.	39
Figura 36. Temperatura media anual de la serie actual del grupo con porcentaje de bosque mayor de 22%.....	40
Figura 37. Temperatura media anual de la serie futura del grupo con porcentaje de bosque mayor de 22%.....	40
Figura 40. Temperatura media para el grupo de cuenca $<75 \text{ km}^2$ en el escenario actual.....	41
Figura 41. Temperatura media para el grupo de cuenca $<75 \text{ km}^2$ en el escenario actual.....	41
Figura 42. Temperatura media para el grupo de cuenca $>75 <250 \text{ km}^2$ en el escenario actual.	42
Figura 43. Temperatura media para el grupo de cuenca $>75 <250 \text{ km}^2$ en el escenario futuro.	42
Figura 44. Temperatura media por meses del grupo con cuenca mayor de 250 km^2 serie actual.	43
Figura 45. Temperatura media por meses del grupo con cuenca mayor de 250 km^2 serie futura.	43
Figura 38. Variación estacional serie actual.....	44
Figura 39. Variación estacional serie futura.....	45

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Características de los puntos de estudio seleccionados.	18
Tabla 2. Caudal medio y variaciones de caudales en los puntos estudiados.	23
Tabla 3. Valores medios del índice FRE3 y sus variaciones en cuanto al escenario futuro en los puntos estudiados.	32
Tabla 4. Valores medios del índice FRE7 y sus variaciones en cuanto al escenario futuro en los puntos estudiados.	33
Tabla 5. Valores medios del índice BFI y sus variaciones en cuanto al escenario futuro en los puntos estudiados.	35
Tabla 6. Temperatura media y variaciones de la temperatura del agua en los puntos estudiados.	37
Tabla 7. Variación estacional del escenario actual y futuro por meses para cada punto.	45

1. Introducción

1.1. Antecedentes y justificación

Actualmente, alrededor de 7 mil millones de personas viven en el mundo y el rápido crecimiento de la población humana es una de las preocupaciones actuales. Se estima que en 2050 la población mundial ascenderá hasta los 9 mil millones de habitantes, lo que conlleva una mayor demanda de recursos esenciales, tal como el agua. Por ello, se estima que para el año 2030, bajo el contexto actual de cambio climático, casi la mitad de los habitantes del mundo sufrirán estrés hídrico (ONU, 2014).

Los cambios en los usos del suelo y la cobertura vegetal son aspectos clave para poder combatir el problema de la escasez del agua (*Escasez de Agua / Decenio Internacional Para La Acción “El Agua, Fuente de Vida” 2005-2015*, n.d.). El agua disponible se genera mediante el transporte atmosférico del agua del mar a la tierra, donde el exceso de precipitación sobre la evaporación produce el agua útil (Miracle Sol, 2006). A partir el agua disponible se crea el concepto hídrico SUELO-PLANTA-ATMÓSFERA (SPA), aspecto que sirve para el estudio de relaciones hídricas de plantas y bosques. Las hojas de cualquier cubierta vegetal condicionan la cantidad de agua que recibe el bosque, ya que provocan que una parte de la precipitación sea interceptada, retenida y evaporada directamente, sin que pueda llegar al suelo o descender por los troncos de los árboles. Sin embargo, una parte de esa precipitación alcanza al suelo llegando a interactuar con las raíces de los árboles. Estas raíces favorecen la entrada del agua en el suelo, ya que son capaces de distribuir el agua rápidamente y hacia horizontes más profundos en diferentes superficies (Savé et al., 2005).

Por otro lado, otro aspecto clave es la temperatura del agua, ya que es un factor que interactúa directamente con los ecosistemas y los usos del suelo. Algunas características como el tamaño del río, el caudal, la posición de la cuenca, la intensidad de la luz solar, la temperatura del aire o la cobertura vegetal del suelo, son las que condicionan los valores de la temperatura del agua. Debido a esto, los bosques tienen gran influencia en la temperatura del agua de los ríos ya que principalmente su sombra regula la temperatura de estos. Además, se ha confirmado que, en zonas con menor cobertura forestal la temperatura del agua ha aumentado considerablemente (Chiaga Pouaha, A. N., 2020).

Sin embargo, estos dos aspectos clave (la temperatura y el agua disponible) están condicionados por el cambio climático. El cambio climático está causado por actividades antropogénicas y también por actividades de origen natural según los informes del IPCC (El grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático) (Díaz Cordero, 2012). El IPCC define el sistema climático como un sistema integrado por la atmósfera, hidrosfera, criosfera, superficie terrestre y biosfera y por las interacciones entre estos. Por lo tanto, es necesario conocer el sistema climático y sus alteraciones, para poder determinar la situación de futuro del clima. Para ello, el IPCC ha definido cuatro escenarios de futuro posibles llamados Trayectorias de Concentración Representativas (RCP). Estos RCP contienen concentraciones de la gama completa de GEI y aerosoles y gases químicamente activos y series temporales de emisiones (Amblar et al., 2017). En el caso del agua disponible, los modelos climáticos prevén una variación no uniforme en los ciclos hidrológicos globales. En el Norte de Europa, por ejemplo, se estima un aumento de las precipitaciones anuales, mientras que en Europa Central y las zonas mediterráneas se espera una fuerte reducción del número de días de lluvias con el consiguiente mayor riesgo de períodos de sequía, lo que conllevará que el Mediterráneo sea un punto importante en cuanto a la escasez del agua. Además, se espera que el consumo del agua en los cultivos en los países mediterráneos aumente en un promedio entre 3 y 4% (Masia et al., 2021). Por el contrario, en el caso de la temperatura se prevé un aumento de esta que afectaría directamente a la evapotranspiración, afectando a su vez al ciclo del agua (Fomento et al., 2010).

Para poder ayudar a reducir y gestionar los riesgos del cambio climático se pueden plantear diferentes opciones de adaptación y mitigación, pero ninguna de esta solución es suficiente por sí misma. Estas soluciones dependen de las políticas que se apliquen, de gobernanzas e instituciones eficaces o de innovación e inversión en tecnologías e infraestructuras ecológicamente racionales. En cuanto a opciones de adaptación, se enfocan en la reducción de la vulnerabilidad, la planificación de la adaptación o la gestión del riesgo de desastres. Asimismo, las opciones de mitigación también son clave y la solución más conocida es la reducción de las emisiones directas de CO₂, que a su vez pueden ser más eficientes combinándolas con medidas como el uso de energías renovables o mejorar los sumideros de carbono (IPCC, 2016). Sin embargo, dada la trayectoria actual de las emisiones, se requerirán reducciones sustanciales en las emisiones para evitar impactos severos en el ciclo del agua en Europa (Donnelly et al., 2017).

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

El objetivo general de este estudio es analizar los cambios hidrológicos y térmicos para el escenario actual y el escenario futuro (escenario RCP 8.5) debido al cambio climático en las cuencas cántabras de los ríos Pas, Miera y Asón, así como el análisis del efecto del bosque sobre estos cambios.

1.2.2. Objetivos específicos

Para alcanzar el objetivo general, se plantean una serie de objetivos específicos:

- Analizar la información hidrológica en la zona de estudio, para el escenario presente y futuro.
- Describir las variaciones de temperatura del agua en la zona de estudio para el escenario presente y futuro.
- Analizar los efectos del bosque en los cambios producidos en el escenario presente y futuro.

2. Material y métodos

2.1. Área de estudio

2.1.1 Ubicación y topografía

El área de estudio se sitúa en Cantabria (España), su superficie se estima en 5326 km² y tiene una altitud media de 2619 m. La Comunidad Autónoma de Cantabria está repartida en 13 cuencas, de las cuales en este trabajo solo estudiaremos tres: Pas (649 km²), Miera (316 km²) y Asón (765 km²) (Figura 1). La cuenca del río Asón limita con las cuencas de los ríos Miera y Agüera, occidental y oriental respectivamente y por el Sur limita con la provincia de Burgos. La cuenca del río Miera está delimitada por las cuencas del Asón y Pas, por el Sur limita con Castilla y León. En el caso de la cuenca del río Pas, limita con las cuencas de los ríos Miera y Saja y con los Montes de Valnera y de Samo y con la Sierra Escudo. Las tres cuencas de estudio desembocan en el mar Cantábrico, por lo que limitan por el Norte con este (*ALICE in Spain: Pas, Miera and Asón Catchments, Cantabria – ALICE, 2021*).

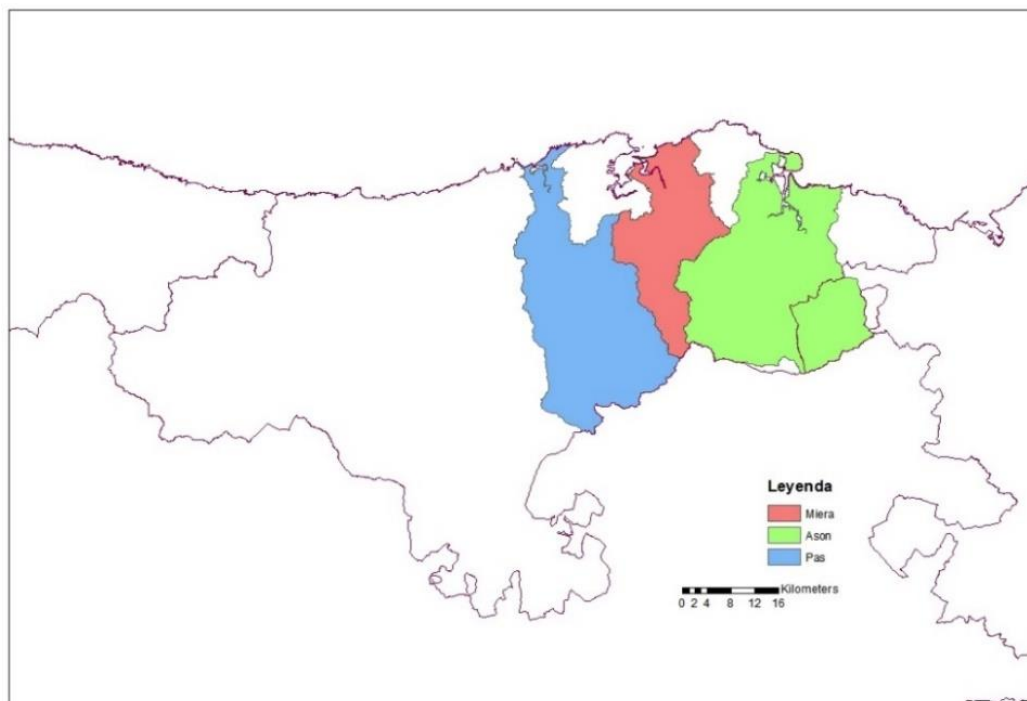


Figura 1. Cuencas de estudio en Cantabria.

Asimismo, Cantabria se diferencia principalmente en tres zonas morfológicas: la costa en la zona con menor altitud (400 m), la zona intermedia con una altitud entre 400-1200 m y la zona de montaña con una elevación de hasta 1700 m (*GEOGRAFÍA FÍSICA DE CANTABRIA – FEMININ*, 2014).

En cuanto a la actividad económica de Cantabria, tiene un sector primario con ganadería vacuna, lechera tradicional, agricultura, pesca marina y minería donde solo el 5,8% de la población activa forma parte de este sector. En el sector secundario trabaja el 30.4% de la población activa, destacando la industria siderúrgica, la alimentaria, la química, la papelera, la textil, la farmacéutica y el transporte. Por último, el sector terciario representa el 63.8% de la población activa y a su vez los últimos años va en aumento. Esto se debe a la despoblación dada en el interior, ya que cada vez más habitantes deciden mudarse a las ciudades de la costa (Instituto Cántabro de Estadística, 2017).

2.1.2. Hidrología

El río Asón nace en los Collados del Asón de una surgencia kárstica y desemboca en la Bahía de Santoña donde las corrientes de aguas recorren un total de 50 km (Figura 2). Los tributarios más importantes del río Ason son el río Gandara, Carranza y Ruahermosa. Atraviesa 32 municipios de los cuales 2 de ellos pertenecen a la Comunidad Autónoma Vasca. Presenta un caudal medio de $16.7 \text{ m}^3/\text{s}$ y un aporte anual de 527 hm^3 (CH Cantábrico, n.d.-c)

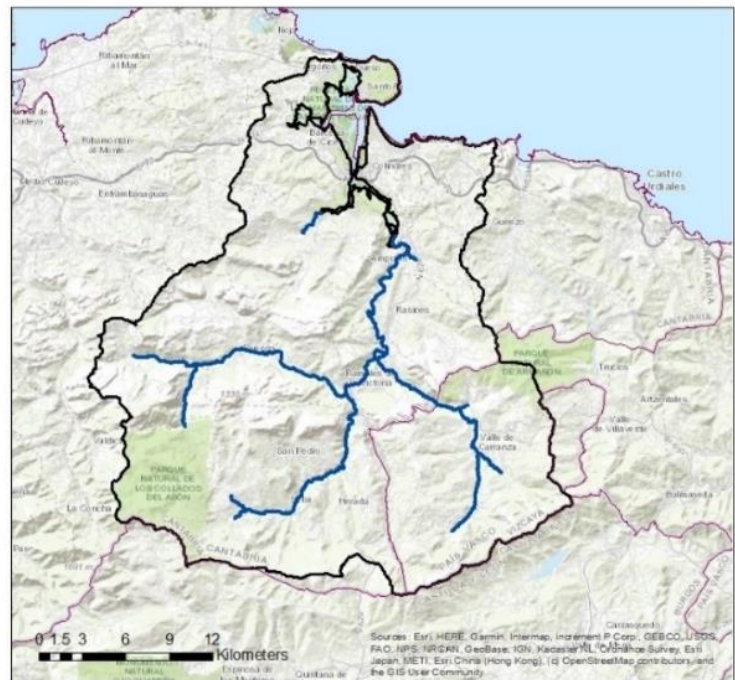


Figura 2. Principales ríos de la cuenca del Asón.

El río Miera nace a una altitud de 1200 m en el Portillo de Lunada y desemboca en la Bahía de Santander tras recorrer más de 45 km (Figura 3). Sus principales afluentes son los ríos Aguanaz, Pámanes, Revilla y Pontones. Su caudal medio anual es de 5.24m³/s, con máximos de 7.75 m³/s y mínimos de 2.64 m³/s, en invierno y verano respectivamente. Además, la red fluvial se encuentra en un Lugar de Interés Comunitario Río Miera protegiendo todo su recorrido y sus principales afluentes. Algunas de las especies presentes en este LIC son el salmón atlántico, la madrilla, el sábalo o la nutria. También cabe destacar el LIC de las Dunas del Puntal y el Estuario de Miera en su desembocadura (CH Cantábrico, n.d.-a)

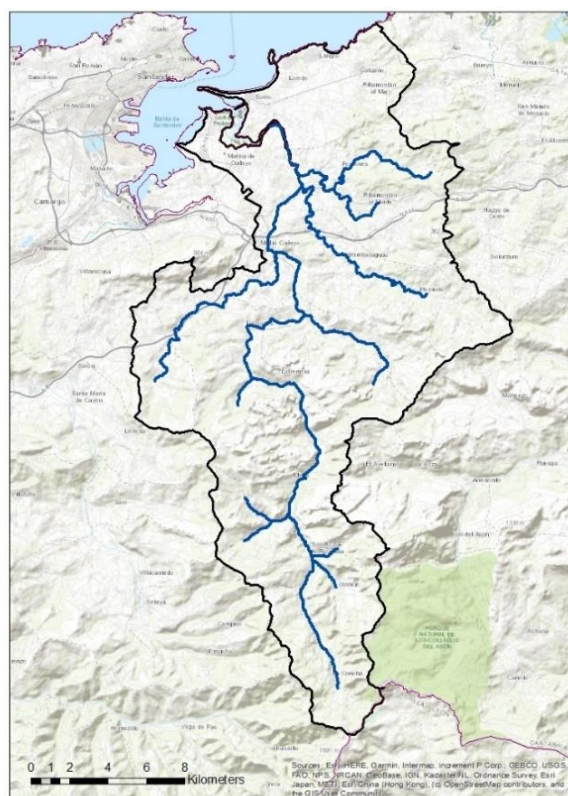


Figura 3. Principales ríos de la cuenca del Miera.

En la cuenca del río Pas, la red hídrica principal está compuesta por el río Pas y sus dos principales afluentes, el río Pisueña y Magdalena. El río Pas nace en las Peñas Negras de Castro Valnera y desemboca en el Mar Cantábrico donde recorre 61 km en total (Figura 4). Su caudal medio anual llega casi hasta los 9 m³/s, con máximos de 18.06 m³/s y mínimos de 4.11 m³/s, en invierno y verano respectivamente. Además, el Lugar de Interés Comunitario Río Pas protege todo su recorrido desde su nacimiento hasta la desembocadura y el afluente río Pisueña. Algunas de las especies que viven en este LIC son el salmón atlántico, el desmán ibérico, la nutria, la madrilla o el cangrejo de río. Igualmente, en la desembocadura del río Pas encontramos un Lugar de Interés Comunitario de las Dunas de Liencres y el Estuario del Pas (CH Cantábrico, n.d.-b).

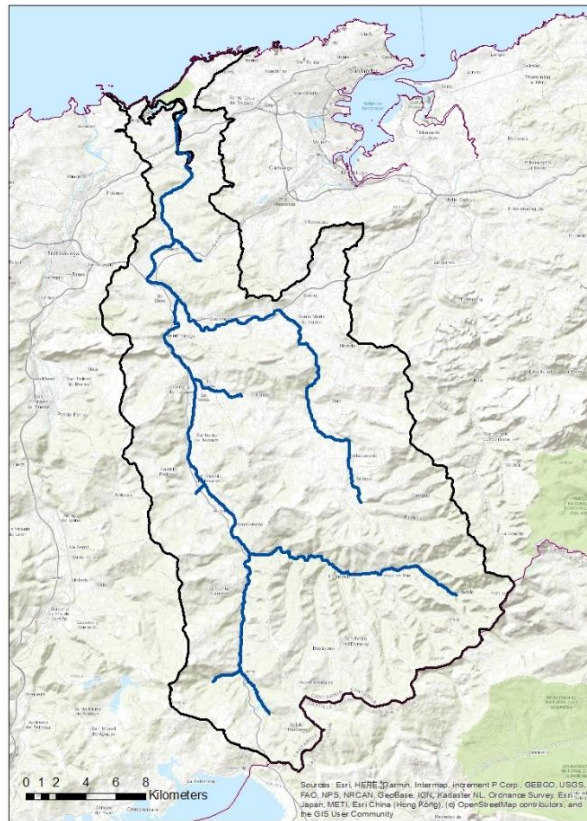


Figura 4. Principales ríos de la cuenca del Pas.

2.1.3. Ocupación de suelo

En cuanto a la ocupación del suelo de la cuenca del río Asón está en su mayoría ocupada por arbustos (Figura 5). La segunda mayor superficie está formada por pastizales, seguido por la zona de bosque de frondosas. Además no hay grandes zonas de áreas urbanas ya que en su mayoría estas zonas se concentran en la costa.

