



ANÁLISIS DE ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO EN ASTURIAS



Gobierno del
Principado de Asturias

Autores:

Fernando González Taboada,
Ricardo Anadón Álvarez .

Departamento de Biología de Organismos y Sistemas.
Universidad de Oviedo

Coordinación:

Nieves Roqueñí Gutiérrez,
Paz Orviz Ibáñez.

Oficina para la Sostenibilidad, el Cambio Climático y la Participación.
Gobierno del Principado de Asturias

Edición:

Gobierno del Principado de Asturias
Consejería de Medio Ambiente, Ordenación del Territorio e Infraestructuras
Oficina para la Sostenibilidad, el Cambio Climático y la Participación

Diseño:

Jorge Lorenzo Diseño y Comunicación Visual

DL:

AS-3185-2011x

ISBN:

978-84-694-2848-1

ÍNDICE

	Pag		Pag
1. Introducción	7	4. Resultados del análisis	52
2. Análisis de series históricas de datos	12	4.1. Difusión de resultados	54
2.1. Preparación de un modelo digital de elevaciones	14	4.2. Materiales generados para la difusión de resultados	55
2.2. Análisis exploratorio de la Red de Observación Meteorológica AEMET en el Principado de Asturias	15	4.3. Consideraciones finales	57
2.3. Tendencias observadas en precipitación y temperatura (1970–2009)	20	A. Recopilación de datos y métodos empleados	58
2.4. Interpolación de datos de temperatura y precipitación	29	A.1. Paquetes informáticos empleados para el análisis y visualización de datos	59
3. Proyecciones climáticas de alta resolución	34	A.2. Estaciones meteorológicas de la red AEMET	59
3.1. Simulaciones climáticas a escala regional: proyectos PRUDENCE y ENSEMBLES	36	A.3. Análisis de series procedentes de estaciones meteorológicas	69
3.2. Modelos de transferencia entre escalas e interpolación	41	B. Mapas estacionales de precipitación y temperatura, 1970–2009	71
3.3. Análisis de escenarios de cambio climático (2010-2100)	44	C. Mapas de proyecciones estacionales de precipitación y temperatura, 2010–2069	77
		D. Mapas de cambios estacionales proyectados para precipitación y temperatura, 2010–2069	83
		E. Mapas de proyecciones estacionales para precipitación y temperatura, 2070–2099	89
		F. Mapas de cambios estacionales proyectados para precipitación y temperatura, 2070–2099	95
		Agradecimientos	102
		Bibliografía	102

LISTA DE TABLAS

	Pag
1. Familias de escenarios socio-económicos empleados en el Cuarto Informe de Evaluación del IPCC	37
2. Modelos climáticos globales empleados en los proyectos PRUDENCE y ENSEMBLES	38
3. Experimentos de proyección de clima PRUDENCE	39
4. Experimentos de proyección de clima ENSEMBLES	40
5. Cambios en precipitación y temperatura para distintos escenarios de emisión	46
A1. Estaciones de la red AEMET en el Principado de Asturias	60
A2. Ajuste del modelo de regresión lineal mixto a los valores de precipitación y temperatura mensual	70

LISTA DE FIGURAS

	Pag		Pag
1. Mapas topográfico y de distancia a la costa del Principado de Asturias	14	13. Tendencias medias en la temperatura (1970-2010)	25
2. Distribución de estaciones meteorológicas en el Principado de Asturias	15	14. Relación entre las tendencias medias, elevación y continentalidad (1970-2009)	26
3. Relación entre la elevación de las estaciones meteorológicas según el modelo ASTER GDEM y los datos proporcionados por AEMET	16	15. Tendencias en precipitación para cada estación del año (1970-2009)	27
4. Variación temporal en el número de estaciones meteorológicas de la red de observación AEMET	17	16. Tendencias en temperatura para cada estación del año (1970-2009)	28
5. Densidad de estaciones meteorológicas respecto a la distribución de distintas características topográficas en el territorio asturiano	18	17. Mapas de la climatología de precipitación y temperatura media anual para el período 1970-2009	30
6. Variación temporal en la dispersión espacial de las estaciones meteorológicas de la red de observación AEMET	19	18. Evolución temporal de la precipitación y temperatura anual en el Principado de Asturias (1970-2009)	30
7. Evolución temporal de la media anual de precipitación y temperatura observadas en la red de estaciones AEMET (1970-2009)	21	19. Mapas decadales de precipitación anual acumulada y de temperatura media anual (1970-2009)	31
8. Evolución temporal de las anomalías estacionales de precipitación observadas en la red de estaciones AEMET (1970-2009)	22	20. Evolución temporal de la precipitación acumulada estacional en el Principado de Asturias (1970-2009)	32
9. Evolución temporal de las anomalías estacionales de precipitación observadas en la red de estaciones AEMET (1970-2009)	22	21. Evolución temporal de la temperatura media estacional en el Principado de Asturias (1970-2009)	33
10. Evolución temporal del índice de la Oscilación del Atlántico Norte (NAO) y de la Oscilación Multidecadal del Atlántico (AMO)	23	23. Distribución de los coeficientes de determinación para los modelos de transferencia de escala	43
11. Ajuste de los modelos lineales mixtos a las series de precipitación y temperatura (1970-2010)	24	24. Proyecciones para precipitación y temperatura anual en el Principado de Asturias	45
12. Tendencias medias en la precipitación (1970-2010)	25	25. Mapas de proyecciones de precipitación y temperatura anual, 2010-2069 .	47
		26. Mapas de cambios esperados para precipitación y temperatura anual, 2010-2069	48
		28. Mapas de cambios esperados para precipitación y temperatura anual, 2070- 2099	49

	Pag		Pag
29. Proyecciones para la precipitación y temperatura estacional en el Principado de Asturias	51	E1. Mapas de proyecciones de precipitación y temperatura en invierno, 2070–2099	91
30. Ejemplo de la presentación de las series AEMET en el geoportal	56	E2. Mapas de proyecciones de precipitación y temperatura en primavera, 2070–2099	92
B1. Mapas de precipitación acumulada y de temperatura media en invierno, 1970–2009	73	E3. Mapas de proyecciones de precipitación y temperatura en verano, 2070–2099	93
B2. Mapas de precipitación acumulada y de temperatura media en primavera, 1970–2009	74	E4. Mapas de proyecciones de precipitación y temperatura en otoño, 2070–2099	94
B3. Mapas de precipitación acumulada y de temperatura media en verano, 1970–2009	75	F1. Mapas de cambios proyectados para precipitación y temperatura en invierno, 2070–2099	97
B4. Mapas de precipitación acumulada y de temperatura media en otoño, 1970–2009	76	F2. Mapas de cambios proyectados para precipitación y temperatura en primavera, 2070–2099	98
C1. Mapas de proyecciones de precipitación y temperatura en invierno, 2010–2069	79	F3. Mapas de cambios proyectados para precipitación y temperatura en verano, 2070–2099	99
C2. Mapas de proyecciones de precipitación y temperatura en primavera, 2010–2069	80	F4. Mapas de cambios proyectados para precipitación y temperatura en otoño, 2070–2099	100
C3. Mapas de proyecciones de precipitación y temperatura en verano, 2010–2069	81		
C4. Mapas de proyecciones de precipitación y temperatura en otoño, 2010–2069	82		
D1. Mapas de incrementos proyectados para precipitación y temperatura en invierno, 2010–2069	85		
D2. Mapas de incrementos proyectados para precipitación y temperatura en primavera, 2010–2069	86		
D3. Mapas de incrementos proyectados para precipitación y temperatura en verano, 2010–2069	87		
D4. Mapas de cambios proyectados para precipitación y temperatura en otoño, 2010–2069	88		

1

INTRODUCCIÓN

1. INTRODUCCIÓN

El último informe elaborado por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) de la Organización de las Naciones Unidas (IPCC 2007) demuestra que la actividad humana durante el último siglo ha alterado el sistema climático del planeta de manera perceptible y significativa. Esta alteración ha modificado y continuará modificando las condiciones de vida en la Tierra, lo que en última instancia afecta el bienestar humano. El informe demuestra una relación clara entre las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) asociadas a la actividad humana y los cambios observados en las principales variables climáticas a distintas escalas. Se establece, por tanto, que la principal causa del cambio climático observado durante las últimas décadas es la intensificación de las emisiones de dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) y otros GEI asociadas al uso de combustibles fósiles y a los cambios en el uso del suelo. Entre los efectos detectados destacan un aumento de la temperatura troposférica y una subida del nivel medio del mar, tendencias que se prevé continuarán durante siglos, incluso en el caso de que se reduzcan las emisiones.

Estas conclusiones se fundamentan tanto en el análisis de series de datos climatológicos y socioeconómicos como en el uso de modelos climáticos globales ejecutados empleando distintas condiciones de contorno o escenarios de emisión. Estos escenarios tratan de incorporar todos los factores que, aunque no se implementan de manera directa en los modelos climáticos, afectan el devenir del clima. Entre otros factores, los escenarios de emisión consideran cambios en la demografía y en la economía y el desarrollo tecnológico, así como distintas estrategias disponibles para la obtención de energía, el transporte, y la actividad agrícola e industrial (Nakicenovic *et al.* 2000, véase también Moss *et al.* 2010). Estos factores socioeconómicos corresponden a distintos escenarios de emisión y de cambios en los usos del suelo, y se traducen en diferencias en el forzamiento radiativo que se pueden integrar en los modelos climáticos. Este método permite estudiar la respuesta del sistema climático ante los forzamientos de distinta naturaleza asociados a cada escenario de emisión (IPCC 2007).

Los modelos dinámicos de simulación del clima cumplen una función doble en el estudio del clima y su variación (McGuXe & Henderson-Sellers 2005). Por un lado, los modelos permiten aislar la influencia de distintos componentes del sistema climático. Es importante tener en cuenta que el clima resulta de la interacción de procesos cuya escala espacial y temporal limita la utilidad de aproximaciones basadas solamente en la observación. Los modelos permiten alterar distintos componentes del clima o estudiar la evolución del sistema climático bajo distintos forzamientos externos (e.g. cambios en la radiación solar, en las emisiones de GEI, etc.). De esta manera, complementan otras aproximaciones al facilitar el diseño de experimentos que se emplean para discernir las causas y mecanismos responsables de distintos patrones climáticos, como los cambios observados en las últimas décadas. Además, los modelos climáticos proporcionan predicciones de las condiciones climáticas futuras bajo distintos escenarios de desarrollo socioeconómico y tecnológico. De esta manera, los modelos permiten inferir con antelación los impactos derivados del cambio climático, permitiendo que estas proyecciones se puedan integrar en el proceso de toma de decisiones. La disponibilidad de distintos escenarios de cambio facilita la adopción de medidas que mitiguen la intensidad del cambio climático y la adaptación a las nuevas condiciones.

La necesidad de incorporar los efectos del cambio global en la planificación y desarrollo de políticas y planes hace deseable la disponibilidad de proyecciones de cambio de clima para los diferentes escenarios a una escala adecuada para la toma de decisiones. Debido a la importancia de facilitar la participación pública en el proceso de toma de decisiones (Roqueñí & Orviz 2009), así como de asegurar la concienciación de los ciudadanos ante los problemas que el cambio climático plantea, se hace necesario además el desarrollo de medios para la transmisión de este tipo de información a la sociedad (Anadón & Roqueñí 2009). En este sentido, los informes del IPCC proporcionan acceso libre a los resultados de los modelos de simulación para distintos escenarios de emisiones. No obstante, los modelos climáticos globales que emplea el IPCC realizan proyecciones considerando unidades de terreno del orden de cientos de kilómetros cuadrados. Pese a que esta escala es adecuada para el estudio del cambio climático a escala global y continental, el IPCC destaca la importancia de reducir la escala –aumentar la resolución– de los modelos para su aplicación a nivel regional (Christensen *et al.* 2007b). Las predicciones de cambio climático a escala regional son más útiles, en este sentido, tanto para la planificación de políticas de adaptación y mitigación como para la concienciación y transmisión de información a la sociedad.

Durante los últimos años se ha producido un auge en el desarrollo de métodos para la elaboración de escenarios de cambio climático a escala regional. En general, estas técnicas tratan de incrementar la resolución espacial de los resultados producidos por los modelos climáticos globales. Las técnicas empleadas para realizar esta transición de escalas se agrupan en técnicas dinámicas y estadísticas. Las técnicas del primer grupo emplean modelos dinámicos similares a los modelos climáticos empleados a escala global sobre mallas con una mayor resolución, lo que permite mejorar la descripción de aquellos procesos de circulación condicionados por la topografía local (Christensen *et al.* 2007b). El segundo grupo de técnicas se basa principalmente en el uso de técnicas de modelado estadístico para la extrapolación y/o interpolación de los resultados producidos por los modelos dinámicos (Benestad *et al.* 2008). El incremento de resolución obtenido mediante estas técnicas permite mejorar las proyecciones del impacto debido al del cambio climático.

Este informe resume la colaboración entre la Oficina para la Sostenibilidad, el Cambio Climático y la Participación del Principado de Asturias y el Depto. de Biología de Organismos y Sistemas de la Universidad de Oviedo para el análisis y divulgación de distintos escenarios de cambio climático a escala regional y local para el Principado de Asturias. Los siguientes apartados describen las tareas realizadas para completar ambos objetivos, que comprenden (i) el análisis e interpolación de series históricas de datos meteorológicos, a fin de determinarlas condiciones de referencia y los cambios observados en temperatura y precipitación (sección 2); (ii) la preparación de series de datos derivadas de experimentos con modelos climáticos regionales y su comparación con series históricas de temperatura y precipitación, con objeto de derivar modelos estadísticos que permitan reducir la escala de las proyecciones realizadas por los modelos dinámicos regionales (sección 3); y (iii) la construcción de una base de datos geográfica que agrupe y ordene los datos reunidos y generados en los pasos anteriores, sobre la que se desarrollará un geoportal destinado a la divulgación de los principales resultados obtenidos (sección 4).

En este informe se presentan proyecciones sobre el funcionamiento del sistema climático a medio y largo plazo, por lo que el lector debe tener presente en todo momento las limitaciones inherentes a este tipo de aproximación. Pese a que los modelos climáticos integran el conocimiento actual sobre el funcionamiento del sistema climático, existen incertidumbres que limitan su capacidad de predicción (IPCC 2007). Nuestra comprensión del funcionamiento del sistema climático no es completa, y existe incertidumbre en cuanto al papel de aerosoles y nubes, posibles procesos de retroalimentación entre distintos compartimentos, etc (e.g. Schiermeier 2010). Es conveniente destacar además que, en general, los modelos climáticos han demostrado una gran fiabilidad en cuanto a la predicción de cambios observados en la temperatura atmosférica, aunque no se puede decir lo mismo con respecto a los cambios en precipitación Herrera *et al.* (2010). Las técnicas de cambio de escala también poseen sus propias limitaciones, que se incrementan en el caso de regiones con una topografía compleja como es el caso del Principado de Asturias (Christensen *et al.* 2007b; Benestad *et al.* 2008). También existe gran incertidumbre con respecto a los escenarios de emisión de gases de efecto invernadero en el futuro (Moss *et al.* 2010). El lector debe considerar además que las proyecciones climáticas se actualizan cada cierto tiempo, ya que existe un gran esfuerzo a escala internacional para continuar mejorando las proyecciones disponibles. No obstante, las predicciones conservan valor cuantitativo, y el lector puede considerarlas en esos términos. Pese a que los valores proporcionados están asociados en general a un grado de incertidumbre considerable, hasta el momento las proyecciones basadas en modelos de simulación de clima han resultado acertadas o, en el peor de los casos, demasiado conservadoras (véase por ejemplo Rahmstorf *et al.* 2007). Esto permite comparar las condiciones que cabe esperar bajo distintos escenarios de desarrollo socioeconómico a medio y largo plazo con cierta confianza. Quizá el mensaje más importante sea, por tanto, que el propio lector es una fuente de incertidumbre capaz de modificar las predicciones que se presentan, dada nuestra capacidad de reacción individual y colectiva.

2

**ANÁLISIS
DE SERIES
HISTÓRICAS
DE DATOS**

2. ANALISIS DE SERIES HISTÓRICAS DE DATOS

El análisis de series históricas de datos meteorológicos permite valorar los cambios en las condiciones climáticas de una localidad o región en el tiempo (von Storch & Zwiers 2001). El Principado de Asturias cuenta con una red de estaciones meteorológicas integrada dentro de la red nacional de observación meteorológica de la Agencia Estatal de Meteorología del Gobierno de España (AEMET). Frente a otras fuentes de datos como las procedentes de sensores remotos o las reconstrucciones basadas en medidas indirectas (anillos de crecimiento, análisis de isótopos, etc.), las estaciones meteorológicas proporcionan una cobertura espacial y temporal intermedia que las convierte en la principal fuente de datos para el análisis de la variación del clima durante los últimos 160 años (Hansen *et al.* 2006; Bonan 2008). Con objeto de analizar los cambios en las condiciones climáticas durante las últimas décadas en el Principado de Asturias, se recopilaron y analizaron todos los datos procedentes de la red de estaciones meteorológicas de AEMET. A partir de estas observaciones, se reconstruyó la variación espacial en las condiciones mensuales de precipitación y temperatura empleando técnicas de interpolación espacial. Finalmente, se preparó un conjunto de mapas para representar las condiciones climáticas medias en el Principado durante las últimas décadas.

2.1. Preparación de un modelo digital de elevaciones

Antes de proceder al análisis de las series históricas de datos meteorológicos, se preparó un modelo digital de elevaciones (DEM) matricial del Principado de Asturias. Un DEM es una representación numérica de la topografía de un determinado territorio (Longley *et al.* 2005; Kraak & Ormeling 2010). En el caso de los DEM matriciales, la abstracción consiste en teselar el territorio utilizando una malla regular, asignando a cada una de las celdas de esta malla una altura que se asume constante dentro de la misma. En este estudio se empleó como base el DEM preparado por la Agencia Espacial Japonesa (JSP) y la Agencia Estadounidense del Espacio y la Aeronáutica (NASA) a partir de los datos recogidos por el sensor ASTER (Radiómetro Térmico eEspacial Avanzado de Emisión y ReWexión), montado a bordo del satélite Terra (EOS-AM1) de la NASA.

El modelo digital de elevaciones global ASTER GDEM está disponible a través del portal de la JSP (www.gdem.aster.ersdac.or.jp) gracias a la colaboración entre el Ministerio de Economía, Comercio e Industria de Japón (METI) y la NASA. Se obtuvieron ocho escenas de 1 x 1 con una resolución horizontal de 0.00028 (e.g. 23 x 31 m en el centro de Asturias, véase la figura 1, panel superior). El error de geolocalización de este DEM es inferior a 50 m, tiene una resolución vertical de 1 m y un error vertical en general menor que 20 m (Fujisada *et al.* 2005). Las ocho escenas fueron combinadas, reproyectadas y remuestreadas para crear un DEM de 200 x 200 m de resolución (proyección WGS84 / UTM 30N, EPSG:32630), a partir del que, posteriormente, se preparó una capa de distancia a la línea de costa (figura 1, panel inferior). Ambas características topográficas se emplearon posteriormente en la interpolación espacial de los valores de variables climáticas, ya que actúan como medidas indirectas del gradiente adiabático y de la continentalidad.

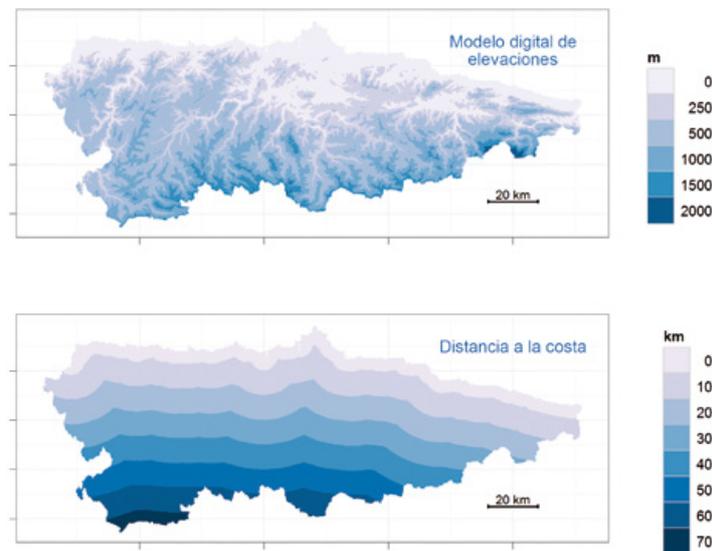


figura 1: Mapas topográfico y de distancia a la costa del Principado de Asturias. Panel superior: mapa topográfico del Principado de Asturias elaborado a partir del modelo digital de elevaciones ASTER GDEM. La intensidad de color en el mapa corresponde a la altura sobre el nivel del mar, variable que se emplea en la interpolación espacial de variables climáticas para representar el efecto del gradiente adiabático. Panel inferior: mapa de distancia a la línea de costa derivado a partir del modelo digital de elevaciones. Esta variable se emplea en la interpolación espacial de variables climáticas, ya que actúa como medida indirecta de la continentalidad. El modelo ASTER GDEM es un producto del METI y de la NASA (véase la subsección 2.1).

2.2. Análisis exploratorio de la Red de Observación Meteorológica AEMET en el Principado de Asturias

Se obtuvieron datos mensuales de temperatura y precipitación recogidos en estaciones meteorológicas (figura 2) durante el período 1950-2010 en el Principado de Asturias mediante una solicitud oficial a la Delegación Territorial de AEMET (tabla A1 en el Apéndice A.2). En los datos originales se recoge además la localización (coordenadas geográficas) y elevación (metros sobre el nivel del mar) de cada una de las estaciones. Las tablas fueron examinadas y preparadas para su tratamiento siguiendo las instrucciones proporcionadas por AEMET. A continuación, se comprobó la exactitud en la localización espacial de los datos contrastando el nombre de cada estación en un Sistema de Información Geográfica (*Quantum GIS*, www.qgis.org) con la capa de toponimia proporcionada libremente por los Servicios de Mapas Bing Maps™ (www.bing.com/maps) y Google Maps™ (www.maps.google.com/), sin detectarse ningún fallo en la localización de las estaciones.

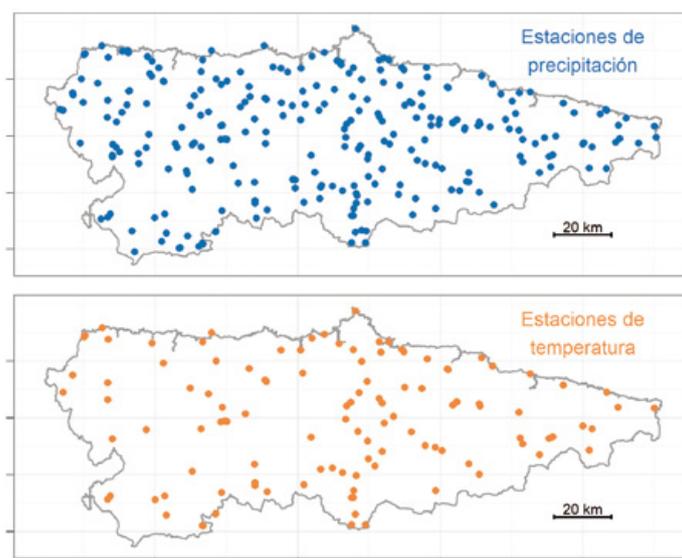


figura 2: Distribución de las estaciones meteorológicas de precipitación (panel superior) y temperatura (panel inferior) pertenecientes a la red de observación de AEMET en el Principado de Asturias que ha estado en funcionamiento en algún momento durante el período 1950-2010.

Los valores de altura de cada estación proporcionados por AEMET y por la celda del modelo digital de elevaciones correspondiente (figura 1) se compararon entre sí para comprobar la correspondencia entre ambas series, que resultó ser, en general, muy buena (figura 3). No obstante, en el caso de la estación 1191A (Valle de Angón, punto destacado en la figura 3), la magnitud de la desviación entre la altura predicha por el DEM y la proporcionada por AEMET fue muy elevada (300 m), razón por la que esta estación no fue considerada en posteriores análisis. Por tanto, se retuvieron 267 estaciones de precipitación con un total de 60598 observaciones válidas de precipitación mensual acumulada, y 120 estaciones de temperatura con un total de 20959 observaciones válidas de temperatura media mensual.

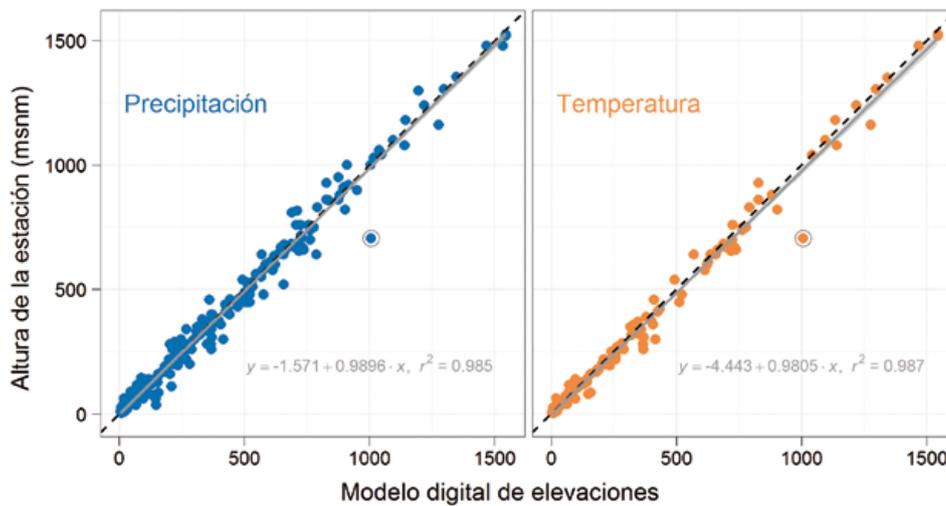


figura 3: Relación entre la elevación de las estaciones meteorológicas según el modelo digital de elevaciones ASTER GDEM (figura 1) con respecto a los datos proporcionados por AEMET. Cada panel presenta una regresión lineal simple entre los valores de altura sobre el nivel del mar de cada estación meteorológica de precipitación o temperatura proporcionada por AEMET y la altitud derivada a partir del modelo digital de elevaciones de 200 x 200 m de resolución (véase la subsección 2.1). El punto destacado corresponde a la estación 1191A (Valle de Angón), ya que la magnitud de la desviación entre la altura predicha por el DEM y la proporcionada por AEMET fue muy elevada (≈ 300 m), razón por la que esta estación no fue considerada en posteriores análisis.

El objetivo del resto de los análisis exploratorios fue valorar la disponibilidad de observaciones tanto para la interpolación y reconstrucción espacial de las condiciones de precipitación y temperatura mensual durante las últimas décadas como para el análisis del cambio en los niveles medios de ambas variables. La variación a lo largo del tiempo en el número de estaciones meteorológicas activas permitió observar tres fases bien definidas en el funcionamiento de la red de observación (figura 4). Hasta el año 1970, la red contó con un número de estaciones bajo, especialmente en el caso de las estaciones termométricas. A partir de ese año, el número de estaciones se estabilizó alrededor de 140 en el caso de las estaciones pluviométricas y de 40 en el caso de las estaciones termométricas. La situación permaneció más o menos estable –estacionario– hasta el presente, aunque en el caso de las estaciones pluviométricas se produjo una reducción de alrededor del 40 % durante el período 1985-2000.

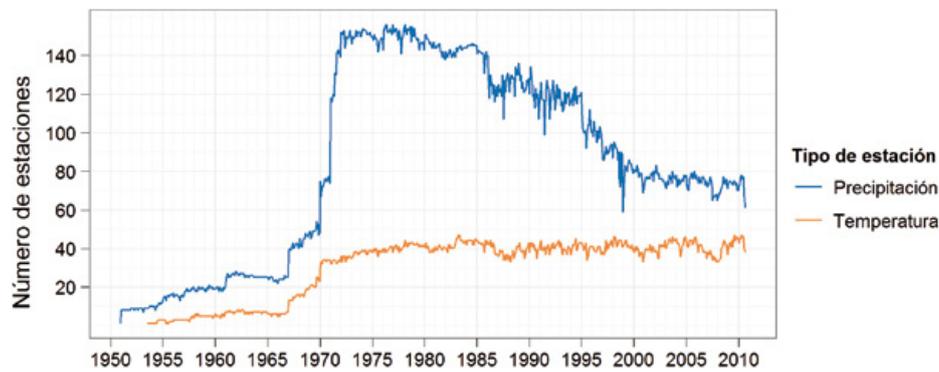


figura 4: Variación temporal en el número de estaciones meteorológicas de precipitación y temperatura pertenecientes a la red de observación AEMET en el Principado de Asturias entre 1950 y 2009. **figura 5:** Densidad de estaciones meteorológicas respecto a la distribución de distintas características topográficas en el territorio asturiano. El modelo digital de elevaciones (subsección 2.1) se tomó como referencia para estimar la densidad de cada una de las variables topográficas en el territorio asturiano. Si la cobertura de la red de observación AEMET corresponde a las características del territorio, esperamos una correspondencia alta entre las estimaciones de densidad para las localizaciones de las estaciones y las basadas en el modelo digital de elevaciones. La densidad se estimó mediante un núcleo gaussiano para una secuencia de 101 puntos cubriendo el rango de cada una de las variables.

Además del número de estaciones, la distribución de los puntos de muestreo en el espacio es especialmente importante a la hora de reconstruir mapas sobre la variación en temperatura y precipitación. En este sentido, se examinaron varios índices y estadísticos espaciales, así como la representatividad de la red de observación con respecto a distintas variables topográficas. En primer lugar, se comparó la densidad de estaciones frente a la distribución de variables como elevación, distancia a la línea de costa y coordenadas geográficas en el conjunto de Asturias (figura 5), que se asumieron corresponden a las derivadas a partir del modelo digital de elevaciones ASTER GDEM (subsección 2.1). Si las localizaciones de las estaciones meteorológicas presentan características topográficas representativas de las características medias del territorio, se esperarían que las estimaciones de densidad para las estaciones y las basadas en el modelo digital de elevaciones fueran similares. En general, la localización de las estaciones resultó ser representativa de las características examinadas (figura 5), a excepción de una pequeña subrepresentación de la zona oeste del Principado y, sobre todo, una sobrerepresentación de zonas por debajo de 500 m de altitud, con la consecuente subrepresentación de zonas altas (también apreciable en la figura 3). Es conveniente destacar además que ninguna de las estaciones de la red de observación AEMET se encuentra por encima de 1525 m de altitud.

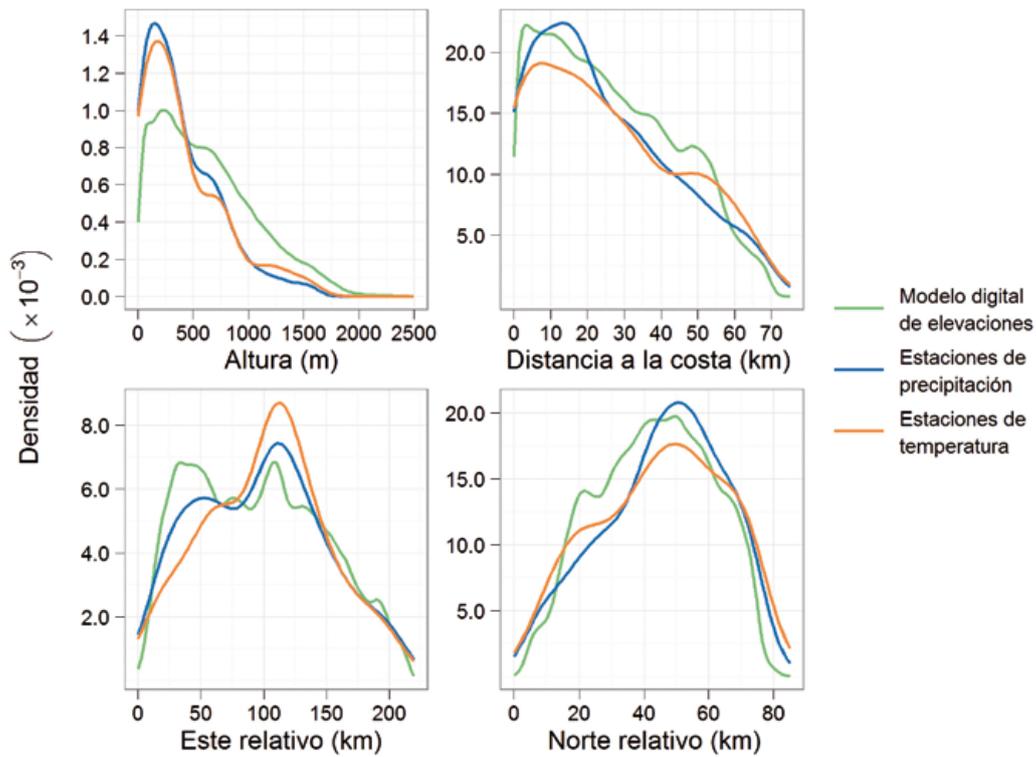


figura 5: Densidad de estaciones meteorológicas respecto a la distribución de distintas características topográficas en el territorio asturiano. El modelo digital de elevaciones (subsección 2.1) se tomó como referencia para estimar la densidad de cada una de las variables topográficas en el territorio asturiano. Si la cobertura de la red de observación AEMET corresponde a las características del territorio, esperamos una correspondencia alta entre las estimaciones de densidad para las localizaciones de las estaciones y las basadas en el modelo digital de elevaciones. La densidad se estimó mediante un núcleo gaussiano para una secuencia de 101 puntos cubriendo el rango de cada una de las variables.

En último lugar, se examinó la variación temporal en la dispersión espacial de la localización relativa de las estaciones meteorológicas. Para ello, se estudió la distribución de las distancias a la estación más cercana (figura 6). Al igual que al examinar la tendencia en el número de estaciones (figura 4), se puso de manifiesto un cambio en la red de observación a partir de la década de los setenta. La distancia media al vecino más próximo se redujo de manera importante a partir de 1970 tanto para las estaciones de precipitación como para las de temperatura, indicando una mejora en la cobertura de la red para el conjunto del territorio asturiano. En ambos casos, la distancia media se sitúa en torno a 10 km, con la mayoría de las observaciones por debajo de 15 y 20 km para estaciones de precipitación y temperatura, respectivamente. El cambio en la distribución espacial de las estaciones confirma también las conclusiones extraídas al analizar la evolución en el número de estaciones que componen la red de observación, especialmente en lo que respecta a la reducción del número de estaciones de precipitación, que va acompañado de un aumento en la distancia media a la estación más cercana a partir de mediados de la década de los ochenta.

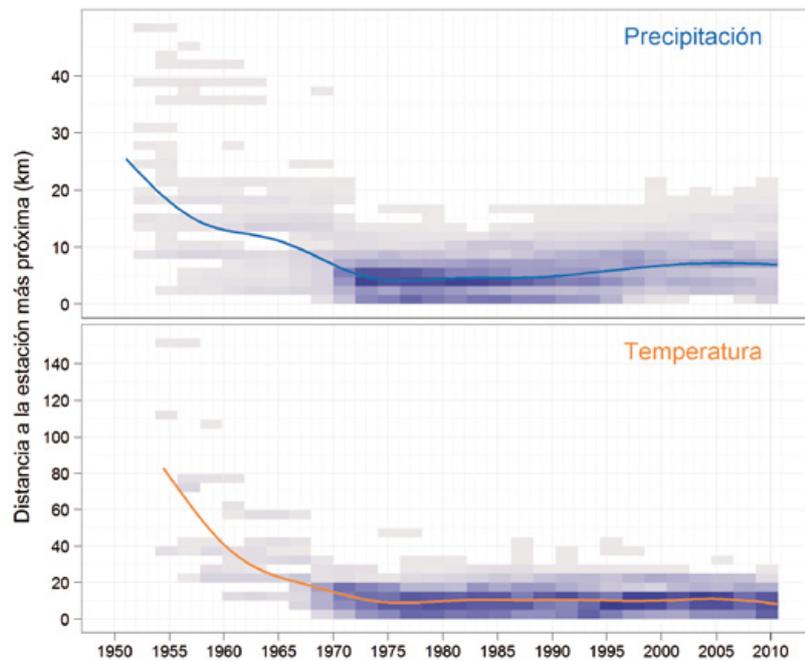


figura 6: Variación temporal en la dispersión espacial de las estaciones meteorológicas de precipitación y temperatura pertenecientes a la red de observación AEMET entre 1950 y 2010. En cada panel se incluye un diagrama de densidad bidimensional que representa la distribución de las distancias a la estación más próxima para estaciones de precipitación (panel superior) y temperatura (panel inferior). Los tonos de color gris corresponden a las densidades más bajas, mientras que los tonos color azul corresponden a las densidades más

altas. Los espacios en blanco corresponden a una densidad nula. El gráfico muestra una reducción y homogenización de la red a partir de 1970, así como una disminución en el número de estaciones de precipitación operativas a partir de 1985. Como guía, se incluye además en cada gráfico la tendencia media de la distancia al vecino más próximo, estimada mediante ajuste de un modelo generalizado aditivo, capaz de acomodar una dependencia no lineal del tiempo (Hastie & Tibshirani 1990; Wood 2006).

2.3. Tendencias observadas en precipitación y temperatura (1970–2009)

Durante los últimos 40 años (1970–2009), las estaciones meteorológicas de la red de observación AEMET han recogido datos meteorológicos que proporcionan una cobertura homogénea y una buena representatividad de la variación en las condiciones climáticas en el Principado de Asturias (subsección 2.2). Este tipo de información permite estudiar la variación del clima y estimar parámetros de interés como la tendencia en la precipitación acumulada y en la temperatura media. Para ello, se emplearon solamente los datos procedentes de aquellas estaciones con series temporales de mayor calidad y duración, por lo que se aplicaron una serie de filtros a la base de datos original (tabla A1 en el Apéndice A.2). En primer lugar, se seleccionaron aquellas estaciones que han recogido datos en al menos 20 de los 40 años considerados (no necesariamente consecutivos). A continuación, se descartaron los datos procedentes de estaciones para las que el porcentaje medio anual de datos válidos fue inferior al 80 %. En último lugar, el análisis exploratorio directo de las series conllevó la eliminación de los datos procedentes de cinco estaciones de precipitación y de cinco estaciones de temperatura, debido a que su irregularidad o la existencia de discontinuidades hicieron dudar sobre la fiabilidad de los datos. Tras aplicar estos filtros, la base de datos quedó reducida a un total de 121 estaciones de precipitación y 36 estaciones de temperatura, que en conjunto proporcionan un total de 43820 y 13197 observaciones válidas, respectivamente.

Los datos de temperatura y precipitación se analizaron por separado, para lo que se ajustaron modelos lineales mixtos a los dos conjuntos de series temporales (Gelman & Hill 2007). La idea general detrás de este tipo de análisis, y su principal ventaja, es la posibilidad de describir la variación observada en precipitación y temperatura a distintos niveles de agrupación fijados *a priori*. En nuestro caso, partimos de datos procedentes de un conjunto de estaciones con una resolución temporal mensual. Nuestro interés consiste, no obstante, en estimar la tendencia media común para el conjunto de estaciones. Esta tendencia media trataría de aproximar la tendencia esperada para el conjunto del Principado, estudiando a la vez posibles variaciones en dicha tendencia entre las cuatro estaciones del año. Los modelos lineales mixtos aprovechan precisamente la disponibilidad de varias réplicas para mejorar la estimación de tendencias comunes, y permiten incorporar cierto grado de redundancia en la información que se incluye en el análisis (e.g. falta de independencia entre observaciones), así como diferencias en la disponibilidad de información (e.g. distinto número de observaciones por estación). Además, estos modelos permiten considerar simultáneamente el efecto de otras variables que pueden influenciar los niveles medios de precipitación y temperatura, como es el caso de la topografía o factores ligados al propio funcionamiento del sistema climático que condicionan la evolución a largo plazo de las condiciones locales. Por ejemplo, el análisis exploratorio de los datos revela claramente que el comportamiento de ambos conjuntos de series está lejos de ajustarse a un modelo lineal sencillo (figuras 7, 8 y 9).