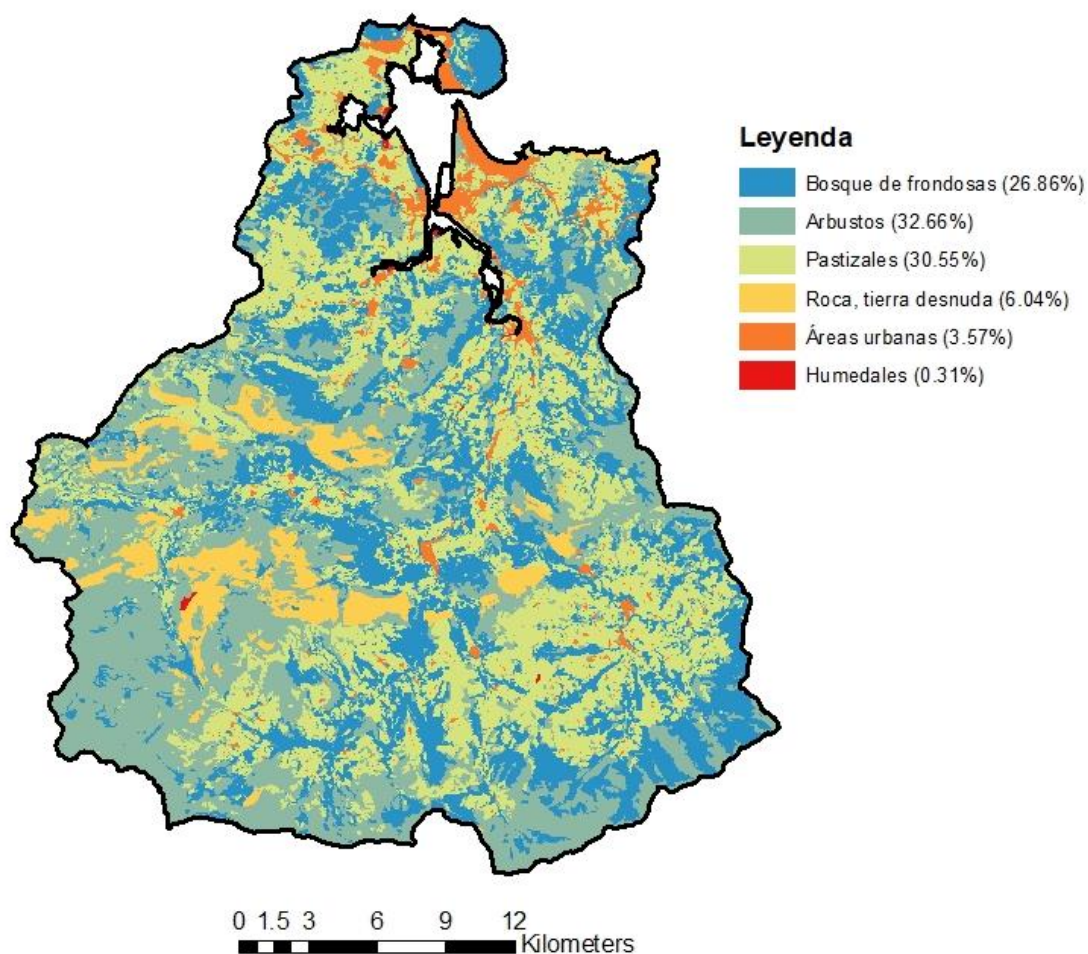


Figura 5. Mapa de ocupación del suelo de la cuenca del Asón.

En cuanto a la cuenca del Miera, la zona alta se define por la gran superficie de arbustos con pequeñas zonas de bosque y pastizales (Figura 6). En cambio, en la zona baja de la cuenca predomina el pastizal y las zonas de áreas urbanas. Además, la superficie de bosque se concentra más en el Noreste de la cuenca coincidiendo con el límite de la cuenca del Asón. La roca aflora en la parte intermedia de la cuenca.

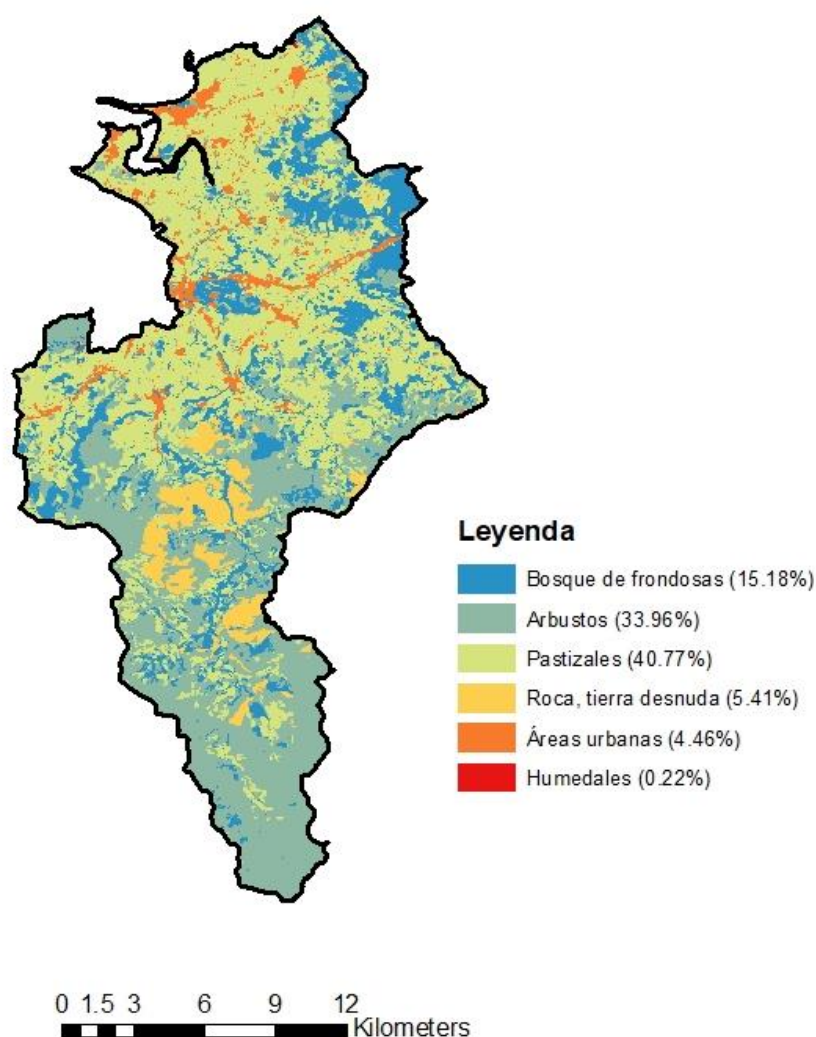


Figura 6. Mapa de ocupación del suelo de la cuenca del Miera.

Por otro lado, la ocupación del suelo de la cuenca del río Pas se diferencia notablemente por zonas (Figura 7), siendo los arbustos y matorrales los que mayor superficie ocupan. En la parte alta de la cuenca, predominan los bosques y los matorrales, en cambio en los tramos medios y bajos de la cuenca los pastizales ocupan una gran parte mezclándose con los bosques, donde empieza a disminuir el matorral. Además, cabe destacar que la mayoría de las áreas urbanas se asientan aguas abajo o alrededor de la red hídrica.

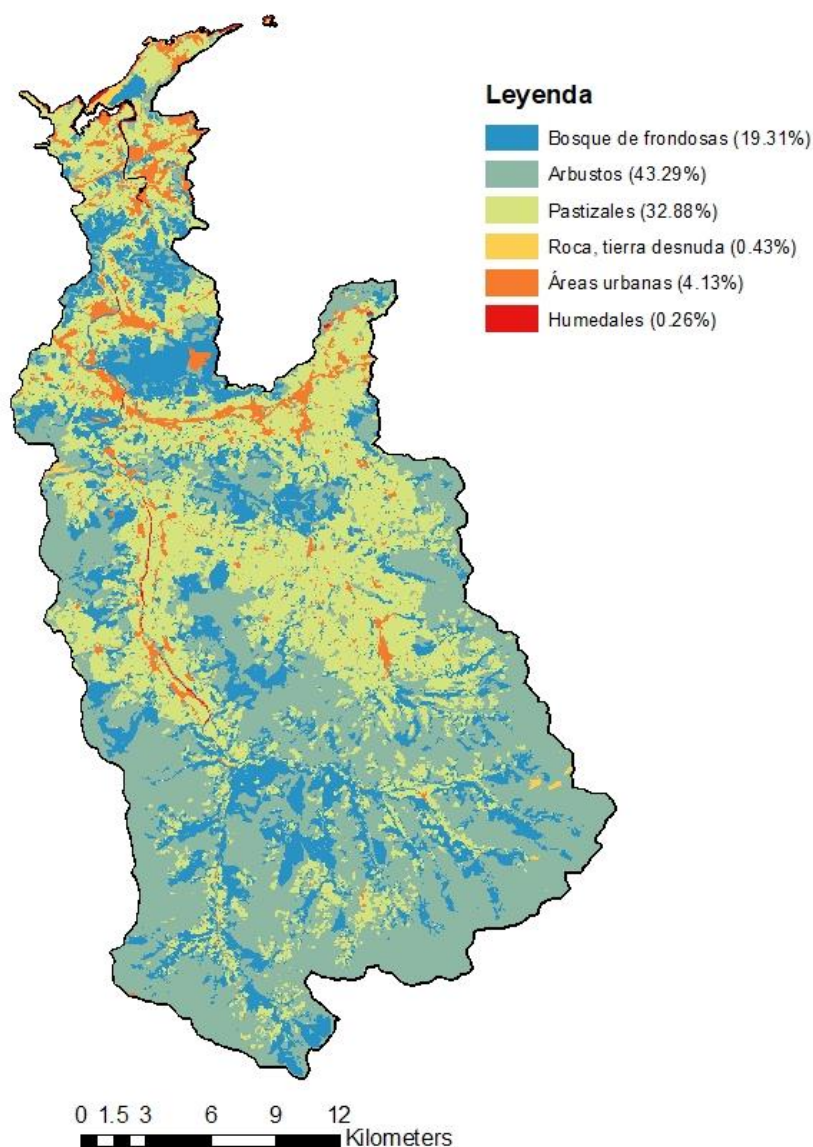


Figura 7. Mapa de ocupación del suelo de la cuenca del Pas.

2.1.4. Clima: escenario actual y futuro

Como este estudio tiene como objetivo analizar los efectos del cambio climático, a continuación, se realizará la descripción del clima para el escenario actual (1980-2018) y futuro (2041-2070).

2.1.4.1. Descripción del escenario actual

El río Asón se encuentra en la costa occidental europea donde predomina el clima oceánico atlántico. Este clima se caracteriza por tener temperaturas suaves, templadas y con poca variación térmica estacional. La temperatura media anual varía desde temperaturas más bajas en las zonas montañosas hasta temperaturas un poco más altas en la zona baja de la cuenca. En cuanto a las precipitaciones medias anuales son máximas en la zona Oeste donde llegan a valores de 2800 mm. Sin embargo, se van reduciendo hasta los 1000 mm en la zona Este de la cuenca (Figura 8a). En cuanto a la temperatura máxima diaria (Figura 8b), los valores varían entre los 14.55°C y los 17.78°C, siendo más calurosas las zonas bajas de la cuenca. Por el contrario, la temperatura mínima diaria (Figura 8d) registrada no supera los 7.37°C siendo 3.42°C el mínimo. La temperatura media diaria (Figura 8c) para esta cuenca oscila entre los 6.17°C y los 10.78°C.

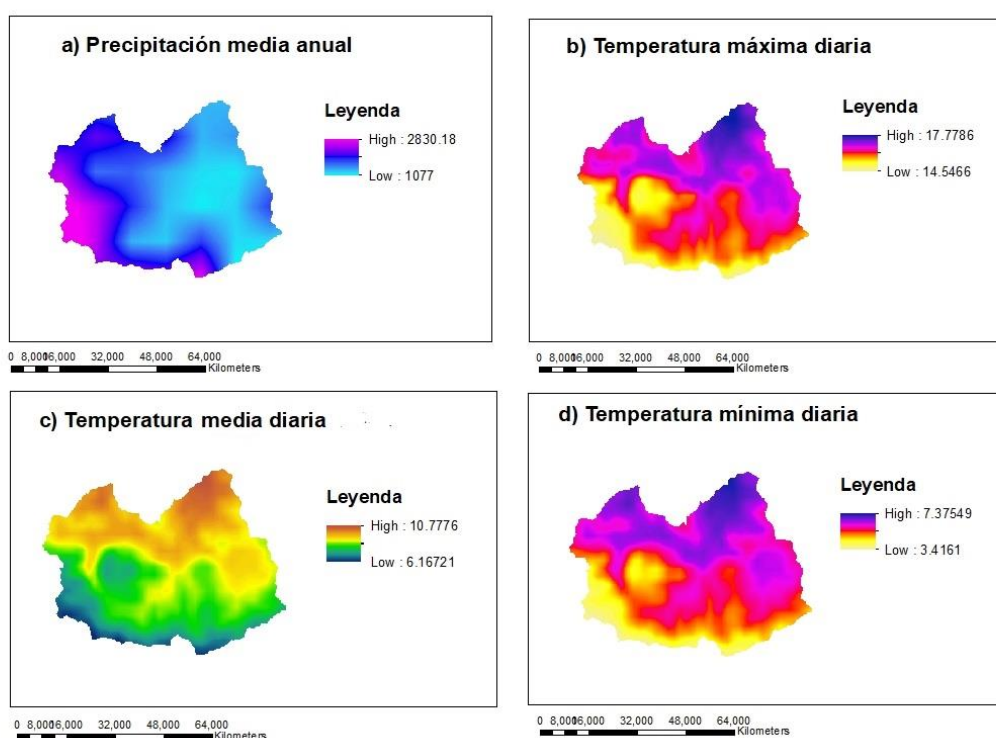


Figura 8. Mapas de clima para la cuenca del Asón en el escenario actual. a) Precipitación media anual. b) Temperatura máxima diaria. c) Temperatura media diaria. d) Temperatura mínima diaria.

La zona de mayor altitud de la cuenca del río Miera se caracteriza por un clima continental de montaña, de condiciones extremas y variaciones bruscas de la temperatura. En cambio, en la zona costera presenta un clima oceánico o atlántico con un gradiente pequeño de temperaturas anuales. En la parte alta de la cuenca se dan precipitaciones en torno a 2900 mm anuales, en cambio en la zona baja de la cuenca las precipitaciones anuales apenas llegan a los 1200 mm (Figura 9a). Las temperaturas máximas diarias (Figura 9b) llegan a alcanzar los 18.16°C, por el contrario, las temperaturas mínimas (Figura 9d) presentan unos valores mínimos de 3.34°C en la parte alta de la cuenca. En cuanto, a la temperatura media diaria (Figura 9c) los valores varían entre los 6.12°C hasta los 11.72°C, de la parte alta de la cuenca a la baja respectivamente.

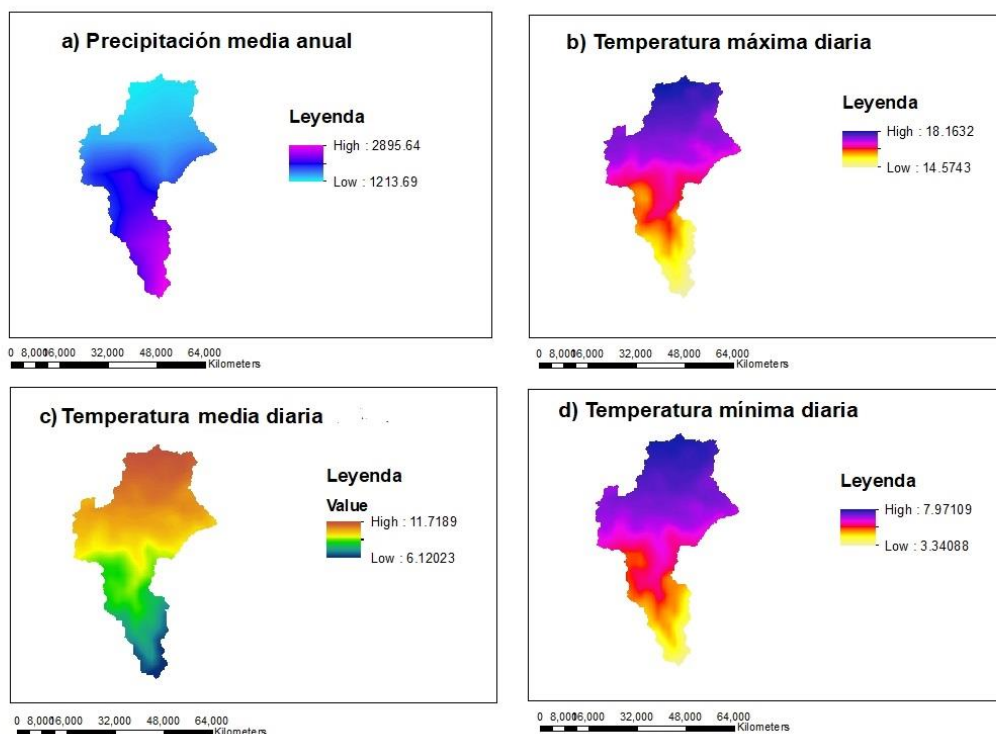


Figura 9. Mapas de clima para la cuenca del Miera en el escenario actual. a) Precipitación media anual. b) Temperatura máxima diaria. c) Temperatura media diaria. d) Temperatura mínima diaria.

La climatología de la cuenca del río Pas se reparte en tres tipos por zonas: la zona costera, la zona de mayor altitud y la zona sur de la cuenca. Para la primera zona, se establece un clima oceánico con una precipitación media anual de 1300 mm, la zona de mayor altitud tiene un clima continental de montaña, con una precipitación que llega a alcanzar valores de 2800 mm anuales.

Por último, la zona Suroeste de la cuenca tiene un clima tipo mediterráneo-continental, con una precipitación que no superan los 1200 mm anuales (Figura 10a). En cuanto a la temperatura máxima y mínima diaria de la cuenca, los valores oscilan entre los 14.47°C -18.01°C y 2.91°C-7.49°C respectivamente (Figura 10b y Figura 10d). Además, la temperatura media (Figura 10c) llega a alcanzar un mínimo de 5.46°C en las zonas con más altitud y 11.07°C en la parte baja de la cuenca.

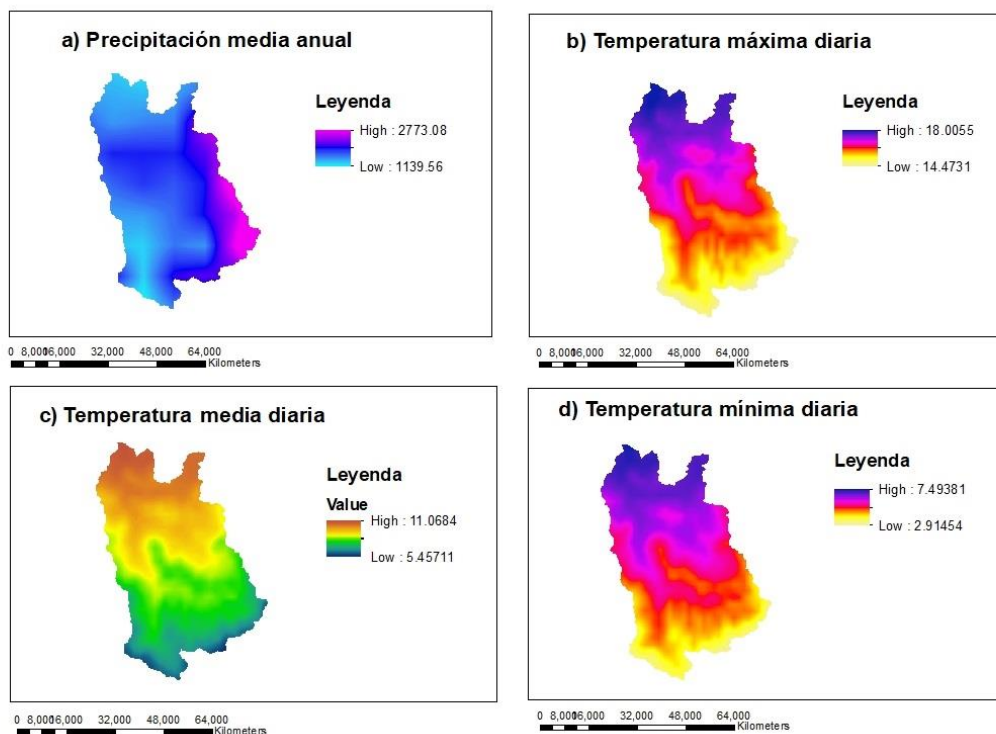


Figura 10. Mapas de clima para la cuenca del Pas en el escenario actual. a) Precipitación media anual. b) Temperatura máxima diaria. c) Temperatura media diaria. d) Temperatura mínima diaria.

2.1.4.2. Descripción del escenario futuro

En la descripción del clima futuro, se analizan los datos del escenario de cambio climático RCP 8.5. En este escenario las emisiones continúan aumentando durante todo el siglo XXI donde se prevé un aumento del calentamiento global de 2°C y un aumento del nivel medio mundial del mar de 30 cm para este periodo de estudio (Amblar et al., 2017).

Para la cuenca del Asón se observa una precipitación media anual (Figura 11a) con valores máximos de 2420 mm en la parte Oeste de la cuenca, sin embargo, en la parte Este las precipitaciones apenas llegan a los 1000 mm. En cuanto a las temperaturas máximas los valores alcanzan los 19.29°C, siendo sus mínimas de 16.13°C (Figura 11b). Las temperaturas mínimas de la cuenca presentan unos valores mínimos de 4.95°C y unos máximos de 8.92°C en la parte baja de la cuenca (Figura 11b). Por último, la temperatura media diaria varía entre los 7.74°C y los 12.30°C (Figura 11d).

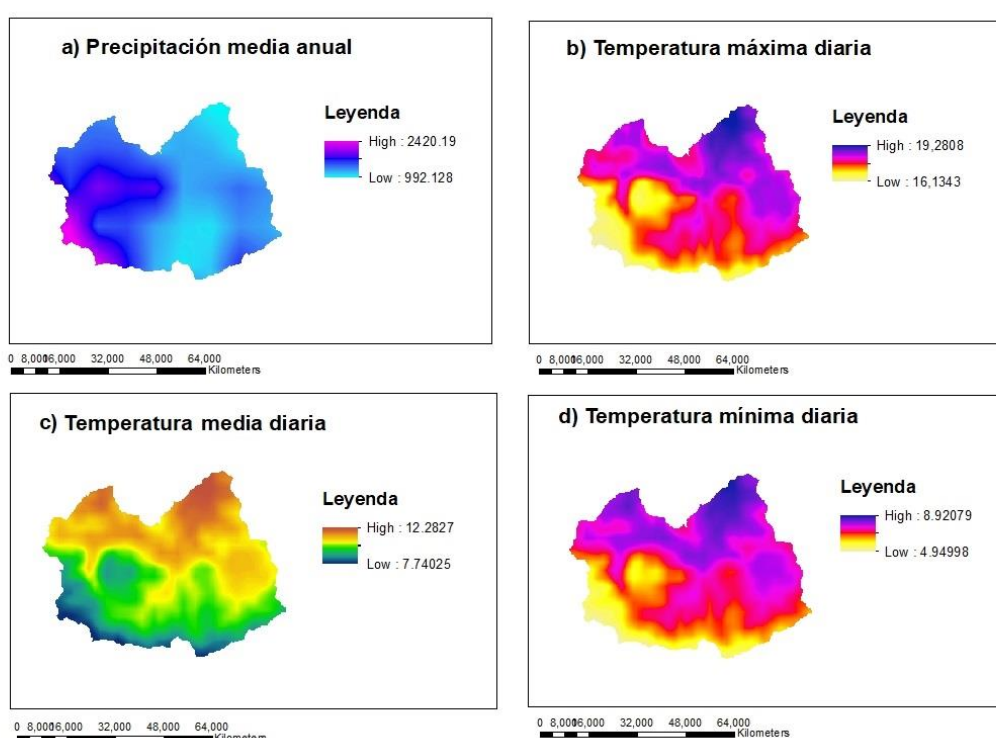


Figura 11. Mapas de clima para la cuenca del Asón en el escenario futuro. a) Precipitación media anual. b) Temperatura máxima diaria. c) Temperatura media diaria. d) Temperatura mínima diaria.

En cuanto al clima futuro de la cuenca del Miera, la precipitación media anual (Figura 12a) de la cuenca presentan la misma distribución que en el escenario actual, pero disminuyen los valores máximos hasta llegar a los 2460 mm y en general, disminuye la precipitación en toda la zona de estudio. Las temperaturas máximas vuelven a aumentar (Figura 12b) hasta los 19.60 °C y las mínimas también aumentan hasta los 4.87°C (Figura 12d). Del mismo modo, la temperatura media aumenta en toda la cuenca llegando a alcanzar los 13.15 °C (Figura 12c).

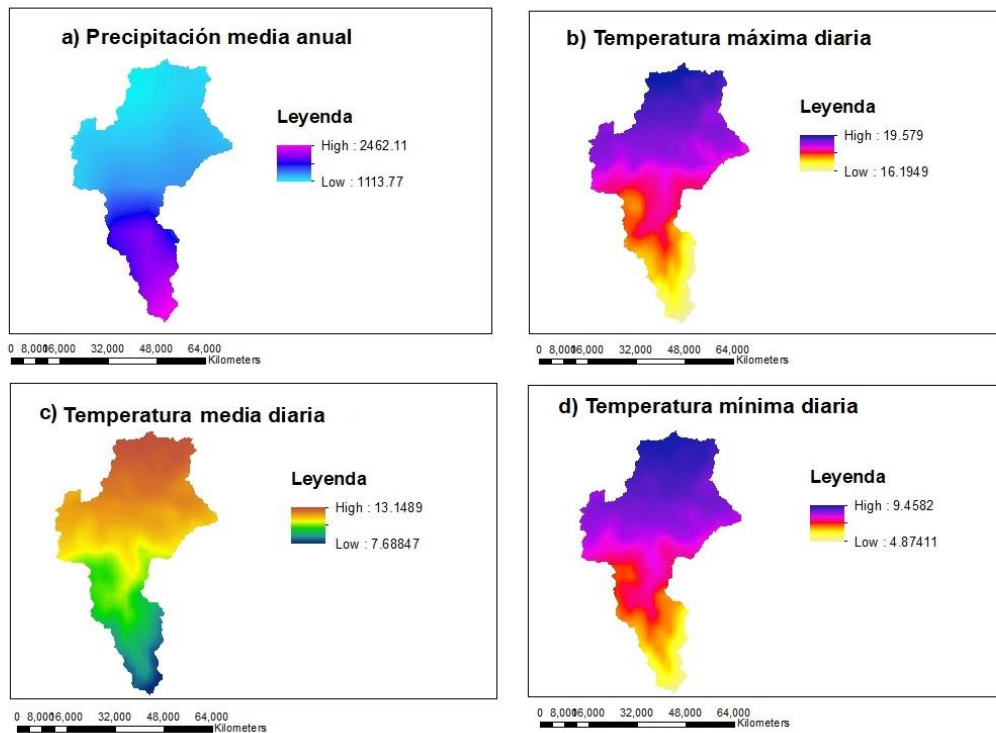


Figura 12. Mapas de clima para la cuenca del Miera en el escenario futuro. a) Precipitación media anual. b) Temperatura máxima diaria. c) Temperatura media diaria. d) Temperatura mínima diaria.

En la cuenca del Pas, vuelven a reducirse las precipitaciones (Figura 13a) no superando los 2500 mm en ningún punto de la cuenca. A su vez, las temperaturas máximas diarias (Figura 13b) llegan a los 19.40°C y las mínimas no superan los 8.98°C, siendo 4.50°C su mínimo (Figura 13d). Finalmente, la temperatura media diaria para este escenario de futuro llega a alcanzar los 12.5°C en la parte baja de la cuenca.

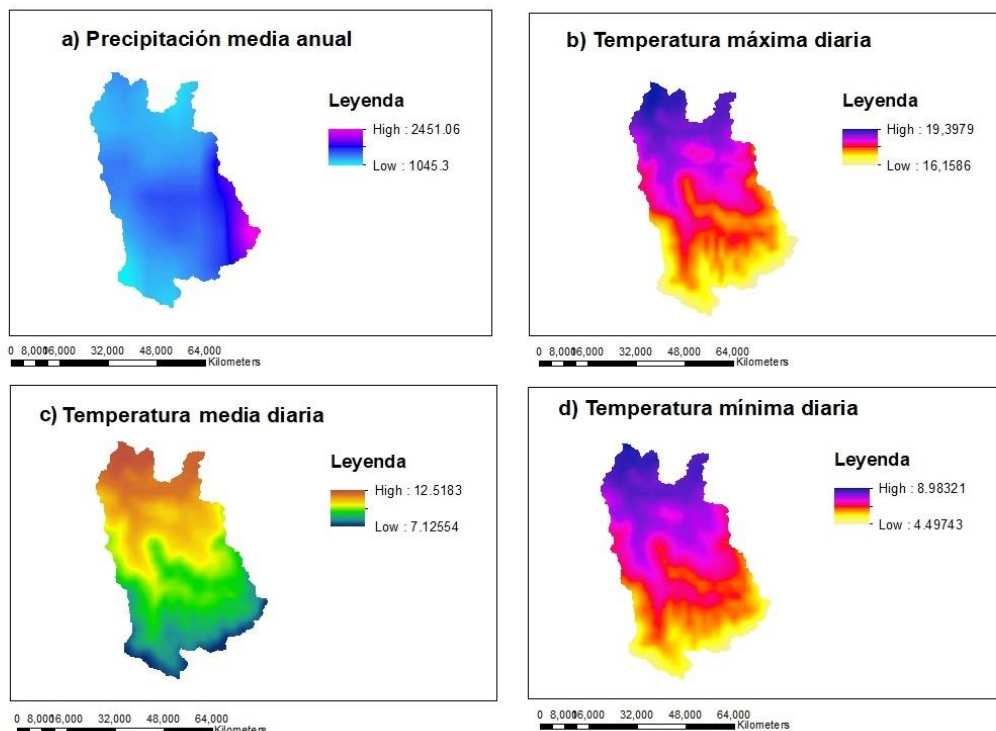


Figura 13. Mapas de clima para la cuenca del Pas en el escenario futuro. a) Precipitación media anual. b) Temperatura máxima diaria. c) Temperatura media diaria. d) Temperatura mínima diaria.

2.2. Selección de datos

Para poder realizar este estudio, los datos se han obtenido del proyecto ALICE. Este proyecto está financiado por la Unión Europea y su objetivo principal es promover las inversiones en infraestructuras verdes y azules (BGINs) poniendo en valor los beneficios de los servicios ecosistémicos prestados en la interfaz terrestre-acuática y tierra-mar en la región atlántica. (para más información ver <http://project-alice.com>).

2.2.1. Selección de puntos de estudio

Para llevar a cabo este estudio se ha realizado una selección previa de puntos de estudio en las cuencas del Pas, Miera y Asón. Esta selección de puntos se ha obtenido del estudio “SPATIOTEMPORAL PATTERNS OF WATER TEMPERATURE IN RIVER ECOSYSTEMS IN CANTABRIA,

NORTH OF SPAIN” de Aude Noelle Chiaga Pouaha. Para realizar la selección de puntos, en dicho estudio previo (Chiaga Pouaha, A. N. 2020) se realizó un análisis multicriterio, donde los criterios eran: el tamaño de la cuenca, el porcentaje de bosque que tiene la cuenca y la altitud en la que se encuentra. Con este criterio, se seleccionó un punto de cada combinación del área de cuenca y porcentaje de bosque, siempre siguiendo el criterio de altitud menor de 200 m. Finalmente, se obtuvieron 9 puntos de estudio distribuidos en las tres cuencas del proyecto ALICE (ver tabla 1 y Figura 14). En el caso del escenario a futuro de este estudio, se analizan los cambios dados por el cambio climático sin ningún cambio en la ocupación del suelo (es decir, usando el escenario de ocupación del suelo actual también en el escenario futuro de cambio climático).

Tabla 1. Características de los puntos de estudio seleccionados.

Criterio			Puntos seleccionados	Valores		
Área de cuenca (km ²)	Bosque (%)	Altitud (m)		Área de cuenca (km ²)	Bosque (%)	Altitud (m)
≤75	≤ 11	<200	PAS 15	32.42	3.64	80
≤75	> 11 ≤ 22	<200	ASON 20	28.45	13.07	153
≤75	>22	<200	ASON 13	17.05	29.81	191
>75 ≤ 250	≤ 11	<200	PAS 14	193.20	8.87	49
>75 ≤ 250	> 11 ≤ 22	<200	Magdalena	234.02	19.46	193
>75 ≤ 250	>22	<200	ASON 17	112.59	26.15	106
>250	≤ 11	<200	MIERA1	293.95	10.46	3
>250	> 11 ≤ 22	<200	Pas Vargas	362.70	17.04	41
>250	>22	<200	ASON 3	471.59	22.02	40

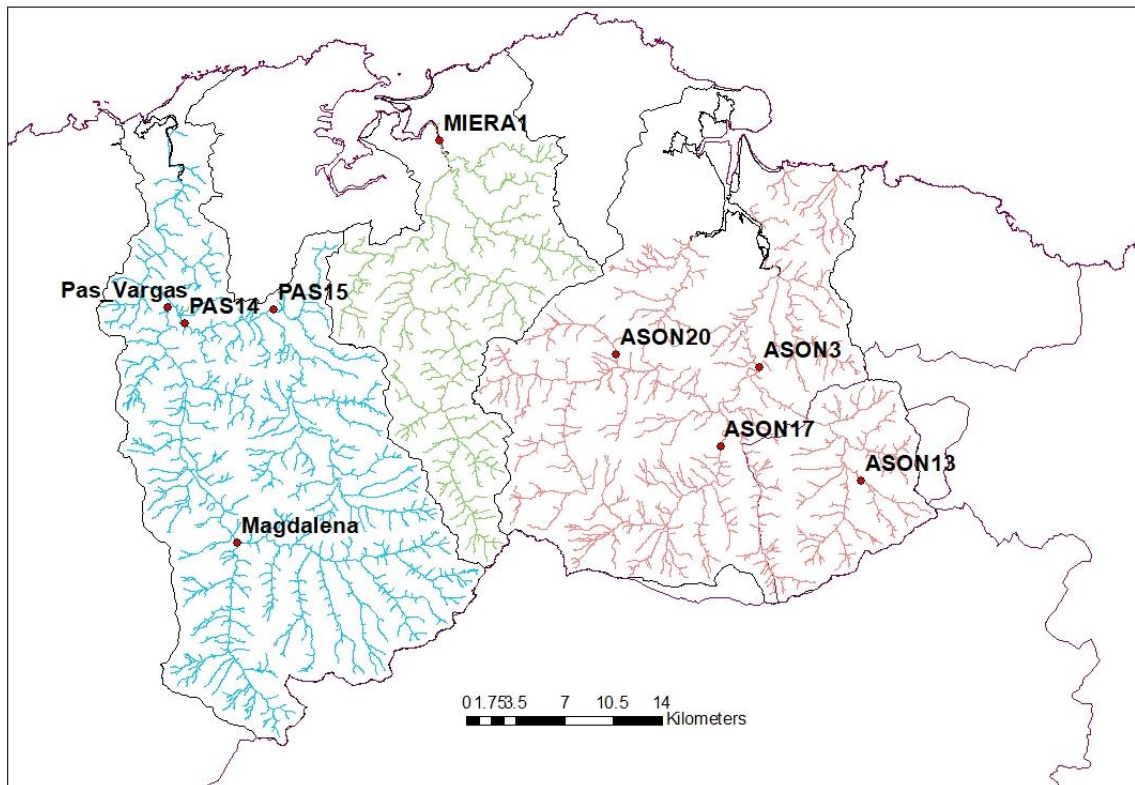


Figura 14. Localización de los puntos de estudio seleccionados.

2.2.2. Modelo hidrológico

El modelo hidrológico utilizado en el proyecto ALICE para la obtención de los datos es el modelo SPHY, cuya funcionalidad es evaluar el cambio en el almacenamiento y los flujos a lo largo del tiempo (Terink et al., 2009). El modelo SPHY (Spatial Processes in Hydrology) tiene en cuenta diferentes procesos hidrológicos como pueden ser la lluvia de escorrentía, la salida del flujo del lago/embalse, los procesos criosféricos, la evapotranspiración o los procesos hidrológicos del suelo, cuya incorporación al modelo se puede activar o desactivar en función de la relevancia de estos procesos en la zona de interés. Además, este modelo puede tener en cuenta distintos escenarios como los cambios en el uso del suelo, distintos escenarios climáticos o escenarios de clima extremos. Este modelo ha sido desarrollado y actualizado constantemente combinando modelos de simulación ya existentes (*Modelos Hidrológicos y SPHY – FutureWater*, n.d.). A partir de las series de caudal espacialmente distribuidas para el periodo actual y futuro obtenidas en el proyecto ALICE, a través del modelo SPHY, se han extraído las series de caudal para ambos

periodos en los puntos de estudio seleccionados para llevar a cabo el análisis (ver 2.2.1. Selección de puntos de estudio).

Para realizar el análisis por grupos de porcentaje de bosque o tamaño de cuenca, se ha realizado una media de los datos de caudal para cada año, obteniendo así el valor medio para cada año estudiado. Estos datos comienzan en el año 1980 y terminan en el 2012 para el escenario actual y empiezan en el año 2041 y terminan en el 2070 para el escenario futuro.

Además, para poder analizar mejor estos datos, se han calculado varios índices hidrológicos de cada serie, los cuales han sido calculados en base al año hidrológico. En hidrología, se usa el término año hidrológico para referirse a un periodo de 12 meses donde se miden los caudales dados en la cuenca a estudiar, este periodo comienza el 1 de octubre y termina el 30 de septiembre. A su vez, los índices han sido calculados con las series normalizadas para poder comparar los resultados de los diferentes puntos de estudio. La normalización de índices se realiza ajustando los valores medidos en diferentes escalas a una misma escala, para ello se han dividido los valores de las series por el caudal medio (*Web IH Rivers*, 2021) (para más información ver <https://ihrivers.ihcantabria.com/InfoDatos.aspx>).

Los índices analizados para los resultados del modelo hidrológico son los siguientes (Peñas et al., 2016):

- FRE3: número medio de eventos de caudal superior a 3 veces el caudal mediano anual de más de 7 días de duración
- FRE7: número medio de eventos de caudal superior a 7 veces el caudal mediano anual de más de 7 días de duración
- BFI: índice de caudal base, se calcula como la división entre 7LF y I1, donde:
7LF: magnitud de caudal mínimo de 7 días de duración
I1: momento linear que representa la media de la curva de duración de caudal anual

2.2.3. Modelo de temperatura del agua

En el proyecto ALICE se han desarrollado y probado tres modelos diferentes de temperatura del agua. Los datos utilizados para la calibración de los modelos se obtuvieron de cuatro fuentes y el modelo final elegido de temperatura del agua en este estudio es el modelo estándar

desarrollado con 5 parámetros. Este modelo se basa en la ecuación logística desarrollada en estudios previos (Caissie, 2006; Carraro et al., 2020; Bartholow, 2000).

$$\frac{dT_w(t)}{dt} = k \cdot \left[1 - \frac{T_w(t)}{T_{eq}(t)} \right]$$

$$T_{eq}(t) = \frac{a_1 \cdot T_a}{2} + \sqrt{\left(\frac{a_1 \cdot T_a}{2} \right)^2 + a_1 \cdot \gamma + a_2 \cdot DL}$$

$$DL = \cos\left(\frac{2\pi}{365} \cdot (t + t_{lag})\right)$$

Donde:

T_w = es la temperatura media del agua

T_a = es la temperatura media del aire de la cuenca

T_{eq} = es la temperatura de equilibrio

DL = es la duración

$a_1, a_2, \gamma, k, t_{lag}$ = son constantes determinadas durante la calibración del modelo (ver (Chiaga Pouaha, A. N. 2020)).