Al examinar la evolución temporal de ambas variables parece clara la existencia de oscilaciones de baja frecuencia que se superponen sobre una tendencia negativa en la precipitación y una tendencia positiva en la temperatura media (figura 7). Por esta razón, los modelos lineales mixtos incluyeron como efectos fijos los índices climáticos de la Oscilación del Atlántico Norte (NAO, Hurrell & Dickson 2005) y la Oscilación Multi-decadal del Atlántico (AMO, Schlesinger & Ramankutty 1994) (figura 10). La NAO representa el estado atmosférico del sector atlántico del hemisferio norte y se suele representar a través de un índice con el mismo nombre que se calcula como la diferencia en la presión atmosférica entre las islas Azores (Punta Delgada) e Islandia (Reikiavic). Este valor refleja la posición relativa de los centros de altas y bajas presiones en el sector Atlántico Norte. Los valores positivos están asociados a un aumento de la intensidad de los vientos del oeste, que se traduce en condiciones frías y húmedas en el norte de Europa, y cálidas y secas en el sur. Mientras, valores negativos del índice NAO se asocian a condiciones más frías y a una mayor pluviosidad en la cuenca mediterránea. La AMO refleja la variación en la circulación profunda del océano Atlántico, y se describe a través de la temperatura media de la superficie del mar en el Atlántico Norte, una vez eliminada cualquier tendencia exógena como la asociada al cambio climático (que se asume lineal, Schlesinger & Ramankutty 1994). De esta manera, la AMO trata de reflejar la variación intrínseca del océano Atlántico Norte, sistema que condiciona el clima atmosférico en toda su cuenca y, por tanto, puede explicar oscilaciones de largo recorrido en las variables climáticas en Asturias.

Además del efecto de oscilaciones climáticas de largo recorrido, los modelos incluyeron también el efecto de la elevación y de la distancia a la costa sobre los valores de precipitación y temperatura (subsección 2.1). La formulación de los modelos lineales mixtos se completó con la inclusión de términos aleatorios de regresión para incluir una tendencia lineal sobre el tiempo para cada una de las estaciones del año, así como el ciclo estacional mensual. El modelo considera, de esta manera, un efecto común para el conjunto de series procedentes de cada estación meteorológica, y efectos individuales para cada una de las series por separado. El efecto de oscilaciones climáticas a largo término, la elevación y la continentalidad corresponderían al primer tipo de efecto, y vendrían representados por los índices NAO y AMO y la altura y la distancia a la costa extraídas del modelo digital ASTER GDEM (subsección 2.1). El segundo tipo de efectos consiste en la estimación de medias y pendientes para cada estación, aunque se asume que proceden en realidad de una

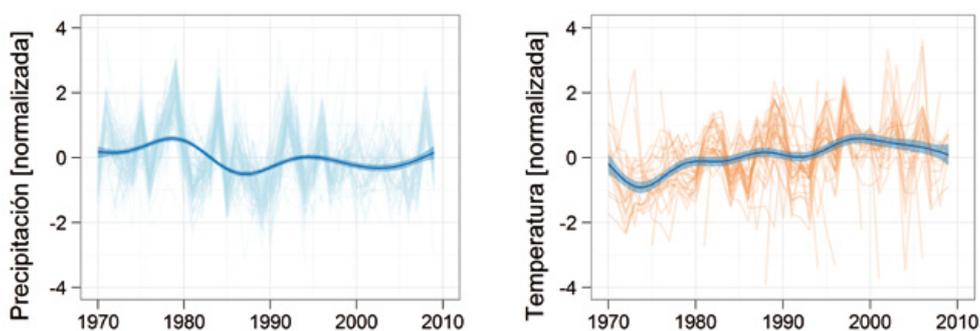


figura 7: Evolución temporal de la media anual de precipitación (panel izquierdo) y temperatura (panel derecho) en las estaciones pertenecientes a la red de observación AEMET entre 1970 y 2009. Cada panel incluye todas las series de precipitación y temperatura que cumplen los criterios de calidad establecidos para este estudio (subsección 2.3). Ambas variables climáticas se expresan como desviaciones normalizadas (e.g. $\mu=0$ y $\delta^2=1$) a fin de poder incluir, a modo de guía, el ajuste de un modelo generalizado aditivo, capaz de acomodar una

dependencia no lineal del tiempo (Hastie & Tibshirani 1990; Wood 2006). Se ha aplicado un factor de transparencia aditivo (Wickham 2009) para poder apreciar el grado de concordancia entre las series procedentes de distintas estaciones meteorológicas, de tal manera que la intensidad de color es proporcional al número de series que se solapan, con máxima intensidad correspondiente al solapamiento de 10 y 5 series para precipitación y temperatura, respectivamente.

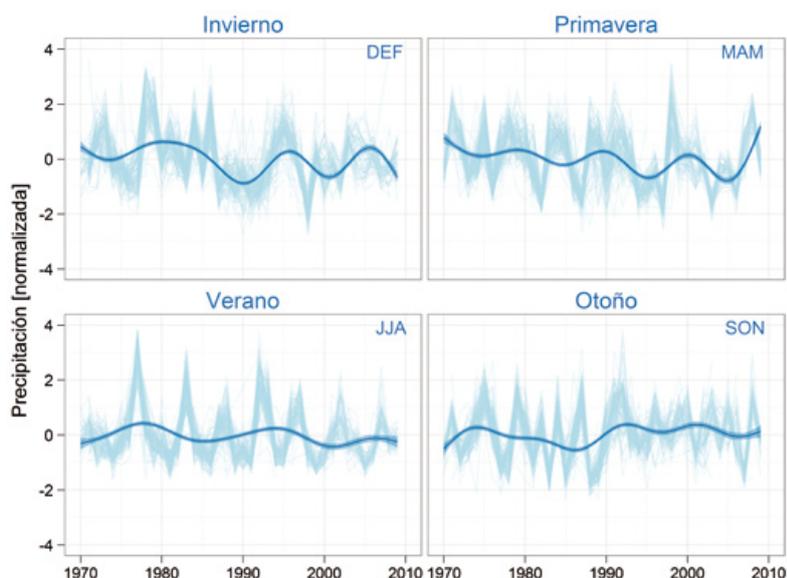


figura 8: Evolución temporal de las series estacionales de precipitación en las estaciones pertenecientes a la red de observación AEMET entre 1970 y 2009. Cada panel incluye todas las series de precipitación que cumplen los criterios de calidad establecidos para este estudio (subsección 2.3). Para cada estación, cada línea representa desviaciones normalizadas (e.g. $\mu=0$ y $\delta^2=1$) a fin de poder incluir, a modo de guía, el ajuste de un modelo generalizado aditivo, capaz de acomodar una dependencia no lineal del tiempo (Hastie & Tibshirani 1990; Wood 2006). Se ha aplicado un factor de transparencia aditivo (Wickham 2009) para poder apreciar el grado de concordancia

entre las series procedentes de distintas estaciones meteorológicas, de tal manera que la intensidad de color es proporcional al número de series que se solapan, con máxima intensidad correspondiente al solapamiento de 5 series. La precipitación acumulada durante cada estación del año se calculó como la suma de los valores de precipitación mensual acumulada considerando estaciones del año trimestrales; *invierno*: diciembre, enero y febrero (DEF); *primavera*: marzo, abril y mayo (MAM); *verano*: junio, julio y agosto (JJA); y *otoño*: septiembre, octubre y noviembre (SON)

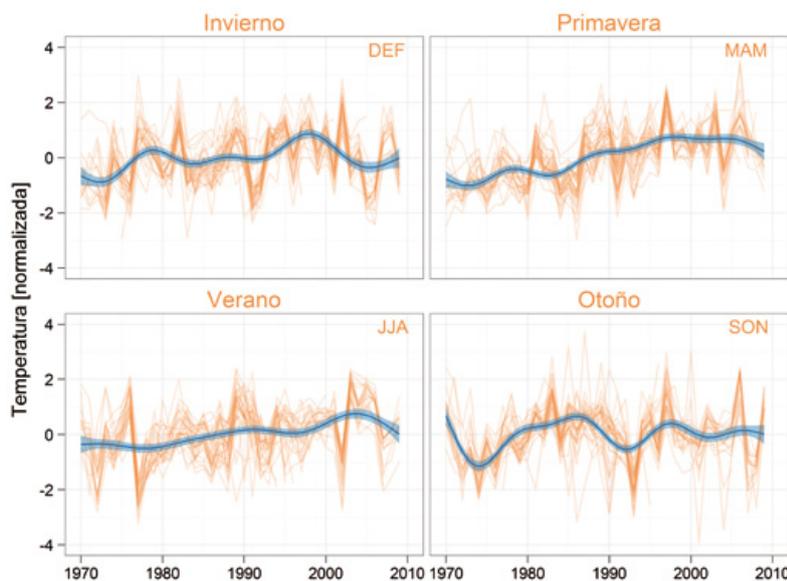


figura 9: Evolución temporal de las series estacionales de temperatura en las estaciones pertenecientes a la red de observación AEMET entre 1970 y 2009. Cada panel incluye todas las series de temperatura que cumplen los criterios de calidad establecidos para este estudio (subsección 2.3). Para cada estación, cada línea representa desviaciones normalizadas (e.g. $\mu=0$ y $\delta^2=1$) a fin de poder incluir, a modo de guía, el ajuste de un modelo generalizado aditivo, capaz de acomodar una dependencia no lineal del tiempo (Hastie & Tibshirani 1990; Wood 2006). Se ha aplicado un factor de transparencia aditivo (Wickham

2009) para poder apreciar el grado de concordancia entre las series procedentes de distintas estaciones meteorológicas, de tal manera que la intensidad de color es proporcional al número de series que se solapan, con máxima intensidad correspondiente al solapamiento de 5 series. La temperatura media durante cada estación del año se calculó como el promedio de los valores de temperatura mensual considerando estaciones del año trimestrales; *invierno*: diciembre, enero y febrero (DEF); *primavera*: marzo, abril y mayo (MAM); *verano*: junio, julio y agosto (JJA); y *otoño*: septiembre, octubre y noviembre (SON).

población de parámetros con media y varianza común (de ahí el referirse a este tipo de modelos como regresión aleatoria). De esta manera, todas las series contribuyen a la estimación de los parámetros globales (para el conjunto de las series) y de los parámetros particulares (para cada una de las series) (Gelman & Hill 2007). Los modelos se ajustaron en *R* (R Development Core Team 2010) empleando la librería *MCMCglmm* (Hadfield 2010). El Apéndice A.3 proporciona más detalles sobre los métodos empleados en este apartado.

Al comparar las predicciones de los modelos de regresión lineales mixtos con los datos recogidos por la red AEMET se observó un ajuste aceptable, especialmente bueno en el caso de la temperatura (figura 11). La tabla A2 en el Apéndice A.3 proporciona un resumen detallado de los valores estimados para cada uno de los parámetros considerados en los modelos. Al examinar el ajuste de los efectos fijos, la precipitación mostró una correlación positiva con la NAO y negativa con la AMO. El análisis también detectó un ligero aumento de la precipitación con la elevación y una pequeña reducción con la distancia a la costa. Por otro lado, la temperatura sólo mostró una relación importante y de signo positivo con la AMO, mientras que el efecto de la NAO, la elevación y la distancia a la costa fue despreciable. Los modelos revelan además la existencia de una ligera tendencia negativa, prácticamente inapreciable, en la precipitación mensual acumulada ($-0.40 [-0.80, 0.03]$ mm mes^{-1} década $^{-1}$, media e intervalo de confianza del 95 %), y de una tendencia positiva, mucho más clara, en la temperatura media ($0.09 [0.06, 0.12]$ °C década $^{-1}$) para el período 1970-2009.

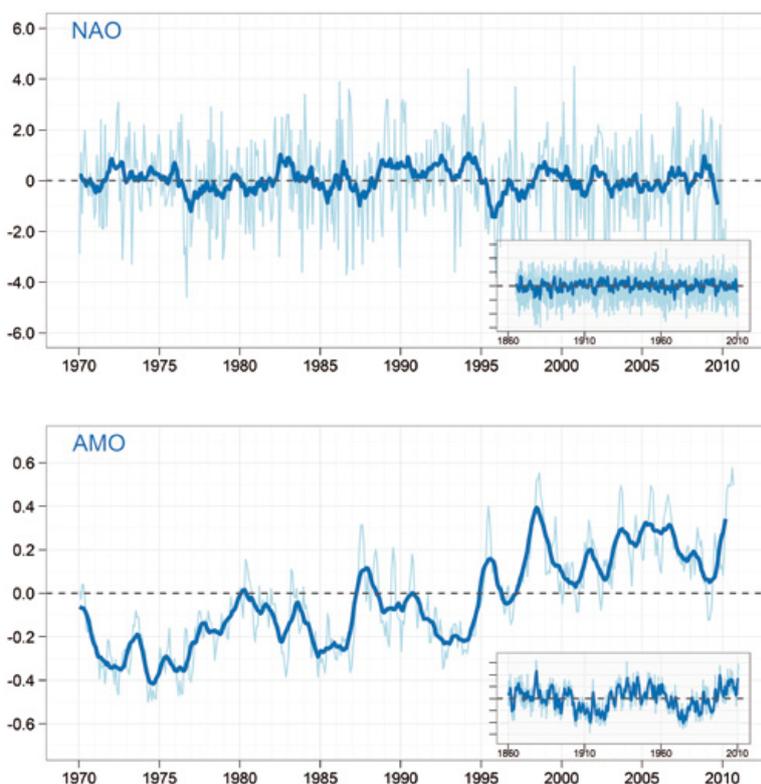


figura 10: Evolución temporal del índice de la Oscilación del Atlántico Norte (panel superior: NAO, Hurrell & Dickson 2005; se emplearon los valores mensuales del índice NAO disponibles en el sitio web de James Hurrell en el NCAR, www.cgd.ucar.edu/cas/jhurrell/indices.html) y de la Oscilación Multidecadal del Atlántico (panel inferior: AMO, Schlesinger & Ramankutty 1994; valores procedentes del Earth System Research Laboratory de la NOAA, www.esrl.noaa.gov/psd/data/timeseries/AMO/). En cada gráfico se muestra la variación durante los últimos 40 años (1970-2009) y, en el panel interior, la variación durante los últimos 150 años.

Las figuras 12 y 13 muestran las tendencias estimadas para cada una de las estaciones meteorológicas (nótese que en las gráficas tipo oruga se presentan intervalos de confianza del 90 %). Las estimaciones individuales van asociadas a una gran incertidumbre, especialmente en el caso de la precipitación. Esto se debe principalmente a la corta duración del período considerado (40 años), aunque en el caso de la precipitación también refleja la gran irregularidad que caracteriza esta variable. No obstante, la distribución de las tendencias estimadas muestra un ligero sesgo hacia valores negativos en el caso de la precipitación y, de manera mucho más clara, una clara tendencia hacia valores positivos en el caso de la temperatura. Las tendencias estimadas también mostraron una ligera relación positiva con la altura sobre el nivel del mar y con la distancia a la costa en el caso de la precipitación, relación que es negativa en el caso de la temperatura (figura 14), aunque en ambos casos las tendencias fueron poco claras. Además, es necesario tener en cuenta algunas de las consideraciones sobre la cobertura de la red de observación AEMET, especialmente la carencia de observaciones en zonas de alta montaña, tal y como se apuntó en la subsección 2.2.

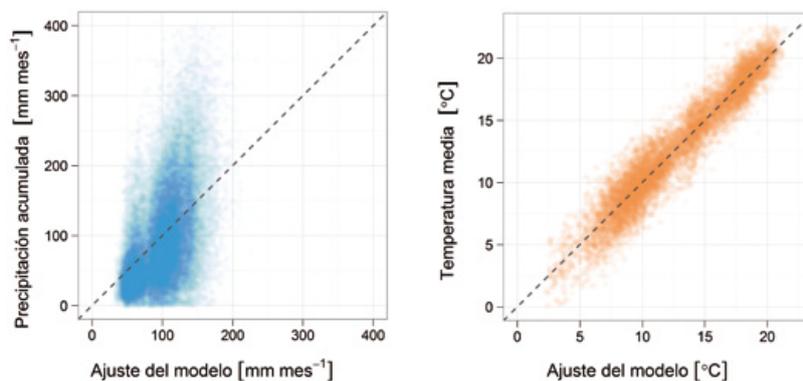


figura 11: Ajuste entre los valores predichos por los modelos lineales mixtos (subsección 2.3) y los valores mensuales observados de precipitación (panel izquierdo) y temperatura (panel derecho). La línea discontinua de color gris oscuro marca la localización que ocuparían los puntos si el ajuste del modelo fuera perfecto (1:1). Para apreciar mejor la distribución de los valores predichos y observados se ha aplicado un factor de transparencia aditivo (Wickham 2009), de tal manera la intensidad de color es proporcional al número de puntos que se solapan, con máxima intensidad correspondiente al solapamiento de 20 y 10 puntos para precipitación y temperatura, respectivamente.

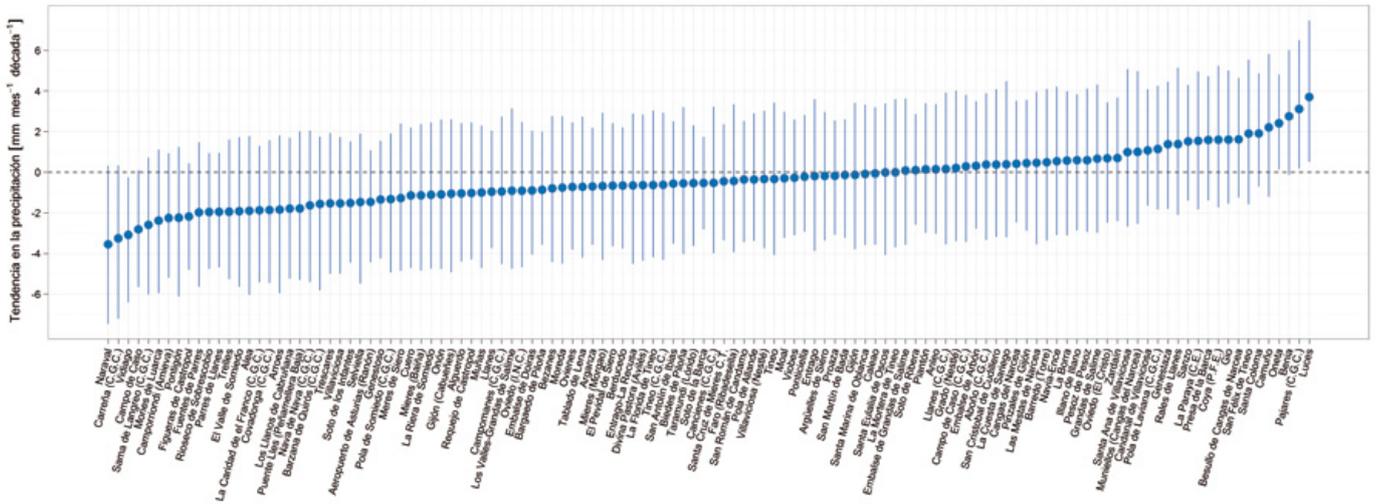


figura 12: Tendencias medias en la precipitación mensual ($\text{mm mes}^{-1} \text{ década}^{-1}$, intervalo de confianza del 90 %). Las tendencias fueron estimadas a partir del ajuste de un modelo lineal mixto a las observaciones mensuales recogidas en las estaciones meteorológicas de la red de observación AEMET (subsección 2.3).

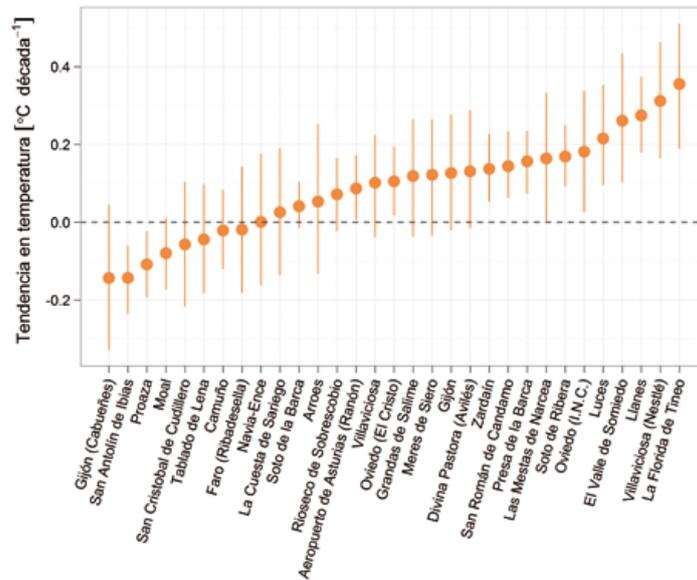


figura 13: Tendencias medias en la temperatura ($^{\circ}\text{C década}^{-1}$, intervalo de confianza del 90 %). Las tendencias fueron estimadas a partir del ajuste de un modelo lineal mixto a las observaciones mensuales recogidas en las estaciones meteorológicas de la red de observación AEMET (subsección 2.3).

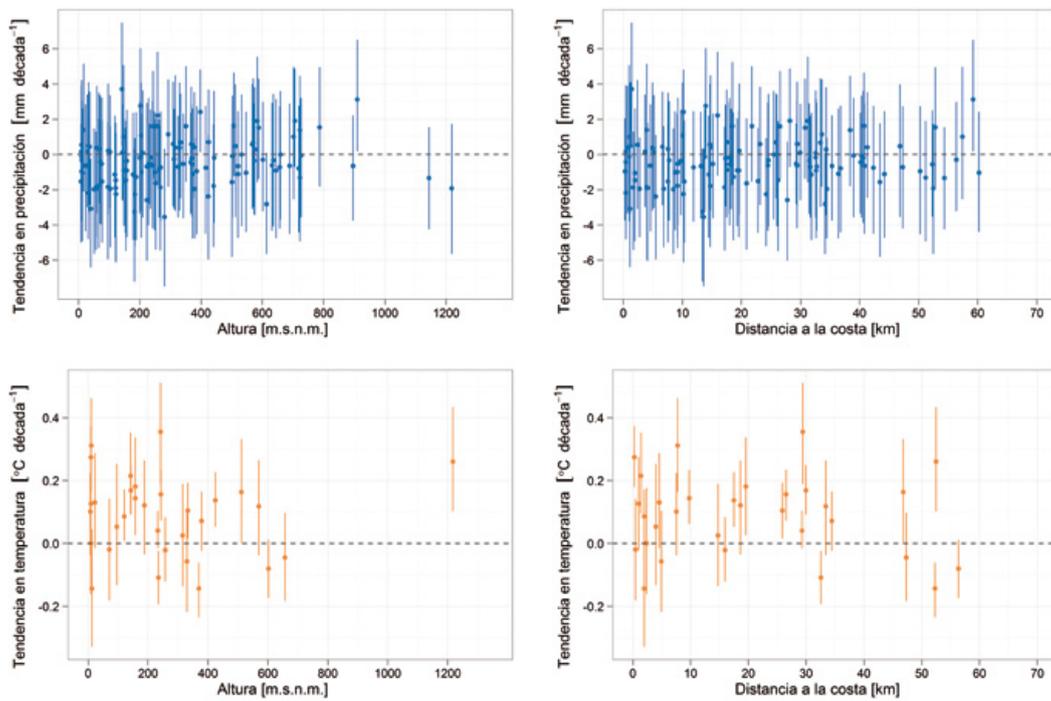


figura 14: Relación entre las tendencias medias en precipitación (arriba) y temperatura (abajo) para el período 1970–2009 (se representan media e intervalos de confianza del 90 %), y la altura sobre el nivel del mar (izquierda) y la distancia a la costa (derecha). Las tendencias fueron estimadas a partir del ajuste de un modelo lineal mixto a las observaciones mensuales recogidas en las estaciones meteorológicas de la red de observación AEMET (subsección 2.3).

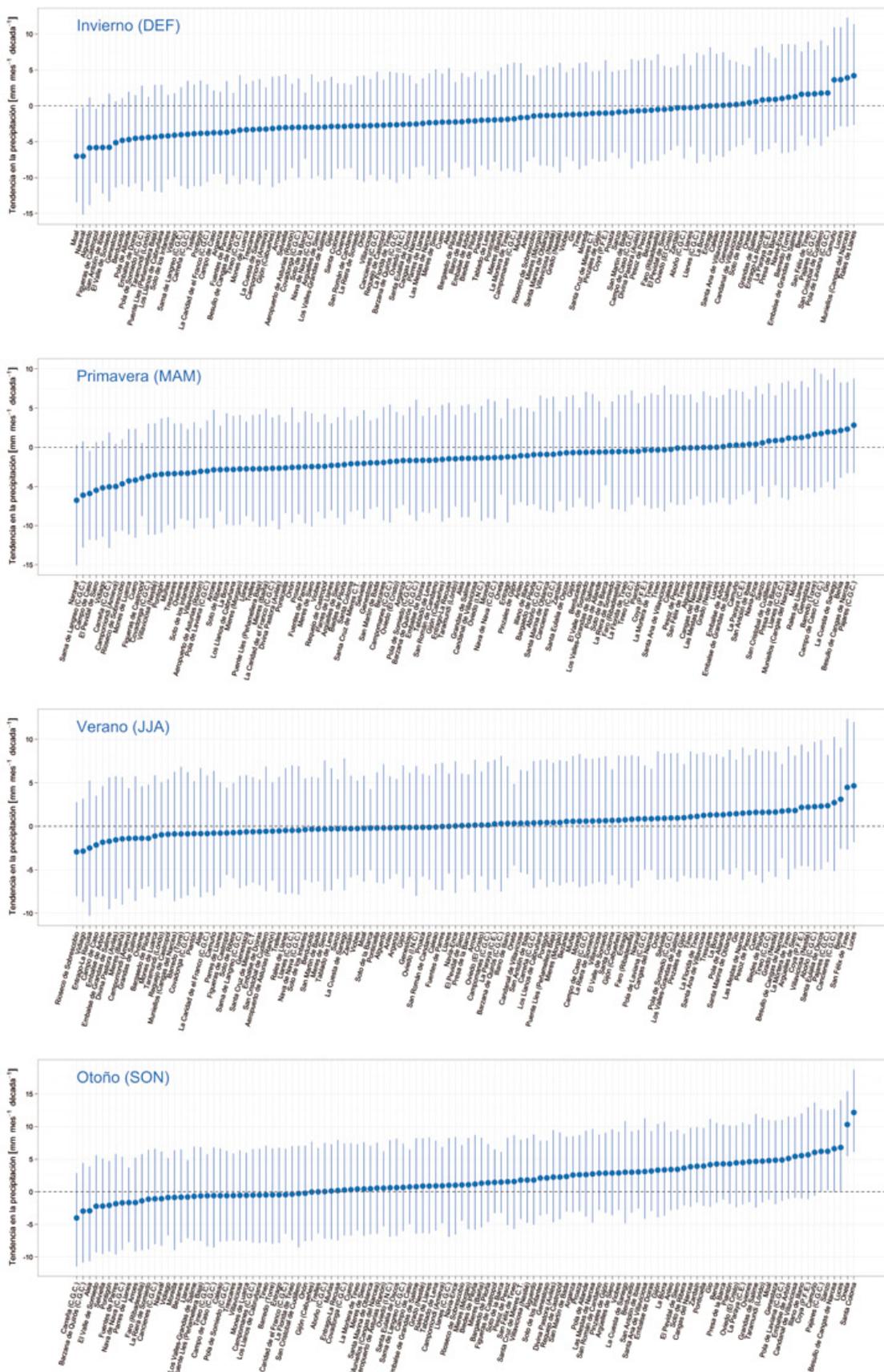


figura 15: Tendencias medias para cada estación del año en la precipitación mensual acumulada (mm mes⁻¹ década⁻¹, intervalo de confianza del 90 %). Las tendencias fueron estimadas a partir del ajuste de un modelo lineal mixto a las observaciones mensuales recogidas en las estaciones meteorológicas de la red AEMET (subsección 2.3). Nótese

que el orden de las estaciones en el eje de abscisas cambia entre paneles. Las observaciones mensuales se asignaron a las distintas estaciones del año de la siguiente manera: *invierno*: diciembre, enero y febrero (DEF); *primavera*: marzo, abril y mayo (MAM); *verano*: junio, julio y agosto (JJA); y *otoño*: septiembre, octubre y noviembre (SON).

Los cambios observados en el nivel medio de precipitación y temperatura fueron diferentes dependiendo de la estación del año considerada (figuras 15 y 16). En el caso de la precipitación existe una gran incertidumbre asociada a las tendencias estimadas para cada estación meteorológica (figura 15), aunque se detectó una disminución al considerar la tendencia media en invierno y en primavera (-1.94 [-2.88,-1.02] y -1.52 [-2.39,-0.73] mm mes⁻¹ década⁻¹, respectivamente), y un aumento para el otoño (1.64 [0.81, 2.41] mm mes⁻¹ década⁻¹). En verano se detectó una tendencia media ligeramente positiva aunque poco clara (0.20 [-0.57, 0.97] mm mes⁻¹ década⁻¹). Pese a que los efectos detectados durante las épocas con mayor pluviosidad son de signo contrario, la disminución durante invierno y primavera compensa el aumento observado durante el otoño. La temperatura mostró un patrón mucho más claro (figura 16), con tendencias de signo contrario a las encontradas en la precipitación. De este modo, las tendencias medias fueron positivas para todas las estaciones salvo para el otoño (-0.07 [-0.13,-0.02] °C década⁻¹), en el que se detectó una ligera reducción en la temperatura media estacional. Las tendencias medias estimadas para el resto de estaciones del año indicaron un aumento de la temperatura, coincidiendo con la tendencia general detectada. El aumento de temperatura es más importante en primavera y verano (0.33 [0.28, 0.40] y 0.08 [0.02, 0.13] °C década⁻¹, respectivamente), y algo menos acusado en el invierno (0.03 [-0.02, 0.08] °C década⁻¹).

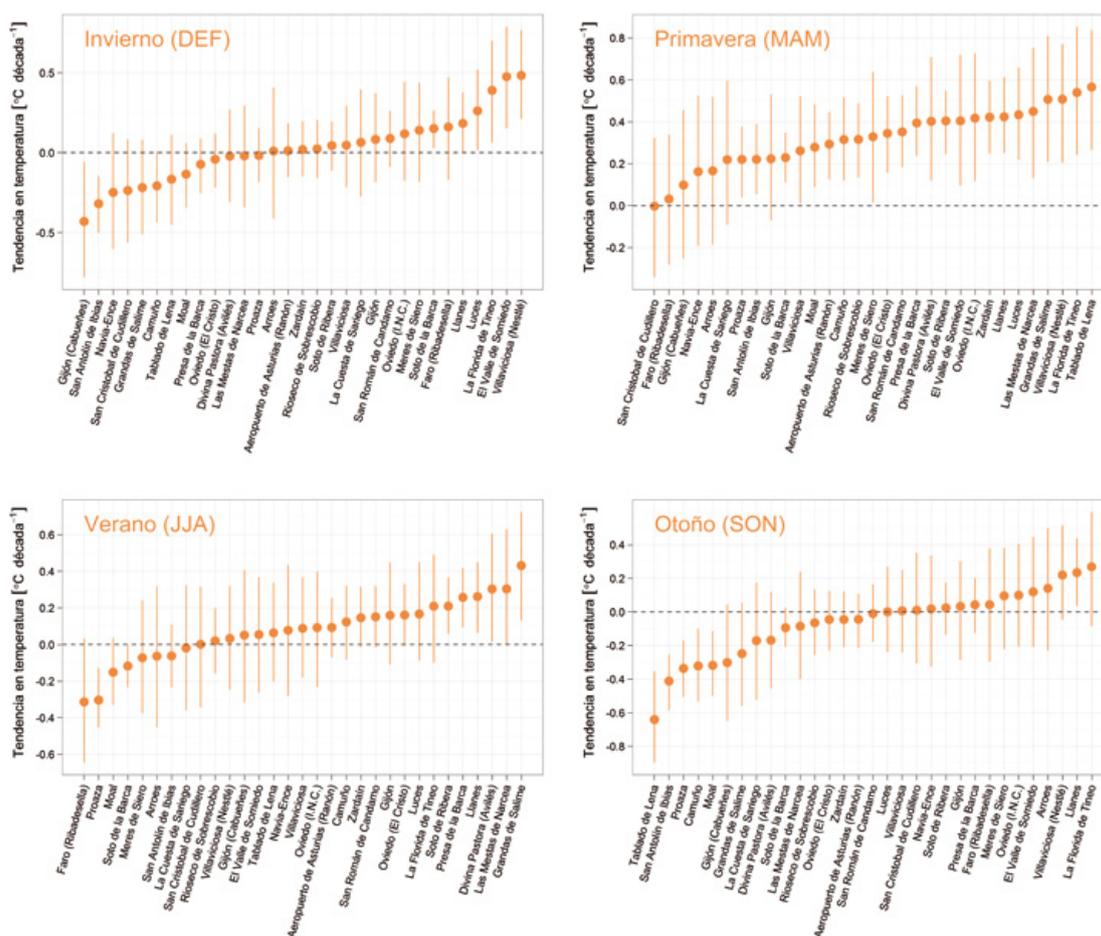


figura 16: Tendencias medias para cada estación del año en la temperatura (°C década⁻¹, intervalo de confianza del 90 %). Las tendencias fueron estimadas a partir del ajuste de un modelo lineal mixto a las observaciones mensuales recogidas en las estaciones meteorológicas de la red AEMET (subsección 2.3). Nótese que el orden de las estaciones en el eje de abscisas cambia entre paneles. Las observaciones mensuales se asignaron a las distintas estaciones del año de la siguiente manera: *invierno*: diciembre, enero y febrero (DEF); *primavera*: marzo, abril y mayo (MAM); *verano*: junio, julio y agosto (JJA); y *otoño*: septiembre, octubre y noviembre (SON)

2.4. Interpolación de datos de temperatura y precipitación

Las series temporales de precipitación mensual acumulada y de temperatura media registradas por la red de estaciones de AEMET ofrecen una buena cobertura espacio-temporal de las condiciones climáticas en el Principado de Asturias durante los últimos 40 años (subsección 2.2). Además de estudiar la variación en los niveles medios de ambas variables (subsección 2.2), la disponibilidad de este tipo de información permite reconstruir la variación espacial en la precipitación y la temperatura mensual. Estos mapas se pueden emplear después tanto en la estimación de tendencias como en la preparación de climatologías, es decir, estimaciones de las condiciones promedio que se puede asumir definen las condiciones climáticas en una región durante un determinado período de tiempo. Al mismo tiempo, las climatologías de precipitación y temperatura proporcionan un nivel de referencia que se puede emplear para la valoración de cambios en el clima, así como para la valoración y ajuste de las predicciones realizadas empleando modelos climáticos de simulación. Para cada uno de los meses del período 1970–2009, se combinaron los datos procedentes de todas las estaciones para construir modelos predictivos que se emplearon en la interpolación espacial de las condiciones meteorológicas. Los modelos empleados fueron de tipo geoestadístico, basados en una técnica de uso muy extendido denominada *kriging*, que consiste en la reconstrucción espacial de una variable en cada punto del espacio como combinación lineal de los valores en localidades cercanas (Cressie 1993). Se empleó un tipo de *kriging* denominado *universal* ya que, además de los valores en localidades cercanas de la variable objetivo, tiene en cuenta la influencia de otras variables a la hora de interpolar los datos.

En el caso de variables climáticas como precipitación y temperatura, es deseable considerar al menos la influencia de la topografía y la continentalidad o grado de influencia oceánica. De este modo, los modelos de interpolación incluyeron los valores de elevación procedentes del modelo digital de elevaciones ASTER GDEM así como la capa que codifica la distancia a la línea de costa (figura 1, subsección 2.1). Además, los modelos incluyeron también un término de regresión para reconstruir la superficie de tendencia a gran escala a partir de las coordenadas espaciales. Los modelos se ajustaron en *R* (R Development Core Team 2010) empleando la librería *fields* (Furrer *et al.* 2010). Además de especificar los valores y localizaciones de la variable que se desea interpolar (en nuestro caso, valores mensuales de precipitación acumulada o temperatura media), así como los valores de las covariables (elevación y distancia a la costa), el modelo debe incluir una función que describa la relación entre la correlación entre los valores de la variable y la distancia que los separa. Esta función de covarianza se ajustó para cada uno de los meses por separado tras comprobar que era razonable asumir que era de tipo exponencial y considerando una escala de decorrelación constante de 30 km. Tras fijar de esta manera el parámetro que especifica el alcance o escala (*rango*) de la correlación, los valores de el error de medida (*nugget*) y el valor asintótico (*sill*) se ajustaron por validación cruzada (Furrer *et al.* 2010).

A partir de los mapas mensuales para cada una de las variables, se calcularon medias anuales y estacionales para distintos períodos de tiempo. La figura 17 recoge los mapas con la precipitación anual acumulada y la temperatura anual media para el período 1970–2009. Alvarez García *et al.* (2009) proporcionan una revisión actualizada sobre el clima y meteorología de Asturias. La precipitación aumenta en general hacia el interior (salvo en el sector central) y con la altura (figura 17). La temperatura media anual muestra un patrón similar pero inverso, con valores más altos cerca de la costa asociados al efecto atemperador del océano y temperaturas más bajas asociadas a las zonas más elevadas (figura 17). Al examinar la evolución a escala anual de ambas variables (figura 18), se puede apreciar una disminución en las precipitaciones y un aumento en la temperatura media. Estas tendencias se pueden apreciar de manera más clara al estimar los niveles promedio por década (figura 19). Los gráficos permiten apreciar además diferencias en la evolución de ambas variables; la precipitación presenta una reducción fuerte tras la década de los setenta, mientras que el aumento en la temperatura es más gradual. En el caso de la temperatura se puede observar además que los incrementos han sido en general más importantes cerca de la costa y en zonas bajas.

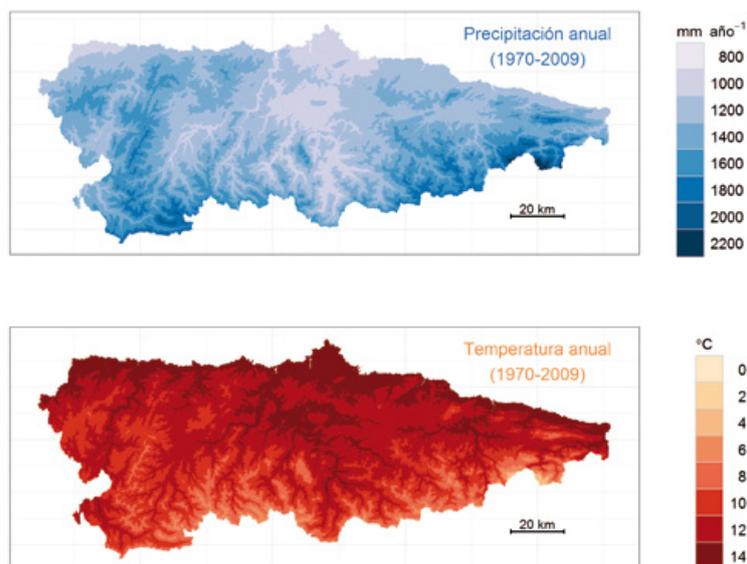


figura 17: Precipitación anual (mm año⁻¹, panel superior) y temperatura media (°C, panel inferior) para el período 1970-2009. El promedio fue estimado usando mapas interpolados a partir de los datos recogidos por la red de estaciones meteorológicas AEMET para reconstruir la variación espacial en los niveles mensuales de precipitación y temperatura (subsección 2.4).

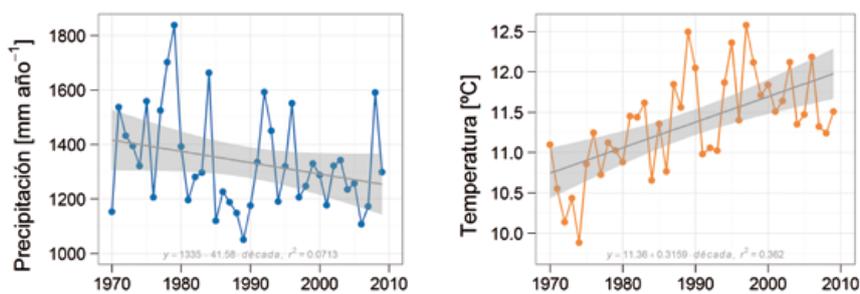


figura 18: Evolución temporal de la precipitación (mm año⁻¹, panel izquierdo) y temperatura (°C, panel derecho) anual en el Principado de Asturias (1970-2009). Cada punto corresponde al promedio de mapas interpolados a partir de los datos recogidos por la red de estaciones meteorológicas AEMET para reconstruir la variación espacial en la precipitación y la temperatura mensuales (subsección 2.4). Cada panel incluye el resultado del ajuste de un modelo de regresión lineal de la precipitación o temperatura anual sobre el tiempo (expresado en décadas).

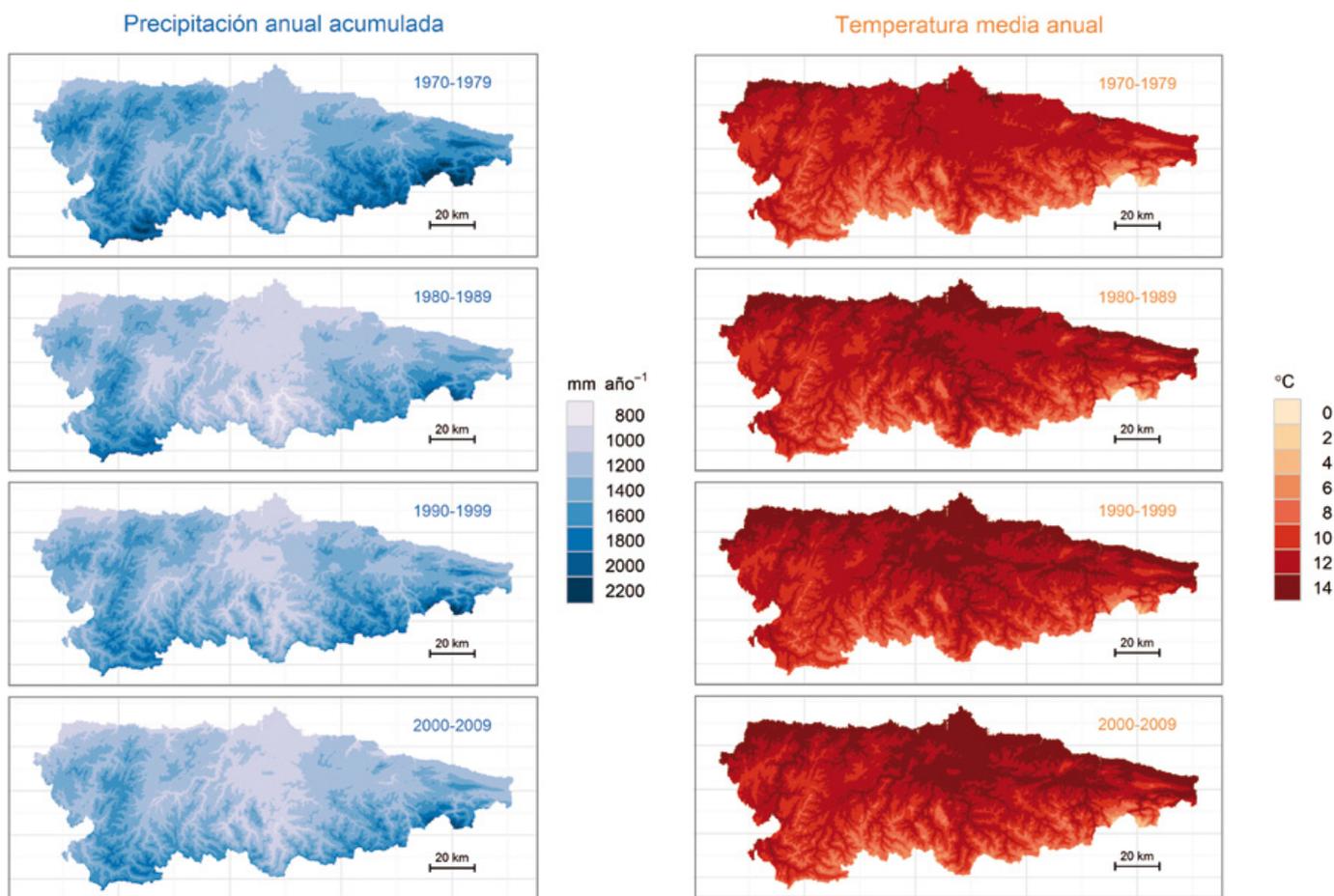


figura 19: Variación espacial en la precipitación anual acumulada (mm año^{-1}) y en la temperatura media anual ($^{\circ}\text{C}$) en el Principado de Asturias durante las últimas décadas (1970-2009). Cada uno de los

mapas muestra un promedio decadal basado en mapas mensuales interpolados a partir de datos recogidos por la red de estaciones meteorológicas AEMET (subsección 2.4).

Al repetir los mismos análisis promediando los mapas mensuales según las estaciones del año, los resultados reforzaron las conclusiones extraídas al analizar las series recogidas por estaciones meteorológicas (subsección 2.3). Tanto en el caso de la precipitación como en el de la temperatura, los cambios más importantes se han producido en invierno y primavera, siendo también apreciable la disminución de las precipitaciones y el aumento de las temperaturas medias en verano (figuras 20 y 21). Al contrario que en los análisis basados en las series de estaciones, se detectó un ligero aumento de la temperatura para el otoño. Al considerar los promedios decadales y al igual que al analizar los cambios en los datos agregados a escala anual, el descenso en la precipitación es especialmente brusco a partir de la década de los setenta, mientras que el aumento en la temperatura es mucho más gradual en todas las estaciones del año (figuras B1-B4 en el Apéndice B). Se puede apreciar una disminución de la precipitación y un aumento de la temperatura en invierno, primavera y verano, con cambios más importantes en las zonas bajas y en los valles del centro de Asturias. Los mapas de medias decadales para el otoño son menos concluyentes y no permiten apreciar una tendencia clara salvo en el caso de la temperatura, que parece aumentar cerca de la costa.

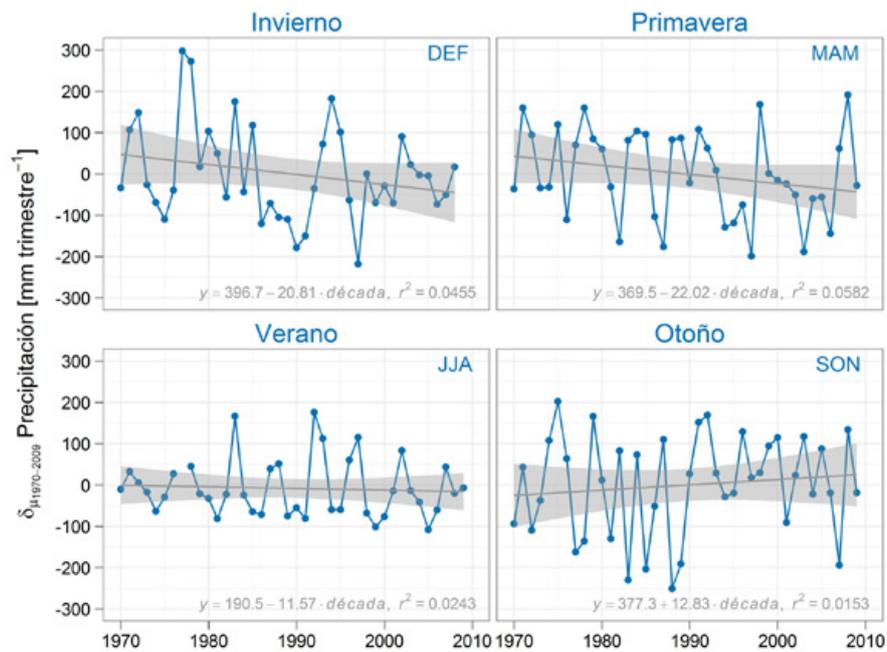


figura 20: Evolución temporal de la precipitación (mm trimestre⁻¹) para cada una de las estaciones del año en el Principado de Asturias durante las últimas décadas (1970–2009). Cada punto corresponde al promedio de mapas interpolados a partir de los datos recogidos por la red de estaciones meteorológicas AEMET para reconstruir la variación espacial en la precipitación mensual (subsección 2.4). Los valores que se presentan son desviaciones respecto a la media para cada estación del año, que corresponde a la ordenada en el origen del modelo de regresión lineal de la precipitación acumulada sobre el tiempo (expresado en décadas) incluida en cada panel. La precipitación acumulada durante cada estación del año se calculó como la suma de los valores de precipitación mensual acumulada estimados considerando estaciones del año trimestrales: *invierno*: diciembre, enero y febrero (DEF); *primavera*: marzo, abril y mayo (MAM); *verano*: junio, julio y agosto (JJA); y *otoño*: septiembre, octubre y noviembre (SON).

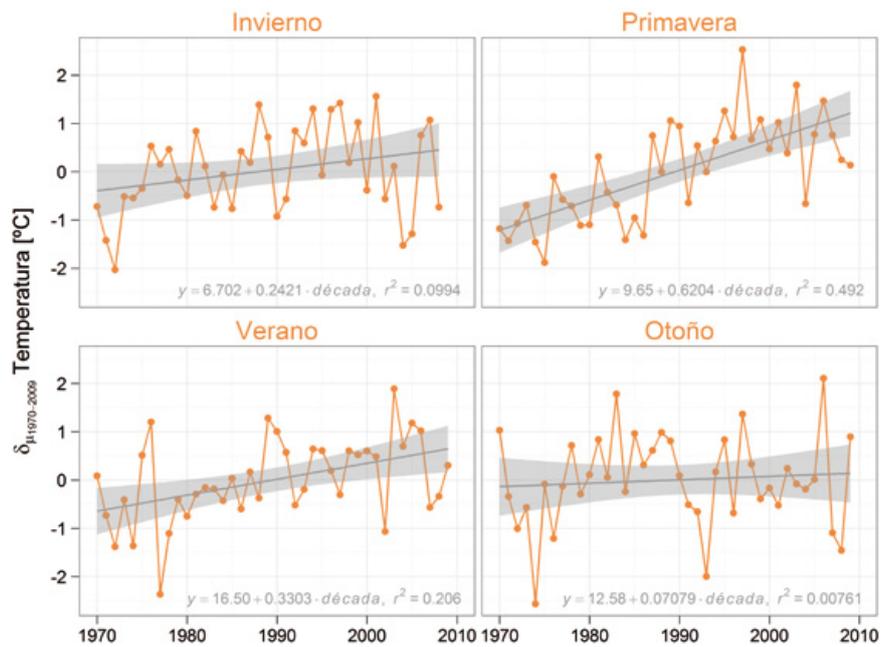


figura 21: Evolución temporal de la temperatura media (°C) para cada una de las estaciones del año en el Principado de Asturias durante las últimas décadas (1970–2009). Cada punto corresponde al promedio de mapas interpolados a partir de los datos recogidos por la red de estaciones meteorológicas AEMET para reconstruir la variación espacial en la temperatura mensual (subsección 2.4). Los valores que se presentan son desviaciones respecto a la media para cada estación del año, que corresponde a la ordenada en el origen del modelo de regresión lineal de la temperatura media sobre el tiempo (expresado en décadas) incluida en cada panel. La temperatura media durante cada estación del año se calculó como el promedio de los valores de temperatura mensual estimados considerando estaciones del año trimestrales; *invierno*: diciembre, enero y febrero (DEF); *primavera*: marzo, abril y mayo (MAM); *verano*: junio, julio y agosto (JJA); y *otoño*: septiembre, octubre y noviembre (SON).

3

**PROYECCIONES
CLIMÁTICAS DE
ALTA RESOLUCIÓN**

3. PROYECCIONES CLIMÁTICAS DE ALTA RESOLUCIÓN

Los escenarios de cambio climático facilitan la incorporación de los efectos del cambio global en el proceso de toma de decisiones para la planificación y desarrollo de políticas y planes. A la vez, este tipo de información posee una gran demanda por parte de todos los agentes sociales y los ciudadanos, debido a la creciente percepción de los problemas asociados al cambio climático. El segundo objetivo de este trabajo es el análisis de escenarios de cambio climático en el Principado de Asturias para lo que resta del presente siglo (2010–2100). Para ello, partiendo de series de datos derivadas de experimentos de simulación realizados con modelos climáticos regionales, se realizó un aumento de la resolución mediante técnicas estadísticas (Benestad *et al.* 2008). Se emplearon simulaciones regionales disponibles a través de los proyectos PRUDENCE (prudence.dmi.dk) y ENSEMBLES (ensembles- Escenarios de Cambio Climático en Asturias www.metoXce.com). Las predicciones realizadas por estos modelos se compararon con las observaciones disponibles a través de las series históricas de datos recogidas en las estaciones meteorológicas de la red de observación AEMET (sección 2), a fin de ajustar modelos de transferencia entre las áreas para las que los modelos realizan sus proyecciones y las medidas con localización 'puntual' realizadas en las estaciones meteorológicas. A continuación, estos modelos se emplearon para reducir la escala de las proyecciones de precipitación y temperatura mensual durante las próximas décadas. Finalmente, se reconstruyó mediante interpolación la variación espacial esperada para ambas variables.

3.1. Simulaciones climáticas a escala regional: proyectos PRUDENCE y ENSEMBLES

Los modelos dinámicos de simulación de clima aplican principios físicos de dinámica de fluidos y química ambiental para recrear la dinámica de la atmósfera y los océanos, incluyendo los cambios en las propiedades físicas y químicas de los fluidos que componen ambos compartimentos (Trenberth 1993; McGuXe & Henderson-Sellers 2005). Para ello, las ecuaciones que rigen el movimiento de fluidos se resuelven sobre una tesela que divide la atmósfera y el océano. La resolución horizontal y vertical de esta tesela varía para distintas capas, ajustándose a las características de distintos niveles; por ejemplo, las capas cercanas a la superficie suelen ser mucho más dinámicas, por lo que el volumen de las celdas que componen la tesela suele ser más pequeño que el de las celdas que se emplean para reproducir la dinámica en las capas altas de la atmósfera.

Varios aspectos limitan la capacidad de los modelos climáticos para reproducir las condiciones climáticas. En primer lugar, es necesario insistir en que el objetivo de este tipo de modelos no es reproducir exactamente las condiciones meteorológicas en cada localidad de la Tierra, sino más bien los resúmenes estadísticos que definen las condiciones climáticas durante períodos de tiempo prolongados. Esto se debe principalmente a la propia naturaleza caótica de las ecuaciones que describen el sistema climático (Lorenz 1963), motivo por el que los modelos climáticos muestran sensibilidad a las condiciones iniciales. Esta sensibilidad implica que las trayectorias predichas por un mismo modelo a partir de dos estados iniciales muy similares, aunque distintos, tienden a diverger y amplificarse a medida que avanza el tiempo. Pequeños errores en las medidas del estado de la atmósfera o el océano son suficientes, por tanto, para limitar la capacidad de predicción de los modelos climáticos. Es muy importante tener en cuenta que esta característica se refiere exclusivamente a la reproducción de una trayectoria concreta del sistema, no al comportamiento esperado al considerar las condiciones promedio a largo plazo. De este modo, los modelos son capaces de reproducir de manera correcta otras características como los niveles promedio de variables climáticas a escala estacional o anual, la varianza en las condiciones meteorológicas, o el período de retorno de un fenómeno extremo.

Aparte de la propia limitación estructural en la predictibilidad de las condiciones climáticas mediante modelos climáticos de simulación, la necesidad de teselar de manera artificial el océano y la atmósfera plantea dificultades tanto de tipo metodológico como de interpretación de resultados. Los modelos operan con las condiciones promedio dentro de cada una de las celdas. En el caso de modelos climáticos globales (GCM) como los empleados en los informes del IPCC (IPCC 2007), la resolución horizontal de las celdas superficiales suele ser de cientos de kilómetros, mientras que la resolución vertical varía entre la decena de metros cerca de la superficie a centenares de metros de altura en las capas más altas de la atmósfera o en las profundidades del océano. No obstante, la discretización de medios continuos como atmósfera y océano es un paso necesario para poder reproducir su comportamiento en la computadora. En general, reducir el tamaño de cada una de las celdas mejora la calidad de los resultados, aunque aumentar la resolución va asociado a ciertos problemas, entre ellos un mayor esfuerzo de computación, es decir, un mayor coste en términos de energía y tiempo.

tabla 1: Familias de escenarios socio-económicos (Nakicenovic *et al.* 2000) empleados en el Cuarto Informe de Evaluación del IPCC (IPCC 2007).

		ENFOQUE QUE DA PRIORIDAD A ASPECTOS	
		Económicos	Medio Ambientales
Relaciones entre países	Globalización	<p>A1B</p> <p>Crecimiento económico rápido con uso balanceado de distintas fuentes de energía</p> <p>$\Delta T = 2.8 (1.7-4.4) ^\circ C$</p> <p>$\Delta H = 0.21-0.48 \text{ cm}$</p>	<p>B1</p> <p>Sostenibilidad ambiental global</p> <p>$\Delta T = 1.8 (1.1-2.9) ^\circ C$</p> <p>$\Delta H = 0.18-0.38 \text{ cm}$</p>
	Regionalización	<p>A2</p> <p>Desarrollo económico regional</p> <p>$\Delta T = 3.4 (2.0-5.4) ^\circ C$</p> <p>$\Delta H = 0.23-0.51 \text{ cm}$</p>	<p>B2</p> <p>Sostenibilidad ambiental local</p> <p>$\Delta T = 2.4 (1.4-3.8) ^\circ C$</p> <p>$\Delta H = 0.20-0.43 \text{ cm}$</p>

Notas: en el caso de la familia de escenarios A1 sólo se incluye el grupo A1B, ya que este escenario fue empleado en el proyecto ENSEMBLES al considerarse representativo de las condiciones esperables a medio plazo en el contexto actual (subsección 3.1). Los escenarios están documentados en el Informe Especial del IPCC sobre Escenarios de Emisiones (Nakicenovic *et al.* 2000). Se incluyen además predicciones para aumento de la temperatura media global en superficie (ΔT , en magenta) y para el aumento del nivel del mar (ΔH , en rojo) (para ΔT se da la mejor estimación y, entre paréntesis, el rango probable; en ambos casos se expresa la diferencia entre la media 2090–2099 respecto a la media 1980–1999). Fuente: modificado a partir de la tabla SPM 3 en IPCC (2007).

Como alternativa para mejorar la resolución de los modelos climáticos globales se han planteado distintas metodologías que se pueden agrupar en métodos dinámicos y métodos estadísticos de cambio de resolución. Los métodos dinámicos consisten en ejecutar un modelo de simulación de clima similar a los empleados a escala global en un dominio espacial menos amplio. Esto permite reducir el tamaño de las celdas de la malla sobre la que se ejecuta el modelo y mejorar la resolución de la línea de costa y la topografía. Estos modelos climáticos regionales (RCM) se ejecutan utilizando las proyecciones realizadas por los modelos globales como condición de contorno, de tal manera que el resultado final equivale aproximadamente a anidar dentro del modelo global una segunda malla de mayor resolución. La principal ventaja de los métodos dinámicos reside en la robustez y coherencia que proporciona emplear modelos basados en principios físicos, lo que no ocurre necesariamente en el caso de las relaciones empíricas de transición de escalas que emplean los métodos estadísticos. No obstante, los métodos dinámicos implican un esfuerzo de computación mucho mayor que los métodos estadísticos, y se ven limitados además por la falta de observaciones para la validación de los resultados y para la realización de proyecciones a escalas muy pequeñas (e.g. disponibilidad de modelos de elevaciones y batimétricos, escenarios de cambio de usos del suelo, modelización de procesos de meso y microescala, etc.).

tabla 2: Modelos climáticos globales considerados en los proyectos PRUDENCE y ENSEMBLES. Los experimentos realizados como parte de los proyectos PRUDENCE y ENSEMBLES se basan en anidar modelos de simulación de clima regionales bajo el resultado de los experimentos de simulación de clima realizados con modelos climáticos globales como parte del Cuarto Informe de Evaluación del IPCC (IPCC 2007; Randall *et al.* 2007).

INSTITUCIÓN	MODELO CLIMÁTICO	SITIO WEB
Centro Climático de Pekín, China	BCM	bcc.cma.gov.cn
Centro Canadiense para el Análisis y Modelado del Clima	CGCM	www.cccma.ec.gc.ca
Center for Climate System Research(Universidad de Tokyo), National Institute for Environmental Studies, and Frontier Research Center for Global Change (JAMSTEC), Japan	MIROC	www.ccsr.u-tokyo.ac.jp
Hadley Centre for Climate Prediction and Research/Met OXce, Reino Unido	HadCM y HadAM	www.metoxce.gov.uk
Institut Pierre Simon Laplace	IPSL	igcmg.ipsl.jussieu.fr
Max Planck Institute for Meteorology	ECHAM	www.mpimet.mpg.de
METEO-FRANCE & CNRS	Arpege	www.cnrm.meteo.fr

En este informe se ha optado por combinar ambos tipos de metodología para la elaboración de escenarios de cambio climático para el Principado de Asturias. Varios grupos de investigación europeos son pioneros en la aplicación de modelos dinámicos para mejorar la escala de los modelos climáticos globales y durante las dos últimas décadas su actividad se ha concentrado en dos grandes proyectos europeos. Los resultados de estos proyectos, disponibles de manera libre en la red, proporcionan proyecciones de cambio climático para los escenarios de emisión A1B, A2 y B2. Estos escenarios representan distintas alternativas de desarrollo socioeconómico y tecnológico futuro, y se agrupan en cuatro grandes familias según representen estrategias que priorizan aspectos económicos o ambientales (escenarios A# vs. B#), que pueden ir acompañadas de relaciones entre países que favorezcan un mundo cada vez más globalizado u homogéneo frente a estrategias que favorezcan un mundo más regionalizado o heterogéneo (escenarios #1 vs. #2) (véase la tabla 1).

El primer proyecto que proporciona escenarios de cambio climático empleando métodos de cambio de escala dinámicos es PRUDENCE (Predicción de Escenarios Regionales e Incertidumbres para la Definición de los Riesgos y Efectos del Cambio Climático en Europa), desarrollado como parte del 5o Programa Marco de la Unión Europea (Christensen *et al.* 2007a, prudence.dmi.dk). El proyecto PRUDENCE estudió distintas fuentes de incertidumbre en el desarrollo de escenarios de cambio climático, especialmente la variación asociada al uso de distintos modelos climáticos regionales y a distintos escenarios de emisión. Los experimentos realizados consistieron en la simulación de dos períodos de 30 años, 1960-1990 y 2071-2100. La mayoría de las simulaciones utilizaron como condición de contorno los resultados de simulaciones del modelo atmosférico del Centro Hadley de Cambio Climático de la Oficina Meteorológica del Reino Unido (HadAM3H, www.metoxce.gov.uk, tabla 2) para el escenario de emisiones A2, aunque también se realizaron simulaciones para el escenario B2 (Nakicenovic *et al.* 2000). La tabla 3 proporciona un resumen de las proyecciones realizadas como parte del proyecto PRUDENCE que han sido empleadas en este estudio. El resultado de cada uno de estos experimentos se encuentra disponible en la página web del proyecto PRUDENCE (prudence.dmi.dk) en formato NetCDF (www.unidata.ucar.edu/software/netcdf/), lo que permite un fácil manejo en programas como R mediante librerías como *ncdf* (Pierce 2010) o *RNetCDF* (Michna 2010).

tabla 3: Resumen de los experimentos de proyección de clima realizados como parte del proyecto PRUDENCE considerados en este estudio. Partiendo de simulaciones realizadas con modelos climáticos globales para el Cuarto Informe de Evaluación del IPCC (IPCC 2007; Randall *et al.* 2007), el proyecto PRUDENCE empleó distintos modelos climáticos regionales para mejorar la resolución de las proyecciones climáticas de manera dinámica. Todos los experimentos incluyen un período de referencia que sirve como control (1960-1990) y un período en el que el modelo se ejecuta bajo los escenarios de emisión A2 y/o B2 (2070-2100). Las referencias proporcionadas en la última columna se refieren a los modelos climáticos regionales; la tabla 2 presenta un resumen de los modelos climáticos globales citados.

Institución	MODELO CLIMÁTICO		Escenario	Resolución	Referencia
	Global	Regional			
Météo-France (CNRM)	HadCM3	Arpege	A2, B2	50-70 km	Déqué <i>et al.</i> 1998
ETH	HadAM3H	CHRM	A2	55 km	Vidale <i>et al.</i> 2003
GKSS	HadAM3H	CLM	A2	56 km	Steppeler <i>et al.</i> 2003
Hadley Centre	HadAM3P	HadRM3P	A2, B2	50 km	Pope <i>et al.</i> 2000
DMI	HadAM3H	HIRHAM	A2, B2	50 km	Christensen <i>et al.</i> 1996
UCM	HadAM3H	PROMES	A2, B2	50 km	Castro <i>et al.</i> 1993
KNMI	HadAM3H	RACMO	A2	50 km	Lenderink <i>et al.</i> 2003
SMHI	ECHAM4OPYC	RCAO	A2, B2	44 km	Döscher <i>et al.</i> 2002
SMHI	HadAM3H	RCAO	A2, B2	44 km	
SMHI	HR HadAM3H	RCAO	A2	22 km	
ICTP	HadAM3H	RegCM	A2, B2	50 km	Giorgi <i>et al.</i> 1993ab
MPI	HadAM3H	REMO	A2	55 km	Jacob 2001

El segundo proyecto considerado es ENSEMBLES (ensembles-eu.metoXce.com), desarrollado como parte del 6º Programa Marco de la Unión Europea (van der Linden & Mitchell 2009). El principal objetivo del proyecto ENSEMBLES es proporcionar proyecciones climáticas de la mejor calidad posible para su uso por investigadores, políticos y gestores, el sector empresarial y los ciudadanos. Entre los experimentos realizados, los más relevantes para este estudio consistieron en proyecciones climáticas para el período 1970-2100. Los experimentos de simulación consistieron en ejecutar distintos modelos climáticos regionales anidados en los resultados de varios modelos climáticos globales (tabla 2), aunque en este caso sólo se consideró el escenario de emisiones A1B (Nakicenovic *et al.* 2000, tabla 1). Este es un escenario de emisiones intermedio entre los escenarios A2 y B2, y se seleccionó porque el principal objetivo era proporcionar proyecciones a medio plazo (2010-2050), período para el que proyecciones basadas en distintos escenarios de emisión no varían de manera crítica (van der Linden & Mitchell 2009).

Una de las diferencias más importantes de los experimentos ENSEMBLES con respecto a las proyecciones realizadas en PRUDENCE es el aumento de la resolución horizontal de los modelos climáticos regionales empleados (alrededor de 50 km en PRUDENCE frente a la predominancia de modelos con resolución horizontal de 25 km en ENSEMBLES). La tabla 4 proporciona un resumen de las proyecciones realizadas como parte del proyecto ENSEMBLES que han sido empleadas en este estudio. El resultado de cada uno de estos experimentos se encuentra disponible a través del servidor de datos del proyecto ENSEMBLES (ensemblesrt3.dmi.dk) en formato NetCDF, lo que facilitó su manejo y análisis. Debido al gran volumen de datos que representan algunos de los experimentos

considerados, se empleó el portal *Climate Explorer* (climexp.knmi.nl), una interfaz diseñada como parte del propio proyecto ENSEMBLES por el Instituto Holandés de Meteorología (KNMI, <http://www.knmi.nl/>) para la difusión y análisis de bases de datos climáticas en línea, para reducir los tiempos de descarga mediante la selección de subconjuntos de los datos disponibles.

tabla 4: Resumen de los experimentos de proyección de clima realizados como parte del proyecto ENSEMBLES considerados en este estudio. Partiendo de simulaciones realizadas con modelos climáticos globales para el Cuarto Informe de Evaluación del IPCC (IPCC 2007; Randall *et al.* 2007), el proyecto ENSEMBLES empleó distintos modelos climáticos regionales para mejorar la resolución de las proyecciones climáticas de manera dinámica.

Institución	MODELO CLIMÁTICO		Escenario	Resolución	Período	Referencia
	Global	Regional				
ETHZ	HadCM3Q0	CLM	A1B	25 km	1970–2099	Böhm <i>et al.</i> 2006
GKSS	IPSL	CLM	A1B	25 km	1970–2050	
OURANOS	CGCM3	CRCM	A1B	25 km	1970–2050	Plummer <i>et al.</i> 2006
DMI	ECHAM5-r3	DMIHIRHAM5	A1B	25 km	1970–2099	Christensen <i>et al.</i> 1996
DMI	Arpege	DMIHIRHAM	A1B	25 km	1970–2099	
METNO	BCM	METNOHIR-HAM	A1B	25 km	1970–2050	
METNO	HadCM3Q0	METNOHIR-HAM	A1B	25 km	1970–2050	
HC	HadCM3Q0	HadCM3Q0	A1B	25 km	1970–2098	Collins <i>et al.</i> 2006
HC	HadCM3Q16	HadCM3Q16	A1B	25 km	1970–2098	
HC	HadCM3Q3	HadCM3Q3	A1B	25 km	1970–2099	
Rosby Centre	HadCM3Q16	RCA3	A1B	25 km	1970–2098	
UCLM	HadCM3Q0	PROMES	A1B	25 km 1	970–2050	Castro <i>et al.</i> 1993
KNMI	ECHAM5-r1	RACMO	A1B	50 km	1970–2100	Lenderink <i>et al.</i> 2003
KNMI	ECHAM5-r2	RACMO	A1B	50 km	1970–2100	
KNMI	ECHAM5-r3	RACMO	A1B	50 km	1970–2100	
KNMI	MIROC	RACMO	A1B	50 km	1970–2100	
SMHI	BCM	RCA	A1B	25 km 1	970–2099	Kjellström <i>et al.</i> 2005
SMHI	ECHAM5-r3	RCA	A1B	25 km	1970–2100	
SMHI	HadCM3Q3	RCA	A1B	25 km	1970–2099	
ICTP	ECHAM5-r3	RegCM	A1B	25 km	1970–2100	Giorgi <i>et al.</i> 1993 ab
MPI	ECHAM5-r3	REMO	A1B	25 km	1970–2100	Jacob 2001
CNRM	Arpege	RM5.1	A1B	25 km	1970–2100	van der Linden & Mitchell 2009
VMGO	HadCM3Q0	RRCM	A1B	25 km	1970–2050	van der Linden & Mitchell 2009

3.2. Modelos de transferencia entre escalas e interpolación

Los modelos de simulación climática resultan en predicciones de los valores de las variables climáticas promediados para el volumen de cada una de las celdas de las mallas sobre las que se ejecutan. En principio, estos valores no se pueden emplear como medidas puntuales (e.g. corresponden a un volumen amplio), por lo que no permiten derivar el comportamiento de las variables climáticas a escalas menores que la propia resolución del modelo. Para ello, previamente es necesario realizar una transferencia de escala entre los volúmenes finitos considerados por los modelos climáticos regionales y las medidas 'puntuales' que se recogen en las estaciones meteorológicas. De este modo, las series temporales procedentes de cada uno de los experimentos PRUDENCE y ENSEMBLES disponibles (tablas 3 y 4) se alinearon con las series recogidas por la red de estaciones meteorológica AEMET. Para el ajuste de los modelos de transferencia, se consideraron únicamente las observaciones disponibles entre 1960 y 1990 en el caso de los experimentos PRUDENCE y entre 1970 y 2009 para las proyecciones ENSEMBLES. Solamente se emplearon aquellas estaciones con un total de observaciones al menos igual a 240 meses (e.g. equivalente a 20 años completos). Tras aplicar estos filtros, quedaron disponibles 162 series procedentes de estaciones de precipitación y 47 series de temperatura para los experimentos PRUDENCE, y 110 series de precipitación y 32 series de temperatura para los experimentos ENSEMBLES.

Los datos procedentes de cada una de estas estaciones se alinearon a continuación con la serie predicha para la celda más cercana localizada en tierra, a fin de evitar el efecto atemperador del océano. En el caso de la precipitación, el modelo de transferencia consistió en un modelo de regresión múltiple en el que el logaritmo de los valores de precipitación observados en cada estación se predijeron a partir de la precipitación (también en escala logarítmica) y la temperatura media predicha por cada modelo climático regional. El caso de las series de temperatura fue más sencillo y, en general, el ajuste entre las predicciones de los modelos y las observaciones fue muy bueno, por lo que fue suficiente considerar modelos de regresión lineal simple. La figura 22 muestra un ejemplo del ajuste entre los datos observados en la estación 1177 (Puente Lles, en Peñamellera Baja; véase la tabla A1 en el Apéndice A.2) y las predicciones obtenidas mediante el modelos de transferencia de escala a partir de los resultados del modelo Arpege ejecutado en un escenario control del modelo global HadCM3 (experimento PRUDENCE correspondiente a la primera entrada de la tabla 3)

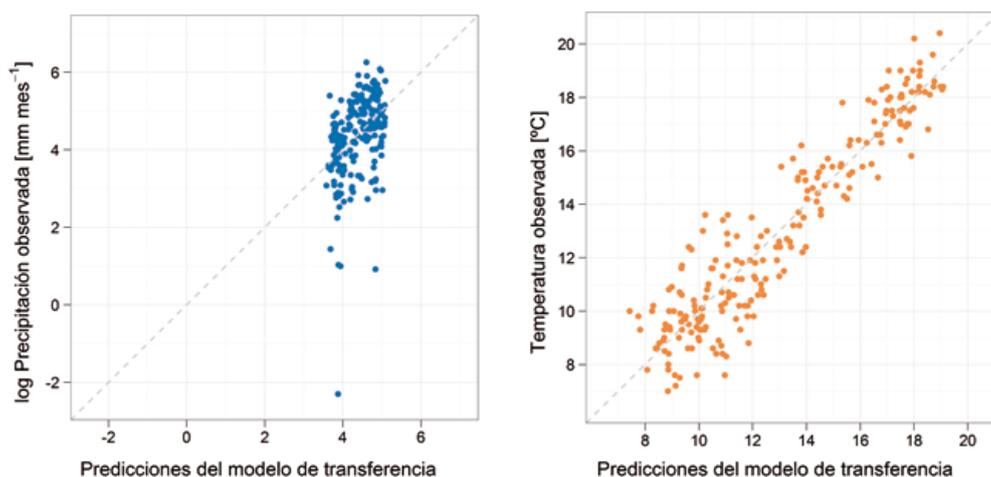


figura 22: Ejemplo del ajuste de los modelos de transferencia para precipitación (panel izquierdo) y temperatura (panel derecho). Cada panel muestra el ajuste entre las observaciones realizadas en la estación 1177 (Puente Lles, en Peñamellera Baja; tabla A1 en el Apéndice A.2) y el ajuste proporcionado por el modelo de transferencia de escala para las predicciones realizadas por el modelo Arpege ejecutado en un escenario control del modelo global HadCM3 (tabla 3) para la celda más cercana a la localización de la estación. La línea discontinua de color gris oscuro marca la localización que ocuparían los puntos si el ajuste del modelo fuera perfecto (1:1).

Además de examinar el ajuste entre los valores observados y las predicciones realizadas por los modelos de transferencia, también se examinaron otros patrones en los datos como la distribución de los residuos y la posibilidad de autocorrelación temporal en los mismos, así como la adecuación de las predicciones realizadas por los modelos. A modo de resumen sobre la calidad del ajuste proporcionado por los modelos de transferencia, la figura 23 presenta la distribución de los coeficientes de determinación de los 4474 modelos ajustados a los datos de precipitación y los 1300 modelos ajustados a los datos de temperatura. En general, el porcentaje de varianza explicado fue mucho mayor en el caso de la temperatura (e.g. superior al 50 %). No obstante, el ajuste fue aceptable en el caso de la precipitación, especialmente al considerar la gran irregularidad, la alta frecuencia de valores extremos y la variación a pequeña escala espacial que caracterizan esta variable. En ese contexto, el valor medio del coeficiente de determinación encontrado, $r^2 = 0.14$, se puede considerar un valor relativamente alto, lo que junto con el examen directo del ajuste para cada modelo (e.g. figura 22) proporciona cierta confianza en los modelos de transferencia ajustados, aunque también advierte de la necesidad de interpretar cualquier resultado derivado con cierta cautela.

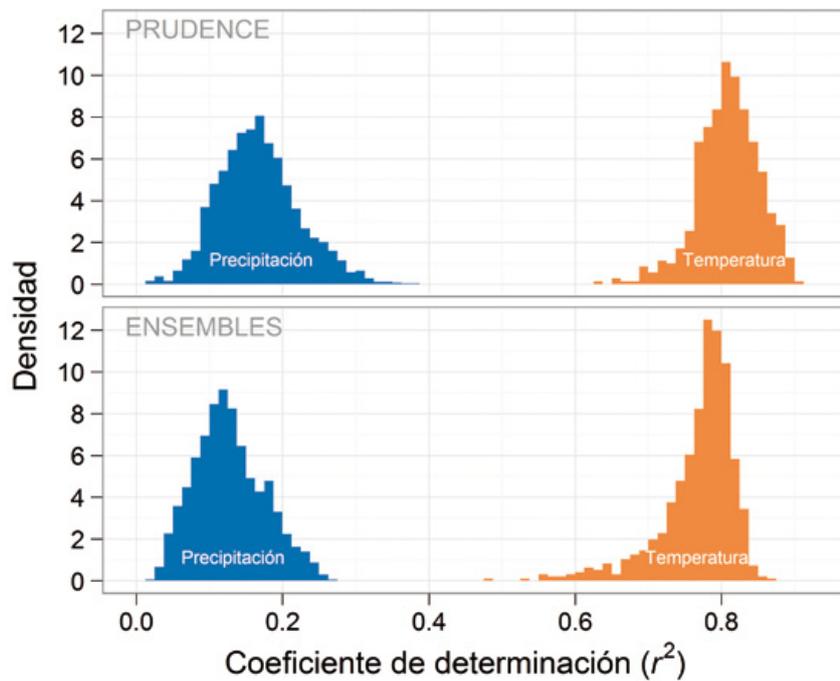


figura 23: Distribución de los coeficientes de determinación (r^2) obtenidos tras ajustar los modelos de transferencia de escala entre los datos de precipitación (histogramas color azul) y temperatura (histogramas color naranja) recogidos por las estaciones meteorológicas de la red AEMET y las predicciones de los modelos climáticos regionales empleados en los proyectos PRUDENCE (panel superior) y ENSEMBLES (panel inferior). Las tablas 3 y 4 recogen un listado de los experimentos de simulación de clima en los que se basó el ajuste de los valores de precipitación y temperatura mensuales observados.