Cabe decir, que la temperatura media del aire utilizada en el modelo para aquellas zonas con presencia de bosque se calcula a partir de una regresión obtenida mediante datos empíricos que relacionan la temperatura del aire y la temperatura sobre la superficie del agua (bajo la cobertura arbórea) en zonas con presencia de bosque (ver (Chiaga Pouaha, A.N. 2020) para más información).

Así pues, se han utilizado los datos obtenidos de temperatura del agua en el modelo estándar del proyecto ALICE. En este caso, los datos actuales de temperatura del agua comienzan en el

año 1980 y terminan en el año 2018. Al igual que en el caso del modelo hidrológico, la serie de datos del escenario de futuro comienza en el año 2041 y terminan en el año 2070. Tal y como se ha mencionado anteriormente, se ha usado el escenario de ocupación de suelo actual para obtener los datos del modelo de temperatura del agua del escenario futuro.

Para poder realizar el análisis por grupos de porcentaje de bosque o tamaño de cuenca, al igual que en el modelo hidrológico, se han obtenido los valores medios para cada año estudiado.

3. Resultados

3.1. Modelo hidrológico

A continuación, se presentan los resultados obtenidos del modelo hidrológico, para el escenario actual y el escenario futuro. Para poder realizar un mejor análisis en cuanto a los cambios producidos en el escenario actual y futuro, se han calculado las variaciones de caudales dadas en cada punto de estudio con el promedio de los valores de caudal de cada periodo: actual y futuro (Tabla 2). Se observa que el caudal disminuye en todos los puntos a futuro de forma generalizada. Además, los puntos con menor porcentaje de bosque (MIERA1, PAS14 y PAS15) junto con el punto ASON20 presentan una tendencia clara de disminución de caudal, ya que presentan los valores de reducción de caudal más altos. Por otro lado, los tres puntos con menor porcentaje de variación son el ASON13, Magdalena y Pas_Vargas, donde el ASON13 pertenece al grupo de mayor porcentaje de bosque y los otros dos al grupo intermedio de porcentaje de bosque. Analizando los datos por tamaño de cuenca, para los puntos con menor área de cuenca (PAS15, ASON20 y ASON13) el punto con mayor reducción de caudal (PAS15) coincide con el de menor porcentaje de bosque. Ocurre lo mismo para los otros dos grupos de tamaño de cuenca, donde en el grupo de área mediana (ASON17, Magdalena y PAS14) es el punto PAS14 el que mayor reducción presenta y en el grupo de áreas grandes (MIERA1, Pas_Vargas y ASON3) es el MIERA 1.

Tabla 2. Caudal medio y variaciones de caudales en los puntos estudiados.

	ASON13	ASON17	ASON20	ASON3	Magdalena	MIERA1	Pas_Vargas	PAS14	PAS15
Caudal medio (m³/s) 1980-2021	0.43	4.62	1.44	19.50	5.02	6.62	7.64	4.68	0.78
Caudal medio (m³/s) 2041-2070	0.40	3.51	0.88	14.75	3.96	4.22	5.92	3.24	0.46
Variación (%)	-8.24	-24.05	-39.00	-24.38	-21.06	-36.22	-22.53	-30.74	-40.75

A su vez, se han analizado los resultados de la serie temporal de los caudales por grupos de porcentaje de bosque y tamaño de cuenca. Para el grupo con menor porcentaje de bosque (Figura 15) destacan los valores del punto PAS15 siendo notablemente inferiores a los otros dos puntos de su grupo. Además, el punto MIERA1 presenta los valores de caudal más altos en este caso, siendo el de mayor porcentaje de bosque y área de cuenca de los tres puntos estudiados en este grupo.

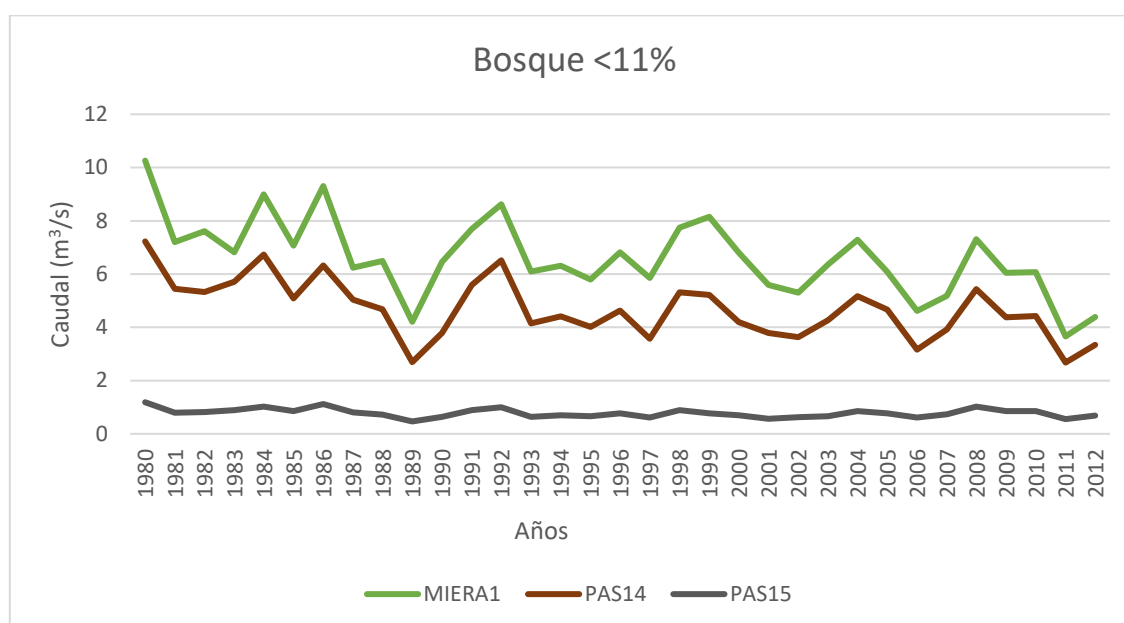


Figura 155. Caudales para el grupo de porcentaje de bosque <11% en el escenario actual.

Para el escenario futuro del grupo con menor porcentaje de bosque (Figura 16), se observa un mismo patrón de los puntos, pero cabe destacar que se reducen notablemente los valores de caudal para los tres puntos de estudio respecto al escenario actual (Tabla 2).

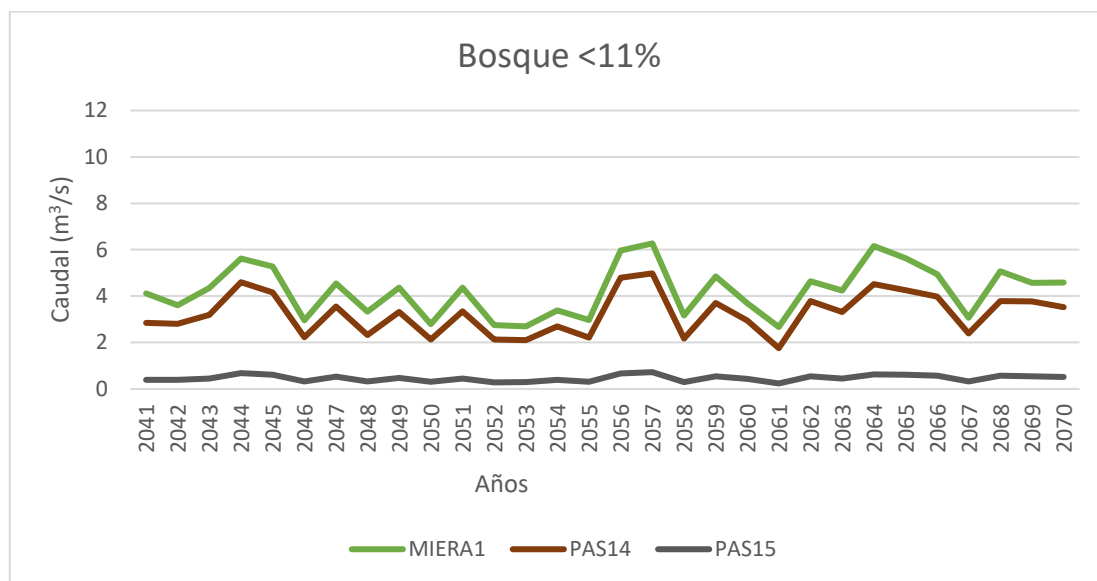


Figura 166. Caudales para el grupo de porcentaje de bosque <11% en el escenario futuro.

El siguiente grupo analizado es el grupo con porcentaje de bosque entre 11% y 22% (Figura 17). En este caso, vuelve a destacar un punto (ASON20) sobre los otros por tener valores más bajos, que presenta el menor porcentaje de bosque y área de cuenca de los tres puntos estudiados en este grupo.

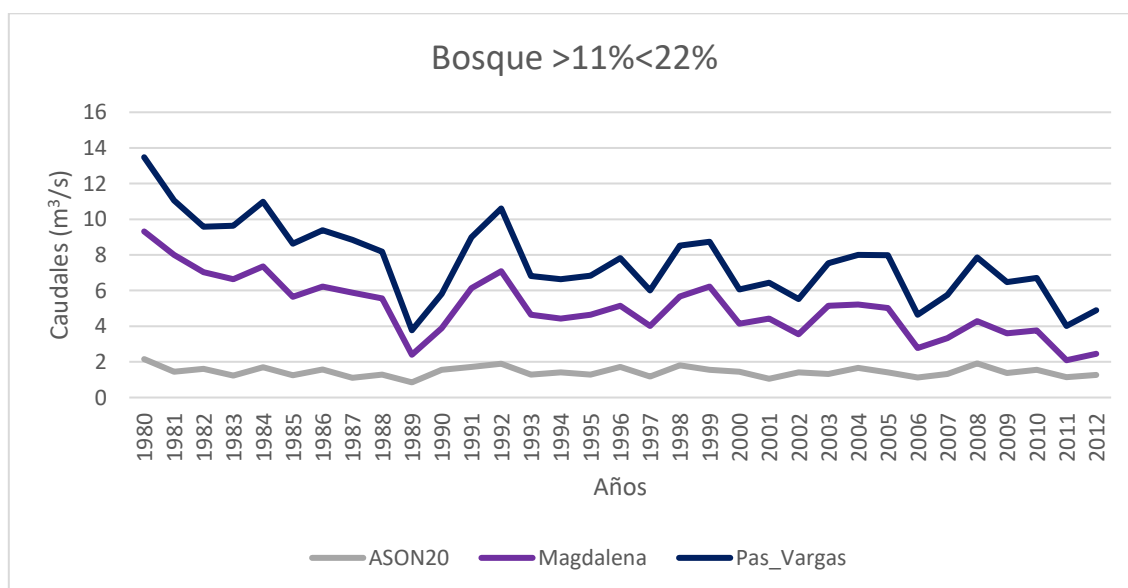


Figura 177. Caudales para el grupo de porcentaje de bosque >11% <22% en el escenario actual.

Para este mismo grupo se muestran los resultados obtenidos para el escenario de futuro (Figura 18). Al igual que en el grupo anterior analizado, los caudales siguen en mismo patrón que en el escenario actual, destacando también una disminución general de los valores de caudales para los tres puntos (Tabla 2) en comparación con el escenario actual.

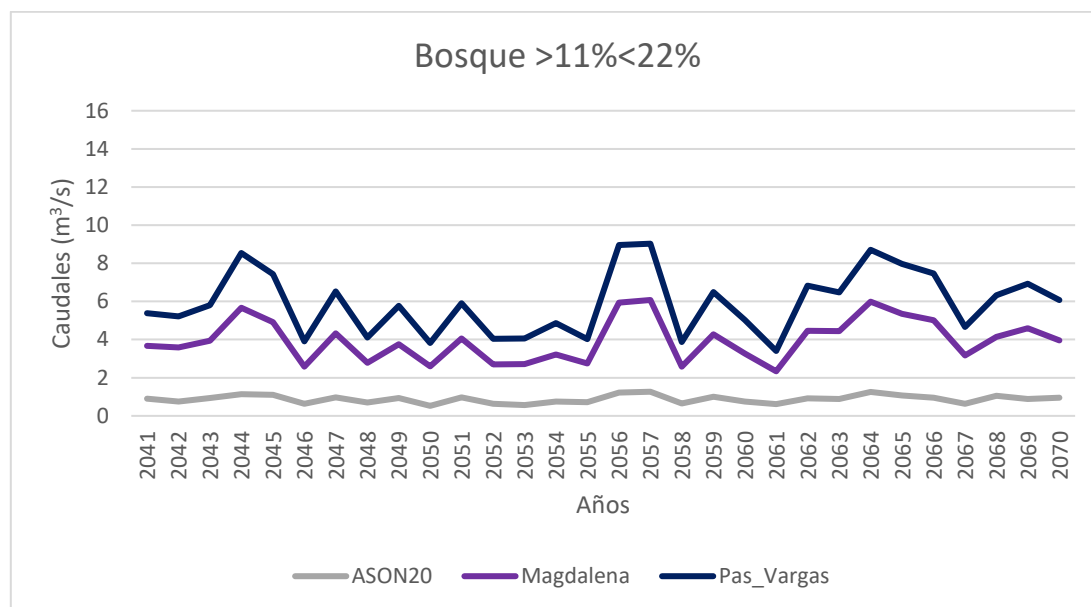


Figura 18. Caudales para el grupo de porcentaje de bosque >11% <22% en el escenario futuro.

Por último, se presentan los valores para el grupo de mayor porcentaje de bosque (<22%) (Figura 19). En este caso, destacan los valores altos del punto ASON3, siendo el punto con mayor área de cuenca de los tres. Por el contrario, el punto ASON13 presenta valores muy bajos de caudal respecto a los otros dos puntos de su grupo, el cual pertenece al grupo de menor área de cuenca.

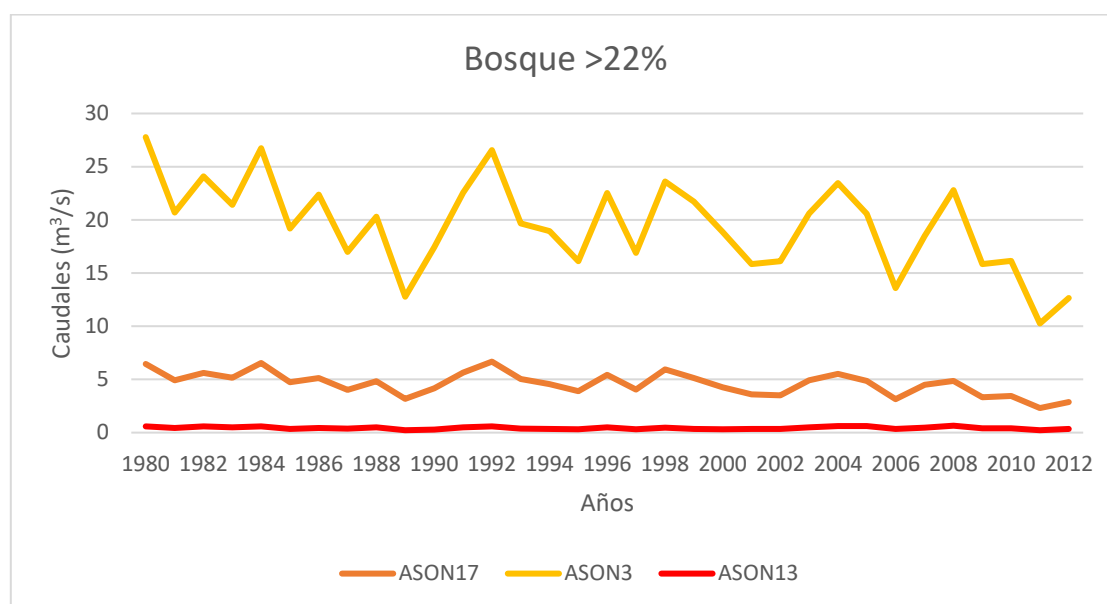


Figura 19.19 Caudales para el grupo de porcentaje de bosque >22% en el escenario actual.

En el escenario futuro (Figura 20), se vuelve a presentar el mismo patrón que para el escenario actual, destacando los valores del punto ASON13 y ASON3. Como en los grupos anteriores, se vuelve a dar la disminución de los caudales de forma general en todos los puntos, en comparación con el escenario actual.

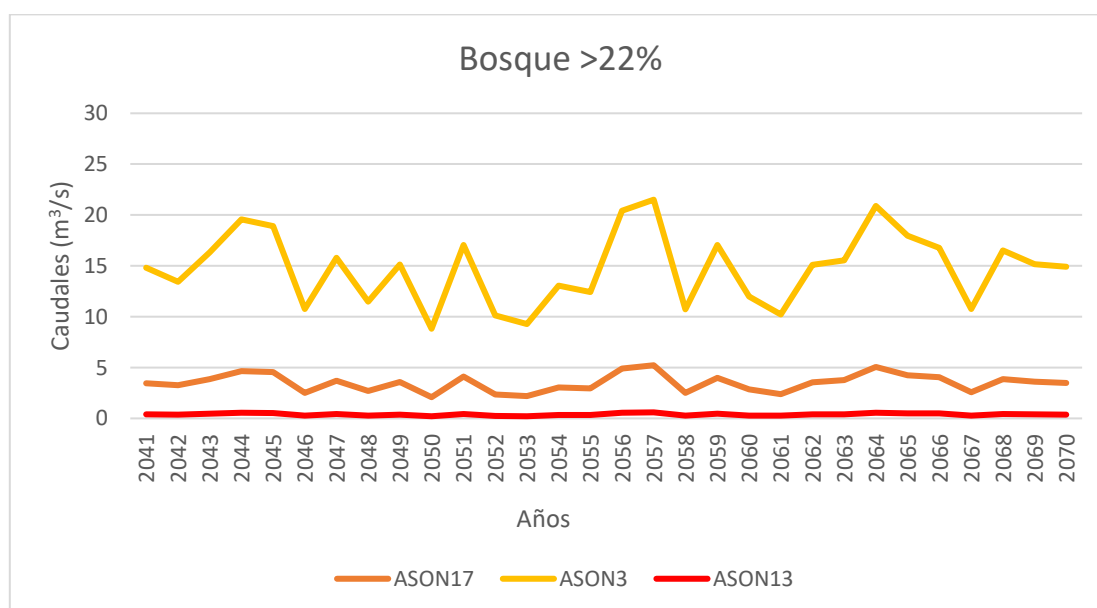


Figura 20. Caudales para el grupo de porcentaje de bosque >22% en el escenario futuro.

Por otro lado, se analizan los datos por tamaño de cuenca para el escenario actual y futuro. Primero analizamos las cuencas con menor tamaño (Figura 21), donde destacan los valores más altos del ASON20 respecto a los otros dos puntos. En este caso, el punto ASON20 es el punto con porcentaje de bosque y área intermedia de los tres puntos analizados de este grupo, por lo que no se puede comentar ningún patrón claro dentro de este grupo de cuencas pequeñas.