Los valores generados tras invertir los modelos de transferencia de escala se emplearon para reconstruir la variación espacial en precipitación y temperatura entre 1970 y 2100 utilizando métodos similares a los empleados en la subsección 2.4. De este modo, se empleó de nuevo la técnica de interpolación geoestadística denominada *kriging universal*, que consiste en la reconstrucción espacial de una variable en cada punto del espacio como combinación lineal de los valores en localidades cercanas (Cressie 1993). Además de los valores de la variable objetivo en localidades cercanas, el *kriging universal* tiene en cuenta la influencia de otras variables a la hora de interpolar los datos. Se incluyó la influencia de la topografía y la continentalidad o grado de influencia oceánica a través de la inclusión como covariables de los valores de elevación procedentes del modelo digital de elevaciones ASTER GDEM así como la capa que codifica la distancia a la línea de costa (figura 1, subsección 2.1).

Los modelos incluyeron también un término de regresión para reconstruir la superficie de tendencia a gran escala a partir de las coordenadas espaciales. Los modelos se ajustaron en *R* (R Development Core Team 2010) empleando la librería *fields* (Furrer *et al.* 2010). Además de especificar los valores y localizaciones de la variable que se desea interpolar (en nuestro caso, valores mensuales de precipitación acumulada o temperatura media), así como los valores de las covariables (elevación y distancia a la costa), se incluyó una función de covarianza que se ajustó para cada uno de los meses por separado tras comprobar que era razonable asumir que era de tipo exponencial con una escala de decorrelación constante de 30 km. Tras fijar de esta manera el parámetro que especifica el alcance o escala (*rango*) de la correlación, los valores de el error de medida (*nugget*) y el valor asintótico (*sill*) se ajustaron por validación cruzada (Furrer *et al.* 2010). Los mapas resultantes se emplearon para calcular los incrementos en precipitación mensual acumulada y temperatura media mensual respecto al período de cada simulación 1970–1990, que se tomó como control. Se escogió este período de control debido a la disponibilidad de observaciones para validar los modelos y por el solapamiento parcial entre los experimentos PRUDENCE (1960–1990) y los experimentos ENSEMBLES (1970–2100). Los niveles absolutos de precipitación y temperatura se estimaron añadiendo a los incrementos proyectados los valores climatológicos estimados mediante interpolación de las observaciones recogidas por la red AEMET entre 1970 y 1990 (subsección 2.4).

3.3. Análisis de escenarios de cambio climático (2010–2100)

A partir de los mapas mensuales interpolados para cada experimento de simulación de clima, se estimó la variación en la precipitación anual acumulada y en la temperatura media anual en las proyecciones bajo los escenarios A1B, A2 y B2 para el período 2010–2100 (figura 24). Los resultados de los modelos de simulación de clima coinciden de manera clara en la tendencia general esperada, indicando una disminución gradual de la precipitación anual acumulada y un aumento de la temperatura media anual en el Principado de Asturias. No obstante, los modelos no son capaces de reproducir la variabilidad interanual observada en el caso de la precipitación, aunque sí logran seguir la media observada durante el período con observaciones disponibles. Por otra parte, las tendencias proyectadas para ambas variables muestran una ligera aceleración a partir de 2040 (figura 24).

Para el período 2070–2100, la disponibilidad de proyecciones para distintos escenarios de emisión permite apreciar además la diferencia entre las condiciones esperadas bajo cada uno de ellos, con cambios más acusados en las predicciones para el escenario A2 que para los escenarios A1B y B2, siendo este último el escenario que presentaría los cambios de menor magnitud. Para poder examinar la variación espacial en la magnitud de los incrementos esperados, se tomaron como nivel de referencia las condiciones medias predichas por cada modelo para el período 1970–1990, y se utilizó como nivel base la climatología elaborada mediante interpolación de los datos recogidos por la red de observación AEMET para el mismo período (subsección 2.4). A continuación, se prepararon mapas para las condiciones promedio durante períodos consecutivos de 30 años, así como para el porcentaje de reducción esperado en la precipitación acumulada y para la diferencia en temperatura para los distintos escenarios. Los mapas estimados para cada uno de los modelos se combinaron entre sí estimando el valor promedio predicho para cada uno de los píxeles, siendo esta predicción conjunta la que se ha utilizado para el cálculo de estadísticos y la que se presenta en los mapas de este documento. La tabla 5 proporciona un resumen de los cambios esperados a escala anual y estacional para distintos escenarios de emisión.

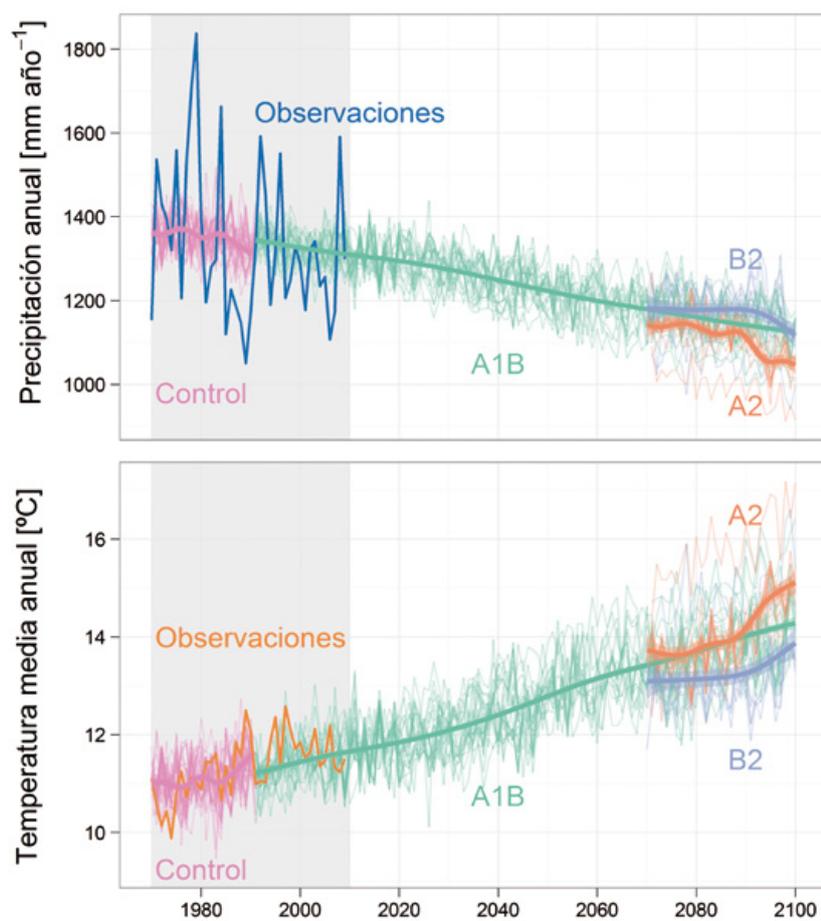


figura 24: Proyecciones para la precipitación acumulada (mm año^{-1} , panel superior) y la temperatura media anual ($^{\circ}\text{C}$, panel inferior) en el Principado de Asturias. Las proyecciones se basan en el promedio de 23 experimentos realizados como parte del proyecto ENSEMBLES para el escenario A1B (1970–2100, tabla 3), y de 12 y 7 experimentos PRUDENCE para los escenarios A2 y B2, respectivamente (1960–1990 y 2070–2099, tabla 4). Cada línea muestra el promedio de mapas mensuales obtenidos tras interpolar mapas mensuales interpolados a partir de series proyectadas a partir del ajuste entre los resultados del modelo regional de simulación de clima y las observaciones recogidas en las estaciones meteorológicas de la red AEMET. A modo de guía, se incluye además en cada gráfico la tendencia media para cada escenario (líneas con mayor grosor), estimada mediante ajuste de un modelo generalizado aditivo (Hastie & Tibshirani 1990; Wood 2006). Cada panel incluye además el promedio observado para la precipitación o la temperatura durante el período 1970-2009 (figura 18). A fin de apreciar el grado de concordancia entre las distintas series procedentes de los distintos experimentos de simulación de clima, se ha aplicado un factor de transparencia aditivo (Wickham 2009), de tal manera que la intensidad de color es proporcional al número de series que se solapan, con máxima intensidad correspondiente al solapamiento de 4 series.

tabla 5: Cambios en precipitación y temperatura para distintos escenarios de emisión (A2, A1B y B2; sección 3). Para cada período temporal y escenario disponible se presenta el cambio promedio y el rango de los cambios proyectados para el conjunto del Principado de Asturias (entre paréntesis). Los valores se han extraído de la proyección conjunta estimada a partir de la reducción de escala varios modelos climáticos regionales. Los valores corresponden al porcentaje de precipitación anual y la diferencia en la temperatura media durante al nivel medio proyectado con respecto al promedio estimado para el período 1970–1990 (subsección 3.2).

	ESCENARIO DE EMISIÓN				
	A1B		A2	B2	
	2010–2039	2040–2069	2070–2099	2070–2099	2070–2099
<i>P</i> _{anual}	95.0 % (92.8–97.0 %)	89.8 % (85.4–93.8 %)	85.4 % (79.3–91.1 %)	82.1 % (75.3–86.8 %)	86.6 % (81.0–90.0 %)
<i>T</i> _{anual}	0.88 °C (0.62– 1.10 °C)	1.84 °C (1.27–2.34 °C)	2.73 °C (1.90–3.49 °C)	3.02 °C (2.15–3.96 °C)	2.17 °C (1.46–2.87 °C)
<i>P</i> _{invierno}	95.1 % (93.3–97.3 %)	90.2 % (86.4–94.7 %)	86.8 % (81.4–93.2 %)	82.8 % (76.9– 87.4 %)	87.5 % (82.7–90.9 %)
<i>T</i> _{invierno}	0.79 °C (0.52–0.96 °C)	1.65 °C (1.08–1.98 °C)	2.30 °C (1.47–2.79 °C)	2.41 °C (1.91–3.04 °C)	1.67 °C (1.18–2.17 °C)
<i>P</i> _{primavera}	95.8 % (93.0–97.8 %)	91.3 % (85.9–95.3 %)	86.9 % (79.0– 92.8 %)	84.4 % (74.3–90.1 %)	89.1 % (81.6–92.8 %)
<i>T</i> _{primavera}	0.71 °C (0.54–0.89 °C)	1.54 °C (1.11–1.97 °C)	2.35 °C (1.69–3.03 °C)	2.50 °C (1.83–3.24 °C)	1.74 °C (1.20–2.26 °C)
<i>P</i> _{verano}	92.5 % (88.0–95.6 %)	85.5 % (77.3–91.3 %)	78.6 % (66.9–87.1 %)	74.2 % (57.1–81.8 %)	78.9 % (64.2–85.5 %)
<i>T</i> _{verano}	1.10 °C (0.81–1.46 °C)	2.18 °C (1.59– 2.91 °C)	3.36 °C (2.55–4.53 °C)	3.94 °C (2.38– 5.66 °C)	3.00 °C (1.82–4.33 °C)
<i>P</i> _{otoño}	95.1 % (92.9–97.0 %)	89.8 % (85.3– 93.9 %)	85.5 % (79.5–91.3 %)	82.9 % (76.3– 87.1 %)	86.9 % (81.5–90.3 %)
<i>T</i> _{otoño}	0.91 °C (0.61–1.13 °C)	1.99 °C (1.30–2.51 °C)	2.90 °C (1.90–3.67 °C)	3.21 °C (2.36–4.14 °C)	2.27 °C (1.52–2.98 °C)

La figura 25 presenta los valores promedio esperados para la precipitación anual acumulada y para la temperatura media anual durante los períodos 2010–2039 y 2040–2069, mientras que la figura 26 muestra la misma información como cambios respecto a la climatología construida a partir de las observaciones recogidas en las estaciones de la red de observación AEMET durante el período de referencia 1970–1990 (subsección 2.4). Durante el período 2010–2069 sólo están disponibles las proyecciones realizadas en el contexto del proyecto ENSEMBLES (tabla 4, subsección 3.1), razón por la que únicamente se presentan resultados para el escenario A1B. No obstante, es necesario considerar que no se esperan grandes diferencias entre distintos escenarios de emisión hasta finales de siglo (van der Linden & Mitchell 2009). Las proyecciones muestran una disminución de la precipitación y un aumento de la temperatura en todo el Principado de Asturias (figura 25), con cambios especialmente acusados en la región occidental (figura 26), donde se puede apreciar una disminución en la precipitación superior al 10 % para el período 2040-2069 y aumentos en la temperatura por encima de 2 °C. Las figuras también permiten apreciar que para mediados de siglo, atendiendo a las proyecciones, la precipitación en los valles centrales y en la costa asturiana será inferior a 1000 mm año⁻¹, mientras que se espera que la temperatura media anual sea superior a los 12 °C.

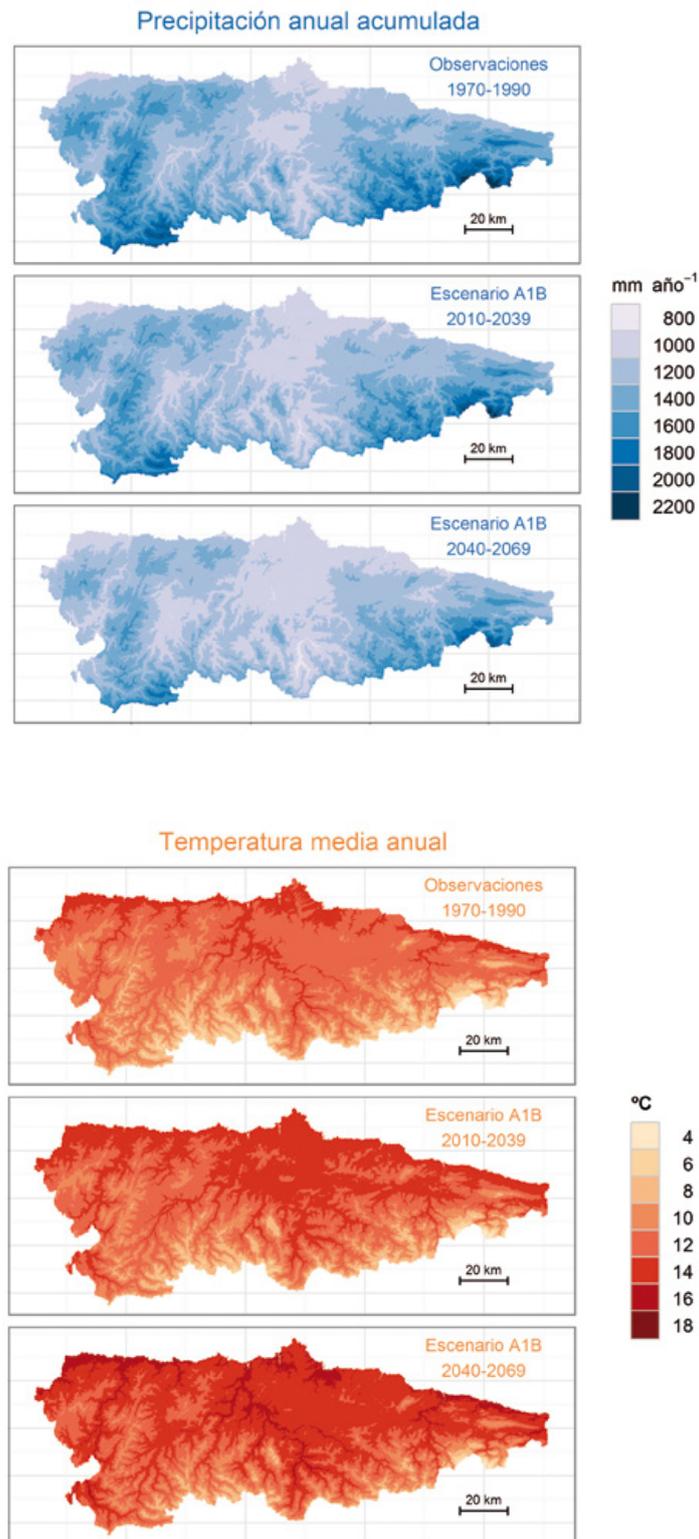
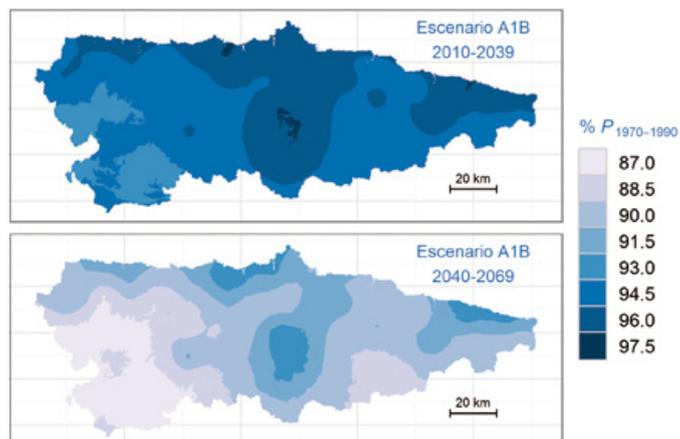


figura 25: Proyecciones para la precipitación anual acumulada (mm año⁻¹, panel superior) y la temperatura media anual (°C, panel inferior) para el período 2010-2069. Cada mapa muestra el promedio de varios modelos climáticos (subsección 3.2), y se ha calculado tras añadir los incrementos en precipitación y temperatura estimados por cada modelo con respecto al período 1970-1990 a la climatología estimada para el mismo período a partir de la interpolación de observaciones recogidas por la red AE-MET (panel superior, subsección 2.4).

Cambios en la precipitación anual



Cambios en la temperatura anual

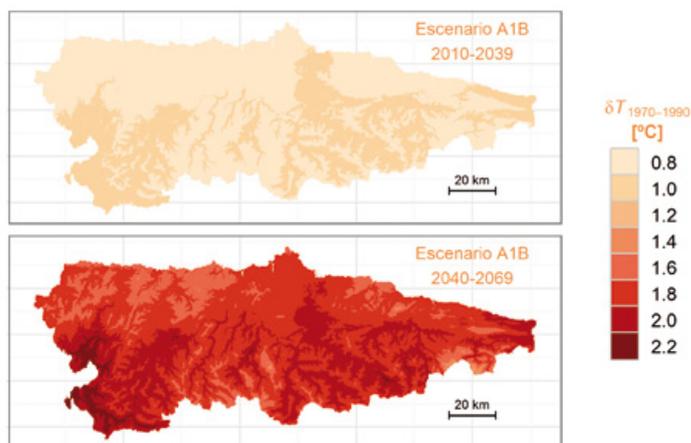


figura 26: Cambios esperados en la precipitación anual acumulada (%, panel superior) y en la temperatura media anual (°C, panel inferior) para el período 2010–2069. Los mapas corresponden a los incrementos predichos para el escenario A1B (véase la sección 3). Cada mapa se basa en el promedio del resultado de varios modelos climáticos y muestra el porcentaje de reducción en la precipitación acumulada y la diferencia en temperatura media entre el incremento proyectado para los períodos 2010–2039 y 2040–2069 respecto al promedio estimado para el período 1970–1990 a partir de observaciones recogidas por la red AEMET (subsección 2.4).

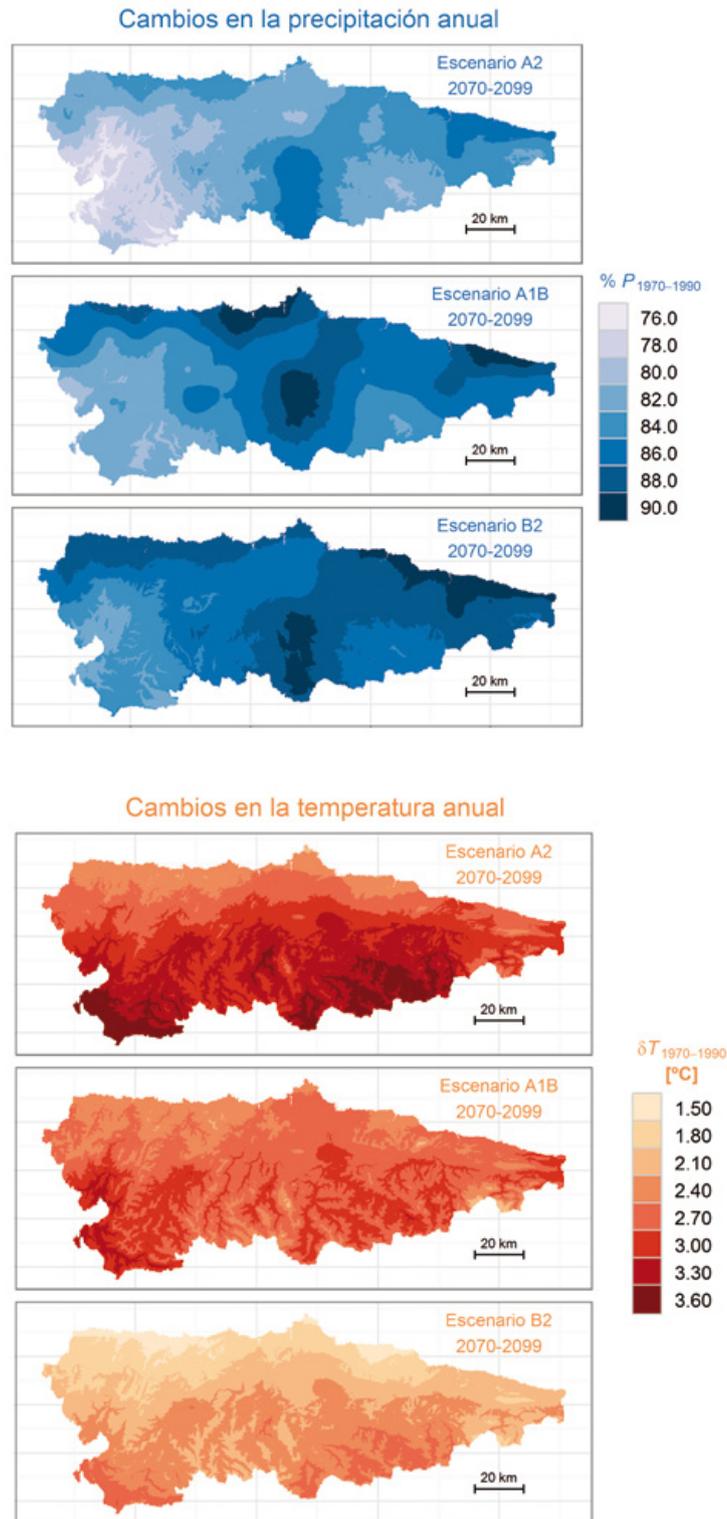


figura 28: Cambios esperados en la precipitación anual acumulada (%) y en la temperatura media anual (°C) para el período 2070–2099. Los mapas corresponden a los incrementos predichos para distintos escenarios (A2, A1B y B2; véase la sección 3). Cada mapa se basa en el promedio del resultado de varios modelos climáticos y muestra el porcentaje de reducción en la precipitación acumulada y la diferencia en temperatura media entre el incremento proyectado para el período 2070–2099 respecto al promedio estimado para el período 1970–1990 a partir de observaciones recogidas por la red AEMET (subsección 2.4).

Durante el período 2070-2099, además de las proyecciones basadas en el escenario A1B procedentes del proyecto ENSEMBLES, se encuentran disponibles las proyecciones realizadas como parte del proyecto PRUDENCE bajo los escenarios A2 y B2 (subsección 3.1). La ?? presenta los valores promedio esperados para la precipitación anual acumulada y para la temperatura media anual bajo cada escenario, mientras que la figura 28 presenta los cambios esperados respecto a la climatología construída a partir de las observaciones recogidas en las estaciones de la red de observación AEMET durante el período de referencia 1970–1990 (subsección 2.4). Ambos conjuntos de mapas permiten apreciar las diferencias entre los distintos escenarios, aunque en todos ellos los cambios predichos son más intensos cerca de la cordillera. Las diferencias en los cambios esperados en precipitación anual entre distintos escenarios son muy importantes en el sector occidental, con reducciones por encima del 20 % en la precipitación esperada para el escenario A2 que no se observan en las proyecciones para otros escenarios (figura 28). En el caso de la temperatura, las proyecciones para los escenarios A2 y A1B son más similares entre sí, aunque de nuevo el escenario A2 resulta en proyecciones más extremas. Mientras, los cambios esperados bajo el escenario B2 son mucho menos intensos, con un aumento promedio esperado menor en más de medio grado que para los escenarios A1B y A2 también la figura 24 y la tabla 5)

En último lugar, las proyecciones se examinaron según las estaciones del año para la precipitación acumulada y para la temperatura media (figura 29). Al igual que al examinar las tendencias a escala a anual (figura 24), los modelos fueron capaces de reproducir la tendencia observada aunque tuvieron más dificultades para reproducir la variabilidad interanual observada, especialmente en el caso de la precipitación (figura 29). Las proyecciones de todos los modelos para cualquiera de los escenarios considerados coinciden al predecir una disminución de la precipitación acumulada y un aumento de la temperatura media para todas las estaciones del año. Los cambios son más importantes para el escenario A2, aunque las tendencias bajo el escenario A1B son similares. Los modelos predicen además un cambio en la tendencia a partir de 2040, especialmente apreciable en el caso del verano. Los Apéndices C, D, F y F presentan los mapas con las proyecciones en términos absolutos y los cambios esperados en precipitación acumulada y temperatura media para cada estación del año.

En general, los mapas con los cambios esperados para las distintas estaciones del año (Apéndices C–F) permiten apreciar un marcado contraste entre las proyecciones para distintos escenarios, así como una gran heterogeneidad espacial en los cambios esperados, que son en general más intensos en las zonas oriental y occidental de la cordillera. Además, las proyecciones son diferentes según la estación del año considerada, con cambios esperados más importantes en el otoño y, especialmente, para el verano (tabla 5). Estas diferencias entre las distintas estaciones del año se van incrementando a lo largo del siglo y se hacen muy patentes para el período 2070–2099, tal y como puede derivarse al examinar los cambios esperados para el escenario A1B (tabla 5). Es necesario considerar además que las tendencias predichas contrastan en cierta medida con las tendencias observadas hasta el momento (e.g. cambios importantes en primavera y verano, más leves en invierno y prácticamente inapreciables en otoño; sección 2). No obstante, el hecho de que las diferencias entre estaciones se vayan haciendo cada vez patentes según avanza el tiempo parece indicar que el cambio esperable en el régimen estacional de precipitación y temperatura en el Principado de Asturias puede alterar las tendencias observadas hasta la actualidad.

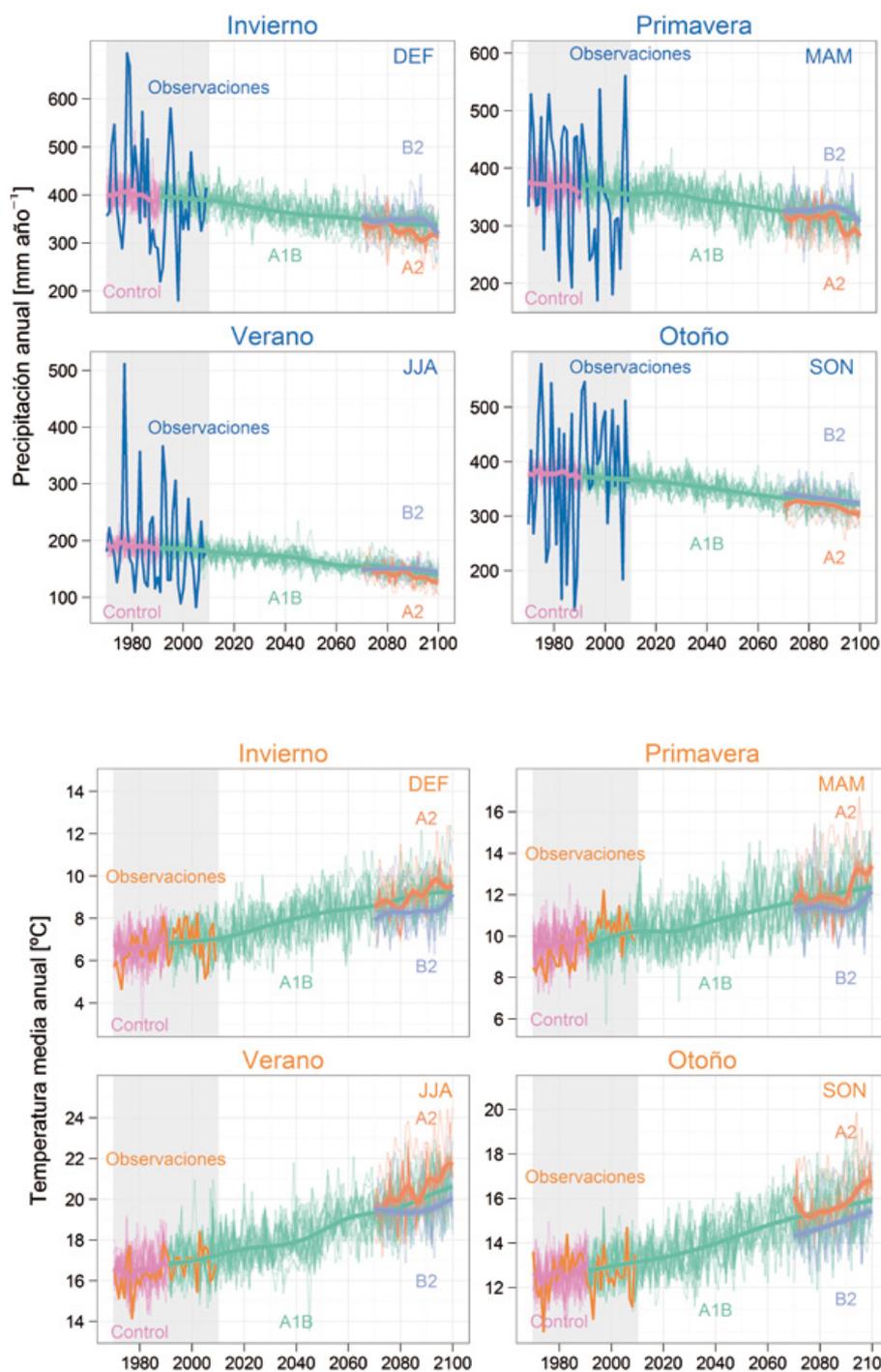


figura 29: Proyecciones para la precipitación acumulada estacional (mm trimestre^{-1}) y la temperatura media ($^{\circ}\text{C}$) en el Principado de Asturias. Las proyecciones se basan en el promedio de 23 experimentos realizados como parte del proyecto ENSEMBLES para el escenario A1B (1970–2100, tabla 3), y de 12 y 7 experimentos PRUDENCE para los escenarios A2 y B2, respectivamente (1960–1990 y 2070–2099, tabla 4). Cada línea muestra el promedio de mapas mensuales obtenidos tras interpolar mapas mensuales interpolados a partir de series proyectadas a partir del ajuste entre los resultados del modelo regional de simulación de clima y las observaciones recogidas en las estaciones meteorológicas de la red AEMET. A modo de guía, se incluye además en cada gráfico la tendencia media para cada escenario (líneas con mayor grosor), estimada mediante ajuste de un modelo generalizado aditivo (Hastie & Tibshirani 1990; Wood 2006). Cada panel incluye además el

promedio observado para la precipitación o la temperatura durante el período 1970-2009 (figura 18). A fin de apreciar el grado de concordancia entre las distintas series procedentes de los distintos experimentos de simulación de clima, se ha aplicado un factor de transparencia aditivo (Wickham 2009), de tal manera que la intensidad de color es proporcional al número de series que se solapan, con máxima intensidad correspondiente al solapamiento de 4 series. La precipitación acumulada durante cada estación del año y la temperatura media se calcularon como suma y promedio, respectivamente, considerando estaciones del año trimestrales; *invierno*: diciembre, enero y febrero (DEF); *primavera*: marzo, abril y mayo (MAM); *verano*: junio, julio y agosto (JJA); y *otoño*: septiembre, octubre y noviembre (SON).

4

**RESULTADOS
DEL ANÁLISIS**

4. RESULTADOS DEL ANÁLISIS

El objetivo final de la proyección de escenarios de cambio climático es facilitar que gestores, agentes sociales, empresas o ciudadanos puedan tomar decisiones informadas que consideren los impactos potenciales del cambio climático. En este sentido, el apartado anterior (sección 3) presenta proyecciones bajo distintos escenarios de emisiones que demuestran que nuestras decisiones pueden condicionar la evolución a medio y largo plazo del clima a escala global y regional. Por todo ello, el tercer y último objetivo de este estudio es la difusión pública de los resultados obtenidos. Para ello, se ha preparado una base de datos geográfica que agrupa los datos reunidos y generados en los pasos anteriores, y se ha desarrollado una página web interactiva destinada a la divulgación de los principales resultados obtenidos.

4.1. Difusión de resultados

Uno de los objetivos de este estudio es la preparación de materiales para la difusión de los principales resultados obtenidos. Para ello, se ha optado por emplear internet como principal soporte y plataforma para los distintos materiales elaborados. En la actualidad están disponibles una gran variedad de recursos en red que proporcionan información sobre el cambio climático y permiten explorar las proyecciones disponibles. En este apartado a destacar alguno de ellos que puede ser de utilidad y servir como complemento a la información asociada a este estudio. En primer lugar, es necesario destacar que todos los datos procedentes de experimentos de simulación de clima suelen estar disponibles para la comunidad científica. Tal sería el caso del repositorio de los resultados de los experimentos de simulación del clima global del IPCC, *Earth System Grid* (www.earthsystemgrid.org, Williams *et al.* 2008) y PCDMI (www-pcmdi.llnl.gov), el proyecto para la comparación de experimentos de paleoclima (pmp2.lsc.ipsl.fr), o los repositorios de los proyectos PRUDENCE (prudence.dmi.dk) y ENSEMBLES (ensembles-eu.metoXce.com) empleados en este estudio.

Aparte de los repositorios generales con los datos brutos, existen distintos portales que ofrecen la posibilidad de explorar los resultados de experimentos de simulación de clima. A raíz del proyecto ENSEMBLES, se han desarrollado dos portales que ofrecen distintas posibilidades para el análisis en línea y la adquisición de datos procedentes de experimentos de simulación. El Instituto Meteorológico Holandés (KNMI, www.knmi.nl) ha desarrollado *ClimateExplorer* (climexp.knmi.nl), que permite el análisis y visualización de una gran variedad de datos, desde series procedentes de estaciones meteorológicas hasta los resultados de experimentos de simulación de clima a escala global. Por otra parte, el Grupo de Meteorología de Santander (Universidad de Cantabria-Instituto de Física de Cantabria del CSIC) ha desarrollado el portal para la reducción a escala regional en línea de experimentos ENSEMBLES (www.meteo.unican.es/ensembles). Ambos portales estarían dirigidos principalmente a investigadores y gestores. A escala global, con un diseño que favorece la difusión hacia un público más general, destaca la iniciativa de la fundación The Nature Conservancy (TNC, www.nature.org) denominada *Climate-Wizard* (www.climatewizard.org), desarrollada junto a las Universidades de Washington y de Mississippi (Girvetz *et al.* 2009). El portal *Climate-Wizard* proporciona acceso interactivo a climatologías estimadas para el período 1950–2000. Además, incluye las proyecciones realizadas por los modelos climáticos globales empleados en el Cuarto Informe del IPCC (Randall *et al.* 2007) promediadas durante los períodos 2040–2069 y 2070–2099 para los escenarios B1, A1B y A2 (véase la tabla 1).

Entre la información climática disponible sobre España cabe destacar el Atlas Climático Digital de la Península Ibérica, desarrollado por los Deptos. de Geografía y de Biología Animal, Vegetal y Ecología de la Universidad Autónoma de Barcelona (opengis.uab.es/wms/iberia). El Atlas Climático Digital de la Península comprende una serie de climatologías termoplumiométricas estimadas para la península ibérica, interpoladas a partir de datos recogidos en estaciones meteorológicas durante el período 1950–1999 (Ninyerola *et al.* 2005). En la página web del Grupo de Meteorología de Santander (www.meteo.unican.es) también se encuentra disponible una reconstrucción de las condiciones de precipitación y temperatura durante el período 1950–2008 (Herrera *et al.* 2011). En cuanto a la información disponible sobre escenarios de cambio climático, la página web de la Agencia Estatal de Meteorología proporciona proyecciones climáticas a escala regional y nacional (www.aemet.es/es/elclima/cambio_climat/proyecciones) y escenarios regionalizados (Brunet *et al.* 2009), aunque es necesario registrarse para poder acceder a los datos (www.aemet.es/es/elclima/cambio_climat/escenarios). Finalmente, destacar el trabajo sobre escenarios regionales desarrollado por el Grupo de Meteorología de Santander para el Gobierno de Cantabria (www.meteo.unican.es/escenariosCantabria), que proporciona de manera libre acceso a reconstrucciones espaciales de alta resolución (1 km) para el período 1973–2003 y proyecciones para los distintos modelos considerados en el proyecto ENSEMBLES (Gutiérrez *et al.* 2010), que también exige registrarse antes de acceder a la información. La necesidad de registrarse en este tipo de portales obedece normalmente a la necesidad de valorar aspectos técnicos del servicio proporcionado (e.g. ancho de banda, tiempo de computación), y es útil a la hora de justificar la existencia de cierta demanda por los servicios proporcionados.

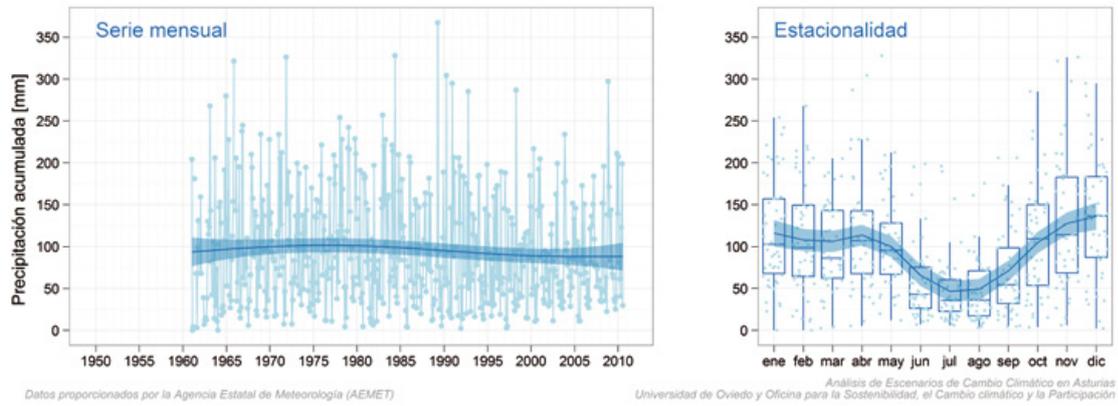
4.2. Materiales generados para la difusión de resultados

Entre las distintas opciones disponibles para la difusión de los resultados y materiales generados, en el presente proyecto se ha optado por la preparación de materiales destinados a un público general, ya que entre los objetivos principales de este proyecto se encuentra la divulgación y transmisión de la información obtenida a los distintos agentes sociales. En primer lugar, se ha redactado el presente informe tomando especial cuidado en la elaboración de figuras y mapas fáciles de interpretar. Para la elaboración de gráficos y mapas se ha empleado la librería *ggplot2* (Wickham 2009) que, en el caso de los mapas, se ha complementado con los esquemas de color disponibles a través de la librería *RColorbrewer* (Neuwirth 2007), diseñados para optimizar la transmisión de información (Brewer 2005, véase también colorbrewer2.org). Se ha procurado evitar además que los gráficos incluyeran más de ocho códigos de color distintos, y se han utilizado rampas de color continuas (Kraak & Ormeling 2010). En la medida de lo posible, se ha intentado emplear un estilo directo y sencillo evitando un uso excesivo de tecnicismos.