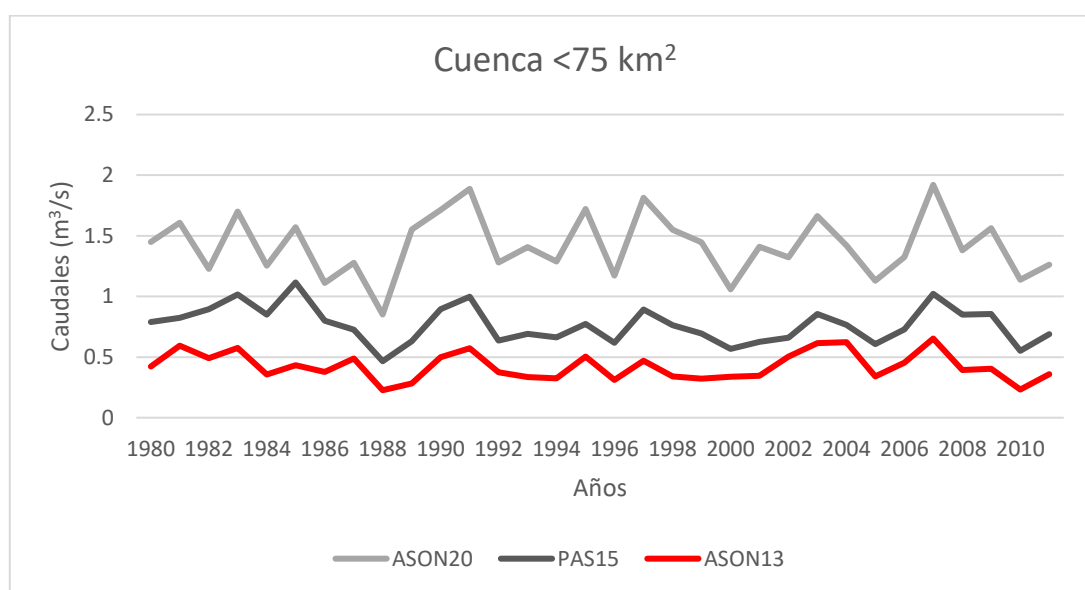


Figura 21. Caudales para el grupo de tamaño de cuenca <75 km² en el escenario actual.

En el escenario futuro (Figura 22), se igualan considerablemente los valores del ASON13 y PAS15, volviendo a destacar el punto ASON20. A su vez, si comparamos los resultados con el escenario actual, se observa una disminución general de los caudales para los tres puntos de estudio (Tabla 2).

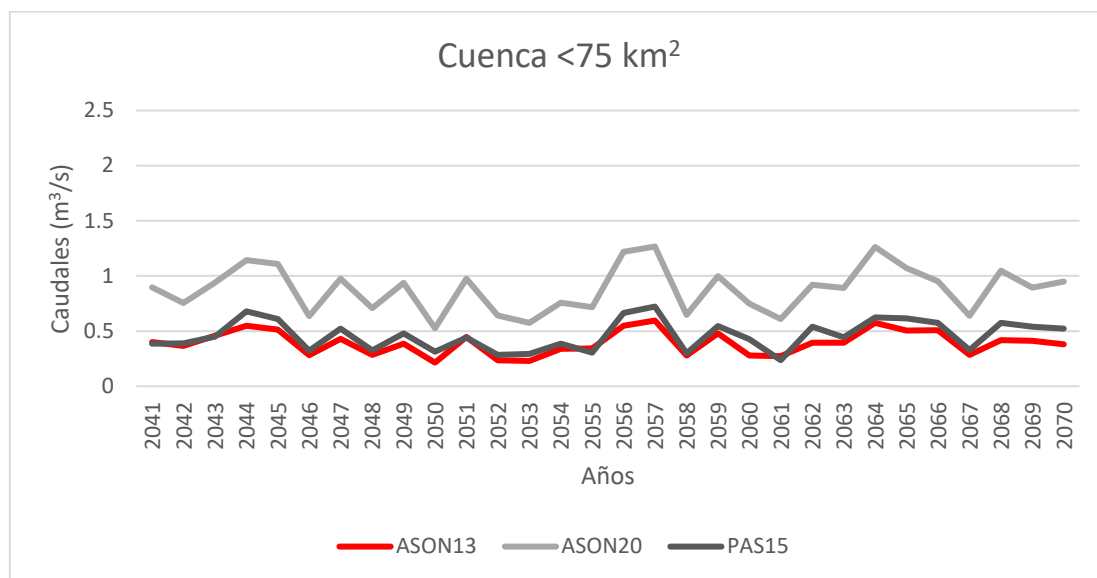


Figura 22. Caudales para el grupo de tamaño de cuenca <75 km² en el escenario futuro.

En el grupo de tamaño de cuenca intermedia, analizando solo el gráfico (Figura 23) no podemos afirmar que ningún punto tenga significativamente mayores valores de caudal que otros. Lo que si nos permite analizar este gráfico es la clara tendencia descendente de los valores de caudal según pasan los años (Tabla 2).

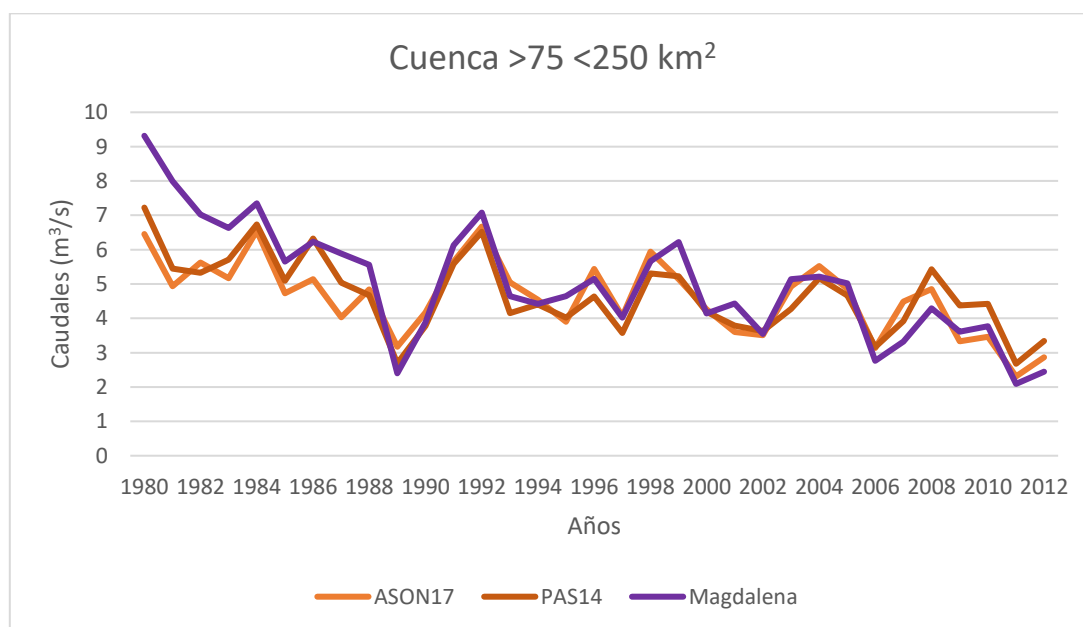


Figura 20. Caudales para el grupo de tamaño de cuenca >75<250 km² en el escenario actual.

En el escenario futuro para este mismo grupo de tamaño de cuenca (Figura 24), destacan los valores más altos del punto Magdalena, aun así, al igual que el gráfico anterior no podemos afirmar que ningún punto tenga significativamente valores mayores o menores que otros solo con este análisis gráfico. Además, volvemos a destacar la disminución de la cantidad de caudales en el tiempo.

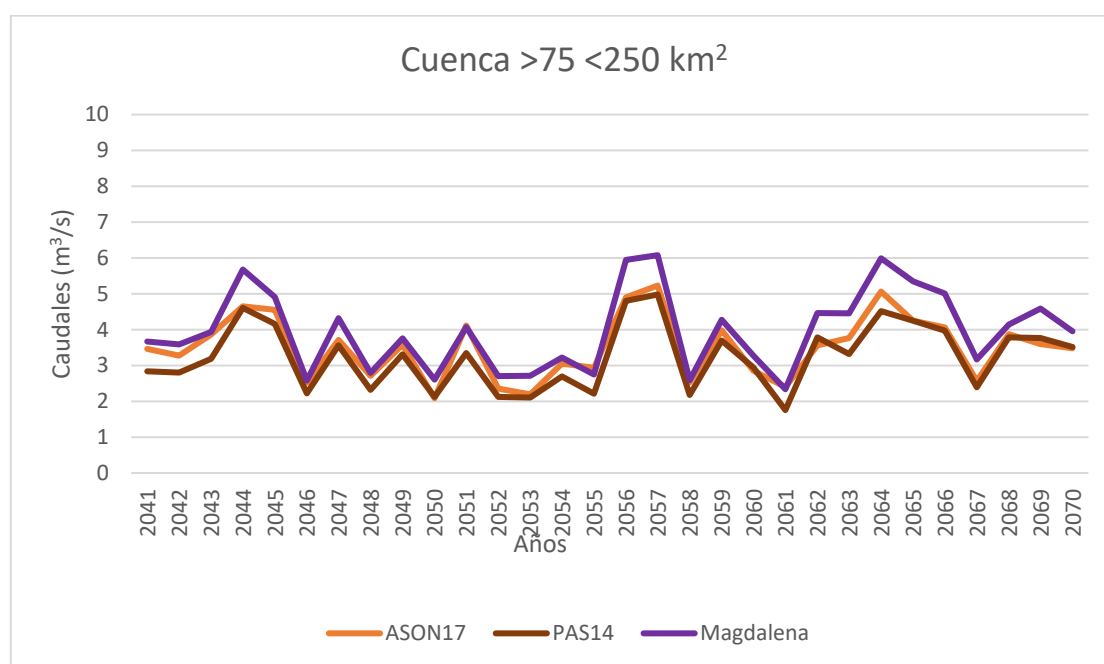


Figura 24. Caudales para el grupo de tamaño de cuenca >75 <250 km².

Por último, se presentan los resultados para las cuencas de mayor tamaño para el escenario actual y futuro (Figura 25 y 26). En los dos escenarios, destacan los valores altos del ASON3 por tener valores más altos que los otros dos puntos. Además, como en caso anteriores, este punto pertenece al grupo con menor porcentaje de bosque de los tres puntos estudiados. En este grupo, también cabe destacar la tendencia descendente de caudales en el escenario futuro (Tabla2).

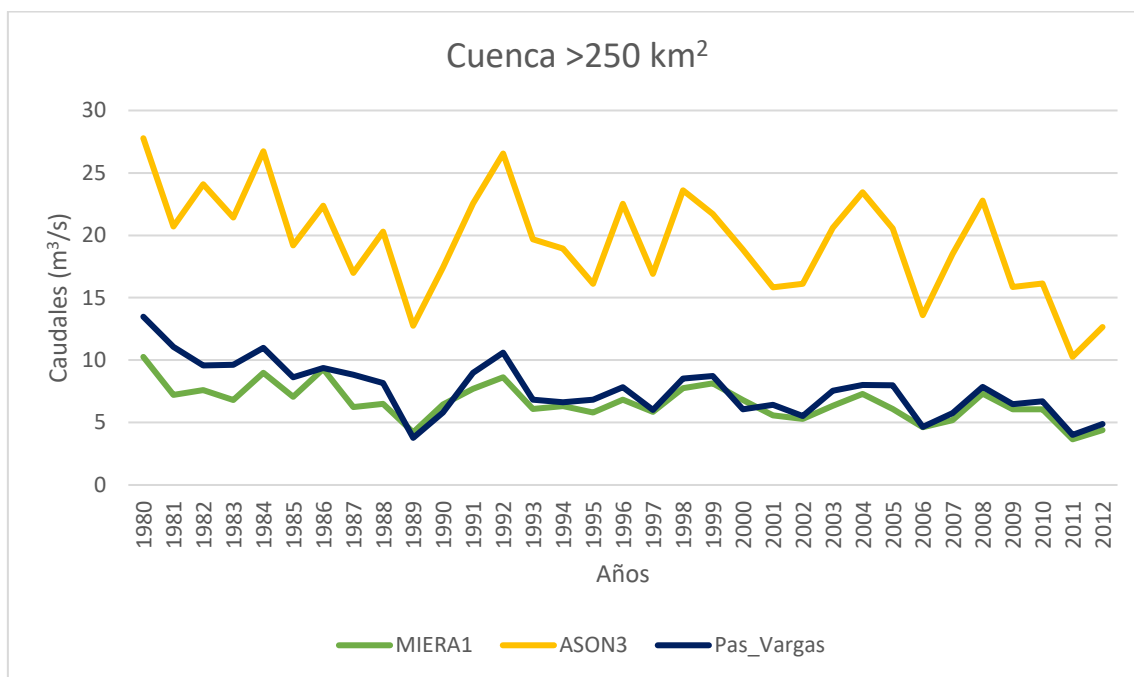


Figura 215. Caudales para el grupo de tamaño de cuenca >250 km² en el escenario actual.

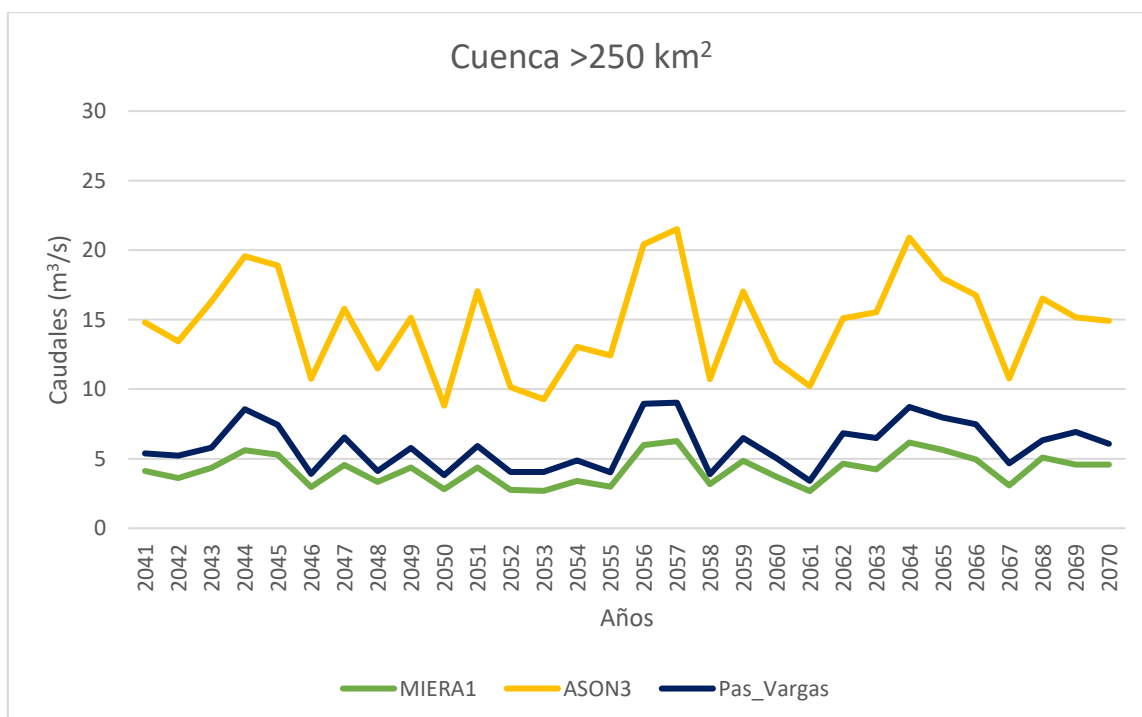


Figura 226. Caudales para el grupo de tamaño de cuenca >250 km² en el escenario futuro.

Tras haber analizado los tres grupos de diferentes porcentajes de bosque, se observa que el punto con mayor reducción de caudal es el punto PAS15, que a su vez, es el punto con menor porcentaje de bosque de todos los puntos estudiados. Por el contrario, el punto ASON13 es el punto con menor reducción de caudal y es el punto con mayor porcentaje de bosque. Sin embargo, para el análisis por tamaño de cuenca se observa que el caudal aumenta según va aumentando el tamaño de cuenca y que, por el contrario, el caudal es menor con la disminución del tamaño de área de cuenca.

A continuación, se presentan los resultados del índice FRE3 para la situación actual y futura (Figura 27), donde se observa que el punto PAS15 presenta valores más bajos respecto a los demás puntos de estudio (Tabla 3). Además, el punto PAS15 tiene el menor porcentaje de bosque de todos los puntos seleccionados. Por el contrario, el punto ASON20 muestra los valores más altos para el escenario actual, pero es el punto MIERA1 quien presenta los valores máximos para el escenario futuro. A su vez, analizando la variación de los valores del índice en cuanto al escenario de futuro, se puede observar que los valores del índice disminuyen en la mayoría de los puntos, exceptuando los puntos PAS14 y PAS15 que presentan un ligero aumento del valor del índice y estos puntos presentan un porcentaje de bosque bajo.

Tabla 3. Valores medios del índice FRE3 y sus variaciones en cuanto al escenario futuro en los puntos estudiados.

	ASON13	ASON17	ASON20	ASON3	Magdalena	MIERA1	Pas_Vargas	PAS14	PAS15
Índice FRE3 1980-2012	6.41	7.16	7.72	7.25	6.47	7.50	6.00	5.47	4.47
Índice FRE3 2041-2070	5.24	6.41	7.00	6.51	5.72	7.28	5.79	5.48	4.59
Variación (%)	-18.18	-10.37	-9.31	-10.11	-11.51	-2.99	-3.45	0.26	2.63

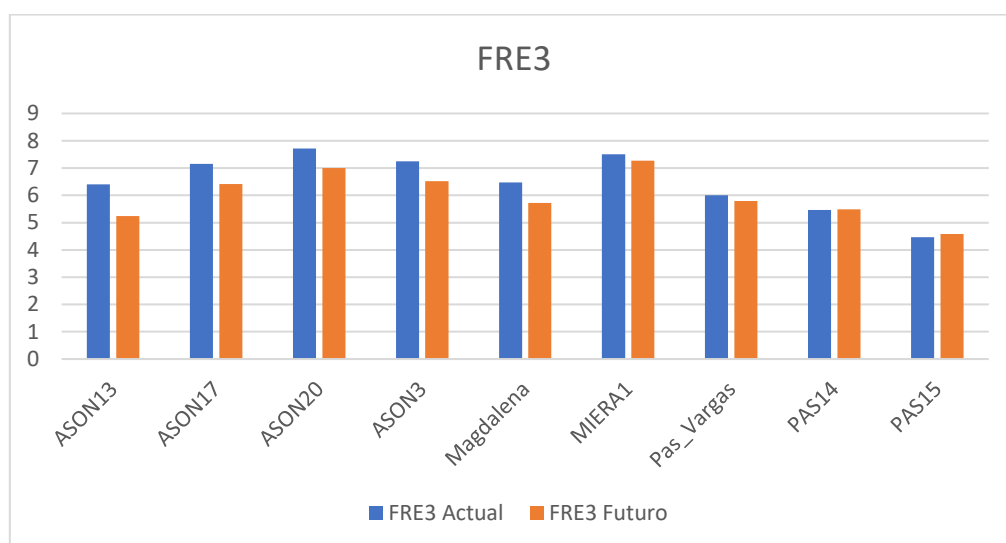


Figura 27. Resultados del índice FRE3 para el escenario actual y futuro.