Las series temporales para las estaciones de mejor calidad así como los mapas con climatologías y con las proyecciones conjuntas elaboradas a partir del resultado de varios modelos climáticos se han preparado para su presentación en la red. Para ello, se han incluido en una base de datos geográfica PostgreSQL PostGIS (postgis.refrains.net). Los datos correspondientes a cada uno de los mapas mensuales en los que se basan las climatologías y proyecciones conjuntas se conservan en formato R y quedan disponibles para cualquier persona interesada en su uso. Debido al gran volumen de memoria necesario para almacenar y servir de manera adecuada estos datos, por el momento las posibles peticiones se atenderán personalmente. En caso de detectarse una demanda importante de la información bruta generada por este estudio, se realizarían los trámites necesarios para proporcionar acceso libre a los datos a través de la red.

Los contenidos y funcionalidades de la página web asociada al proyecto (www.redambientalasturias.es) incluyen textos introductorios y explicativos de los materiales y métodos empleados, así como un resumen de los principales resultados obtenidos. Estos textos van acompañados de algunas de las figuras incluidas en el texto y se puede asumir constituyen un resumen ejecutivo (e ilustrado) del mismo. La página también incluye un enlace a este documento y, sobre todo, una interfaz para la exploración sobre un mapa interactivo de distintos mapas. De esta manera, se ha incluido en primer lugar un mapa con la localización de las estaciones meteorológicas que permite la exploración los datos mensuales de precipitación acumulada y temperatura proporcionados por AEMET (figura 30). El resto de mapas interactivos presentan las climatologías y proyecciones, permitiendo además explorar los mapas con las medias decadales y para períodos de 30 años. Aparte de permitir interrogar las capas a través de una interacción remota con la base de datos geográfica, estos mapas permiten realizar capturas en un formato de imagen ligero (*png*, www.libpng.org/pub/png). Frente a los mapas de clases discretas presentados en este documento, se ha optado por rampas de color con un mayor número de categorías que resultan en una trama casi continua. Pese a que este tipo de visualización no es óptimo para la transmisión de información, se ve compensando por la posibilidad de interrogar de manera directa el valor de las capas en cada localización. Los datos para cada una de las variables se presentan por separado, manteniendo el código de colores (azul y naranja para precipitación y temperatura, respectivamente) así como la convención que se ha adoptado en el texto de indicar niveles o incrementos más altos mediante tonos más intensos.

Soto de los Infantes



Taramundi (Lórido)

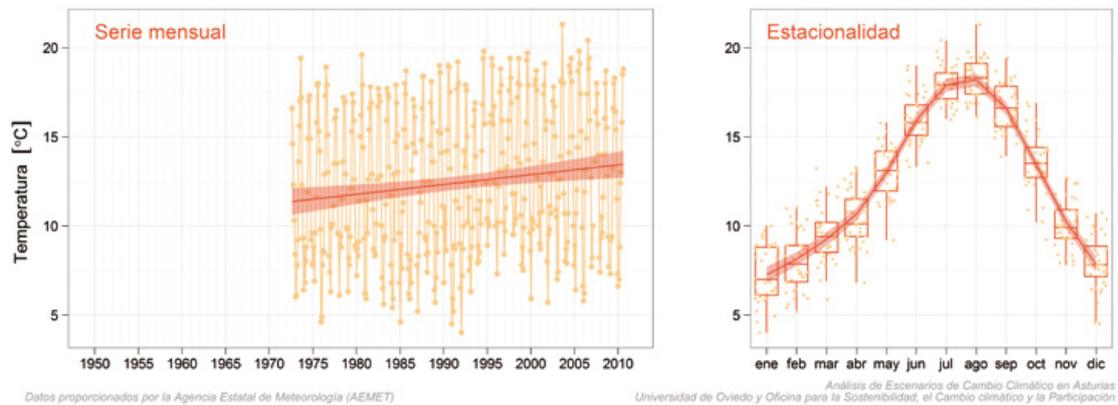


figura 30: Series de precipitación mensual acumulada (panel superior) y temperatura media mensual (panel inferior) para la estaciones 1274 (Soto de los Infantes) y 1340A (Taramundi). Los gráficos se incluyen como ejemplo del tipo de presentación diseñada para el geoportal en el que uno de los mapas permite al usuario seleccionar cada una de las estaciones de la red AEMET en el Principado de Asturias. Ante un doble clic, gráficos similares a los que se presentan aquí aparecen en una ventana emergente.

4.3. Consideraciones finales

Los datos de precipitación y temperatura disponibles gracias a la red de observación meteorológica de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) proporcionan una buena cobertura en el Principado de Asturias, especialmente desde el año 1970. No obstante, en las últimas décadas ha disminuido el número de estaciones de precipitación. Además, destaca una clara deficiencia en la cobertura de la red para las zonas más elevadas y, prácticamente, no hay observaciones disponibles por encima de 1500 m. Pese a que estas áreas representan una pequeña parte de Asturias (alrededor del 4.5 % de la superficie de Asturias está por encima de 1500 m), se trata de zonas en las que se establecen fuertes gradientes, destacando el efecto Foehn que lleva asociada la lluvia orográfica que caracteriza el clima de nuestra región (Alvarez García *et al.* 2009).

La información recogida en las estaciones de la red AEMET permite estudiar las tendencias en precipitación y temperatura durante las últimas décadas, así como reconstruir mediante interpolación la variación espacial en ambas variables. El análisis directo de las series procedentes de estaciones meteorológicas permitió estimar tendencias en la evolución de precipitación y temperatura. Se encontró una ligera tendencia negativa en la precipitación anual. En invierno y primavera la precipitación disminuyó ligeramente, aunque aumentó durante el otoño. No obstante, en el caso de la precipitación las tendencias estimadas llevan asociada una gran incertidumbre y deben interpretarse con cautela. Las tendencias estimadas para la temperatura fueron más claras e indicativas de un proceso generalizado de aumento de la temperatura en el Principado. Las tendencias observadas para cada una de las estaciones del año revelaron cierta heterogeneidad en el proceso de calentamiento, con un mayor aumento de la temperatura durante primavera y verano, y una ligera disminución en otoño. Los análisis basados en la reconstrucción de la variación espacial en precipitación y temperatura confirmaron las tendencias observadas, salvo en el caso del descenso de la temperatura en otoño. Las tendencias observadas son coherentes, en general, con los resultados obtenidos por otros autores (e.g. Brunet *et al.* 2007 2009; Alvarez García *et al.* 2009; ?; González-Hidalgo *et al.* 2010ab).

Las proyecciones basadas en el aumento de la escala de los experimentos de simulación de clima bajo distintos escenarios de emisiones hacen esperar una reducción en las precipitaciones y un aumento en la temperatura media. Este resultado se mantuvo al analizar las proyecciones estacionales, aunque los cambios más importantes se espera que afecten a las precipitaciones y temperaturas durante el verano. Al analizar la variación espacial en las proyecciones, en ambas variables se esperan cambios de mayor intensidad en los extremos occidental y oriental de la cordillera. Además, la comparación entre distintos escenarios de emisión puso de manifiesto una marcada diferencia en la evolución esperada del clima según las distintas estrategias de desarrollo socioeconómico y tecnológico futuro. No obstante, las proyecciones deben valorarse siempre con gran cautela, especialmente en el caso de la precipitación, variable cuyo comportamiento irregular dificulta en gran medida cualquier intento de modelización. Es necesario destacar además que los métodos empleados resultaron en series incapaces de reproducir la variación observada en esta variable. En este mismo sentido, la confianza es mucho mayor en el caso de las proyecciones de temperatura. Los resultados obtenidos encajan en general bien con análisis realizados por otros autores (Castro & y S. Alonso 2005; Brunet *et al.* 2009; Alvarez García *et al.* 2009). No obstante, destaca la coherencia obtenida en este estudio en cuanto a la reducción de la precipitación para cada estación del año, ya que es común que algunos experimentos de simulación de clima con modelos globales y regionales resulten en proyecciones de aumento de precipitación en Asturias durante el invierno para finales de siglo (e.g. Brunet *et al.* 2009; Álvarez García *et al.* 2009). Esto evidencia la necesidad de mejorar los métodos para la modelización de la precipitación, a fin de mejorar las proyecciones sobre la futura evolución de esta variable. Otras opciones a valorar incluirían el análisis de los escenarios empleando una mayor resolución temporal, lo que permitiría a la vez incorporar estudios sobre la evolución esperada de fenómenos extremos.

A

**Recopilación de datos y
métodos empleados**

En esta sección se proporcionan una explicación detallada sobre algunos de los materiales y métodos empleados en la elaboración de este informe, complementaria a las descripciones que se presentan en el texto principal. Al contrario que el resto del documento, esta sección posee un carácter más técnico, ya que está dirigida principalmente a aquellos lectores interesados en aspectos concretos de la metodología empleada o en la replicación de los resultados obtenidos.

A.1. Paquetes informáticos empleados para el análisis y visualización de datos

Todos los análisis se han realizado empleando el paquete estadístico *R* (R Development Core Team 2010). Además de las librerías incluidas en la distribución básica del programa, se han utilizado reiteradamente las siguientes librerías (listadas en orden alfabético): *abind* (Plate & Heiberger 2004), *ape* (Paradis *et al.* 2004), *arm* (Gelman *et al.* 2010), *car* (Fox & Weisberg 2010), *coda* (Plummer *et al.* 2010), *corpcor* (Schaefer *et al.* 2010), *fields* (Furrer *et al.* 2010), *foreign* (core members *et al.* 2010), *ggplot2* (Wickham 2009), *gridExtra* (Auguie 2010), *lattice* (Sarkar 2008), *lme4* (Bates & Maechler 2010a), *MASS* y *nnet* (Venables & Ripley 2002), *Matrix* (Bates & Maechler 2010b), *MCMCglmm* (Hadfield 2010), *mgcv* (Wood 2006 2008), *ncdf* (Pierce 2010), *plyr* (Wickham 2010), *proto* (Kates & Petzoldt 2007), *R2WinBUGS* (Sturtz *et al.* 2005), *RColorBrewer* (Neuwirth 2007), *reshape* (Wickham 2007), *RNetCDF* (Michna 2010), *spam* (Furrer & Sain 2010), *survival* (Therneau & Lumley 2009), y *tensorA* (van den Boogaart 2010). Todos los gráficos y mapas se han preparado empleando la librería *ggplot2* (Wickham 2009) y, en el caso de los mapas, esquemas de color disponibles a través de la librería *RColorBrewer* (Neuwirth 2007) diseñados para optimizar la transmisión de información (Brewer 2005, véase también colorbrewer2.org).

A.2. Estaciones meteorológicas de la red AEMET

La tabla A1 proporciona un listado de las estaciones de la red nacional de observación meteorológica de la Agencia Estatal de Meteorología del Gobierno de España (AEMET) localizadas en el Principado de Asturias, así como un resumen de sus principales características, especialmente de aquellas consideradas a la hora de incluirlas o no en los diferentes análisis realizados.

tabla A1: Estaciones de la red nacional de observación meteorológica de la Agencia Estatal de Meteorología del Gobierno de España (AEMET) en el Principado de Asturias empleadas en este estudio.

Estación meteorológica			Datos de Precipitación acumulada						Datos de Temperatura atmosférica							
Código	Longitud	Latitud	Localidad	Altura(m)	Inicio	Final	Tipo	N _M	N _A	N _{Ac}	Inicio	Final	Tipo	N _M	N _A	N _{Ac}
1177	-4.6080	43.3167	Puente Lles (Peñamellera Baja)	70	15/09/1971	15/11/1998	m	306	28	14	-	-	-	-	-	-
1178P	-4.8200	43.2347	Albergue de Bulnes	660	15/12/1988	15/04/1994	m	51	7	1	15/03/1989	15/04/1994	m	41	6	0
1178Q	-4.7460	43.2353	Sotres	1043	15/06/2005	15/08/2010	m	63	6	4	-	-	-	-	-	-
1179	-4.8460	43.3153	Carreña (C.G.C.)	90	15/08/1971	15/12/1996	m	289	26	18	-	-	-	-	-	-
1179B	-4.8490	43.3108	Carreña de Cabrales	458	15/05/2010	15/08/2010	m	4	1	0	15/08/2009	-	m	9	2	0
1180	-4.7090	43.3181	Trescares	100	15/01/1971	15/12/1998	m	324	28	20	-	-	-	-	-	-
1180E	-4.6910	43.3306	Besnes	120	15/01/1971	15/02/1974	m	35	4	1	-	-	-	-	-	-
1180U	-4.8090	43.3025	Arenas de Cabrales	120	15/09/1995	15/06/2009	m	137	15	7	15/09/1995	15/06/2009	m	136	15	5
1181E	-4.5340	43.3367	Buelles	38	15/01/2009	15/08/2010	m	20	2	1	-	-	-	-	-	-
1182	-4.5410	43.3722	Colombres	110	15/01/1951	15/10/1979	m	278	25	18	15/10/1973	15/04/1979	m	43	7	1
1182E	-4.6660	43.3958	Vidiago	60	15/01/1971	15/08/2010	m	458	40	28	-	-	-	-	-	-
1183G	-4.8900	43.4097	Rales de Llanes	23	15/03/1987	15/08/2010	m	278	24	20	-	-	-	-	-	-
1183I	-4.9380	43.4389	Nueva	50	15/01/1971	15/11/1994	m	78	10	1	15/02/1988	15/10/1992	m	39	5	0
1183X	-4.7490	43.4194	Llanes	12	15/04/1997	15/08/2010	a	128	14	4	15/04/1997	15/08/2010	a	130	14	6
1186I	-5.1080	43.2500	Camporriandi (Amieva)	180	15/01/1971	15/08/2010	m	463	40	32	15/04/1994	15/08/2010	m	187	17	10
1186P	-5.1180	43.2678	Panizales (Amieva)	360	15/06/2008	15/08/2010	m	27	3	1	15/06/2008	15/08/2010	m	27	3	1
1191A	-5.0340	43.2167	Valle de Angón	705	15/11/1993	15/03/1997	m	41	5	3	15/02/1994	15/03/1997	m	38	4	2
1191E	-4.9850	43.2361	Vega Redonda	1480	15/11/1988	15/11/1988	m	1	1	0	-	-	-	-	-	-
1192I	-4.9670	43.3347	Benia	210	15/01/1971	15/08/2010	m	457	40	30	-	-	-	-	-	-
1193	-5.0160	43.3278	Llano-Con	200	15/01/1951	15/06/1983	m	313	28	24	-	-	-	-	-	-
1193C	-5.0550	43.3083	Covadonga, Cangas de Onís (C.G.C.)	257	15/06/1971	15/11/1998	m	324	28	23	-	-	-	-	-	-
1193E	5.1090	43.3208	Seguero	600	15/01/1970	15/06/1975	m	64	6	3	-	-	-	-	-	-
1194	-5.1270	43.3500	Cangas de Onís	80	15/12/1951	15/03/1994	m	505	44	39	15/07/1953	15/03/1994	m	482	42	34
1195I	-5.5330	43.3111	Melendreros	600	15/01/1972	15/04/1972	m	4	1	0	-	-	-	-	-	-
1196A	-5.5080	43.3583	Nava de Nava (C.G.C.)	245	15/06/1971	15/06/1994	m	245	24	17	-	-	-	-	-	-
1196E	-5.5080	43.3833	Viobes	350	15/01/1971	15/08/2010	m	467	40	34	-	-	-	-	-	-
1197	-5.4710	43.3778	Pruneda	280	15/07/1954	15/01/1982	m	327	29	23	-	-	-	-	-	-
1198	-5.4740	43.3611	Trelles	263	15/02/1976	15/01/1982	m	2	2	0	-	-	-	-	-	-
1199	-5.4130	43.3667	Coya	250	15/01/1957	15/07/1979	m	271	23	22	15/10/1957	15/07/1979	m	261	23	20

Continúa en la siguiente página

Abreviaturas y otras convenciones: m y a estación de medida manual o automática, respectivamente; N_M es el número de meses con observaciones válidas; N_A es el número de años con al menos una observación y N_{Ac} es el número de años con observaciones todos los meses. En la columna Localidad, C.G.C. se refiere a Cuartel de la Guardia Civil.

tabla A1: Estaciones de la red nacional de observación meteorológica de la Agencia Estatal de Meteorología del Gobierno de España (AEMET) en el Principado de Asturias empleadas en este estudio.

Estación meteorológica				Datos de Precipitación acumulada					Datos de Temperatura atmosférica							
Código	Longitud	Latitud	Localidad	Altura(m)	Inicio	Final	Tipo	N _m	N _a	N _{ac}	Inicio	Final	Tipo	N _m	N _a	N _{ac}
1199A	-5.4130	43.3694	Coya (P.F.E.)	250	15/01/1971	15/09/1999	m	331	29	19	-	-	-	-	-	-
1199B	-5.3960	43.3778	Bargaedo	270	15/08/1979	15/08/2010	m	368	32	26	15/01/1980	15/08/2010	m	359	31	23
1199X	-5.3980	43.3775	Bargaedo de Piloña	270	15/06/2008	15/08/2010	a	15	3	0	15/06/2008	15/08/2010	a	27	3	1
1200	-5.3630	43.3472	Infiesto	160	15/01/1951	15/12/1978	m	310	28	20	-	-	-	-	-	-
1200E	-5.3600	43.3528	Biedes de Piloña	230	15/01/1970	15/11/1995	m	261	2613	-	-	-	-	-	-	-
1200I	-5.2960	43.3667	Las Hueugas (Infiesto)	100	15/01/1980	15/04/1996	m	172	17	10	15/09/1968	15/04/1996	m	310	29	17
1200J	-5.3050	43.3611	Villamayor de Piloña (C.G.C.)	115	15/05/1971	15/05/1994	m	99	11	6	-	-	-	-	-	-
1200K	-5.2990	43.3733	Vega de Agüín	130	15/06/2004	15/08/2010	m	73	7	4	15/06/2004	15/08/2010	m	73	7	4
	-5.2530	43.3583	Sevares (Nestlé)	80	15/01/1974	15/08/1987	m	159	14	11	-	-	-	-	-	-
1201	-5.1690	43.3528	San Martín de Bada	280	15/01/1967	15/07/2010	m	516	44	37	-	-	-	-	-	-
1201E	-5.1870	43.3833	Arriendas	40	15/01/1971	15/03/1976	m	62	6	4	-	-	-	-	-	-
1202	-5.1440	43.4028	Fuentes de Parrés	40	15/01/1971	15/08/1996	m	249	26	13	-	-	-	-	-	-
1202E	-5.0830	43.4722	Faro (Ribadesella)	117	15/03/1968	15/12/1994	m	287	25	23	15/04/1968	15/12/1991	m	285	24	23
1202F	-5.1300	43.4681	Barredo (Torre)	40	15/10/1991	5/08/2010	m	227	20	18	-	-	-	-	-	-
1202G	-5.2090	43.4633	Caravia (Mima Norberto)	40	15/03/1986	15/08/1986	m	6	1	0	-	-	-	-	-	-
1202I	-5.1600	43.4417	Alea	130	15/01/1971	15/07/1991	m	239	21	17	-	-	-	-	-	-
1203D	-5.2460	43.4942	Collunga	35	15/08/2001	15/08/2010	m	98	10	3	15/08/2007	15/08/2010	m	36	4	2
1204	-5.2940	43.5194	Luces	140	15/01/1967	15/10/2003	m	264	28	13	15/01/1967	15/10/2003	m	270	28	15
1206	-5.4410	43.4806	Villaviciosa	10	15/04/1967	15/12/1996	m	355	30	27	15/04/1967	15/01/1997	m	356	31	27
1206A	-5.4380	43.4778	Villaviciosa (Nestlé)	20	15/01/1968	15/12/1998	m	361	31	26	15/01/1974	15/05/1999	m	303	26	23
1207	-5.5300	43.5111	Arroes	140	15/02/1967	15/04/1989	m	253	23	17	15/01/1967	15/04/1989	m	250	23	18
1207B	-5.5350	43.5403	Santa Ana de Villaviciosa	140	15/01/1979	15/10/1999	m	221	21	12	-	-	-	-	-	-
1207E	-5.5530	43.4583	Candanal de Villaviciosa	160	15/01/1971	15/08/2010	m	459	40	32	-	-	-	-	-	-
1207O	-5.6480	43.4819	Aroles	80	15/07/1974	15/03/1978	m	45	5	3	-	-	-	-	-	-
1207U	-5.6330	43.5306	Gijón (Cabueñes)	10	15/03/1975	5/01/1995	m	216	21	10	15/03/1975	15/12/1994	m	206	20	6
1208	-5.6420	43.5383	Gijón	3	15/06/1976	15/02/2001	m	297	26	24	15/06/1976	15/02/2001	m	297	26	24
1208E	-5.7190	43.4889	Pinzales de Gijón	45	15/08/1971	15/06/2007	m	423	37	29	-	-	-	-	-	-
1208F	-5.7330	43.5278	Gijón (Uninsa-Auxini)	20	15/01/1972	15/04/1972	m	4	1	0	15/01/1972	15/05/1972	m	5	1	0
1208G	-5.7330	43.5278	Gijón (Uninsa Krupp)	20	15/01/1972	15/07/1972	m	5	1	0	-	-	-	-	-	-

Continúa en la siguiente página

Abreviaturas y otras convenciones: m y a estación de medida manual o automática, respectivamente; N_m es el número de meses con observaciones válidas; N_a es el número de años con al menos una observación y N_{ac} es el número de años con observaciones todos los meses. En la columna Localidad, C.G.C. se refiere a Cuartel de la Guardia Civil.

tabla A1: Estaciones de la red nacional de observación meteorológica de la Agencia Estatal de Meteorología del Gobierno de España (AEMET) en el Principado de Asturias empleadas en este estudio.

Estación meteorológica				Datos de Precipitación acumulada					Datos de Temperatura atmosférica							
Código	Longitud	Latitud	Localidad	Altura(m)	Inicio	Final	Tipo	N _M	N _A	N _{Ac}	Inicio	Final	Tipo	N _M	N _A	N _{Ac}
1208H	-5.6990	43.5608	Gijón (Musei)	5	15/03/2001	15/08/2010	m	114	10	8	15/03/2001	15/08/2010	m	114	10	8
1208I	-5.7210	43.5667	Aboño (C.G.C.)	70	15/08/1971	15/10/1995	m	254	25	10	-	-	-	-	-	-
1208U	-5.7410	43.5597	Caicorrída	70	15/01/1978	15/10/1996	m	191	19	9	5/01/1978	15/10/1996	m	193	19	12
1209L	-5.8140	43.4956	Valle de La Zoreda	170	15/05/1994	15/07/2010	m	188	17	10	15/05/1994	15/07/2010	m	178	17	7
1209R	-5.8520	43.5319	Tamón-Nubledo	90	15/01/1994	15/04/2004	m	106	11	4	15/02/1994	15/04/2004	m	112	11	3
1210C	-5.8700	43.5139	Cancienes (C.G.C.)	59	15/08/1971	15/12/1995	m	265	25	14	-	-	-	-	-	-
1210D	-5.9050	43.5403	Villalegre de Avilés (C.G.C.)	40	15/08/1971	15/02/1988	m	193	18	14	-	-	-	-	-	-
1210E	-5.9240	43.5528	Granja La Luz (Avilés)	20	15/01/1970	15/01/1971	m	12	2	0	-	-	-	-	-	-
1210H	-5.9080	43.5478	Bustiello de Avilés	45	15/05/1987	15/11/1996	m	68	10	0	-	-	-	-	-	-
1210I	-5.9140	43.5500	Divina Pastora (Avilés)	10	15/01/1983	15/04/2006	m	268	24	17	15/01/1983	15/04/2006	m	259	24	13
1210X	-5.8490	43.6556	Cabo Peñas	100	15/06/1997	15/08/2010	a	128	13	61	5/06/1997	15/08/2010	a	130	13	7
1210Y	-5.9140	43.5500	Divina Pastora (Avilés)	10	15/04/1997	15/05/2006	a	93	10	1	15/04/1997	15/05/2006	a	102	10	5
1212	-5.9800	43.5778	Arnao	26	15/10/1955	15/01/1975	m	232	21	19	15/01/1956	15/01/1975	m	225	20	16
1212E	-6.0330	43.5647	Aeropuerto de Asturias (Ranón)	127	15/08/1968	15/08/2010	m	501	43	40	15/08/1968	15/08/2010	m	501	43	40
1213D	-6.0790	43.5250	Soto del Barco-La Isla	8	15/06/2003	15/07/2010	m	86	8	6	15/06/2003	15/07/2010	m	85	8	5
1214	-5.2270	43.1111	Tarna de Caso	1000	15/01/1970	15/01/1979	m	109	10	9	-	-	-	-	-	-
1214E	-5.2910	43.1500	Bezanes	654	15/09/1969	15/10/1996	m	320	28	21	15/09/1969	15/10/1996	m	321	28	24
1214I	-5.4100	43.1556	Caleao	717	15/01/1970	15/12/1996	m	318	27	25	-	-	-	-	-	-
1214O	-5.3770	43.1528	La Felguerina	817	15/01/1970	15/11/1980	m	131	11	10	-	-	-	-	-	-
1214U	-5.3380	43.1819	Campo de Caso	577	15/01/1970	15/08/2010	m	478	41	33	15/01/1994	15/08/2010	m	196	17	12
1214V	-5.3460	43.1833	Campo de Caso (C.G.C.)	577	15/06/1971	15/04/1991	m	215	21	9-	-	-	-	-	-	-
1215	-5.3380	43.2111	Nieves	760	15/01/1951	15/07/1967	m	195	17	12	-	-	-	-	-	-
1216	-5.4550	43.2222	Rioseco de Sobrescobio	390	15/09/1969	15/08/2010	m	490	42	39	15/09/1969	15/06/2007	m	449	39	34
1216D	-5.4830	43.2319	Rioseco-Depuradora	260	15/05/1993	15/08/2010	m	204	18	13	15/05/1993	15/08/2010	m	203	18	13
1218	-5.5630	43.2458	Pola de Laviana (C.G.C.)	295	15/06/1971	15/12/2008	m	416	38	22	-	-	-	-	-	-
1218D	-5.5280	43.2356	Muñera	318	15/08/2001	15/06/2010	m	106	10	7	15/11/2001	15/06/2010	m	97	10	5
1218V	-5.5880	43.2778	Blimea (El Parque)	260	5/05/1987	15/05/1998	m	129	12	7	15/04/1987	15/05/1998	m	124	12	6
1219I	-5.6840	43.2944	Sarna de Langreo (C.G.C.)	214	15/09/1971	15/03/2004	m	344	34	13	-	-	-	-	-	-
1219U	-5.6690	43.3250	La Nava de Langreo	350	15/05/1979	15/01/1988	m	102	10	8	15/01/1980	15/01/1988	m	97	9	8

Continúa en la siguiente página

Abreviaturas y otras convenciones: m y a estación de medida manual o automática, respectivamente; N_M es el número de meses con observaciones válidas; N_A es el número de años con al menos una observación y N_{Ac} es el número de años con observaciones todos los meses. En la columna Localidad, C.G.C. se refiere a Cuartel de la Guardia Civil.

tabla A1: Estaciones de la red nacional de observación meteorológica de la Agencia Estatal de Meteorología del Gobierno de España (AEMET) en el Principado de Asturias empleadas en este estudio.

Estación meteorológica				Datos de Precipitación acumulada					Datos de Temperatura atmosférica							
Código	Longitud	Latitud	Localidad	Altura(m)	Inicio	Final	Tipo	N _M	N _A	N _{Ac}	Inicio	Final	Tipo	N _M	N _A	N _{Ac}
1220	-5.7080	43.3028	Lada(Grupo Escolar)	210	15/01/1951	15/06/1965	m	160	15	7	15/01/1983	15/05/1983	m	4	1	0
1220A	-5.7080	43.3028	Lada(QCF)	200	15/05/1957	15/08/1972	m	180	16	11	15/01/1958	15/08/1972	m	147	13	8
12200	-5.8330	42.9778	Boca Norte túnel del Negrón (Lena)	1162	15/02/1982	15/05/1983	m	15	2	0	15/03/1982	15/05/1983	m	14	2	0
1221A	-5.7730	43.0167	Pajares(C.G.C.)	1000	15/06/1971	15/08/2010	m	438	40	23	-	-	-	-	-	-
1221D	-5.7750	42.9797	Pajares (Valgrande)	1480	15/03/1997	15/08/2010	m	126	14	2	15/03/1997	15/08/2010	m	131	14	4
1221E	-5.7920	43.0181	El Nocedo de Lena	900	15/06/1976	15/05/1996	m	156	20	5	-	-	-	-	-	-
1222	-5.7710	43.1083	Linares de Lena	920	15/01/1978	15/01/1978	m	1	1	0	-	-	-	-	-	-
12220	-5.8190	43.0111	Boca Norte túnel de Pando (Lena)	1040	15/01/1979	15/11/1982	m	37	4	1	15/04/1982	15/05/1982	m	2	1	0
1222U	-5.8300	43.0861	Sotiello de Lena	420	15/01/1978	15/05/1983	m	55	6	0	15/06/1978	15/05/1983	m	4	2	0
1223	-5.8190	43.1042	Campomanes (C.G.C.)	380	15/06/1971	15/02/1996	m	254	25	13	-	-	-	-	-	-
1223E	-5.8310	43.0639	Espinedo	540	15/10/1997	15/02/1999	m	17	3	1	15/11/1997	15/02/1999	m	16	3	1
1223F	-5.8380	43.0633	Jomezana de Arriba	683	15/06/2004	15/02/2005	m	9	2	0	15/06/2004	15/02/2005	m	9	2	0
12230	-5.8160	43.1278	Vega del Rey de Lena	340	15/04/1971	15/06/1974	m	22	4	0	-	-	-	-	-	-
1223P	-5.8210	43.1344	Ronzón	370	15/07/2009	15/08/2010	m	14	2	0	15/07/2009	15/08/2010	m	14	2	0
1223U	-5.8800	43.1417	Tablado de Lena	640	15/01/1978	15/12/2007	m	326	30	15	15/01/1978	15/12/2005	m	298	27	16
1224	-5.8300	43.1583	Pola de Lena	317	15/01/1951	15/01/1978	m	318	28	22	-	-	-	-	-	-
1225	-5.5740	43.0722	La Paraya (C.E.)	640	15/08/1973	15/05/2003	m	338	31	22	-	-	-	-	-	-
1226	-5.4760	43.0947	Cuevas de Felechosa	750	15/02/1994	15/08/2010	m	189	17	10	15/02/1994	15/08/2010	m	189	17	12
1226X	-5.4760	43.0947	Cuevas de Felechosa	750	15/06/2008	15/08/2010	a	27	3	1	15/06/2008	15/08/2010	a	27	3	1
1227	-5.5640	43.1236	Collanzo de Aller (C.G.C.)	530	15/06/1971	15/01/1988	m	193	18	13	-	-	-	-	-	-
1227E	-5.6330	43.1667	Serrapio	460	15/03/1972	15/06/1973	m	14	2	0	-	-	-	-	-	-
1227I	-5.6380	43.1361	Coto Bello (Aller)	1300	15/06/1984	15/02/1992	m	84	9	2	-	-	-	-	-	-
1229	-5.7410	43.1667	Moreda	300	15/02/1970	15/06/1989	m	225	20	14	15/04/1970	15/06/1989	m	224	20	14
1229U	-5.7710	43.1889	Santa Cruz de Mieres C.I.	280	15/01/1974	15/08/2010	m	427	37	32	15/06/1994	15/08/2010	m	162	17	11
1229X	-5.7710	43.1889	Santa Cruz de Mieres C.I.	280	15/05/2003	15/05/2008	a	61	6	4	15/05/2003	15/05/2008	a	60	6	3
1231	-5.7130	43.2139	San Andrés de Mieres	340	15/01/1972	15/12/1976	m	60	5	5	15/01/1972	15/12/1976	m	60	5	5
1232	-5.7770	43.2444	Mieres	220	15/10/1972	15/02/1978	m	48	7	0	15/11/1972	15/02/1978	m	49	7	0
1233	-5.7740	43.2583	Mieres (Morgao)	290	15/11/1972	15/03/1999	m	309	28	21	-	-	-	-	-	-
12340	-5.8100	43.2861	El Padrún de Mieres	380	15/05/1973	15/06/1981	m	98	9	7	-	-	-	-	-	-

Continúa en la siguiente página

Abreviaturas y otras convenciones: m y a estación de medida manual o automática, respectivamente; N_M es el número de meses con observaciones válidas; N_A es el número de años con al menos una observación y N_{Ac} es el número de años con observaciones todos los meses. En la columna Localidad, C.G.C. se refiere a Cuartel de la Guardia Civil.

tabla A1: Estaciones de la red nacional de observación meteorológica de la Agencia Estatal de Meteorología del Gobierno de España (AEMET) en el Principado de Asturias empleadas en este estudio.

Estación meteorológica				Datos de Precipitación acumulada				Datos de Temperatura atmosférica								
Código	Longitud	Latitud	Localidad	Altura(m)	Inicio	Final	Tipo	N _M	N _A	N _{Ac}	Inicio	Final	Tipo	N _M	N _A	N _{Ac}
1234P	-5.8190	43.2747	Mieres (Baña)	172	15/11/1976	15/08/2010	m	254	24	17	15/07/2008	15/08/2010	m	18	3	0
1234R	-5.8770	43.2819	Parteayer	146	15/05/1987	15/11/1995	m	98	9	4	-	-	-	-	-	-
1235	-5.8740	43.3111	Soto de Ribera	127	15/01/1961	15/07/2010	m	591	50	46	15/08/1960	15/07/2010	m	588	51	40
1235U	-5.8800	43.3375	Latores	254	15/01/1979	15/01/1981	m	14	3	0	-	-	-	-	-	-
1235X	-5.8740	43.3111	Soto de Ribera	127	15/05/2003	15/06/2007	a	50	5	3	15/05/2003	15/06/2007	a	49	5	2
1236E	-5.9770	43.1139	Ricabo de Quirós	680	15/01/1970	15/12/1979	m	119	10	9	-	-	-	-	-	-
1236I	-5.9240	43.1556	Llanuces	860	15/01/1970	15/12/1973	m	47	4	3	15/01/1970	15/12/1973	m	48	4	4
1236O	-5.9710	43.1569	Barzana de Quirós (C.G.C.)	466	15/08/1971	15/09/1990	m	213	20	13	-	-	-	-	-	-
1237	-6.0020	43.1972	Las Agüeras de Quirós	340	15/09/1955	15/08/1980	m	283	25	20	-	-	-	-	-	-
1237I	-6.0440	43.1000	Paramo	820	15/01/1970	15/01/1972	m	23	3	1	15/10/1971	15/01/1972	m	4	2	0
1237O	-5.9740	43.1500	Villanueva de Teverga	660	15/01/1970	15/12/1970	m	12	1	1	15/01/1970	15/12/1970	m	12	1	1
1238	-6.0850	43.1444	Riello de Teverga	490	15/05/1955	15/01/1962	m	77	8	3	-	-	-	-	-	-
1239	-6.0960	43.1722	Entrago	460	15/01/1967	15/03/1989	m	259	23	19	-	-	-	-	-	-
1239B	-6.0850	43.1708	Entrago-La Recusa	810	15/04/1989	15/08/2010	m	238	22	14	-	-	-	-	-	-
1239I	-6.0210	43.2500	Proaza	195	15/09/1969	15/05/2010	m	481	42	34	15/09/1969	15/05/2010	m	477	42	32
1241I	-5.5490	43.4167	La Cuesta de Sarriego	350	15/12/1975	15/12/1995	m	228	21	17	15/12/1975	15/12/1995	m	238	21	19
1242	-5.5710	43.3806	Lieres	280	15/08/1953	15/03/1975	m	233	23	11	-	-	-	-	-	-
1242E	-5.5930	43.4261	La Rimada	465	15/07/2006	15/08/2010	m	50	5	3	-	-	-	-	-	-
1243C	-5.6230	43.4189	Ordiales	340	15/05/2001	15/08/2010	m	111	10	7	15/05/2001	15/08/2010	m	108	10	4
1244	-5.7190	43.3667	La Vallina de Siero	250	15/01/1967	15/03/1976	m	54	6	2	15/01/1967	15/07/1971	m	53	5	2
1245	-5.7380	43.3889	Arguilles de Siero	220	15/08/1966	15/06/2002	m	412	37	27	-	-	-	-	-	-
1245E	-5.7330	43.3806	Meres de Siero	180	15/10/1972	15/09/1996	m	276	25	15	15/10/1972	15/09/1996	m	278	25	17
1246A	-5.8550	43.3653	Oviedo (Escuela de Minas)	245	15/09/1975	15/08/1985	m	104	11	6	15/01/1977	15/07/1984	m	2	3	0
1247B	-5.8200	43.3972	Oviedo (I.N.C.)	160	15/10/1975	15/08/1999	m	270	25	15	15/10/1975	15/07/1999	m	248	25	14
1247I	-5.6020	43.4306	El Pevidal de Siero	450	15/01/1970	15/12/2005	m	429	36	34	-	-	-	-	-	-
1248O	-5.7880	43.4333	Pruvia	200	15/01/1975	15/11/1993	m	173	19	10	15/03/1975	15/12/1993	m	178	19	7
1249E	-5.8520	43.4403	Posada de Llanera (C.G.C.)	170	15/08/1971	15/12/1978	m	59	7	1	-	-	-	-	-	-
1249I	-5.8730	43.3536	Oviedo (El Cristo)	336	15/01/1972	15/08/2010	m	464	39	38	15/01/1972	15/08/2010	m	464	39	38
1249O	-5.9310	43.4611	Santa Cruz de Llanera	250	15/01/1971	15/08/1981	m	79	8	2	-	-	-	-	-	-

Continúa en la siguiente página

Abreviaturas y otras convenciones: m y a estación de medida manual o automática, respectivamente; N_M es el número de meses con observaciones válidas; N_A es el número de años con al menos una observación y N_{Ac} es el número de años con observaciones todos los meses. En la columna Localidad, C.G.C. se refiere a Cuartel de la Guardia Civil.

tabla A1: Estaciones de la red nacional de observación meteorológica de la Agencia Estatal de Meteorología del Gobierno de España (AEMET) en el Principado de Asturias empleadas en este estudio.

Estación meteorológica				Datos de Precipitación acumulada				Datos de Temperatura atmosférica								
Código	Longitud	Latitud	Localidad	Altura(m)	Inicio	Final	Tipo	N _M	N _A	N _{Kc}	Inicio	Final	Tipo	N _M	N _A	N _{Kc}
1250	-5.9710	43.4139	Samntullano de Las Regueras	180	15/12/1950	15/04/2001	m	539	50	35	-	-	-	-	-	-
1250E	-5.9940	43.3931	Valduno	145	15/07/1994	15/10/1997	m	31	4	1	-	-	-	-	-	-
1250L	-6.0710	43.3611	Grado (Nestlé)	80	15/01/1972	15/03/1993	m	244	22	16	-	-	-	-	-	-
12500	-6.1100	43.4056	Los Llanos de Cabruñana	400	15/01/1970	15/12/1994	m	293	25	21	-	-	-	-	-	-
1251I	-6.0550	43.4111	Cuero	140	15/01/1971	15/11/1996	m	303	26	20	-	-	-	-	-	-
12510	-6.0090	43.4708	Veritosa de Candamo	380	15/01/1971	15/11/1971	m	11	1	0	-	-	-	-	-	-
1252	-6.0680	43.4522	San Román de Candamo	85	15/10/1967	15/08/2010	m	487	44	37	15/10/1967	15/08/2010	m	479	43	37
1253	-6.5380	42.9792	Monasterio de Hermo	1030	15/01/1967	15/02/1985	m	205	19	13	-	-	-	-	-	-
1255	-6.6830	43.0333	Muniellos (Cangas del Narcea)	670	15/01/1967	15/08/2010	m	261	24	16	15/01/1961	15/08/2010	m	322	30	19
1255E	-6.6410	43.0458	Moal	610	15/01/1972	15/11/2008	m	434	37	29	15/04/1973	15/11/2008	m	412	36	26
1258I	-6.4190	42.9961	Puerto de Leitanegos (Pueblo)	1520	15/01/1972	15/12/1984	m	156	13	13	15/01/1972	15/12/1984	m	1	11	0
1259	-6.3960	43.0639	Genestoso	1180	15/01/1961	15/07/2010	m	595	50	49	15/07/1998	15/07/2010	m	145	13	11
1259I	-6.5270	43.1278	Las Mestas de Narcea	450	15/01/1970	15/12/1994	m	238	23	16	15/01/1970	15/12/1994	m	225	24	5
1260	-6.5550	43.1861	Santa Marina de Oblanca	450	15/01/1967	15/01/1997	m	350	31	24	-	-	-	-	-	-
1260A	-6.5520	43.1764	Cangas del Narcea	376	15/06/1971	15/05/2010	m	440	40	20	-	-	-	-	-	-
1263	-6.4550	43.2222	Onón	400	15/01/1967	15/12/1994	m	286	28	18	-	-	-	-	-	-
1265	-6.6330	43.1889	Besullo de Cangas de Narcea	530	15/02/1961	15/08/2010	m	584	50	41	-	-	-	-	-	-
1266	-6.6100	43.2703	Pola de Allande	580	15/01/1967	15/09/2003	m	386	35	25	-	-	-	-	-	-
1266C	-6.5990	43.2581	Cereceda	635	15/07/2006	15/08/2010	m	47	5	2	-	-	-	-	-	-
1266E	-6.5350	43.2681	San Félix de Tineo	600	15/01/197	15/12/1996	m	238	25	11	-	-	-	-	-	-
1267	-6.4960	43.2639	Arganza	320	15/01/1961	15/06/2010	m	586	50	44	15/01/1968	15/06/2010	m	496	43	35
1267I	-6.5830	43.3222	La Mortera de Tineo	680	15/01/1971	15/01/1995	m	260	25	14	-	-	-	-	-	-
1268	-6.5270	43.2750	San Facundo de Tineo	480	15/01/1951	15/02/1979	m	334	29	25	-	-	-	-	-	-
1269	-6.3550	43.2083	Genestaza	680	15/01/1961	15/01/2003	m	503	43	41	-	-	-	-	-	-
1271A	-6.4160	43.3333	Tineo (C.G.C.)	640	15/08/1971	15/11/1994	m	243	23	13	-	-	-	-	-	-
1271B	-6.4080	43.3347	Tineo	640	15/04/1971	15/01/1995	m	275	25	15	15/04/1971	15/02/1980	m	106	10	7
1271E	-6.4130	43.2889	La Florida de Tineo	220	15/01/1972	15/06/1995	m	278	24	21	15/01/1972	15/06/1995	m	277	24	18
1272	-6.3960	43.2917	Soto de la Barca	213	15/01/1967	15/08/2010	m	523	44	42	15/01/1970	15/08/2010	m	481	41	38
1272B	-6.3860	43.2903	Soto de la Barca	285	15/05/2008	15/08/2010	a	20	3	0	15/05/2008	15/08/2010	a	27	3	1

Continúa en la siguiente página

Abreviaturas y otras convenciones: m y a estación de medida manual o automática, respectivamente; N_M es el número de meses con observaciones válidas; N_A es el número de años con al menos una observación y N_{Kc} es el número de años con observaciones todos los meses. En la columna Localidad, C.G.C. se refiere a Cuartel de la Guardia Civil.

tabla A1: Estaciones de la red nacional de observación meteorológica de la Agencia Estatal de Meteorología del Gobierno de España (AEMET) en el Principado de Asturias empleadas en este estudio.

Estación meteorológica				Datos de Precipitación acumulada					Datos de Temperatura atmosférica							
Código	Longitud	Latitud	Localidad	Altura(m)	Inicio	Final	Tipo	N _M	N _A	N _{Ac}	Inicio	Final	Tipo	N _M	N _A	N _{Ac}
1290	-6.3960	43.4750	Muñas	210	15/01/1971	15/11/1996	m	294	26	14	-	-	-	-	-	-
1290B	-6.3000	43.4606	Aguón	927	15/02/2001	15/02/2002	m	13	2	0	15/02/2001	15/02/2002	m	13	2	0
1290E	-6.4210	43.4639	Pontigón	80	15/01/1971	15/11/1996	m	278	26	15	-	-	-	-	-	-
1291	-6.3410	43.5056	Mones de Luarca	440	15/01/1967	15/01/2001	m	367	35	24	-	-	-	-	-	-
1293	-6.5050	43.5389	Barcia de Luarca (Granja)	60	15/01/1955	15/04/1990	m	353	35	241	5/06/1954	15/05/1991	m	339	36	15
12930	-6.5100	43.5014	Sapinas	260	15/01/1971	15/07/1981	m	108	11	4	-	-	-	-	-	-
1302	-6.9130	43.0211	Santiso	900	15/01/1971	15/05/1979	m	99	9	7	-	-	-	-	-	-
1302F	-6.4710	42.9564	Degaña Coto Cortés	1305	15/05/2008	15/08/2010	a	26	3	1	15/05/2008	15/08/2010	a	27	3	1
1302G	-6.4740	42.9583	Degaña Coto Cortés	1350	15/03/1976	15/04/2008	m	362	33	20	15/03/1976	15/04/2008	m	343	33	16
1302I	-6.4880	42.9481	Cerreño	1060	15/01/1974	15/12/1991	m	214	18	16	-	-	-	-	-	-
1303	-6.5690	42.9417	Degaña	860	15/08/1969	15/12/1991	m	188	19	9	-	-	-	-	-	-
1303A	-6.5710	42.9403	Degaña (C.G.C.)	859	15/06/1971	15/09/1999	m	315	29	18	-	-	-	-	-	-
1303E	-6.6310	42.9861	Larón	830	15/01/1970	15/12/1981	m	144	12	12	15/01/1970	15/12/1981	m	143	12	11
1303I	-6.6490	42.9583	Tablado de Degaña	950	15/10/1974	15/01/1987	m	139	14	6	-	-	-	-	-	-
1303X	-6.7630	42.9222	Luiña (Tornado)	700	15/01/1974	15/12/1990	m	182	17	3	-	-	-	-	-	-
1305	-6.7770	42.9875	Alguerdo	562	15/01/1971	15/09/2000	m	348	30	23	-	-	-	-	-	-
1309	-6.8740	43.0389	San Antolín de Ibias	308	15/01/1967	15/08/2010	m	508	44	36	15/10/1967	15/08/2010	m	474	44	27
1309C	-6.8850	43.0272	Linares (San Antolín de Ibias)	738	15/05/2008	15/08/2010	m	28	3	1	15/05/2008	15/08/2010	m	26	3	1
1311	-6.7330	43.2528	Lago de Allande	880	15/01/1970	15/08/1973	m	43	4	2	15/02/1970	15/08/1973	m	41	4	1
1311E	-6.7660	43.2333	Berduedo	910	15/01/1971	15/06/2010	m	464	40	32	-	-	-	-	-	-
1311I	-6.7620	43.2014	Salcedo de Allande	680	15/01/1971	15/08/2010	m	472	40	36	-	-	-	-	-	-
1314	-6.8770	43.2189	Grandas de Salime	640	15/01/1983	15/06/2007	m	254	24	15	15/01/1982	15/06/2007	m	258	25	13
1314A	-6.8780	43.2250	Los Valles-Grandas de Salime	670	15/01/1967	15/02/1991	m	287	25	22	-	-	-	-	-	-
1314B	-6.8470	43.2367	Embalse de Grandas de Salime	110	15/01/1991	15/08/2010	m	235	20	18	-	-	-	-	-	-
1314E	-6.8630	43.2500	Sanzo	590	15/01/1971	15/08/2010	m	456	40	31	-	-	-	-	-	-
1315	-6.7240	43.2958	Santa Coloma	760	15/01/1971	15/07/2010	m	455	40	29	-	-	-	-	-	-
1317	-7.0190	43.2583	Santa Eulalia de Oscos	510	15/01/1971	15/02/1995	m	263	25	15	-	-	-	-	-	-
1320	-6.9060	43.3431	Illano-Carbayal	750	15/12/2001	15/04/2010	m	100	10	7	15/12/2001	15/04/2010	m	87	10	4
1323	-6.8770	43.2583	Pesoz de Pesoz	330	15/01/1971	15/11/1996	m	276	26	12	-	-	-	-	-	-

Continúa en la siguiente página

Abreviaturas y otras convenciones: m y a estación de medida manual o automática, respectivamente; N_M es el número de meses con observaciones válidas; N_A es el número de años con al menos una observación y N_{Ac} es el número de años con observaciones todos los meses. En la columna Localidad, C.G.C. se refiere a Cuartel de la Guardia Civil.

tabla A1: Estaciones de la red nacional de observación meteorológica de la Agencia Estatal de Meteorología del Gobierno de España (AEMET) en el Principado de Asturias empleadas en este estudio.

Estación meteorológica				Datos de Precipitación acumulada				Datos de Temperatura atmosférica								
Código	Longitud	Latitud	Localidad	Altura(m)	Inicio	Final	Tipo	N _M	N _A	N _{Kc}	Inicio	Final	Tipo	N _M	N _A	N _{Kc}
1323C	-6.8660	43.3306	Illano de Illano	355	15/01/1971	15/05/2004	m	385	34	24	-	-	-	-	-	-
1323E	-6.9080	43.3972	Brañavara	760	15/01/1970	15/08/1986	m	191	17	13	15/01/1970	15/08/1986	m	99	14	4
1323I	-6.8450	43.3611	Gio	280	15/01/1971	15/12/2002	m	373	32	24	-	-	-	-	-	-
1323O	-6.8240	43.3861	Erbalse de Doiras	35	15/06/1973	15/08/2010	m	432	38	27	-	-	-	-	-	-
1325	-6.8190	43.4292	Boal	452	15/10/1971	15/11/1984	m	5	3	0	-	-	-	-	-	-
1325A	-6.8170	43.4306	Boal (C.G.C.)	452	15/06/1971	15/03/1995	m	251	25	16	-	-	-	-	-	-
1325E	-6.7390	43.3931	Ponticiella	400	15/01/1971	15/08/2010	m	463	40	31	-	-	-	-	-	-
1327	-6.6700	43.4653	Oneta	330	15/01/1971	15/08/2010	m	469	40	33	-	-	-	-	-	-
1327A	-6.6710	43.4661	Oneta	374	15/05/2008	15/06/2010	a	23	3	0	15/05/2008	15/08/2010	a	18	3	0
1327D	-6.7240	43.4806	Embalse de Arbón	35	15/08/1973	15/08/2010	m	421	37	26	-	-	-	-	-	-
1327E	-6.7330	43.4875	Trelles	100	15/01/1971	15/10/2000	m	355	30	27	-	-	-	-	-	-
1327I	-6.6940	43.5083	Anleo	140	15/01/1971	15/06/2009	m	457	39	34	-	-	-	-	-	-
1327U	-6.7240	43.5278	Navia-Ence	15	15/08/1989	15/08/2010	m	225	22	14	15/08/1989	15/08/2010	m	222	22	13
1328	-6.7460	43.5417	Navia (Aeropuerto)	80	15/04/1975	15/04/1975	m	1	1	0	-	-	-	-	-	-
1328E	-6.8300	43.5514	La Caridad de el Franco (C.G.C.)	63	15/06/1971	15/02/2004	m	356	34	20	-	-	-	-	-	-
1328F	-6.8310	43.5575	La Caridad	55	15/08/2004	15/08/2010	m	72	7	5	-	-	-	-	-	-
1328I	-6.8550	43.5556	Valdeparres	50	15/01/1971	15/10/1978	m	90	8	5	-	-	-	-	-	-
1329E	-6.9160	43.5333	Cavillón	80	15/01/1970	15/12/1978	m	96	9	7	15/01/1970	15/12/1978	m	93	9	5
1330	-6.9440	43.5694	Tapia de Casariego	20	15/07/1954	15/09/1962	m	99	9	7	15/07/1954	15/09/1962	m	93	9	3
1330E	-7.0140	43.3875	Paramios	518	15/01/1971	15/01/1986	m	171	16	9	-	-	-	-	-	-
1330I	-6.9550	43.4500	Requejo de Castropol	300	15/01/1971	15/05/2002	m	372	32	26	-	-	-	-	-	-
1331D	-7.0200	43.5375	Figueras de Castropol	25	5/04/1997	15/08/2010	a	126	14	2	15/04/1997	15/08/2010	a	137	14	4
1331E	-7.0210	43.5389	Figueras de Castropol	20	15/08/1968	15/12/1996	m	330	29	21	-	-	-	-	-	-
1331F	-7.0160	3.5417	Lois de Castropol	30	15/01/1976	5/04/1994	m	208	19	12	15/12/1975	15/04/1994	m	207	20	10
1332E	-7.0270	43.4611	Plantón	40	15/01/1971	15/04/2008	m	435	38	27	-	-	-	-	-	-
1340	-7.1130	43.3611	Taramundi	340	15/01/1971	15/01/1978	m	83	8	5	-	-	-	-	-	-
1340A	-7.1000	43.3597	Taramundi (Lórido)	340	15/08/1972	15/08/2010	m	454	39	34	15/08/1972	15/08/2010	m	452	39	33
1341	-7.0600	43.4097	Ouria de Taramundi	300	15/01/1971	15/06/2010	m	440	40	26	-	-	-	-	-	-
1341B	-7.0610	43.4156	Ouria de Taramundi	335	15/03/2010	15/08/2010	a	6	1	0	15/05/2009	15/08/2010	a	16	2	0

Continúa en la siguiente página

Abreviaturas y otras convenciones: m y a estación de medida manual o automática, respectivamente; N_M es el número de meses con observaciones válidas; N_A es el número de años con al menos una observación y N_{Kc} es el número de años con observaciones todos los meses. En la columna Localidad, C.G.C. se refiere a Cuartel de la Guardia Civil.

tabla A1: Estaciones de la red nacional de observación meteorológica de la Agencia Estatal de Meteorología del Gobierno de España (AEMET) en el Principado de Asturias empleadas en este estudio.

Estación meteorológica				Datos de Precipitación acumulada					Datos de Temperatura atmosférica							
Código	Longitud	Latitud	Localidad	Altura(m)	Inicio	Final	Tipo	N _M	N _A	N _{Ac}	Inicio	Final	Tipo	N _M	N _A	N _{Ac}
1542	-6.4190	42.9972	Puerto de Leitariego	1525	15/01/1961	15/08/2010	m	140	17	6	15/01/1967	15/08/2010	m	115	15	2
1743	-4.9940	43.2694	Refugio Picota	1100	15/12/1988	15/11/2000	m	115	13	5	15/07/1989	15/01/2002	m	72	11	0
1743B	-4.9780	43.2742	Buferrera (Parque)	1080	15/08/1999	15/07/2010	m	113	12	1	15/08/1999	15/07/2010	m	119	12	4

Abreviaturas y otras convenciones: m y a estación de medida manual o automática, respectivamente; N_M es el número de meses con observaciones válidas; N_A es el número de años con al menos una observación y N_{Ac} es el número de años con observaciones todos los meses. En la columna Localidad, C.G.C. se refiere a Cuartel de la Guardia Civil.

A.3. Análisis de series procedentes de estaciones meteorológicas

Los datos mensuales de precipitación y temperatura recogidos por la red de observación AEMET se analizaron mediante modelos lineales mixtos (Gelman & Hill 2007). Para ello, se asumió que el nivel medio de precipitación o temperatura, Y_{ijkt} , medido por la estación meteorológica i , en la estación j , durante el mes del año k , en el instante t , se puede expresar como la siguiente combinación lineal:

$$Y_{ijkt} = \gamma_0 + \gamma_1 \text{NAO}_t + \gamma_2 \text{AMO}_t + \gamma_3 \text{DEM}_i + \gamma_4 \text{DC}_i + \alpha_{0,ik} + \alpha_{0,ij} + \alpha_{1,ijt} + \varepsilon_{ijkt}$$

$$\gamma_m \sim N(\mu_m; \delta_m); \quad m = 0, 1, \dots, 4$$

$$\alpha_{0,ik} \sim N(\alpha_{0,.k}; \delta_{\alpha_{0,.k}}), \quad k = \{\text{enero; febrero,.... diciembre}\} \quad (\text{A1})$$

$$\alpha_{m,ij} \sim N(\alpha_{m,.j}, \delta_{\alpha_{m,.j}}), \quad m = 0, 1 \quad j = \{\text{invierno; primavera; verano; otoño}\}$$

$$\varepsilon_{ijkt} \sim N(0, \delta_e)$$

Los parámetros a estimar son γ_m , que se asume siguen una distribución normal, y los parámetros $\alpha_{m,i}$ para cada estación meteorológica i , que se asume proceden de una distribución normal común para todas las estaciones. Condicionado en los efectos fijos y aleatorios, se asume que las observaciones se pueden explicar excepto por un error de observación independiente e idénticamente distribuido entre distintos momentos y estaciones, que sigue una distribución normal con media cero y desviación estándar δ_e . Los modelos se ajustaron en *R* (R Development Core Team 2010) empleando la librería *MCMCglmm* (Hadfield 2010), que ajusta este tipo de modelos mediante integración combinando cadenas de Markov con el método de Montecarlo. Para el ajuste se emplearon distribuciones previas o *a priori* poco informativas para cada uno de los parámetros. La integración se realizó empleando 13000 iteraciones del algoritmo de Gibbs (Lange *et al.* 1992), de las cuales se descartaron las 3000 primeras. Se seleccionó 1 de cada 10 iteraciones de las 10000 restantes para obtener una muestra de 1000 valores de los parámetros que se emplearon en el resto de los análisis. En el texto principal se hace referencia a alguno de los valores obtenidos tras ajustar ecuación A1 a las observaciones mensuales de precipitación y temperatura, y se proporcionan distintos resúmenes gráficos de los resultados. La tabla A2 proporciona las medias condicionales e intervalos de confianza para el resto de los parámetros.

EFFECTOS FIJOS

	Precipitación	Temperatura
γ_0	97.9 [93.2, 102.4]	13.8 [12.9, 14.8]
γ_1 (NAO)	0.786 [0.433, 1.177]	0.0062 [-0.0074, 0.0208]
γ_2 (AMO)	-16.4 [-19.8, -13.3]	1.73 [1.58, 1.88]
γ_3 (DEM)	0.0457 [0.0301, 0.0617]	-0.0015 [-0.0035, 0.0005]
γ_4 (DC)	-0.592 [-0.837, -0.317]	-0.0259 [-0.0688, 0.0160]

EFFECTOS ALEATORIOS

	Precipitación				Temperatura			
	$\bar{\alpha}_0$	$\delta\alpha_0$	$\bar{\alpha}_1$	$\delta\alpha_1$	$\bar{\alpha}_0$	$\delta\alpha_0$	$\bar{\alpha}_1$	$\delta\alpha_1$
enero	1.23 [-0.979, 3.47]	12.9 [11.0, 14.5]	-	-	-0.956 [-1.39, -0.556]	1.16 [0.911, 1.45]	-	-
febrero	-5.80 [-8.21, -3.72]	12.8 [11.0, 14.5]	-	-	-0.287 [-0.718, 0.104]	1.16 [0.872, 1.47]	-	-
marzo	-2.96 [-5.10, -0.712]	12.9 [11.3, 14.6]	-	-	-1.62 [-2.03, -1.26]	1.16 [0.889, 1.46]	-	-
abril	8.37 [6.35, 10.9]	13.4 [11.8, 15.4]	-	-	-0.745 [-1.16, -0.403]	1.16 [0.849, 1.43]	-	-
mayo	-2.08 [-4.25, 0.266]	12.9 [11.2, 14.7]	-	-	1.89 [1.50, 2.26]	1.16 [0.863, 1.44]	-	-
junio	-1.15 [-3.39, 1.27]	12.6 [11.1, 14.4]	-	-	-1.00 [-1.42, -0.619]	1.15 [0.857, 1.44]	-	-
julio	-6.94 [-9.30, -4.42]	12.4 [10.9, 14.1]	-	-	1.14 [0.742, 1.53]	1.16 [0.896, 1.47]	-	-
agosto	-4.82 [-7.16, -2.69]	12.7 [11.0, 14.2]	-	-	1.43 [1.01, 1.80]	1.15 [0.907, 1.46]	-	-
septiembre	-23.4 [-25.7, -20.9]	13.5 [11.7, 15.2]	-	-	3.36 [2.98, 3.73]	1.24 [0.957, 1.53]	-	-
octubre	8.47 [6.33, 10.8]	12.8 [11.1, 14.4]	-	-	0.205 [-0.182, 0.585]	1.15 [0.868, 1.43]	-	-
noviembre	18.0 [15.8, 20.3]	15.1 [13.2, 16.8]	-	-	-3.21 [-3.60, -2.84]	1.22 [0.947, 1.52]	-	-
diciembre	10.8 [8.60, 13.0]	13.8 [11.8, 15.6]	-	-	-0.181 [-0.559, 0.256]	1.16 [0.899, 1.46]	-	-
invierno	17.0 [13.9, 20.0]	21.1 [19.1, 23.2]	-1.94 [-2.88, -1.02]	4.64 [3.56, 5.75]	-4.18 [-4.79, -3.47]	1.41 [1.05, 1.79]	0.028 [-0.0238, 0.0826]	0.254 [0.195, 0.312]
primavera	9.30 [6.28, 12.5]	19.4 [17.4, 21.0]	-1.52 [-2.39, -0.726]	4.47 [3.55, 5.49]	-1.34 [-2.05, -0.673]	1.41 [1.07, 1.75]	0.333 [0.276, 0.395]	0.218 [0.169, 0.268]
verano	-35.1 [-38.6, -31.9]	13.9 [12.1, 15.6]	0.203 [-0.573, 0.966]	4.27 [3.27, 5.08]	4.52 [3.86, 5.20]	1.52 [1.11, 1.92]	0.077 [0.025, 0.133]	0.229 [0.176, 0.279]
otoño	8.66 [5.46, 11.6]	19.0 [17.1, 21.0]	1.64 [0.808, 2.41]	4.86 [3.83, 6.00]	0.994 [0.333, 1.61]	1.316 [1.01, 1.64]	-0.072 [-0.127, -0.0165]	0.254 [0.199, 0.300]

tabla A2: Ajuste del modelo de regresión lineal mixto a los valores de precipitación y temperatura mensual. Para cada uno de los parámetros (ecuación A1) se proporciona la estimación de la media y el intervalo de confianza del 95% condicionada a las observaciones. La precipitación se expresa como mm mes⁻¹, mientras que la temperatura se expresa en °C. Las tendencias (α_1) se expresan en mm mes⁻¹ o °C por década.

B

**Mapas estacionales de
precipitación y temperatura,
1970–2009**

En este Apéndice se presentan mapas con promedios decadales para cada estación del año durante el período 1970–2009. Cada uno de los mapas muestra el promedio de mapas mensuales interpolados a partir de datos recogidos por las estaciones meteorológicas de la red de observación AEMET (subsección 2.4). La precipitación acumulada (mm trimestre⁻¹) y la temperatura media (°C) durante cada estación del año se calcularon como la suma o el promedio, respectivamente, de los valores de precipitación y temperatura mensual considerando estaciones del año trimestrales; *invierno*: diciembre, enero y febrero (DEF, figura B1); *primavera*: marzo, abril y mayo (MAM, figura B2); *verano*: junio, julio y agosto (JJA, figura B3); y *otoño*: septiembre, octubre y noviembre (SON, figura B4).

Nota: la escala de color cambia entre mapas de una misma variable entre las distintas estaciones del año.

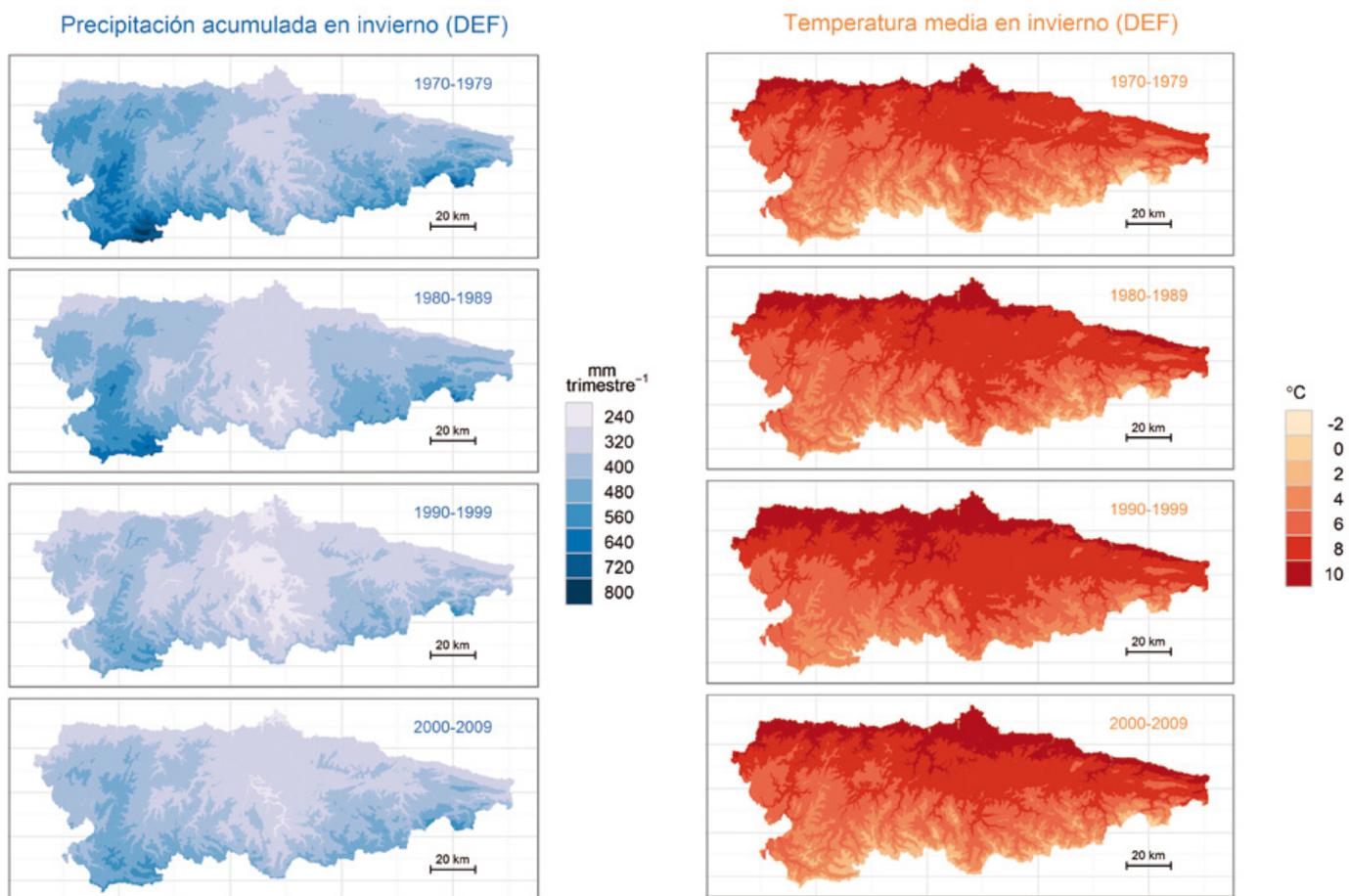


figura B1: Variación espacial en la precipitación acumulada (mm trimestre⁻¹) y en la temperatura media (°C) en invierno durante las últimas décadas (1970-2009). Cada uno de los mapas muestra el promedio de mapas mensuales interpolados a partir de datos recogidos en la red AEMET (subsección 2.4). La precipitación acumulada y la temperatura media son suma y promedio, respectivamente, de los valores estimados para los meses de diciembre (D), enero (E) y febrero (F).

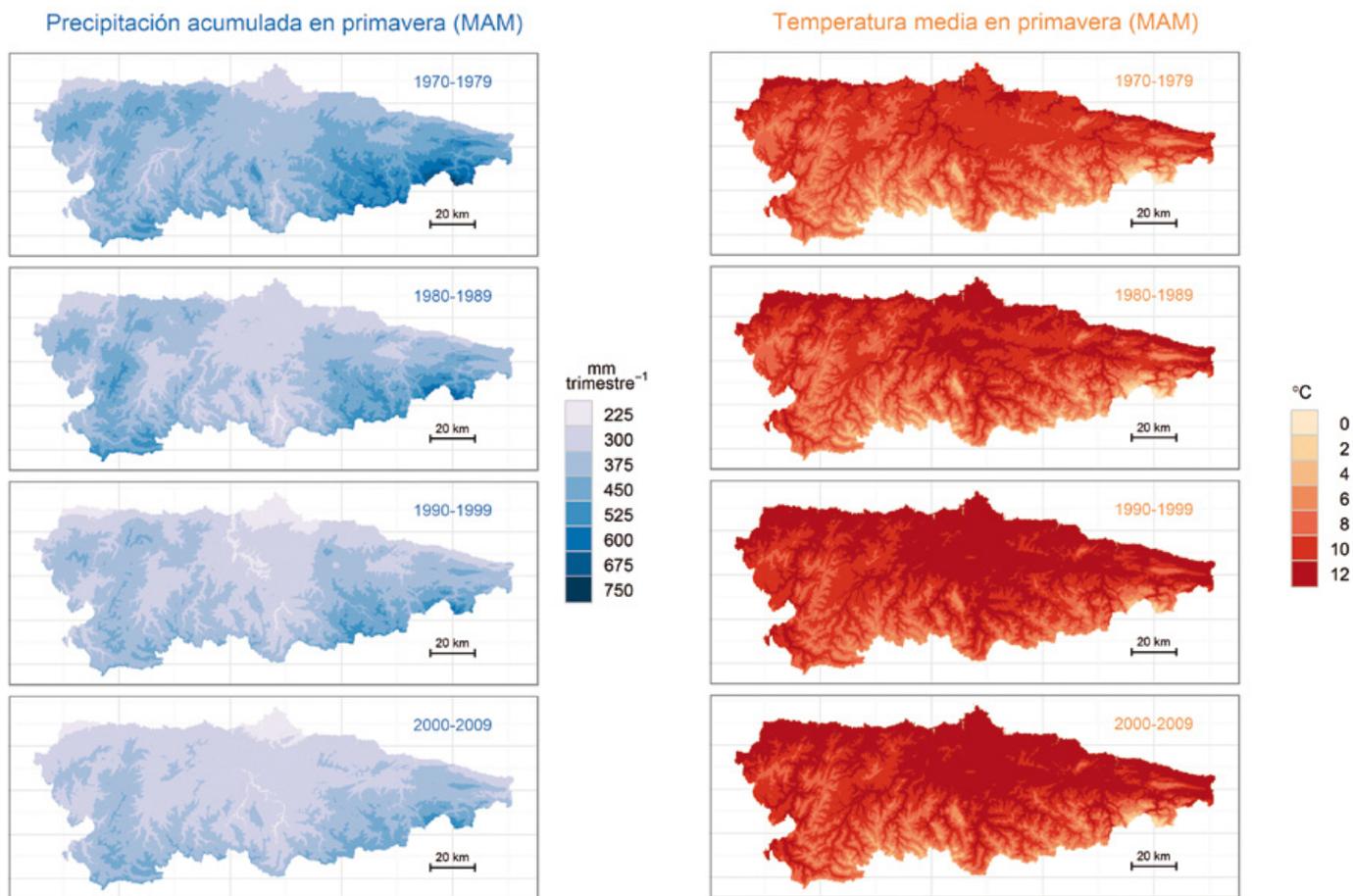


figura B2: Variación espacial en la precipitación acumulada (mm trimestre⁻¹) y en la temperatura media (°C) en primavera durante las últimas décadas (1970-2009). Cada uno de los mapas muestra el promedio de mapas mensuales interpolados a partir de datos recogidos en la red AEMET (subsección 2.4). La precipitación acumulada y la temperatura media son suma y promedio, respectivamente, de los valores estimados para los meses de marzo (M), abril (A) y mayo (M).

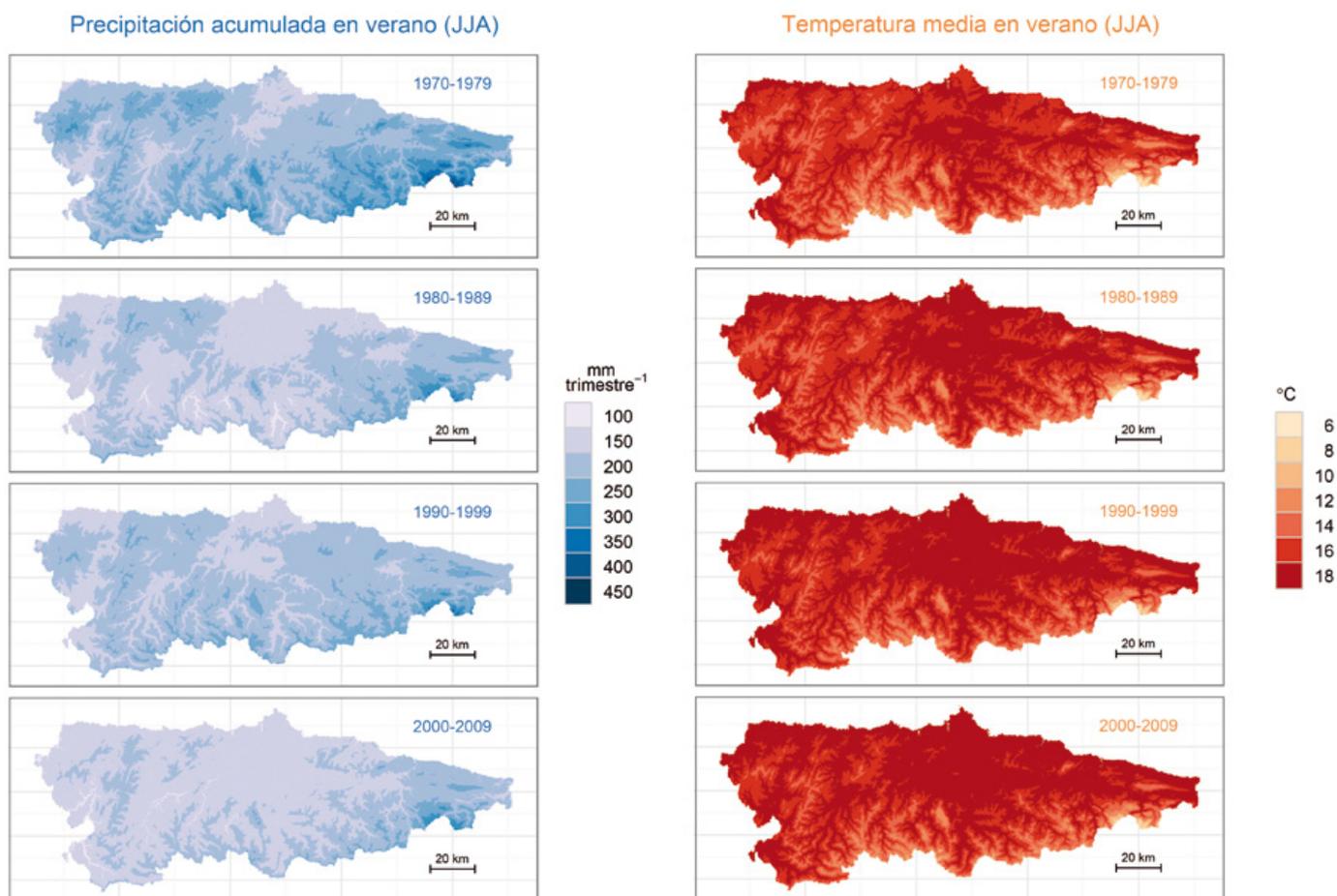


figura B3: Variación espacial en la precipitación acumulada (mm trimestre⁻¹) y en la temperatura media (°C) en verano durante las últimas décadas (1970-2009). Cada uno de los mapas muestra el promedio de mapas mensuales interpolados a partir de datos recogidos en la red AEMET (subsección 2.4). La precipitación acumulada y la temperatura media son suma y promedio, respectivamente, de los valores estimados para los meses de junio (J), julio (J) y agosto (A).