Por otro lado, se han representado los valores del índice FRE7 con los valores de la serie actual y futura (Figura 28). Este índice representa valores de eventos que superen 7 veces el caudal mediano anual, por lo que serán eventos que ocurran menos veces que en el caso del índice FRE3. En este caso, vuelve a ocurrir que el punto PAS15 presenta los valores mínimos respecto a los otros puntos de estudio. Sin embargo, es el punto ASON13 el que presenta los valores máximos para el escenario actual y el MIERA1 para el escenario futuro. Al igual que para el índice FRE3, se presentan los porcentajes de variación, pero esta vez todos los puntos presentan un aumento de los valores.

Tabla 4. Valores medios del índice FRE7 y sus variaciones en cuanto al escenario futuro en los puntos estudiados.

	ASON13	ASON17	ASON20	ASON3	Magdalena	MIERA1	Pas_Vargas	PAS14	PAS15
Índice FRE7 1980-2012	6.16	5.25	4.56	5.16	4.50	6.03	3.84	2.00	1.06
Índice FRE7 2041-2070	6.28	5.45	5.17	5.45	5.28	6.59	4.48	2.76	2.03
Variación (%)	1.94	3.78	13.37	5.66	17.24	9.20	16.62	37.93	91.48

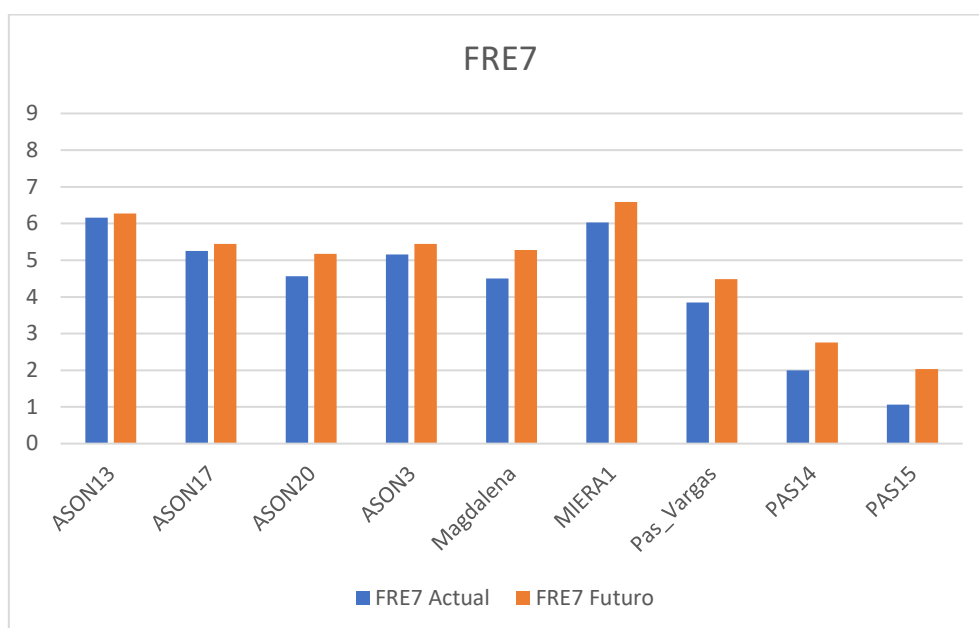


Figura 28. Resultados del índice FRE7 para el escenario actual y futuro.

Una vez analizados los índices FRE3 y FRE7, se observa que en el caso del FRE3 los eventos de menor magnitud descienden en el futuro, por el contrario, para el índice FRE7 aumentan los eventos de mayor magnitud. Si analizamos los resultados de variación de los índices, podemos observar que para el caso de FRE3 son los puntos con menor porcentaje de bosque los que menor reducción del índice muestran, por el contrario, para la variación del índice FRE7 son los puntos con mayor porcentaje de bosque los que presentan menor aumento del índice.

Para el caso del índice que presenta los valores de caudal base (BFI), se observa la siguiente figura (Figura 29), donde los puntos ASON3 y ASON20 presentan los valores máximos. En este caso, llama la atención el punto Magdalena con valores más bajos que el resto y a su vez, presenta una mayor variación del índice. Por el contrario, es el punto Pas_Vargas el que mayor reducción del índice BFI presenta. Cabe destacar que los puntos Magdalena y Pas_Vargas pertenecen al grupo intermedio de porcentaje de bosque. Además, destaca la clara disminución de caudal base a futuro, al igual que se ha podido observar en el análisis de caudales (Tabla 5).

Tabla 5. Valores medios del índice BFI y sus variaciones en cuanto al escenario futuro en los puntos estudiados.

	ASON13	ASON17	ASON20	ASON3	Magdalena	MIERA1	Pas_Vargas	PAS14	PAS15
Índice BFI 1980-2012	0.025	0.050	0.065	0.058	0.013	0.054	0.022	0.033	0.055
Índice BFI 2041-2070	0.022	0.037	0.045	0.046	0.005	0.038	0.014	0.023	0.044
Variación (%)	-13.83	-26.36	-30.53	-21.23	-56.83	-29.96	-36.97	-30.75	-19.27

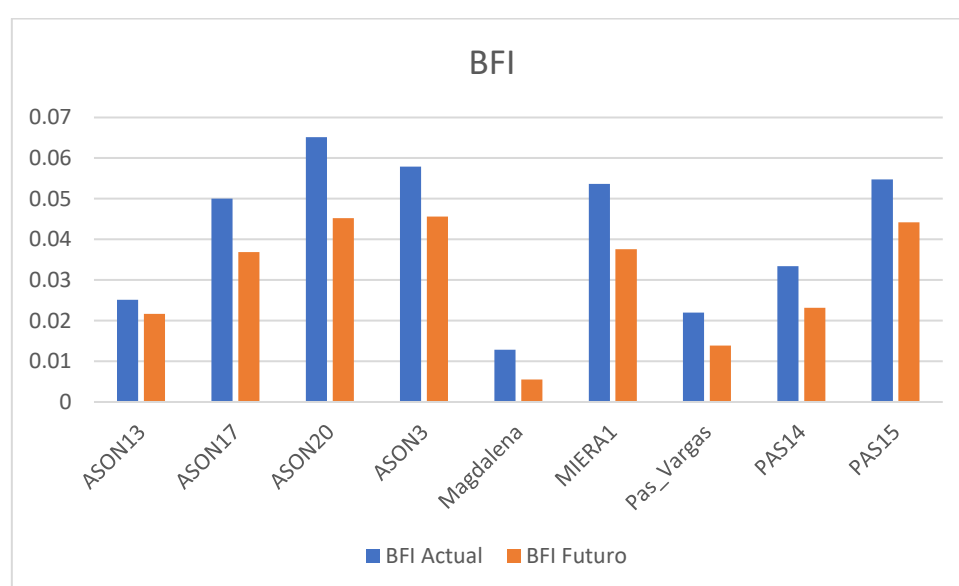


Figura 29. Resultados del índice BFI para el escenario actual y futuro.

3.2. Modelo de temperatura del agua

A continuación, se presentan los datos de temperatura media del agua para cada punto de estudio seleccionado, con los datos de la serie actual (Figura 30).

Los valores obtenidos de todos los puntos varían entre los 6°C y 20 °C. En el caso del punto PAS15 presenta los valores más altos del promedio de temperatura, por el contrario, el punto Magdalena los más bajos. Cabe comentar que el punto PAS15 tiene el porcentaje de bosque más pequeño y pertenece al grupo de cuencas más pequeñas, sin embargo, el punto Magdalena tiene un valor medio de porcentaje de bosque y pertenece al grupo de cuencas medianas.

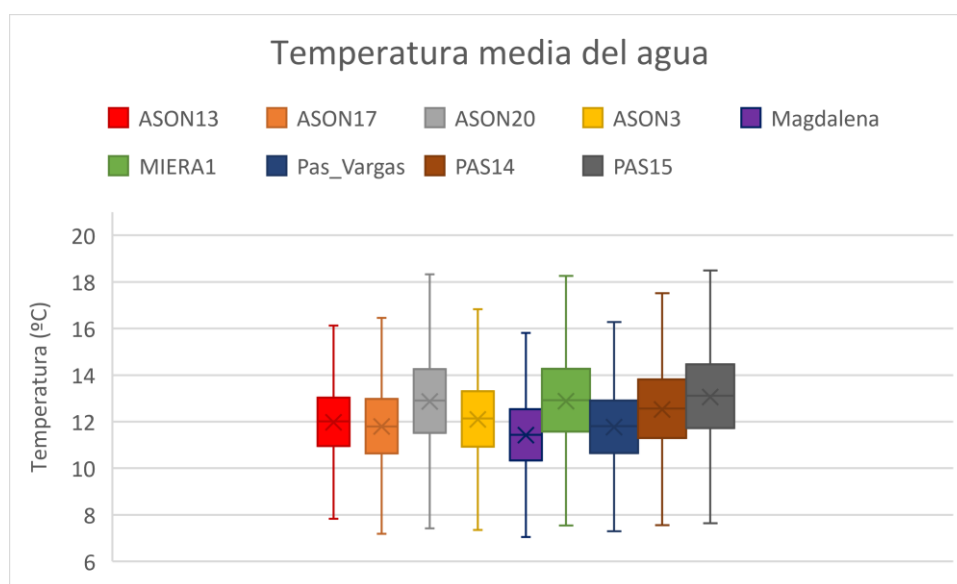


Figura 23. Temperatura media anual en el escenario actual de cada punto de estudio. El valor medio viene dado por una X, la mediana se presenta con una línea, los límites superior e inferior de los cuadros muestran los percentiles 25 (primer cuartil) y 75 (tercer cuartil) y las rayas exteriores representan los valores máximos y mínimos.

También se presentan los valores de temperatura media del agua para el escenario futuro (Figura 31), donde los valores oscilan entre los 7°C y 21°C. A su vez, presentan el mismo patrón que el escenario actual, pero aumentan los valores medios de temperatura de forma general.

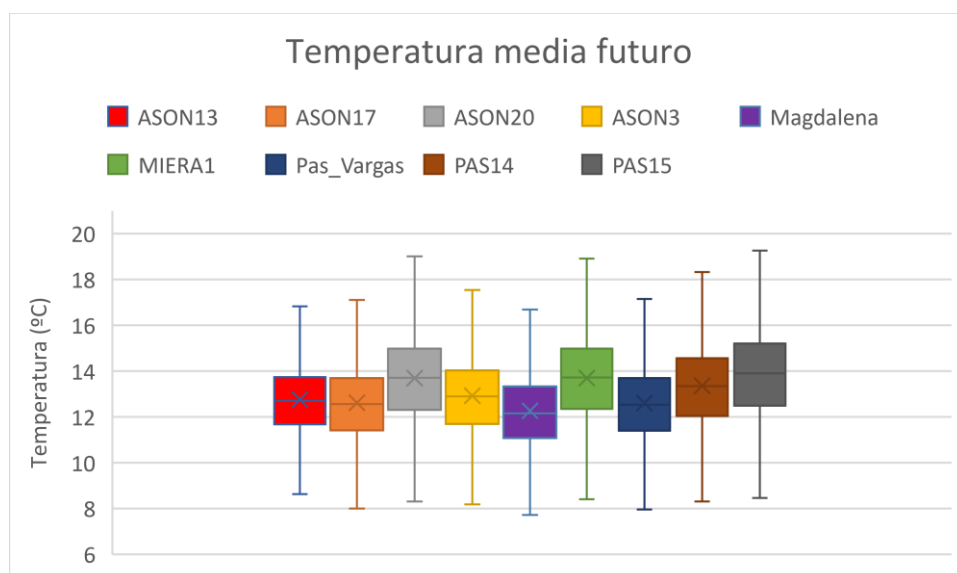


Figura 24. Temperatura media anual en el escenario futuro de cada punto de estudio. El valor medio viene dado por una X, la mediana se presenta con una línea, los límites superior e inferior de los cuadros muestran los percentiles 25 (primer cuartil) y 75 (tercer cuartil) y las rayas exteriores representan los valores máximos y mínimos.

Para poder realizar un correcto análisis comparativo del escenario actual y futuro, al igual que en el modelo hidrológico se han calculado los porcentajes de variación de los resultados de temperatura del agua (Tabla 6). En este caso, todos los puntos presentan un aumento de temperatura para el escenario de cambio climático. Además, el punto que presenta el valor medio de temperatura más bajo en el escenario actual y futuro, es el punto Magdalena que pertenece al grupo de porcentaje de bosque intermedio y tamaño de cuenca intermedio. En el escenario de futuro es el punto PAS15 el que presenta mayor temperatura al igual que ocurre en el escenario actual, sin embargo, es de los puntos que menor variación de temperatura presenta (el que más variación presenta es el punto Magdalena),

Tabla 6. Temperatura media y variaciones de la temperatura del agua en los puntos estudiados.

	ASON13	ASON17	ASON20	ASON3	Magdalena	MIERA1	Pas_Vargas	PAS14	PAS15
Temperatura media (°C) 1980-2012	11.97	11.79	12.87	12.10	11.43	12.89	11.77	12.52	13.06
Temperatura media (°C) 2041-2070	12.75	12.61	13.69	12.92	12.26	13.69	12.60	13.35	13.89
Variación (%)	6.52	6.94	6.38	6.75	7.30	6.26	7.07	6.60	6.29

Asimismo, se representan los puntos con el mismo porcentaje de bosque en el escenario actual y futuro, para poder analizar las diferencias dadas en las dos series estudiadas. Dentro de cada grupo de porcentaje de bosque, se puede observar el aumento de temperatura media en la serie a futuro. En el caso del grupo con menor porcentaje de bosque (Figura 32) de la serie actual, el punto PAS14 presenta los valores mínimos, por el contrario, el punto PAS15 los máximos. Además, el punto PAS15 es el de menor tamaño de cuenca de los tres.

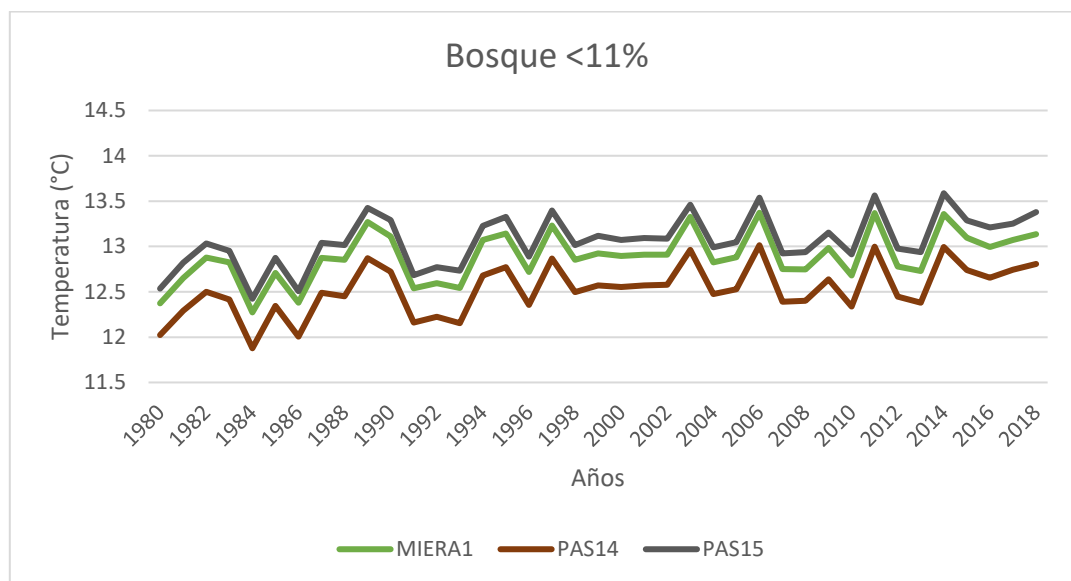


Figura 25. Temperatura media anual de la serie actual del grupo con porcentaje de bosque menor a 11%.

Lo mismo ocurre en cuanto a los puntos con mayor y menor temperatura para la serie a futuro en el grupo de menos porcentaje de bosque (Figura 33). Sin embargo, cabe destacar el aumento considerable de temperatura a futuro para los tres puntos presentados.

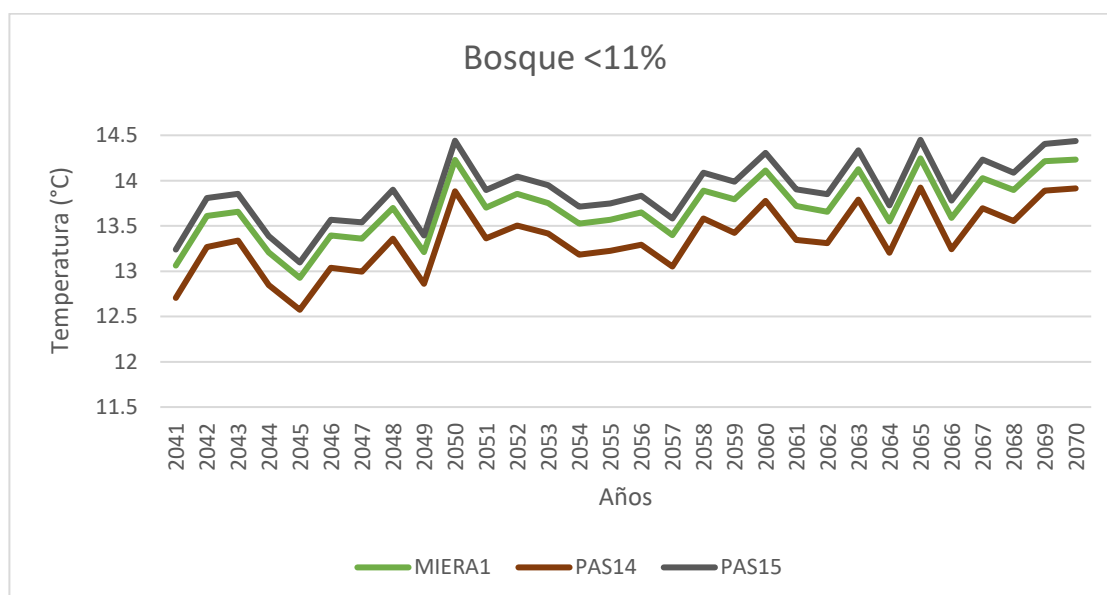


Figura 26. Temperatura media anual de la serie futura del grupo con porcentaje de bosque menor a 11%.

En el caso del grupo con porcentaje de bosque mayor de 11% y menor de 22%, se cumple la tendencia de una mayor temperatura en el escenario de futuro (Figura 34 y Figura 35). Además, el punto ASON20 presenta una mayor temperatura que los otros dos puntos de su grupo, destacando que es el que presenta el menor porcentaje de bosque de los tres puntos estudiados de este grupo.

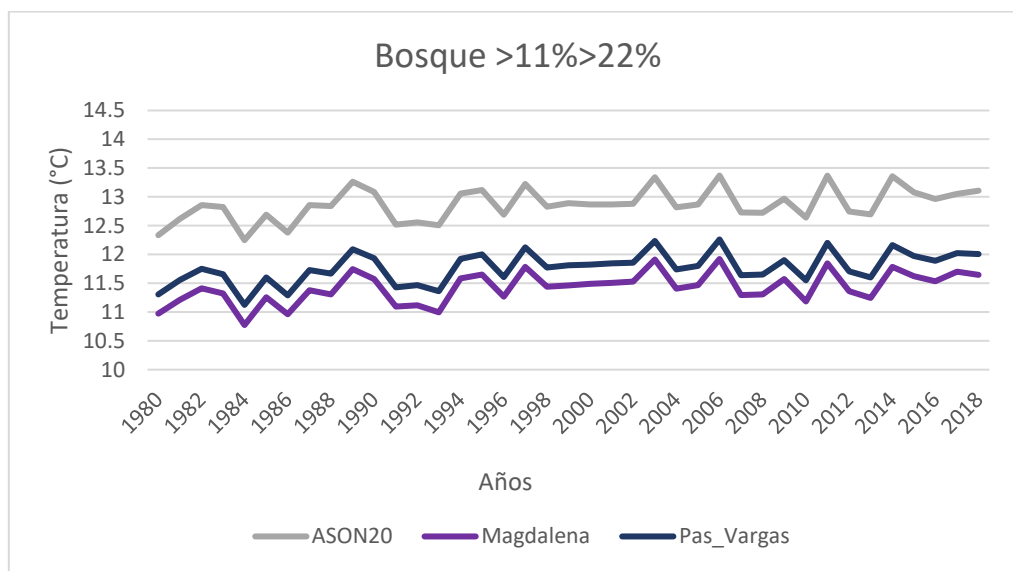


Figura 27. Temperatura media anual de la serie actual del grupo con porcentaje de bosque mayor de 11% y menor de 22%.

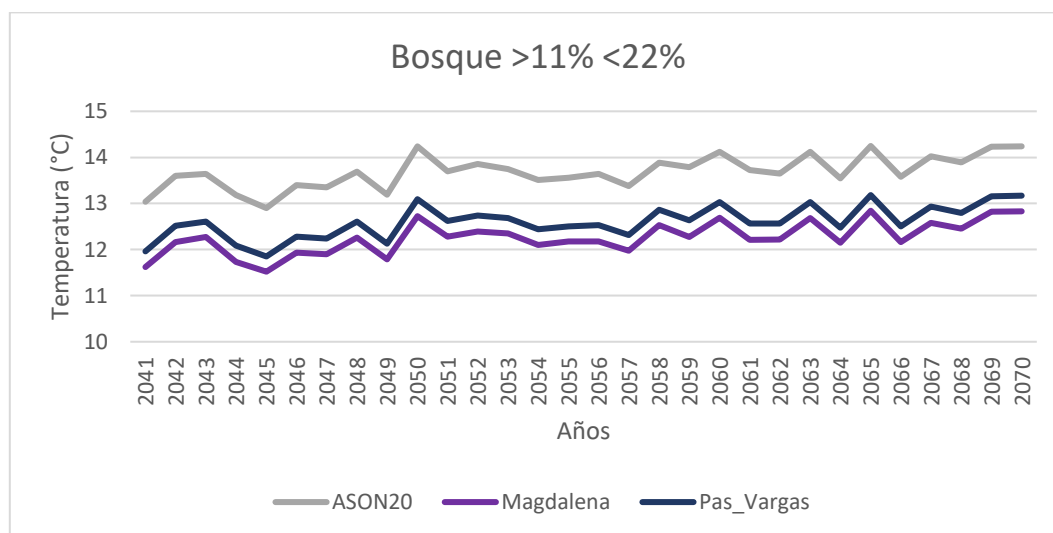


Figura 28. Temperatura media anual de la serie futura del grupo con porcentaje de bosque mayor de 11% y menor de 22%.

Para el grupo de bosque con porcentaje mayor a 22%, se vuelve a cumplir la tendencia ascendente a futuro de la temperatura del agua (Figura 36 y Figura 37). Sin embargo, en este grupo los valores de cada punto no varían tanto como en el grupo anterior, por lo que no se puede sacar un patrón claro.

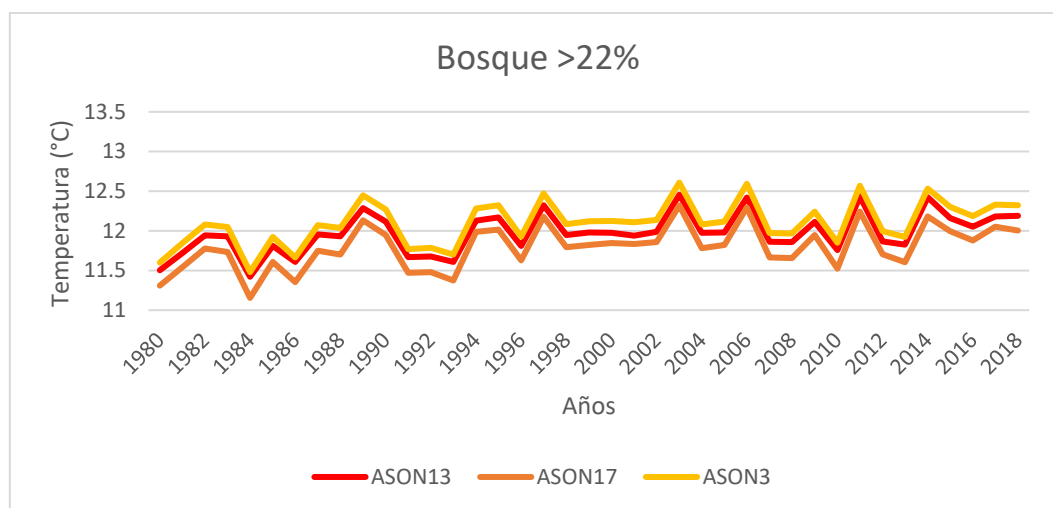


Figura 29. Temperatura media anual de la serie actual del grupo con porcentaje de bosque mayor de 22%.

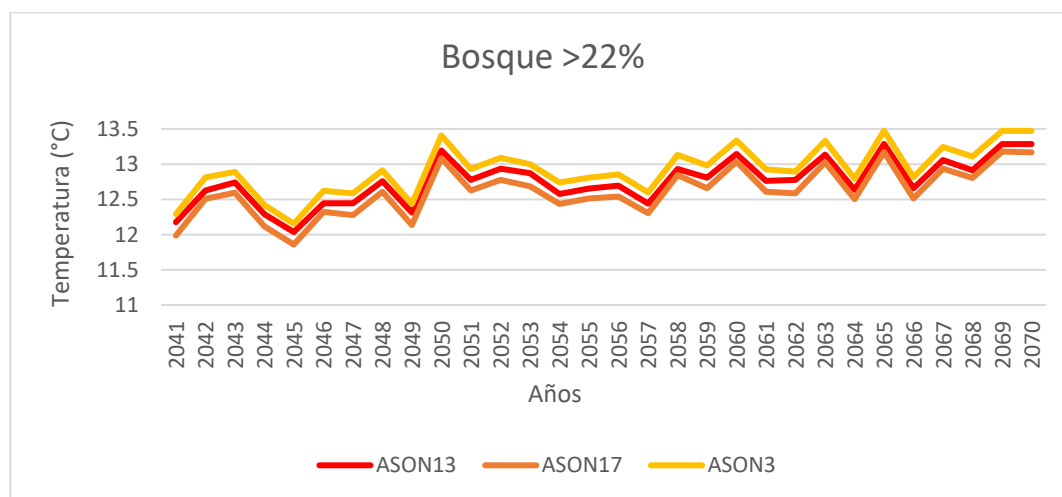


Figura 30. Temperatura media anual de la serie futura del grupo con porcentaje de bosque mayor de 22%.

Asimismo, si analizamos el efecto del tamaño de cuenca con la temperatura media del agua, en el grupo con menor tamaño de cuenca (Figura 40 y 41) podemos observar que destacan los bajos

valores del ASON13 respecto a los otros dos. Además, los dos gráficos muestran un aumento de temperatura a futuro (Tabla 6).

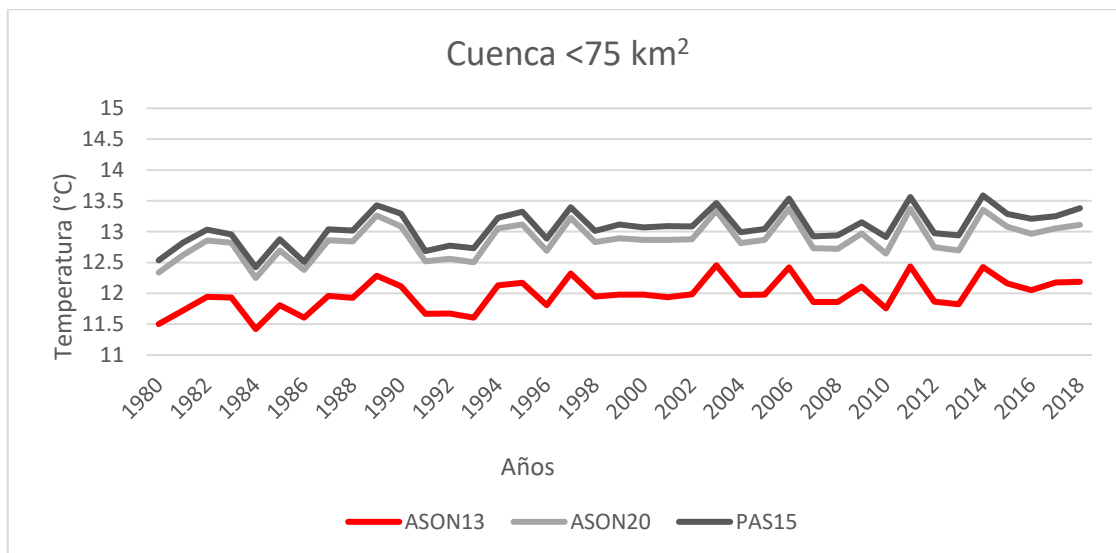


Figura 31. Temperatura media para el grupo de cuenca <75 km² en el escenario actual

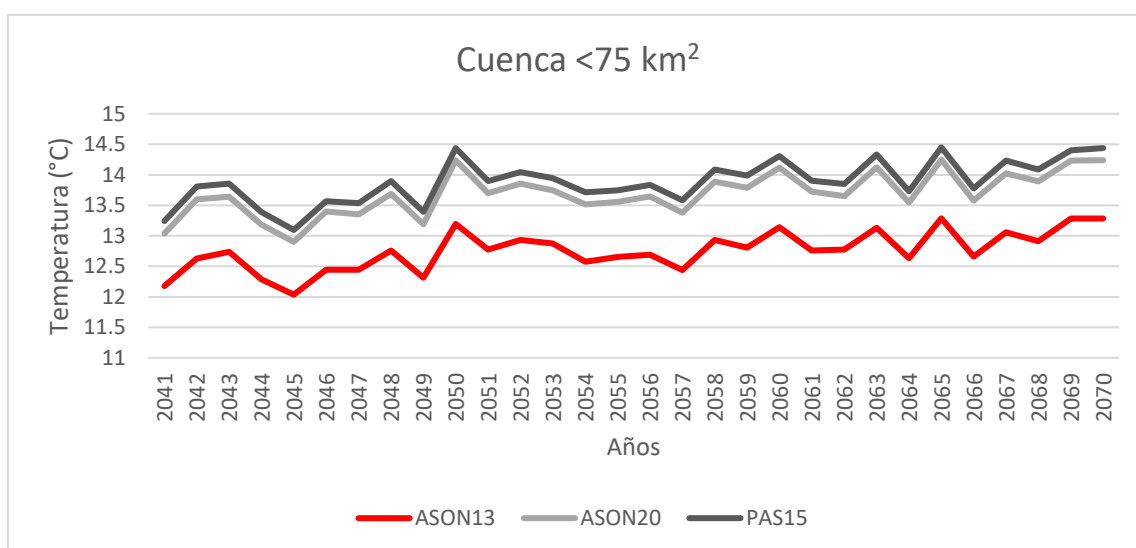


Figura 32. Temperatura media para el grupo de cuenca <75 km² en el escenario actual.

En el caso del grupo de cuencas medianas (Figura 42 y 43), es el PAS14 quien presenta las temperaturas más altas, siendo el punto con menor porcentaje de bosque de los tres. Como en el caso anterior, vuelve a cumplirse la tendencia ascendente de temperatura.

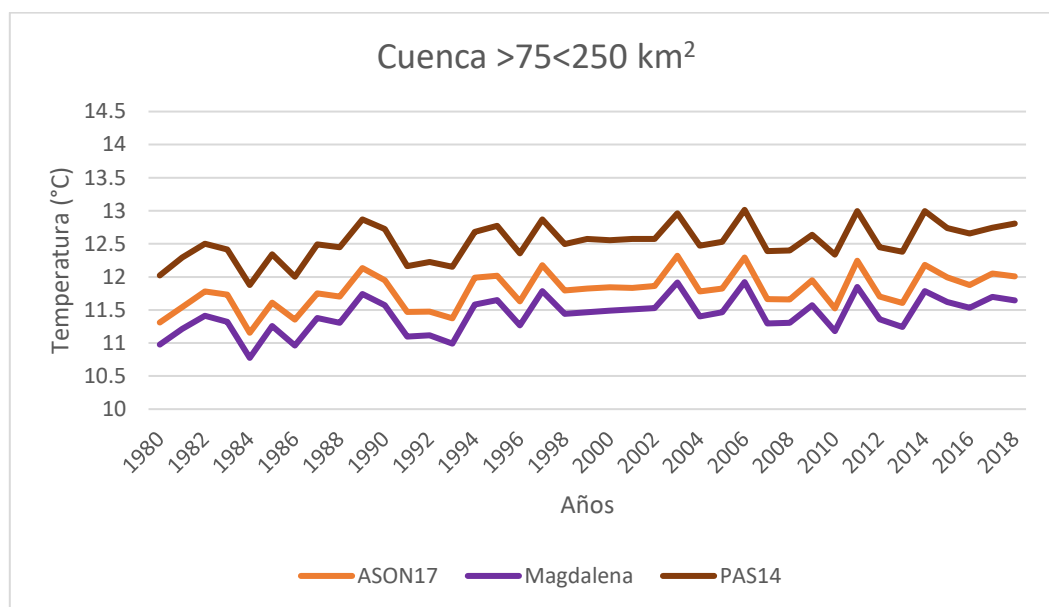


Figura 33. Temperatura media para el grupo de cuenca >75 <250 km² en el escenario actual.

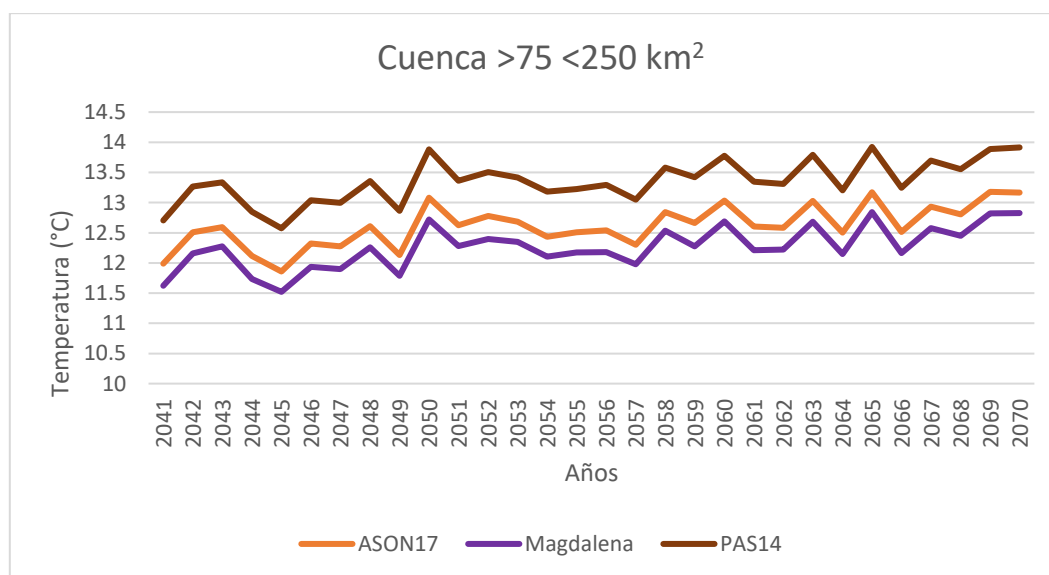


Figura 34. Temperatura media para el grupo de cuenca >75 <250 km² en el escenario futuro.

Por último, en el grupo de áreas mayor de 250 km² (Figura 42 y 43) se cumple la tendencia del grupo anterior, donde el punto con menor porcentaje de bosque (MIERA1) es el que muestra los valores más altos.

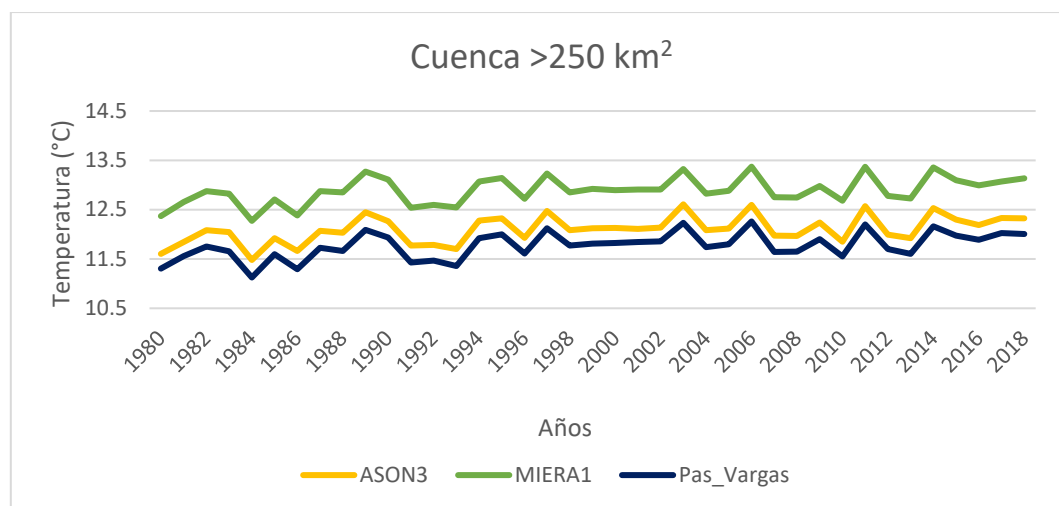


Figura 35. Temperatura media por meses del grupo con cuenca mayor de 250 km² serie actual.

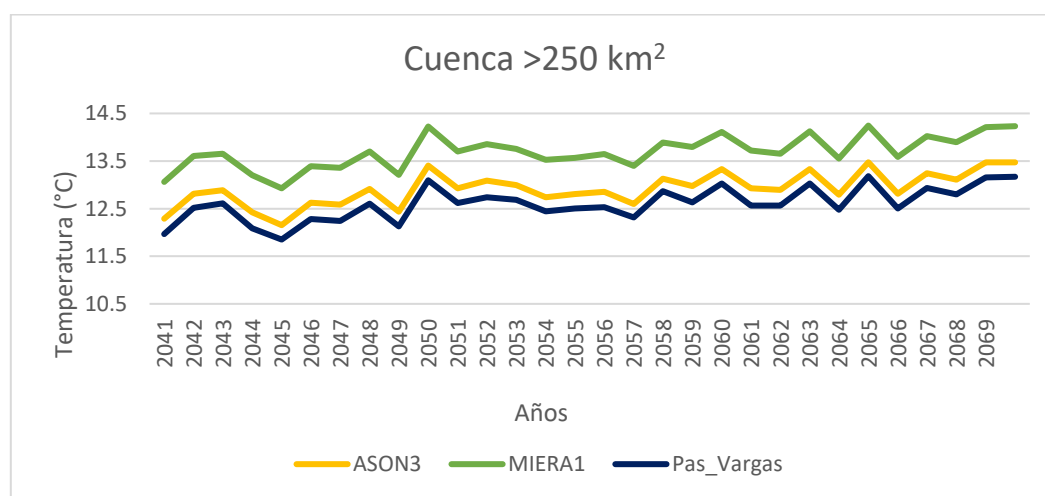


Figura 36. Temperatura media por meses del grupo con cuenca mayor de 250 km² serie futura.