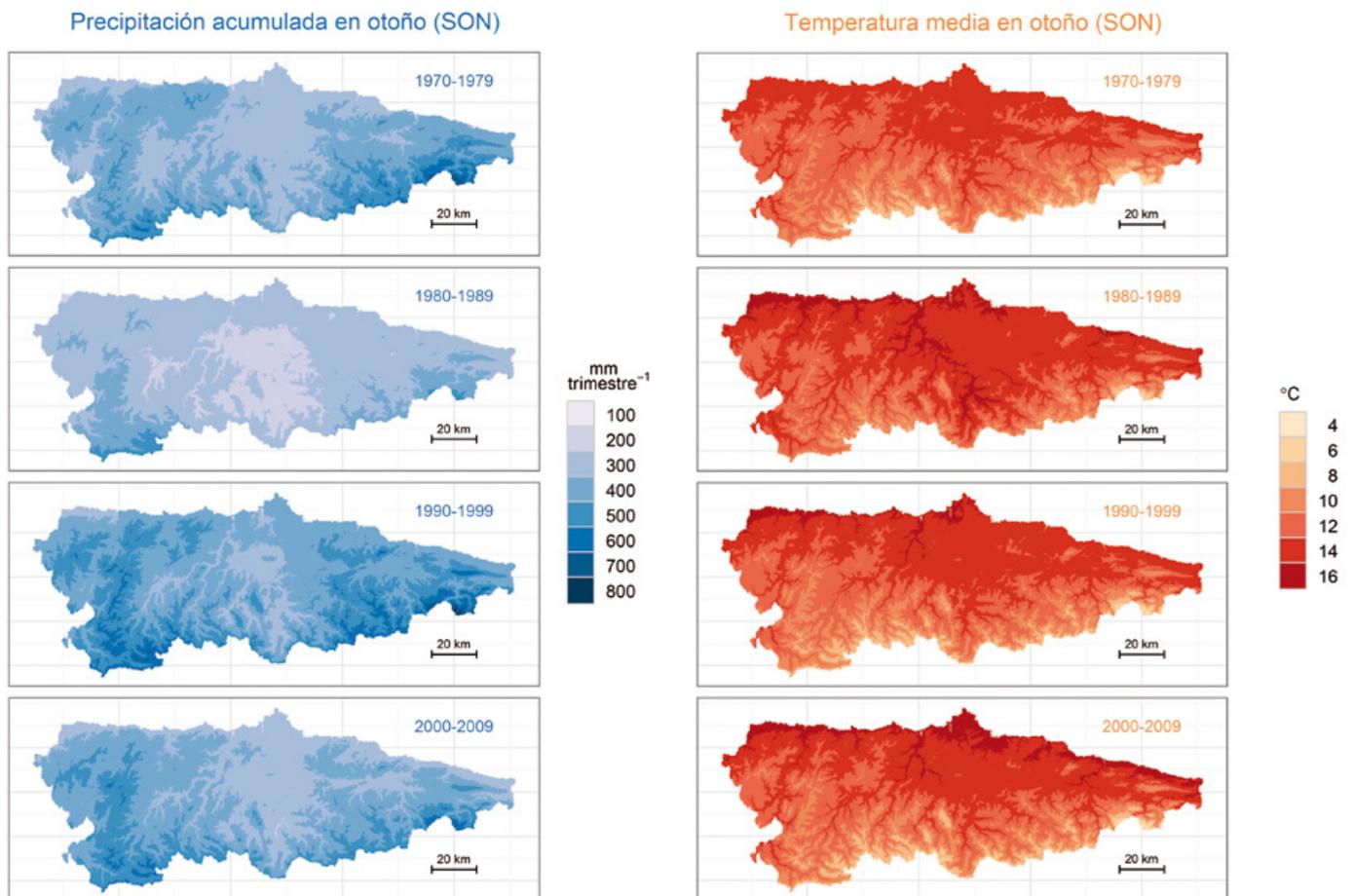


figura B4: Variación espacial en la precipitación acumulada (mm trimestre⁻¹) y en la temperatura media (°C) en otoño durante las últimas décadas (1970-2009). Cada uno de los mapas muestra el promedio de mapas mensuales interpolados a partir de datos recogidos en la red AEMET (subsección 2.4). La precipitación acumulada y la temperatura media son suma y promedio, respectivamente, de los valores estimados para los meses de septiembre (S), octubre (O) y noviembre (N).

C

**Mapas de proyecciones
estacionales de precipitación
y temperatura, 2010–2069**

Este Apéndice presenta mapas con promedios para cada estación del año durante los períodos 2010–2039 y 2040–2069 para el escenario de emisiones A1B (sección 3). Cada mapa muestra proyecciones conjuntas elaboradas a partir de las proyecciones basadas en varios modelos climáticos regionales cuya resolución se ha aumentado mediante técnicas estadísticas (subsección 3.2). Los incrementos en precipitación y temperatura estimados para cada modelo con respecto al período 1970–1990 se ha añadido a la climatología estimada para el mismo período a partir de la interpolación de observaciones recogidas en la red AEMET (panel superior, subsección 2.4). La precipitación acumulada (mm trimestre⁻¹) y la temperatura media (°C) durante cada estación del año se calcularon como la suma o el promedio, respectivamente, de los valores precipitación y temperatura mensual considerando estaciones del año trimestrales; *invierno*: diciembre, enero y febrero (DEF, figura C1); *primavera*: marzo, abril y mayo (MAM, figura C2); *verano*: junio, julio y agosto (JJA, figura C3); y *otoño*: septiembre, octubre y noviembre (SON, figura C4).

Nota: la escala de color cambia entre mapas de una misma variable entre las distintas estaciones del año.

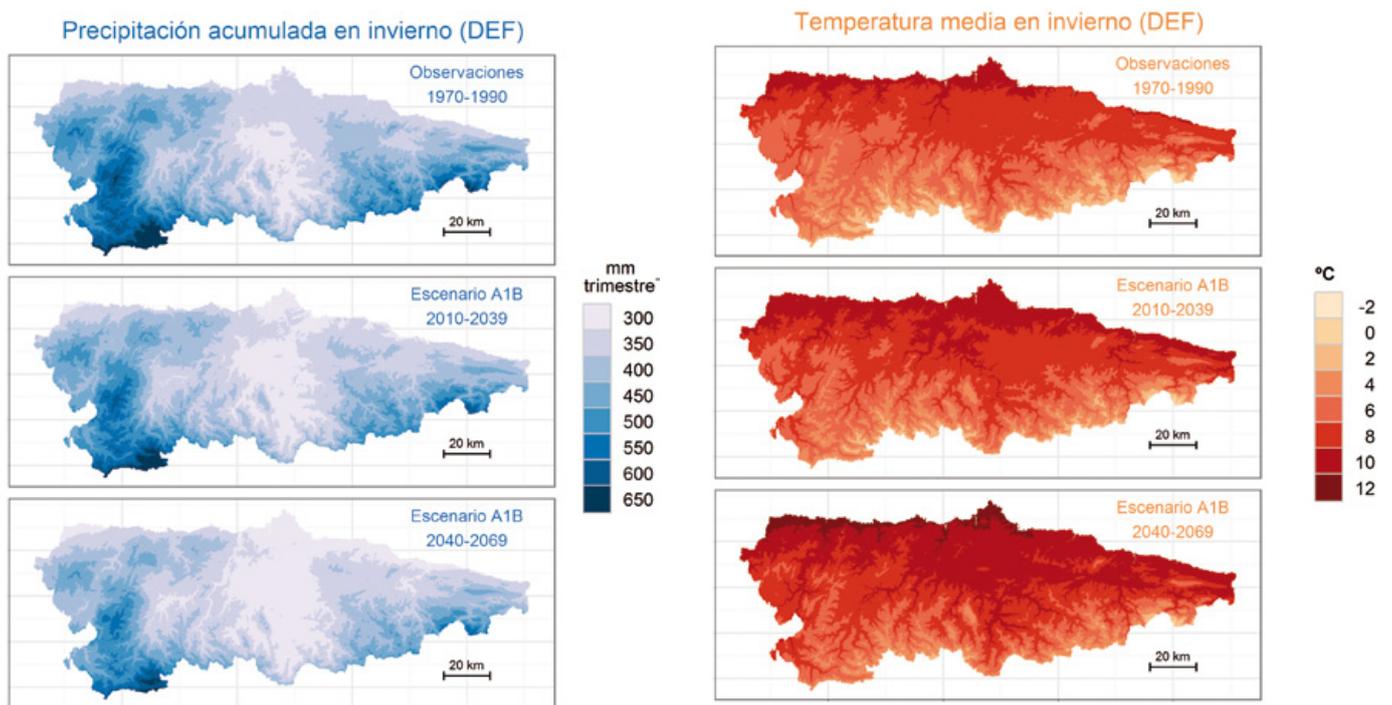


figura C1: Proyecciones para la precipitación acumulada (mm trimestre^{-1}) y la temperatura media ($^{\circ}\text{C}$) en invierno para el período 2010–2069 para el escenario de emisiones A1B (sección 3). Cada mapa muestra proyecciones conjuntas elaboradas a partir de las proyecciones basadas en varios modelos climáticos regionales cuya resolución se ha aumentado mediante técnicas estadísticas (subsección 3.2). Los incrementos en precipitación y temperatura estimados para cada modelo con respecto al período 1970–1990 se ha añadido a la climatología estimada para el mismo período a partir de la interpolación de observaciones recogidas en la red AEMET (panel superior, subsección 2.4). La precipitación acumulada y la temperatura media son suma y promedio, respectivamente, de los valores estimados para los meses de septiembre (S), octubre (O) y noviembre (N).

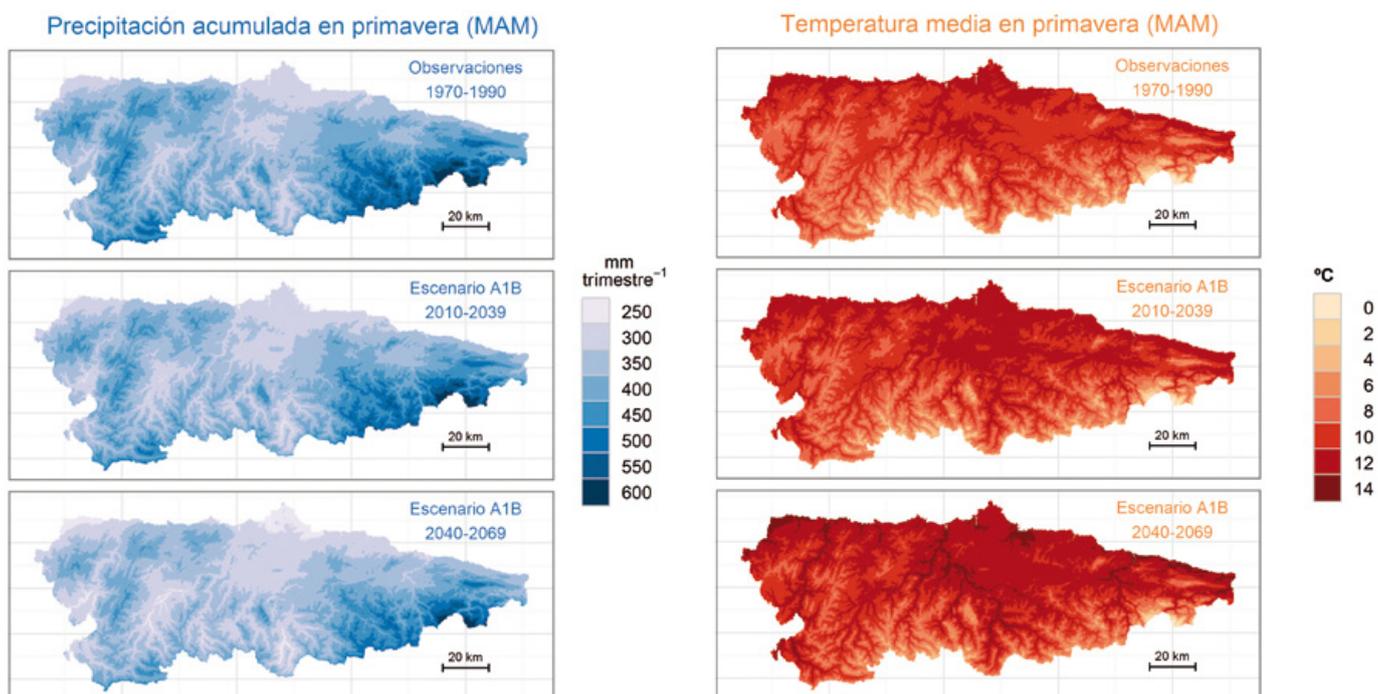


figura C2: Proyecciones para la precipitación acumulada (mm trimestre^{-1}) y la temperatura media ($^{\circ}\text{C}$) en primavera para el período 2010-2069 para el escenario de emisiones A1B (sección 3). Cada mapa muestra proyecciones conjuntas elaboradas a partir de las proyecciones basadas en varios modelos climáticos regionales cuya resolución se ha aumentado mediante técnicas estadísticas (subsección 3.2). Los incrementos en precipitación y temperatura estimados para cada modelo con respecto al período 1970–1990 se ha añadido a la climatología estimada para el mismo período a partir de la interpolación de observaciones recogidas en la red AEMET (panel superior, subsección 2.4). La precipitación acumulada y la temperatura media son suma y promedio, respectivamente, de los valores estimados para los meses de marzo (M), abril (A) y mayo (M).

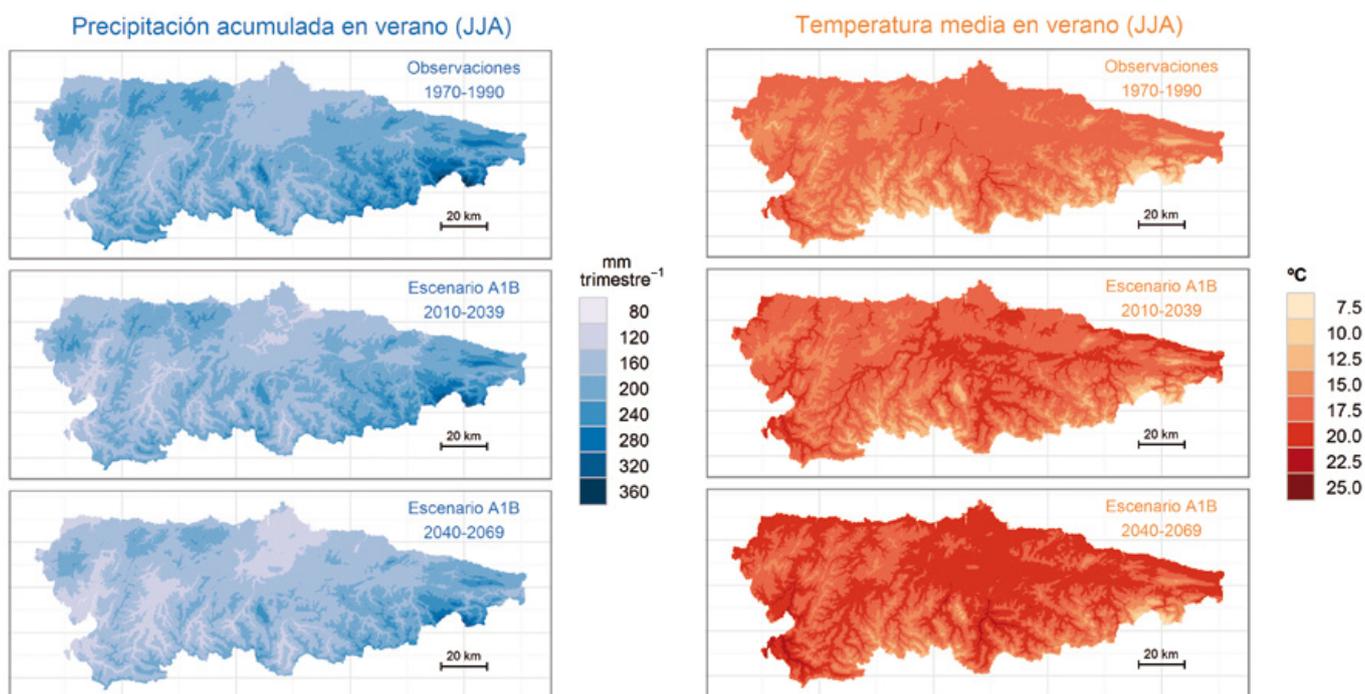


figura C3: Proyecciones para la precipitación acumulada (mm trimestre⁻¹) y la temperatura media (°C) en verano para el período 2010-2069 para el escenario de emisiones A1B (sección 3). Cada mapa muestra proyecciones conjuntas elaboradas a partir de las proyecciones basadas en varios modelos climáticos regionales cuya resolución se ha aumentado mediante técnicas estadísticas (subsección 3.2). Los incrementos en precipitación y temperatura estimados para cada modelo con respecto al período 1970–1990 se ha añadido a la climatología estimada para el mismo período a partir de la interpolación de observaciones recogidas en la red AEMET (panel superior, subsección 2.4). La precipitación acumulada y la temperatura media son suma y promedio, respectivamente, de los valores estimados para los meses de junio (J), julio (J) y agosto (A).

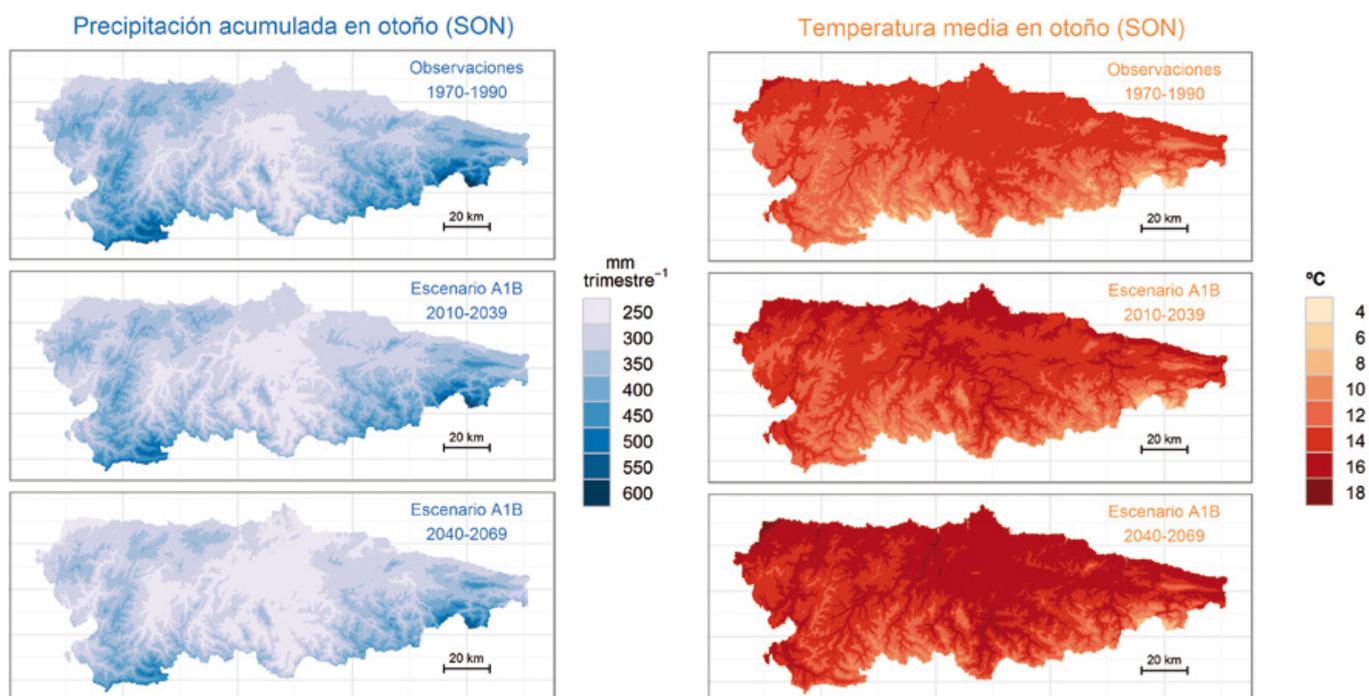


figura C4: Proyecciones para la precipitación acumulada (mm trimestre^{-1}) y la temperatura media ($^{\circ}\text{C}$) en otoño para el período 2010-2069 para el escenario de emisiones A1B (sección 3). Cada mapa muestra proyecciones conjuntas elaboradas a partir de las proyecciones basadas en varios modelos climáticos regionales cuya resolución se ha aumentado mediante técnicas estadísticas (subsección 3.2). Los incrementos en precipitación y temperatura estimados para cada modelo con respecto al período 1970–1990 se ha añadido a la climatología estimada para el mismo período a partir de la interpolación de observaciones recogidas en la red AEMET (panel superior, subsección 2.4). La precipitación acumulada y la temperatura media son suma y promedio, respectivamente, de los valores estimados para los meses de septiembre (S), octubre (O) y noviembre (N).

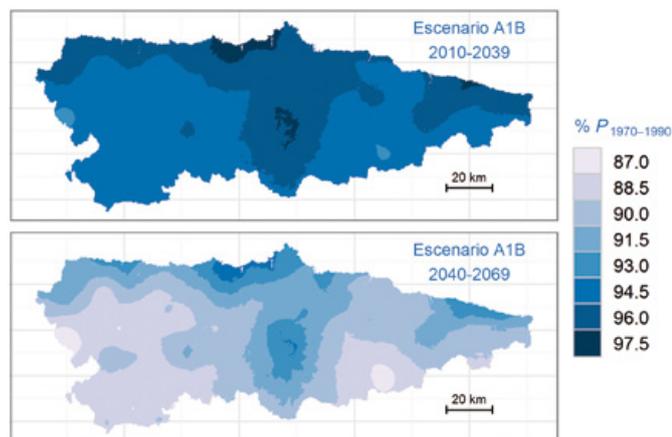
D

**Mapas de cambios estacionales
proyectados para precipitación
y temperatura, 2010–2069**

Este Apéndice presenta mapas con promedios sobre los cambios proyectados para cada estación del año durante el período 2010–2069 para el escenario de emisiones A1B (sección 3). Cada mapa muestra proyecciones conjuntas elaboradas a partir de las proyecciones basadas en varios modelos climáticos regionales cuya resolución se ha aumentado mediante técnicas estadísticas (subsección 3.2). Se presentan el porcentaje de reducción en la precipitación acumulada y la diferencia en temperatura media entre el incremento proyectado para los períodos 2010–2039 y 2040–2069 respecto al promedio estimado para el período 1970–1990 a partir de observaciones recogidas por la red AEMET (subsección 2.4). La precipitación acumulada (%) y la temperatura media (°C) durante cada estación del año se calcularon como la suma o el promedio, respectivamente, de los valores de precipitación y temperatura mensual considerando estaciones del año trimestrales; *invierno*: diciembre, enero y febrero (DEF, figura D1); *primavera*: marzo, abril y mayo (MAM, figura D2); *verano*: junio, julio y agosto (JJA, figura D3); y *otoño*: septiembre, octubre y noviembre (SON, figura D4).

Nota: la escala de color cambia entre mapas de una misma variable entre las distintas estaciones del año.

Cambios en la precipitación en invierno (DEF)



Cambios en la temperatura en invierno (DEF)

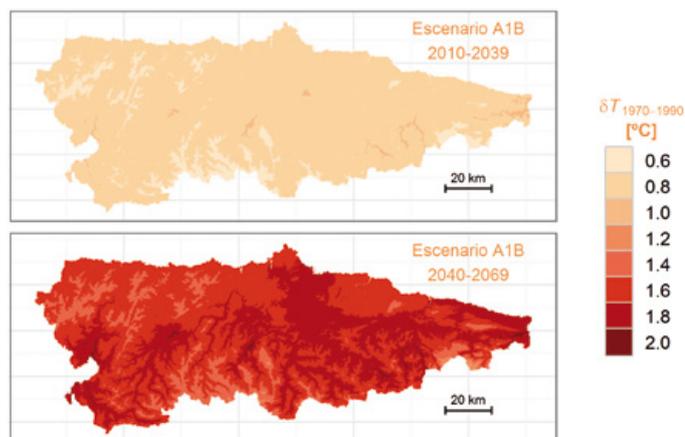


figura D1: Cambios esperados en la precipitación acumulada (% , panel superior) y en la temperatura media (°C, panel inferior) en invierno para el período 2010–2069. Se muestran incrementos predichos para el escenario A1B (véase la sección 3). Cada mapa muestra proyecciones conjuntas elaboradas a partir de proyecciones basadas en varios modelos climáticos regionales cuya resolución se ha aumentado mediante técnicas estadísticas (subsección 3.2). Se presentan el porcentaje de reducción en la precipitación acumulada y la diferencia en temperatura media entre el incremento proyectado para los períodos 2010–2039 y 2040–2069 respecto al promedio estimado para el período 1970–1990 a partir de observaciones de la red AEMET (subsección 2.4). La precipitación acumulada y la temperatura media son suma y promedio, respectivamente, de los valores de estimados para los meses de diciembre (D), enero (E) y febrero (F).

Cambios en la precipitación en primavera (MAM)

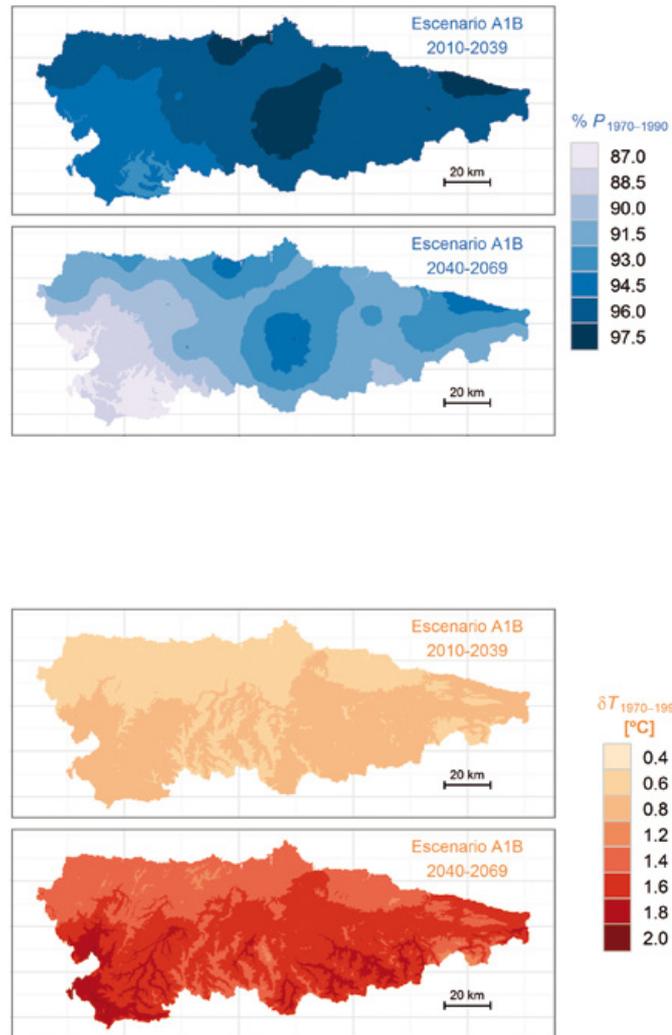
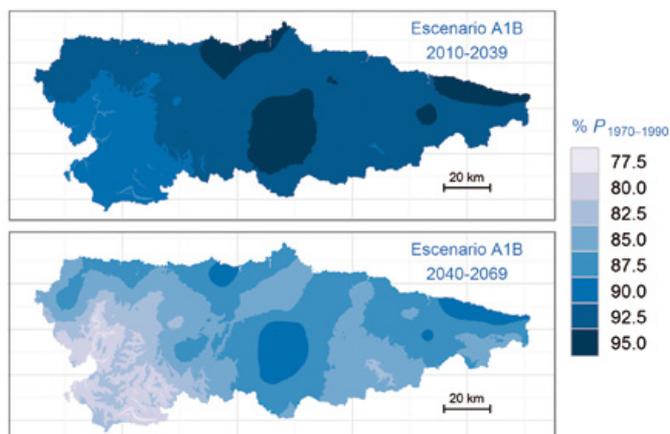


figura D2: Cambios esperados en la precipitación acumulada (% , panel superior) y en la temperatura media (°C, panel inferior) en primavera para el período 2010–2069. Se muestran incrementos predichos para el escenario A1B (véase la sección 3), y cada mapa muestra proyecciones conjuntas elaboradas a partir de las proyecciones basadas en varios modelos climáticos regionales cuya resolución se ha aumentado mediante técnicas estadísticas (subsección 3.2). Se presentan el porcentaje de reducción en la precipitación acumulada y la diferencia en temperatura media entre el incremento proyectado para los períodos 2010–2039 y 2040–2069 respecto al promedio estimado para el período 1970–1990 a partir de observaciones de la red AEMET (subsección 2.4). La precipitación acumulada y la temperatura media son suma y promedio, repectivamente, de los valores de estimados para los meses de marzo (M), abril (A) y mayo (M).

Cambios en la precipitación en verano (JJA)



Cambios en la temperatura en verano (JJA)

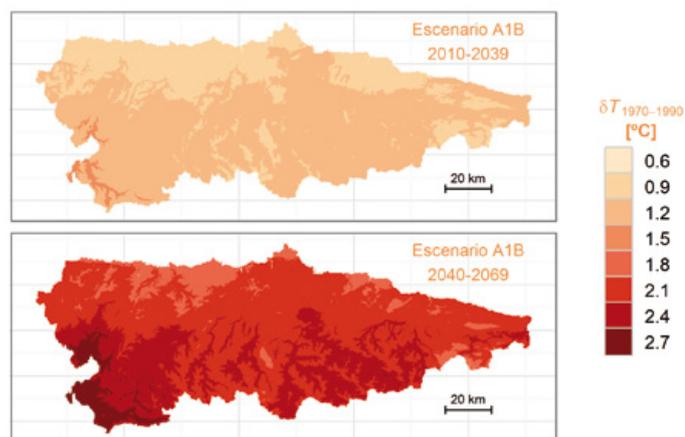
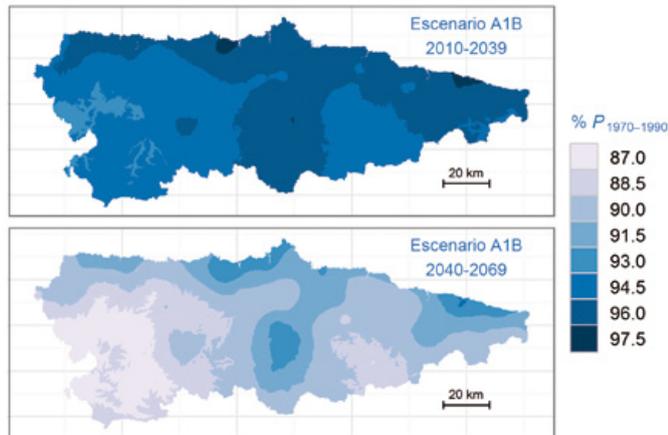


figura D3: Cambios esperados en la precipitación acumulada (%, panel superior) y en la temperatura media (°C, panel inferior) en verano para el período 2010–2069. Se muestran incrementos predichos para el escenario A1B (véase la sección 3), y cada mapa muestra proyecciones conjuntas elaboradas a partir de las proyecciones basadas en varios modelos climáticos regionales cuya resolución se ha aumentado mediante técnicas estadísticas (subsección 3.2). Se presentan el porcentaje de reducción en la precipitación acumulada y la diferencia en temperatura media entre el incremento proyectado para los períodos 2010–2039 y 2040–2069 respecto al promedio estimado para el período 1970–1990 a partir de observaciones de la red AEMET (subsección 2.4). La precipitación acumulada y la temperatura media son suma y promedio, respectivamente, de los valores de estimados para los meses de junio (J), julio (J) y agosto (A).

Cambios en la precipitación en otoño (SON)



Cambios en la temperatura en otoño (SON)

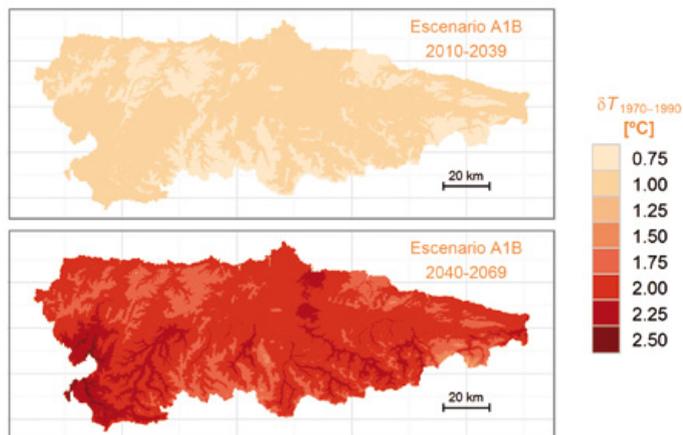


figura D4: Cambios esperados en la precipitación acumulada (%, panel superior) y en la temperatura media (°C, panel inferior) en otoño para el período 2010–2069. Se muestran incrementos predichos para el escenario A1B (véase la sección 3), y cada mapa muestra proyecciones conjuntas elaboradas a partir de las proyecciones basadas en varios modelos climáticos regionales cuya resolución se ha aumentado mediante técnicas estadísticas (subsección 3.2). Se presentan el porcentaje de reducción en la precipitación acumulada y la diferencia en temperatura media entre el incremento proyectado para los períodos 2010–2039 y 2040–2069 respecto al promedio estimado para el período 1970–1990 a partir de observaciones de la red AEMET (subsección 2.4). La precipitación acumulada y la temperatura media son suma y promedio, repectivamente, de los valores de estimados para los meses de septiembre (S), octubre (O) y noviembre (N).

E

**Mapas de proyecciones
estacionales para precipitación
y temperatura, 2070–2099**

Este Apéndice presenta mapas con promedios para cada estación del año durante el período 2070–2099 para los escenarios de emisiones A2, A1B y B2 (sección 3). Cada mapa muestra proyecciones conjuntas elaboradas a partir de las proyecciones basadas en varios modelos climáticos regionales para distintos escenarios (A2, A1B y B2; véase la sección 3), cuya resolución se ha aumentado mediante técnicas estadísticas (subsección 3.2). Los incrementos en precipitación y temperatura estimados para cada modelo con respecto al período 1970–1990 se ha añadido a la climatología estimada para el mismo período a partir de la interpolación de observaciones recogidas en la red AEMET (panel superior, subsección 2.4). La precipitación acumulada (mm trimestre⁻¹) y la temperatura media (°C) durante cada estación del año se calcularon como la suma o el promedio, respectivamente, de los valores de precipitación y temperatura mensual considerando estaciones del año trimestrales; *invierno*: diciembre, enero y febrero (DEF, figura E1); *primavera*: marzo, abril y mayo (MAM, figura E2); *verano*: junio, julio y agosto (JJA, figura E3); y *otoño*: septiembre, octubre y noviembre (SON, figura E4).

Nota: la escala de color cambia entre mapas de una misma variable entre las distintas estaciones del año.

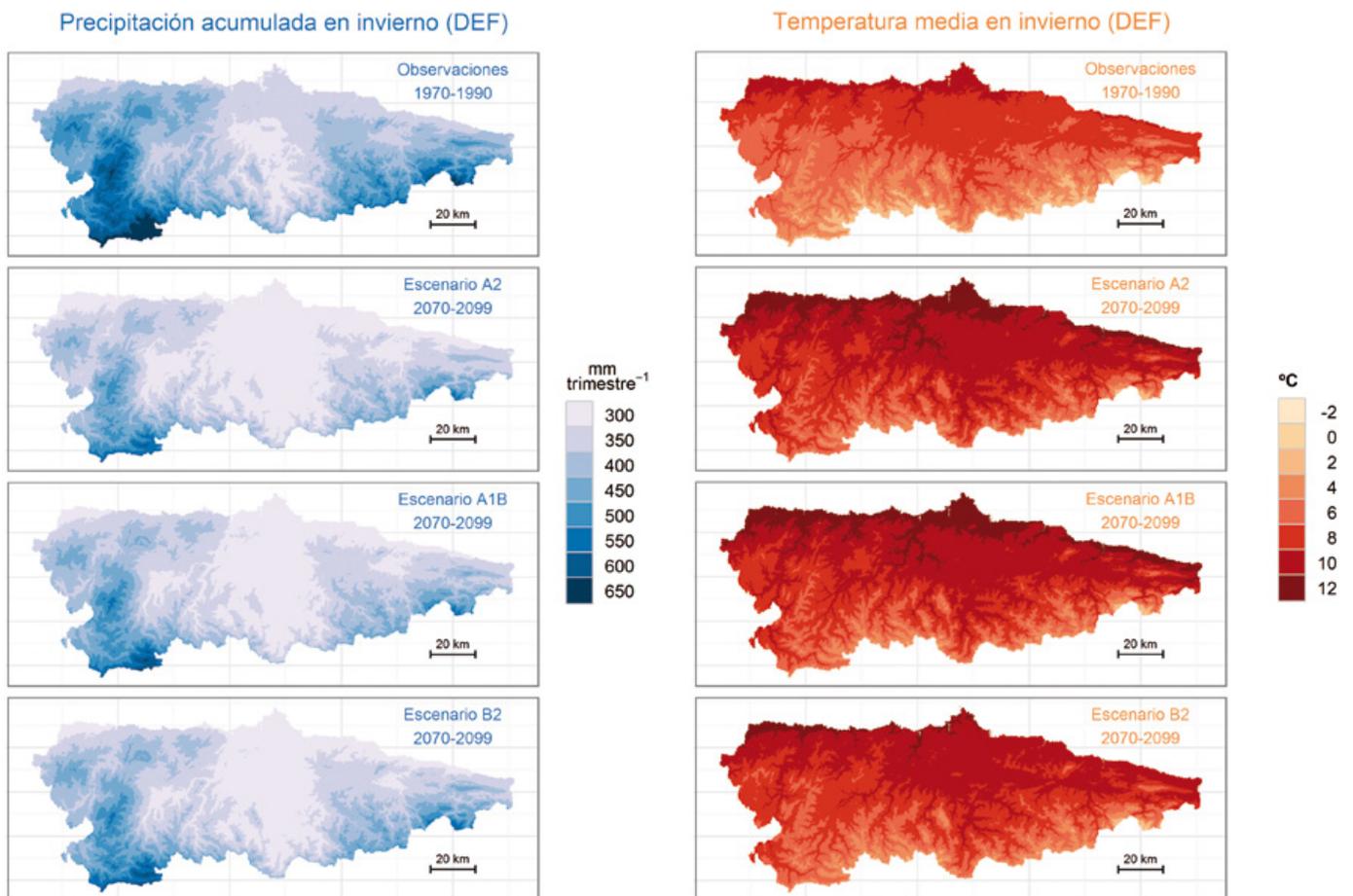


figura E1: Proyecciones para la precipitación acumulada (mm trimestre^{-1}) y la temperatura media ($^{\circ}\text{C}$) en invierno para el período 2070-2099. Cada mapa muestra proyecciones conjuntas elaboradas a partir de las proyecciones basadas en varios modelos climáticos regionales para distintos escenarios (A2, A1B y B2; véase la sección 3), cuya resolución se ha aumentado mediante técnicas estadísticas (subsección 3.2). Los incrementos en precipitación y temperatura estimados para cada modelo con respecto al período 1970–1990 se ha añadido a la climatología estimada para el mismo período a partir de la interpolación de observaciones recogidas en la red AEMET (panel superior, subsección 2.4). La precipitación acumulada y la temperatura media son suma y promedio, respectivamente, de los valores estimados para los meses de diciembre (D), enero (E) y febrero (F).