Una vez analizados los datos de temperaturas por grupos de porcentaje de bosque y tamaño de cuenca, se puede ver que los puntos con menor porcentaje de bosque son los que destacan con mayor temperatura en los grupos por tamaño de cuenca. Asimismo, se cumple el aumento de temperatura para el escenario de futuro en todos los grupos estudiados.

En cuanto a la variación estacional de los valores medios de temperatura de cada año se presentan la Figura 38 y la Tabla 7. Se puede ver que los meses de invierno muestran valores del mismo orden para todos los puntos, por el contrario, en los meses de verano el valor de cada estación es más variable.

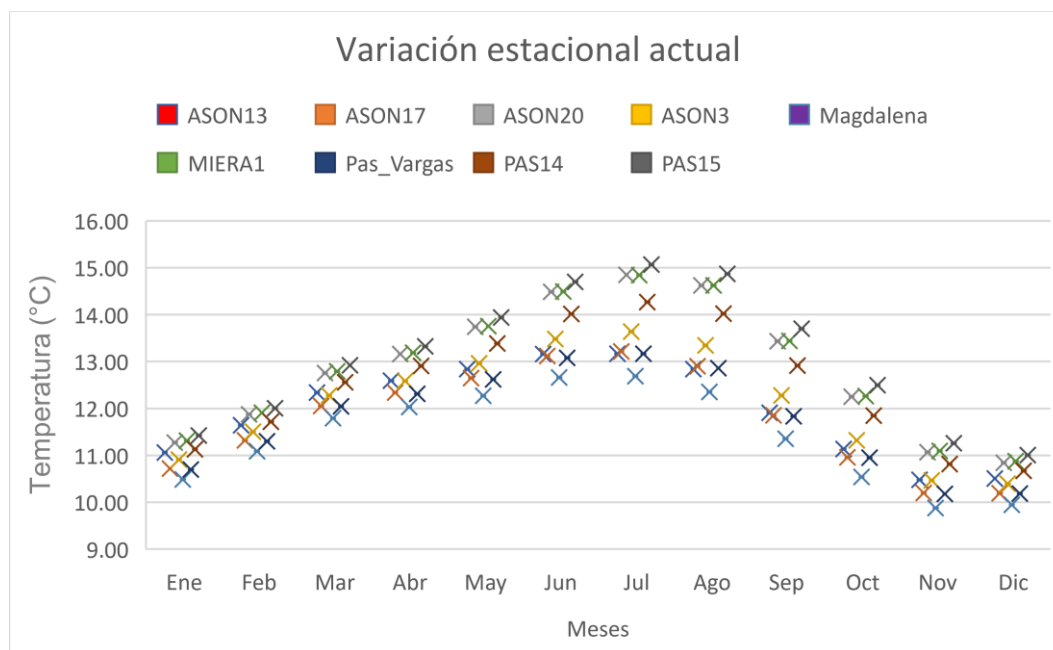


Figura 37. Variación estacional serie actual.

A su vez, se presenta la variación estacional con los datos futuros (Figura 39 y Tabla 7), donde podemos observar que sube la temperatura para todos los meses y puntos estudiados. Además, el punto Magdalena presenta el mayor aumento de todos los puntos para los meses de octubre y noviembre (cuales son los meses con mayor variación de todos) llegando a alcanzar una variación de temperatura de 13.54%. Por el contrario, el punto que presenta la variación más baja de todas para el mes de noviembre es el punto MIERA1 el cual pertenece al grupo de menor porcentaje de bosque. Sin embargo, para el mes de abril (el mes con menor variación de todos) el punto con menor variación es el punto ASON13, que pertenece al grupo de mayor porcentaje de bosque y por el contrario, el punto que presenta mayor variación para este mes, es el punto MIERA1.

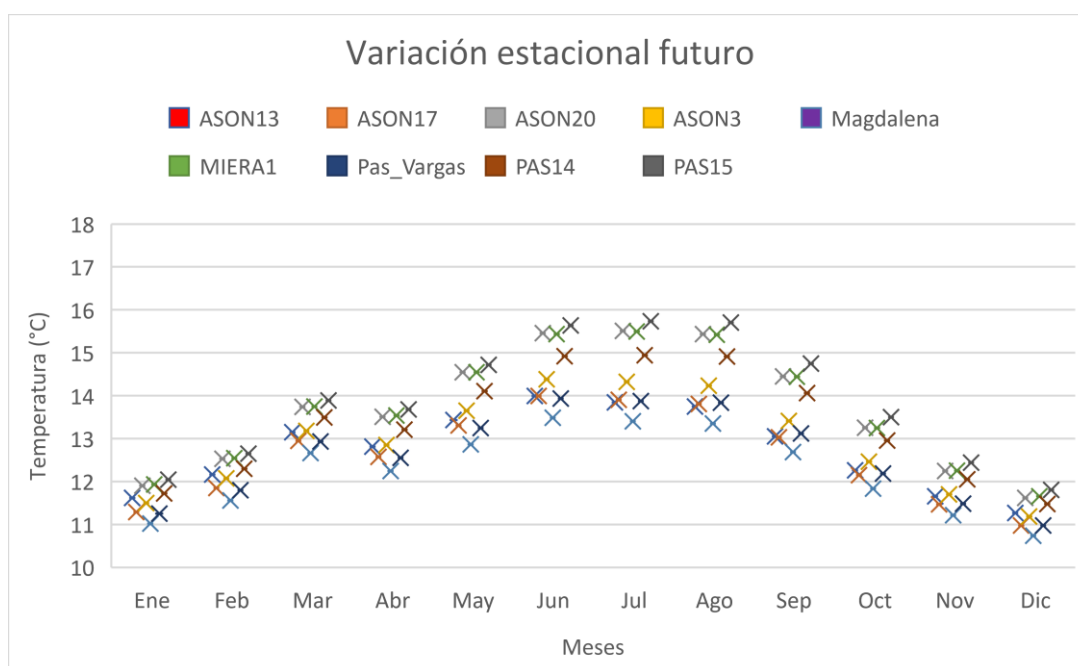


Figura 38. Variación estacional serie futura.

Tabla 7. Variación estacional del escenario actual y futuro por meses para cada punto.

Mes	ASON13 Variación (%)	ASON17 Variación (%)	ASON20 Variación (%)	ASON3 Variación (%)	Magdalena Variación (%)	MIERA1 Variación (%)	Pas_Vargas Variación (%)	PAS14 Variación (%)	PAS15 Variación (%)
Ene	5.09	5.37	5.58	5.43	5.13	5.47	5.14	5.30	5.46
Feb	4.49	4.73	5.51	4.94	4.24	5.38	4.43	4.97	5.39
Mar	6.58	7.40	7.70	7.39	7.40	7.49	7.39	7.47	7.49
Abr	1.76	1.92	2.68	2.10	1.80	2.69	1.98	2.35	2.68
May	4.62	5.18	5.88	5.29	4.82	5.75	4.99	5.37	5.60
Jun	6.36	6.67	6.70	6.68	6.52	6.49	6.52	6.46	6.37
Jul	5.15	5.21	4.46	5.01	5.68	4.40	5.40	4.76	4.42
Ago	7.08	7.06	5.54	6.67	8.13	5.45	7.59	6.35	5.58
Sep	9.61	9.97	7.55	9.24	11.70	7.46	10.85	8.89	7.69
Oct	10.12	10.90	8.21	10.05	12.27	8.03	11.30	9.34	8.09
Nov	11.29	12.47	10.66	11.82	13.54	10.43	12.81	11.45	10.51
Dic	7.24	7.72	7.21	7.56	7.97	7.15	7.80	7.54	7.32

4. Discusión

En este estudio, se han utilizado datos históricos y de futuro para analizar los patrones de la temperatura del agua y los caudales de los ríos de la zona de estudio del proyecto ALICE. Se ha querido analizar el efecto del bosque en la cuenca, por ello se han estudiado 9 puntos localizados en las tres cuencas del proyecto ALICE con porcentajes de bosque diferentes y tamaños de cuenca distintos, para una altitud menor de 200 m.

Al haber seleccionado puntos con características diferentes, la metodología aplicada para analizar los datos de caudal históricos y de futuro ha permitido obtener unos buenos resultados de acuerdo al objetivo del estudio. En el análisis de los datos de caudal por grupo de porcentaje de bosque en el escenario actual y futuro, se confirma que el punto con menor porcentaje de bosque (PAS15) presenta la mayor reducción de caudal en cuanto al escenario de futuro, de todos los puntos estudiados. Sin embargo, así como con la variación de caudal, no se ha podido sacar ninguna relación justificada entre el porcentaje de bosque y la cantidad de caudal. Por el contrario, en los resultados mostrados por tamaño de cuenca, los valores máximos de caudal los presenta el grupo con mayor tamaño de área. Por lo que se confirma que según aumenta el tamaño de cuenca, aumenta la cantidad de caudal y por el contrario, el caudal es menor en cuencas de menor tamaño. En cuanto a la variación de caudal por tamaño de cuenca, no se ha observado un patrón claro en el que la variación aumente o disminuya por el tamaño de cuenca.

En el análisis del escenario futuro, todos los resultados presentados de las series de caudal presentan una tendencia descendente de la cantidad de caudal, por lo que con los resultados de este estudio se puede confirmar la reducción de cantidad de agua disponible al igual que han demostrado estudios previos (Ej. Masia et al., 2021). Asimismo, esta reducción de caudales en el escenario futuro, puede relacionarse con la previsión de reducción de precipitaciones lo que conllevará una escasez de agua (Masia et al., 2021).

Los índices calculados revelan que el punto PAS15 presenta los valores más bajos en los índices FRE3 y FRE7 y teniendo en cuenta que este punto es el de menor porcentaje de bosque de todos, se podría relacionar la cantidad de bosque de una cuenca con el número de eventos de caudal superior al caudal mediano anual. Igualmente, analizando los resultados de estos índices, se ha observado que para el índice de eventos de menor magnitud (FRE3) descienden los eventos para el escenario de futuro. En cambio, para el índice FRE7, los eventos de mayor magnitud aumentan

para el escenario de futuro, por lo que estos resultados se pueden interpretar como uno de los efectos hidrológicos del cambio climático, como se ha podido comprobar en estudios anteriores (Ej. Serrano Vincenti et al., 2012). El último índice analizado, muestra el caudal base para cada punto en el escenario futuro y actual, donde los resultados no esclarecen ningún patrón en cuanto al porcentaje de bosque y el tamaño de cuenca. Si cabe destacar, la disminución del caudal base en todos los puntos de la zona de estudio, el cual se puede relacionar con la disminución del agua disponible en el futuro, como se ha comentado anteriormente.

Un aspecto importante a discutir en cuanto a la temperatura del agua, al igual que en el análisis hidrológico, es la importancia de variación de temperatura entre el escenario actual y futuro. En los resultados analizados, no se observa una relación directa entre la temperatura media y el porcentaje de bosque. Lo que si se ha podido observar es que el punto PAS15 presenta el mayor valor de temperatura, y que a su vez presenta uno de los valores menores de variación de temperatura para el escenario futuro. Del mismo modo, el punto que menor temperatura presenta en los dos escenarios (Magdalena) muestra el mayor aumento de temperatura para el escenario de futuro. Por otro lado, en cuanto al análisis de los puntos por grupos de tamaño de cuenca, los resultados presentan la importancia del porcentaje de bosque en la cuenca. Se observa que los puntos con menor porcentaje de bosque son los que destacan con mayor temperatura en cada grupo de tamaño de cuenca.

En cuanto al análisis de la variación estacional, el único análisis claro que se puede obtener es que el mes que sufrirá un mayor aumento de temperatura para todos los puntos, es el mes de noviembre y que por el contrario el mes de abril sufrirá el menor porcentaje de aumento de temperatura. Sin embargo, con el análisis realizado no se ha podido obtener, como en apartados anteriores, una relación entre la variación de temperatura y el porcentaje de bosque o tamaño de cuenca.

Los resultados de este estudio revelan que la temperatura del agua aumentará en el futuro para el escenario de cambio climático de RCP 8.5, en todos los puntos estudiados independientemente del porcentaje de bosque y del tamaño de cuenca de cada uno. Como se ha observado en estudios previos (Fomento et al., 2010), se prevé un aumento de la temperatura que afectaría directamente al ciclo del agua.

De estos resultados se han obtenido conclusiones claras para los datos analizados de caudales y temperaturas de agua. Sin embargo, debemos recordar que solo se han analizado tres cuencas

de Cantabria, de una misma zona de estudio. Hubiera sido interesante poder estudiar alguna cuenca con mayor porcentaje de bosque, para confirmar el efecto del bosque en la temperatura media del agua y poder sacar patrones respecto a las cuencas con diferentes ocupaciones del suelo. Además, una vez confirmada la importancia del bosque en la cuenca, un análisis más complejo sería analizar los resultados por diferentes tipos de bosque, pudiendo sacar patrones según el tipo de bosque de cada punto.

Por otro lado, se ha confirmado la reducción de caudal y el aumento de temperatura para el escenario de cambio climático RCP 8.5, pero sería interesante hacer este mismo análisis para otros escenarios de cambio climático, para poder ver en qué escenario tendríamos la situación más perjudicial. Asimismo, en este estudio se ha realizado el análisis del escenario futuro sin cambios en la ocupación del suelo, por lo que un estudio más complejo podría analizar los efectos conjuntos por cambios en la ocupación del suelo y el cambio climático.

Finalmente, debemos recordar que los efectos del cambio climático afectan a toda la sociedad y que, para reducir y gestionar los riesgos, se deben aplicar diferentes medidas de adaptación y mitigación (Donnelly et al., 2017). Por lo que este estudio, ayuda a realizar un análisis de los posibles efectos del cambio climático y conociendo estos efectos, se podrían adoptar futuras medidas para evitar mayores riesgos.

5. Conclusión

Con los resultados obtenidos de la metodología aplicada y de acuerdo con los objetivos planteados, se puede concluir la tendencia ascendente en el escenario futuro de la temperatura del agua y descendiente en el caso del caudal, con independencia de las características de tamaño de cuenca y del porcentaje de bosque. Del mismo modo, se establece una relación entre la variación en cuanto al escenario futuro de caudales y el porcentaje de bosque, donde los puntos con menor porcentaje de bosque presentan valores de variación mayores. En cuanto al análisis de temperatura del agua, se concluye que en cuencas con tamaños de cuencas similares los puntos con mayor porcentaje de bosque presentan valores de temperatura del agua menores.

6. Referencias

- ALICE in Spain: Pas, Miera and Asón catchments, Cantabria* – ALICE. (2021). <https://project-alice.com/es/alice-in-spain/>
- Amblar, M. P., Casado Calle, M. J., Pastor Saavedra, M. A., Ramos Calzado, P., & Rodríguez Camino, E. (2017). *Guía de escenarios regionalizados de cambio climático sobre España a partir de los resultados del IPCC-AR5*.
- Caissie, D. (2006). The thermal regime of rivers: A review. *Freshwater Biology*, 51(8), 1389–1406. <https://doi.org/10.1111/J.1365-2427.2006.01597.X>
- Carraro, L., Toffolon, M., Rinaldo, A., & Bertuzzo, E. (2020). SESTET: A spatially explicit stream temperature model based on equilibrium temperature. *Hydrological Processes*, 34(2), 355–369. <https://doi.org/10.1002/HYP.13591>
- CH Cantábrico. (n.d.-a). *Río Miera - WebCHC*. Recuperado 13 de septiembre, 2021, de <https://www.chcantabrico.es/eu/las-cuencas-cantabricas/marco-fisico/hidrologia/rios/miera>
- CH Cantábrico. (n.d.-b). *Río Pas - WebCHC*. Ministerio Para La Transición Ecológica. Recuperado el 5 de septiembre, 2021, de <https://www.chcantabrico.es/eu/las-cuencas-cantabricas/marco-fisico/hidrologia/rios/pas>
- CH Cantábrico. (n.d.-c). *Sistema de Explotación Asón*. www.chcantabrico.es
- Chiaga, Pouaha, A. N. (2020). *MASTER IN INLAND WATER QUALITY ASSESSMENT SPATIOTEMPORAL PATTERNS OF WATER MASTER FINAL PROJECT 2019-2020*.
- Del, R., Informe, Q., & Ipcc, D. E. L. (n.d.). *Cambio Climático : Informe de síntesis*.
- Díaz Cordero, G. (2012). El cambio climático. *Ciencia y Sociedad*.
- Donnelly, C., Greuell, W., Andersson, J., Gerten, D., Pisacane, G., Roudier, P., & Ludwig, F. (2017). Impacts of climate change on European hydrology at 1.5, 2 and 3 degrees mean global warming above preindustrial level. *Climatic Change*, 143(1), 13–26.

Escasez de agua | Decenio Internacional para la Acción “El agua, fuente de vida” 2005-2015. (n.d.). Recuperado 4 de septiembre, 2021, de <https://www.un.org/spanish/waterforlifedecade/scarcity.shtml>

Fomento, D. E., Ambiente, D. E. M., Rural, Y. M., Marino, Y., & Estudios, C. D. E. (2010). *Estudios de los impactos del Cambio Climático en los Recursos Hídricos y las masas de agua*. 398.

GEOGRAFÍA FÍSICA DE CANTABRIA – FEMININ. (2014). <https://northumbriablogcom.wordpress.com/2014/11/05/geografia-fisica-de-cantabria/>

Instituto Cántabro de Estadística. (2017). *Cantabria en cifras*.

Masia, S., Trabucco, A., Spano, D., Snyder, R. L., Sušnik, J., & Marras, S. (2021). A modelling platform for climate change impact on local and regional crop water requirements. *Agricultural Water Management*, 255, 107005. <https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2021.107005>

Miracle Sol, M. R. (2006). Consideraciones y casos en torno al ciclo del agua. *Polis. Revista Latinoamericana*, 14.

Modelos hidrológicos y SPHY – FutureWater. (n.d.). Recuperado el 18 de septiembre, 2021, de <https://www.futurewater.es/herramientas/modelos-hidrologicos-sphy/>

Peñas, F. J., Barquín, J., & Álvarez, C. (2016). Sources of variation in hydrological classifications: Time scale, flow series origin and classification procedure. *Journal of Hydrology*, 538, 487–499. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.04.049>

Savé, R., de Herralde, F., & Biel, C. (2005). Aproximación al ciclo del agua en ecosistemas forestales. *Invest Agrar: Sist Recur For*, 14(3), 497–512.

Serrano Vincenti, S., Zuleta, D., Moscoso, V., Jácome, P., Palacios, E., & Villacís, M. (2012). Análisis estadístico de datos meteorológicos mensuales y diarios para la determinación de variabilidad climática y cambio climático en el Distrito Metropolitano de Quito. *La Granja*, 16(2), 23. <https://doi.org/10.17163/lgr.n16.2012.03>

Terink, W., Lutz, A. F., Simons, G. W. H., Immerzeel, W. W., & Droogers, P. (2009). SPHY v2.0: Spatial Processes in HYdrology. *Geosci. Model Dev*, 8. <https://doi.org/10.5194/gmd-8-2009-2015>

Web IH Rivers. (2021). <https://ihrivers.ihcantabria.com/InfoDatos.aspx>

Zhu, S., Nyarko, E. K., & Hadzima-Nyarko, M. (n.d.). *Modelling daily water temperature from air temperature for the Missouri River*. <https://doi.org/10.7717/peerj.4894>