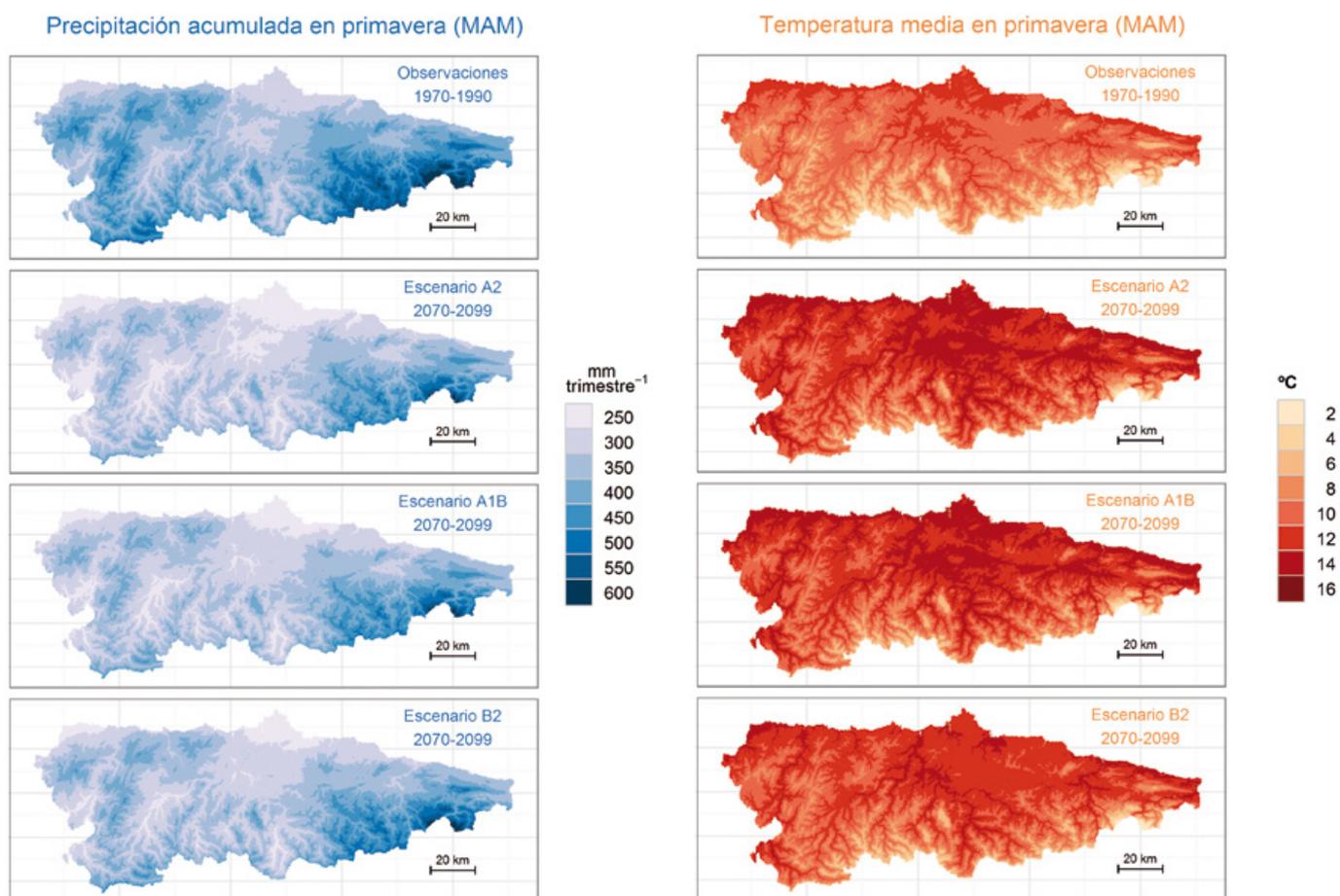


figura E2 : Proyecciones para la precipitación acumulada (mm trimestre^{-1}) y la temperatura media ($^{\circ}\text{C}$) en primavera para el período 2070-2099. Cada mapa muestra proyecciones conjuntas elaboradas a partir de las proyecciones basadas en varios modelos climáticos regionales para distintos escenarios (A2, A1B y B2; véase la sección 3), cuya resolución se ha aumentado mediante técnicas estadísticas (subsección 3.2). Los incrementos en precipitación y temperatura estimados para cada modelo con respecto al período 1970-1990 se ha añadido a la climatología estimada para el mismo período a partir de la interpolación de observaciones recogidas en la red AEMET (panel superior, subsección 2.4). La precipitación acumulada y la temperatura media son suma y promedio, respectivamente, de los valores estimados para los meses de marzo (M), abril (A) y mayo (M).

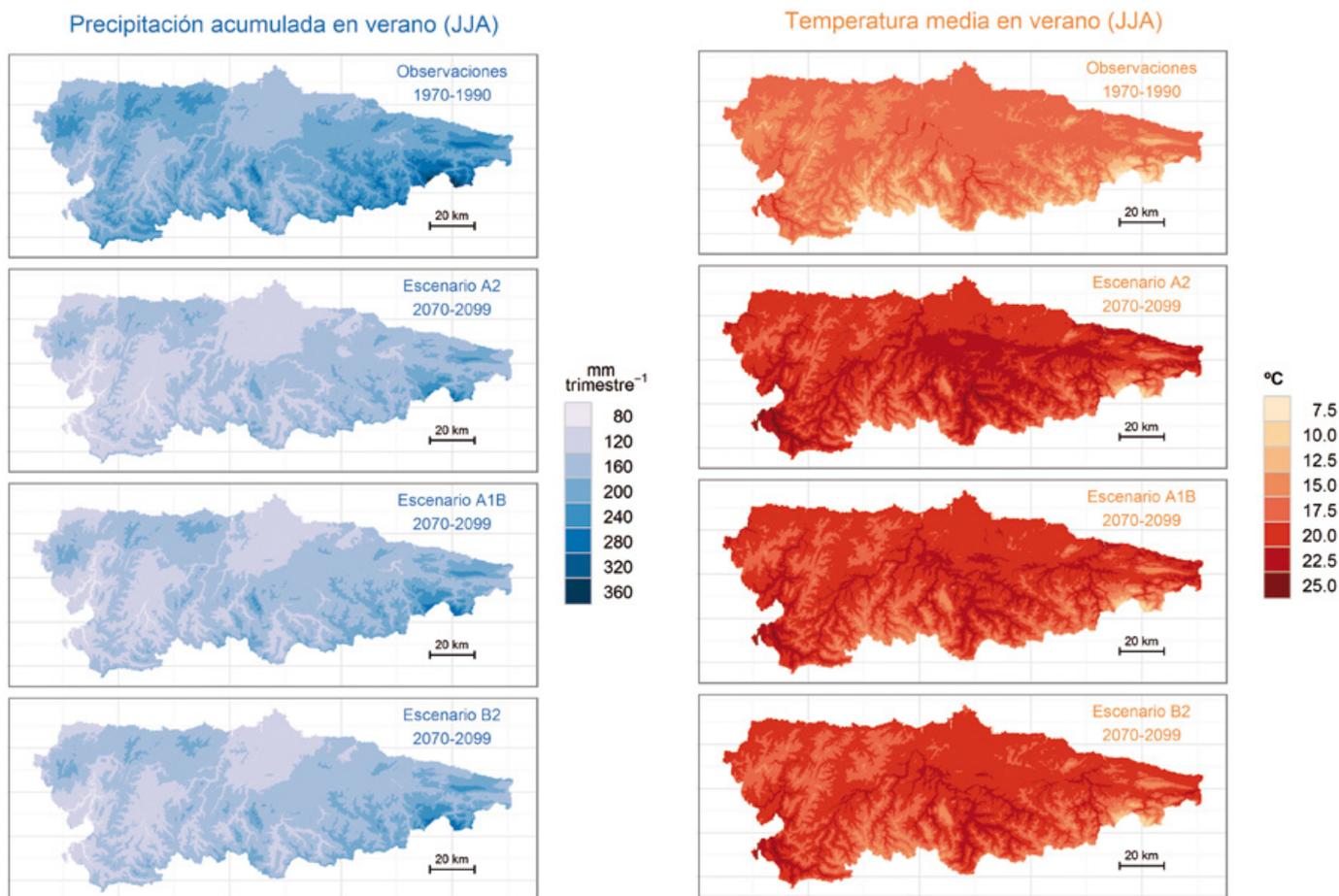


figura E3: Proyecciones para la precipitación acumulada (mm trimestre^{-1}) y la temperatura media ($^{\circ}\text{C}$) en verano para el período 2070-2099. Cada mapa muestra proyecciones conjuntas elaboradas a partir de las proyecciones basadas en varios modelos climáticos regionales para distintos escenarios (A2, A1B y B2; véase la sección 3), cuya resolución se ha aumentado mediante técnicas estadísticas (subsección 3.2). Los incrementos en precipitación y temperatura estimados para cada modelo con respecto al período 1970–1990 se ha añadido a la climatología estimada para el mismo período a partir de la interpolación de observaciones recogidas en la red AEMET (panel superior, subsección 2.4). La precipitación acumulada y la temperatura media son suma y promedio, respectivamente, de los valores estimados para los meses de junio (J), julio (J) y agosto (A).

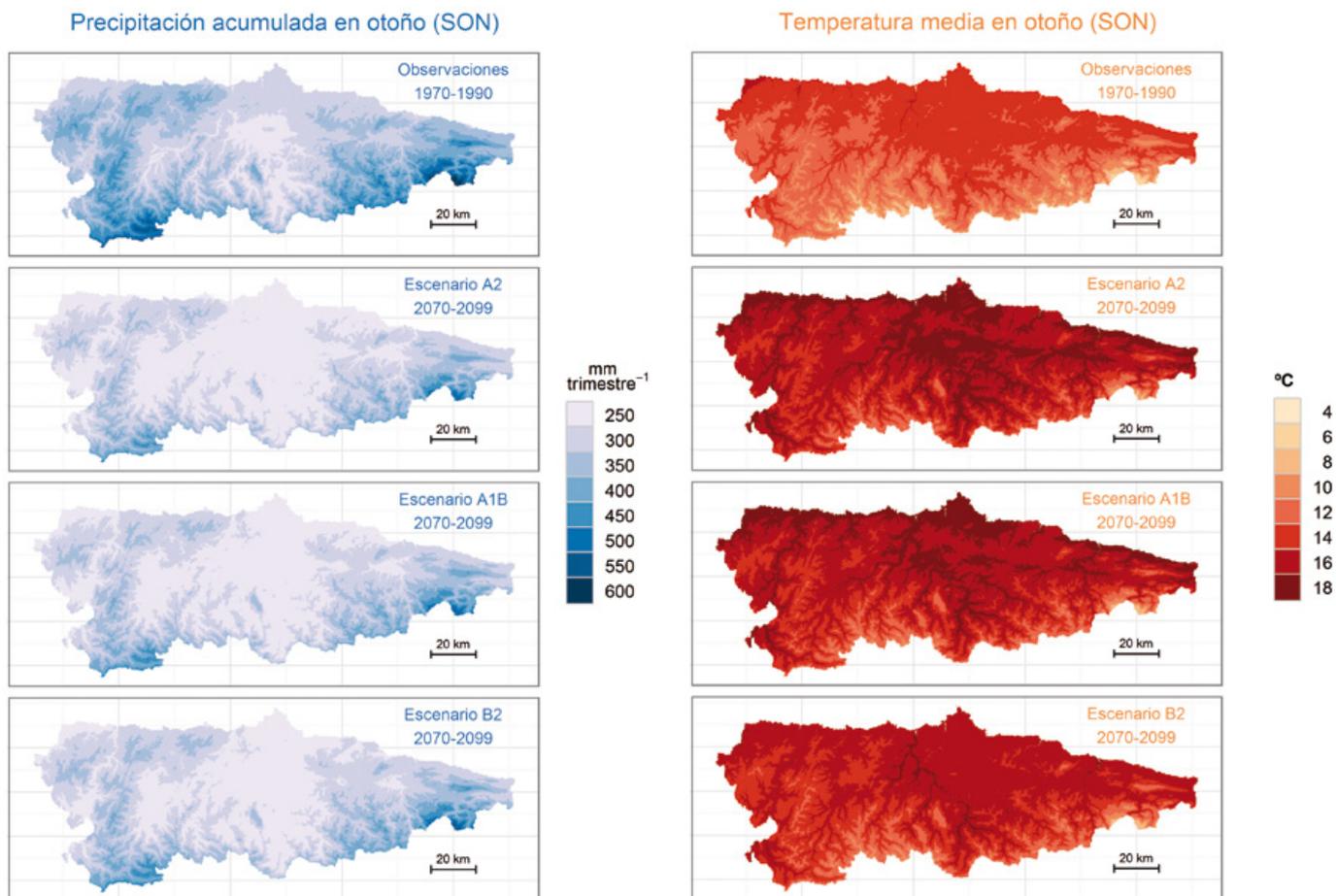


figura E4 : Proyecciones para la precipitación acumulada (mm trimestre⁻¹) y la temperatura media (°C) en otoño para el período 2070-2099. Cada mapa muestra proyecciones conjuntas elaboradas a partir de las proyecciones basadas en varios modelos climáticos regionales para distintos escenarios (A2, A1B y B2; véase la sección 3), cuya resolución se ha aumentado mediante técnicas estadísticas (subsección 3.2). Los incrementos en precipitación y temperatura estimados para cada modelo con respecto al período 1970-1990 se ha añadido a la climatología estimada para el mismo período a partir de la interpolación de observaciones recogidas en la red AEMET (panel superior, subsección 2.4). La precipitación acumulada y la temperatura media son suma y promedio, respectivamente, de los valores estimados para los meses de septiembre (S), octubre (O) y noviembre (N).

F

**Mapas de cambios estacionales
proyectados para precipitación
y temperatura, 2070–2099**

Este Apéndice presenta mapas con promedios sobre los cambios proyectados para cada estación del año durante el período 2070–2099 para los escenarios de emisiones A2, A1B y B2 (sección 3). Cada mapa muestra proyecciones conjuntas elaboradas a partir de las proyecciones basadas en varios modelos climáticos regionales cuya resolución se ha aumentado mediante técnicas estadísticas (subsección 3.2). Se presentan el porcentaje de reducción en la precipitación acumulada y la diferencia en temperatura media entre el incremento proyectado para los períodos 2010–2039 y 2040–2069 respecto al promedio estimado para el período 1970–1990 a partir de observaciones recogidas por la red AEMET (subsección 2.4). La precipitación acumulada (%) y la temperatura media (°C) durante cada estación del año se calcularon como la suma o el promedio, respectivamente, de los valores de precipitación y temperatura mensual considerando estaciones del año trimestrales; *invierno*: diciembre, enero y febrero (DEF, figura F1); *primavera*: marzo, abril y mayo (MAM, figura F2); *verano*: junio, julio y agosto (JJA, figura F3); y *otoño*: septiembre, octubre y noviembre (SON, figura F4).

Nota: la escala de color cambia entre mapas de una misma variable entre las distintas estaciones del año.

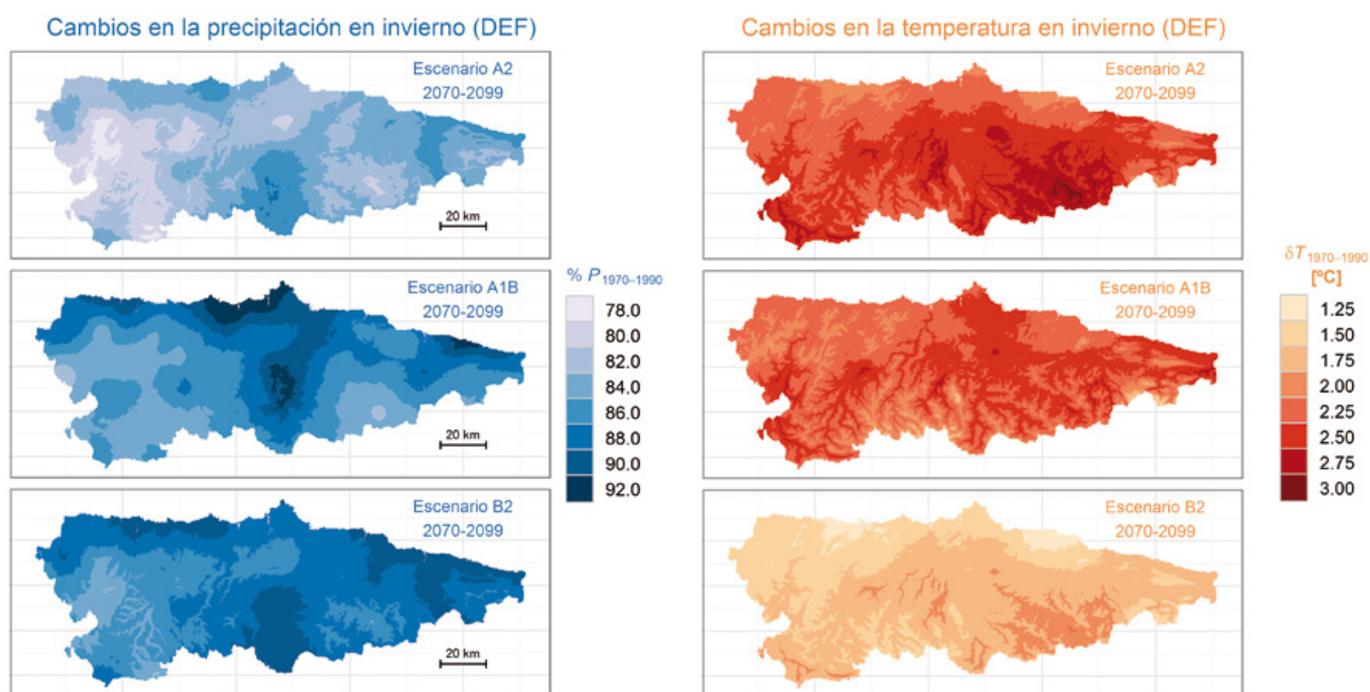


figura F1: Cambios esperados en la precipitación acumulada (%) y en la temperatura media (°C) en invierno para el período 2070–2099. Los mapas corresponden a los incrementos predichos para distintos escenarios (A2, A1B y B2; véase la sección 3). Cada mapa muestra proyecciones conjuntas elaboradas a partir de las proyecciones basadas en varios modelos climáticos regionales cuya resolución se ha aumentado mediante técnicas estadísticas (subsección 3.2). Se presentan el porcentaje de reducción en la precipitación acumulada y la diferencia en temperatura media entre el incremento proyectado para los períodos 2010–2039 y 2040–2069 respecto al promedio estimado para el período 1970–1990 a partir de observaciones recogidas por la red AEMET (subsección 2.4). La precipitación acumulada y la temperatura media son suma y promedio, respectivamente, de los valores estimados para los meses de diciembre (D), enero (E) y febrero (F).

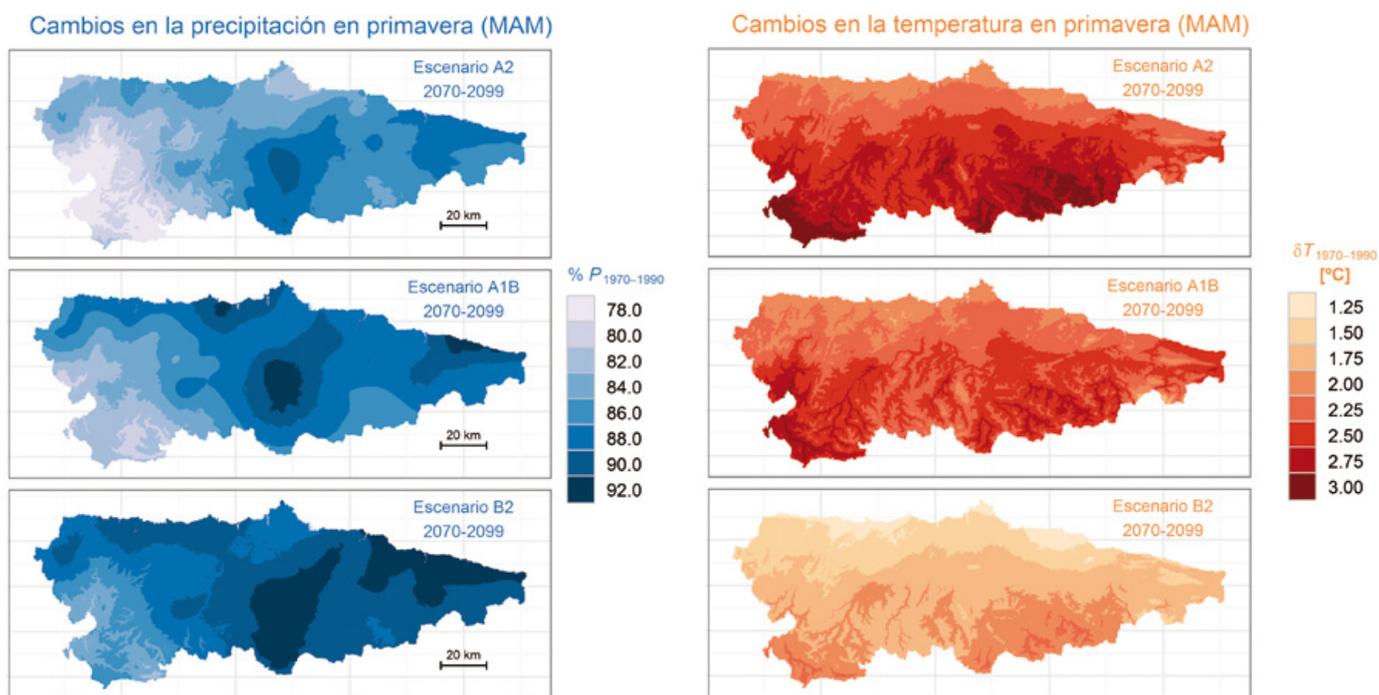


figura F2: Cambios esperados en la precipitación acumulada (%) y en la temperatura media (°C) en primavera para el período 2070–2099. Los mapas corresponden a los incrementos predichos para distintos escenarios (A2, A1B y B2; véase la sección 3). Cada mapa muestra proyecciones conjuntas elaboradas a partir de las proyecciones basadas en varios modelos climáticos regionales cuya resolución se ha aumentado mediante técnicas estadísticas (subsección 3.2). Se presentan el porcentaje de reducción en la precipitación acumulada y la diferencia en temperatura media entre el incremento proyectado para los períodos 2010–2039 y 2040–2069 respecto al promedio estimado para el período 1970–1990 a partir de observaciones recogidas por la red AEMET (subsección 2.4). La precipitación acumulada y la temperatura media son suma y promedio, respectivamente, de los valores estimados para los meses de marzo (M), abril (A) y mayo (M).

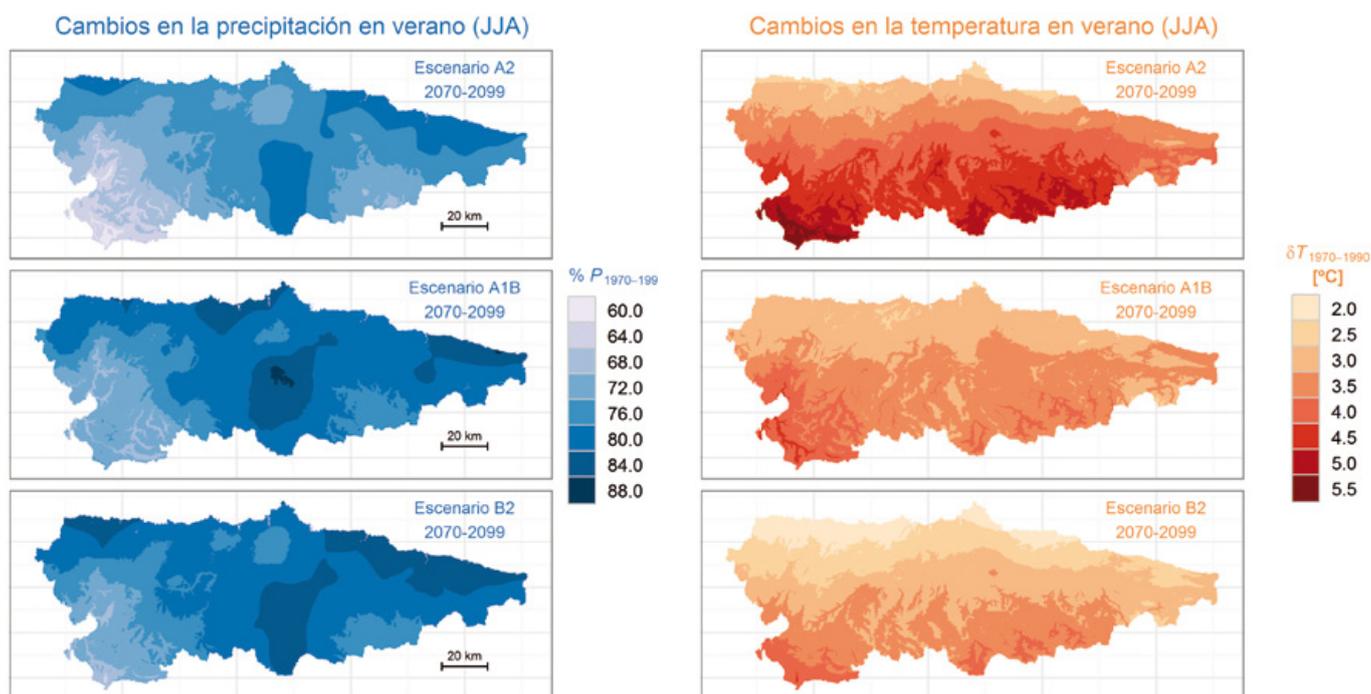


figura F3: Cambios esperados en la precipitación acumulada (%) y en la temperatura media (°C) en verano para el período 2070–2099. Los mapas corresponden a los incrementos predichos para distintos escenarios (A2, A1B y B2; véase la sección 3). Cada mapa muestra proyecciones conjuntas elaboradas a partir de las proyecciones basadas en varios modelos climáticos regionales cuya resolución se ha aumentado mediante técnicas estadísticas (subsección 3.2). Se presentan el porcentaje de reducción en la precipitación acumulada y la diferencia en temperatura media entre el incremento proyectado para los períodos 2010–2039 y 2040–2069 respecto al promedio estimado para el período 1970–1990 a partir de observaciones recogidas por la red AEMET (subsección 2.4). La precipitación acumulada y la temperatura media son suma y promedio, respectivamente, de los valores estimados para los meses de junio (J), julio (J) y agosto (A).

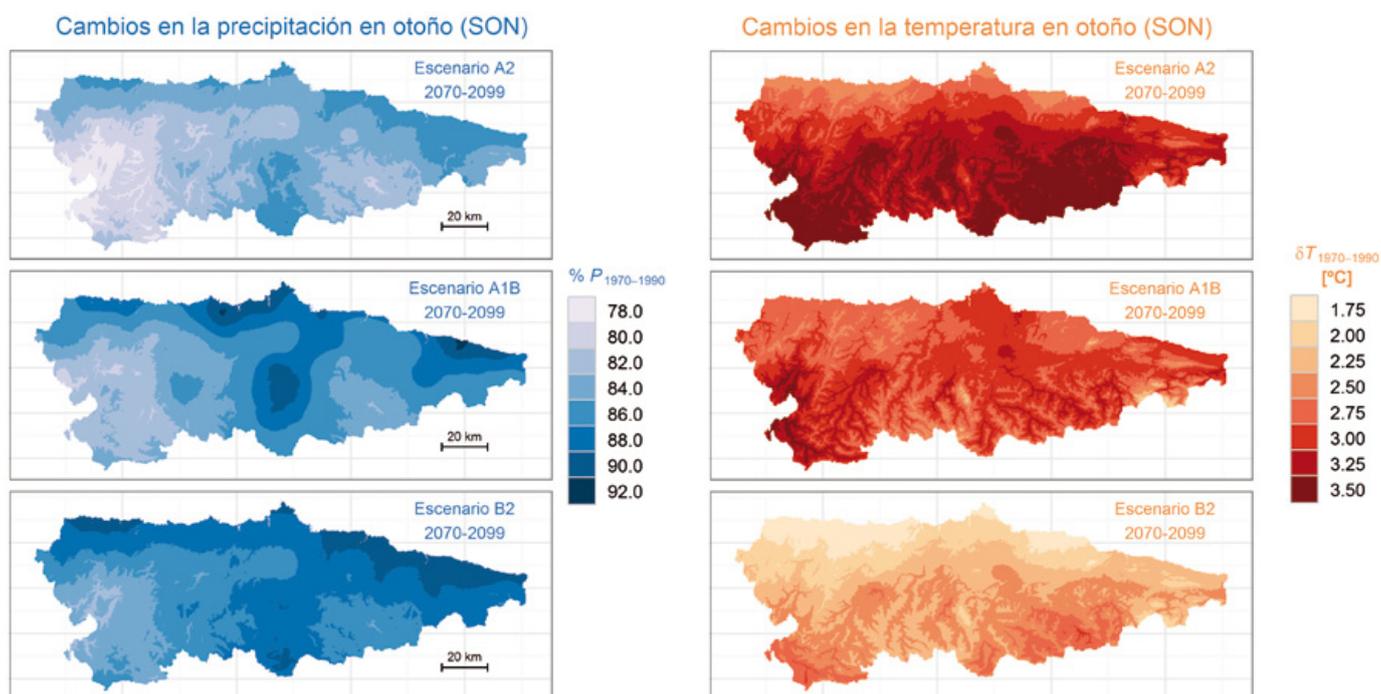


figura F4: Cambios esperados en la precipitación acumulada (%) y en la temperatura media (°C) en otoño para el período 2070–2099. Los mapas corresponden a los incrementos predichos para distintos escenarios (A2, A1B y B2; véase la sección 3). Cada mapa muestra proyecciones conjuntas elaboradas a partir de las proyecciones basadas en varios modelos climáticos regionales cuya resolución se ha aumentado mediante técnicas estadísticas (subsección 3.2). Se presentan el porcentaje de reducción en la precipitación acumulada y la diferencia en temperatura media entre el incremento proyectado para los períodos 2010–2039 y 2040–2069 respecto al promedio estimado para el período 1970–1990 a partir de observaciones recogidas por la red AEMET (subsección 2.4). La precipitación acumulada y la temperatura media son suma y promedio, respectivamente, de los valores estimados para los meses de septiembre (S), octubre (O) y noviembre (N).

Agradecimientos

La elaboración de los escenarios de alta resolución ha sido posible gracias a la disponibilidad de las bases de datos de los proyectos PRUDENCE (prudence.dmi.dk, financiado por la Unión Europea a través del contrato EVK2-CT2001-00132) y ENSEMBLES (ensembles-eu.metoffice.com, financiado a través del Proyecto Integrado del Sexto Programa Marco de la Unión Europea ENSEMBLES, contrato número 505539). El modelo digital de elevaciones global ASTER GDEM está disponible a través del portal de la JSP (www.gdem.aster.ersdac.or.jp) gracias a la colaboración entre el Ministerio de Economía, Comercio e Industria de Japón (METI) y la NASA. También deseamos agradecer la contribución desinteresada de I. Martínez, S. Herrera, T. Iglesias, J. Höfer, M. Volkenandt y J. Álvarez-Sostres.

Bibliografía

Alvarez García, M. A., M. de Castro, R. Cruz Guerrero, A. Gómez Borrego, V. Pérez Muñuzuri & H. Stoll, 2009. *Clima*, capítulo In: CLIMAS, *Evidencias y efectos potenciales del cambio climático en Asturias* [Ricardo Anadón and Nieves Roqueñí (eds.)], páginas 29–65. Consejería de Medio Ambiente, Ordenación del Territorio e Infraestructuras.

Anadón, R. & N. Roqueñí, editores, 2009. *Evidencias y efectos potenciales del cambio climático en Asturias*. Consejería de Medio Ambiente, Ordenación del Territorio e Infraestructuras.

Auguie, B., 2010. *gridExtra: functions in Grid graphics*. R package version 0.7.

Bates, D. & M. Maechler, 2010a. *lme4: Linear mixed-effects models using Eigen and syntax*. R package version 0.999375-35.

Bates, D. & M. Maechler, 2010b. *Matrix: Sparse and Dense Matrix Classes and Methods*. R package version 0.999375-44.

Benestad, R. E., I. Hanssen-Bauer & D. Chen, 2008. *Empirical-Statistical Downscaling*. World Scientific Publishing Co., Singapore, 1 edición.

Böhm, U., M. Kücken, W. Ahrens, A. Block, D. Hauke, K. Keuler, B. Rockel & A. Will, 2006. Ckm - the climate version of Im: Brief description and long-term applications. *COSMO Newsletter*, 6:225–235.

Bonan, G., 2008. *Ecological Climatology. Concepts and Applications*. Cambridge University Press, New York, USA, 2 edición.

Brewer, C., editor, 2005. *Designing Better Maps: A Guide for GIS Users*. ESRI Press, Redlands, California.

Brunet, M., M. J. Casado, M. de Castro, P. Galán, J. A. López, J. M. Martín, A. Pastor, E. Petisco, P. Ramos, J. Ribalaygua, E. Rodríguez, I. Sanz & L. Torres, 2009. Generación de escenarios regionalizados de cambio climático para España. Informe técnico, Agencia Estatal de Meteorología, Ministerio de Medio Ambiente, Madrid.

Brunet, M., P. D. Jones, J. Sigró, O. Saladié, E. Aguilar, A. Moberg, P. M. Della-Marta, D. Lister, A. Walthers & D. López, 2007. Temporal and spatial temperature variability and change over Spain during 1850-2005. *Journal of Geophysical Research*, 112:D12117. doi:10.1029/2006JD008249.

Castro, M., C. Fernández & M. A. Gaertner, 1993. *Description of a mesoscale atmospheric numerical model*, capítulo In: Díaz JL, Lions JL (eds) *Mathematics, Climate and Environment*, páginas 230–253. Rech. Math. Appl. Ser. Mason.

Castro, M. & J. M.-V. y S. Alonso, 2005. *El Clima de España: Pasado, Presente y Escenarios de Clima para el siglo XXI*, capítulo In: *Evaluación Preliminar de los Impactos en España por Efecto del Cambio Climático* [Moreno, J. M. (coord.)], páginas 1–64. Ministerio de Medio Ambiente.

Christensen, J. H., T. R. Carter, M. Rummukainen & G. Amanatidis, 2007a. Evaluating the performance and utility of regional climate models: the prudence project. *Climatic Change*, 81:1–6. doi:10.1007/s10584-006-9211-6.

Christensen, J. H., B. Hewitson, A. Busuioc, A. Chen, X. Gao, I. Held, R. Jones, R. K. Kolli, W.-T. Kwon, R. Laprise, V. M. Rueda, L. Mearns, C. G. Menéndez, J. Räisänen, A. Rinke, A. Sarr & P. Whetton, 2007b. *Regional Climate Projections*, capítulo In: IPCC, *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S, D Qin, M Manning, Z Chen, M Marquis, KB Averyt, M Tignor and HL Miller (eds.)], páginas 847–940. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA.

Collins, M., B. Booth, G. Harris, J. Murphy, D. Sexton & M. Webb, 2006. Towards quantifying uncertainty in transient climate change. *Climate Dynamics*, 27:127–147. ISSN 0930-7575. 10.1007/s00382-006-0121-0.

core members, R., S. DebRoy, R. Bivand & otros, 2010. *foreign: Read Data Stored by Minitab, S, SAS, SPSS, Stata, Systat, dBase, ...* R package version 0.8-41.

Cressie, N. A. C., 1993. *Statistics for Spatial Data (Wiley Series in Probability and Statistics)*. John Wiley & Sons, Chichester, UK, first (revised) edición.

Déqué, M., P. Marquet & R. G. Jones, 1998. Simulation of climate change over Europe using a global variable resolution general circulation model. *Climate Dynamics*, 14:173–189. doi:10.1007/s003820050216.

Döscher, R., U. Willén, C. Jones, A. Rutgersson, H. E. M. Meier, U. Hansson & L. P. Graham, 2002. The development of the coupled regional ocean-atmosphere model rcao. *Boreal Environmental Research*, 7:183–192.

Fox, J. & S. Weisberg, 2010. *car: Companion to Applied Regression*. R package version 2.0-2.

Fujisada, H., G. B. Bailey, G. G. Kelly, S. Hara & M. J. Abrams, 2005. Aster DEM performance. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 43:2707–2714. doi:10.1109/TGRS.2005.847924.

Furrer, R., D. Nychka & S. Sain, 2010. *fields: Tools for spatial data*. R package version 6.3.

Furrer, R. & S. R. Sain, 2010. spam: A sparse matrix R package with emphasis on MCMC methods for Gaussian Markov random fields. *Journal of Statistical Software*, 36(10):1–25.

Gelman, A. & J. Hill, 2007. *Data Analysis Using Regression and Multilevel/Hierarchical Models*. Cambridge University Press, New York, USA, 1 edición.

- Gelman, A., Y.-S. Su, M. Yajima, J. Hill, M. G. Pittau, J. Kerman & T. Zheng, 2010. *arm: Data Analysis Using Regression and Multilevel/Hierarchical Models*. R package version 1.3-06.
- Giorgi, F., M. R. Marinucci & G. T. Bates, 1993a. Development of a second-generation regional climate model (regcm2). part i: Boundary-layer and radiative transfer processes. *Monthly Weather Review*, 121(10):2794–2813. doi:10.1175/1520-0493(1993)121<2794:DOASGR>2.0.CO;2.
- Giorgi, F., M. R. Marinucci, G. T. Bates & G. De Canio, 1993b. Development of a second-generation regional climate model (regcm2). part ii: Convective processes and assimilation of lateral boundary conditions. *Monthly Weather Review*, 121(10):2814–2832. doi:10.1175/1520-0493(1993)121<2814:DOASGR>2.0.CO;2.
- Girvetz, E. H., C. Zganjar, G. T. Raber, E. P. Maurer, P. Kareiva & J. J. Lawler, 2009. Applied climate-change analysis: The climate wizard tool. *PLoS ONE*, 4(12):e8320. doi:10.1371/journal.pone.0008320.
- González-Hidalgo, J. C., M. Brunetti & M. de Luis, 2010a. A new tool for monthly precipitation analysis in Spain: Mopredas database (monthly precipitation trends December 1945–November 2005). *International Journal of Climatology*, (n/a). doi:10.1002/joc.2115.
- González-Hidalgo, J. C., M. Brunetti & M. de Luis, 2010b. Precipitation trends in Spanish hydrological divisions, 1946–2005. *Climate Research*, 43:215–228. doi:10.3354/cr00937.
- Gutiérrez, J. M., S. Herrera, D. San-Martín, C. Sordo, J. J. Rodríguez, M. Frochoso, R. Ancell, J. Fernández, A. S. Cofiño, M. R. Pons & M. A. Rodríguez, 2010. *Escenarios Regionales Probabilísticos de Cambio Climático en Cantabria: Termopluiometría*. Gobierno de Cantabria, Consejería de Medio Ambiente-Universidad de Cantabria, Santander.
- Hadfield, J. D., 2010. MCMC methods for multi-response generalized linear mixed models: The MCMCglmm R package. *Journal of Statistical Software*, 33(2):1–22.
- Hansen, J., M. Sato, R. Ruedy, K. Lo, D. W. Lea & M. Medina-Elizade, 2006. Global temperature change. *Proc Natl Acad Sci USA*, 103:14288–14293. doi:10.1073/pnas.0606291103.
- Hastie, T. J. & R. J. Tibshirani, 1990. *Generalized Additive Models*. Chapman & Hall/CRC Monographs on Statistics & Applied Probability, Boca Raton FL, USA, first edición.
- Herrera, S., L. Fita, J. Fernández & J. M. Gutiérrez, 2010. Evaluation of the mean and extreme precipitation regimes from the ensembles regional climate multimodel simulations over Spain. *Journal of Geophysical Research*, 115:D21117. doi:10.1029/2010JD013936.
- Herrera, S., J. M. Gutiérrez, R. Ancell, M. R. Pons, M. D. Frías & J. Fernández, 2011. Development and analysis of a 50-year high-resolution daily gridded precipitation dataset over Spain (Spain02). *International Journal of Climatology*. doi:10.1002/joc.2256.
- Hurrell, J.W. & R. R. Dickson, 2005. Climatic variability over the North Atlantic. En N. C. Stenseth, G. Ottersen, J. W. Hurrell & A. Belgrano, editores, *Marine Ecosystems and Climate Variation*, páginas 15–31. Oxford University Press, Oxford, UK.
- IPCC, 2007. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S, D Qin, M Manning, Z Chen, M Marquis, K Averyt, M Tignor and H L Miller (eds.)]*. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA.
- Jacob, D., 2001. A note to the simulation of the annual and inter-annual variability of the water budget over the Baltic Sea drainage basin. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 77(1-4):61–73. doi:10.1007/s007030170017.

- Kates, L. & T. Petzoldt, 2007. *proto: Prototype object-based programming*. R package version 0.3-8.
- Kjellström, E., L. Bärring, S. Gollvik, U. Hansson, C. Jones, P. Samuelsson, M. Rummukainen, A. Ullerstig, U. Willén & K. Wyser, 2005. A 140-year simulation of european climate with the new version of the rossby centre regional atmospheric climate model (rca3). Reports Meteorology and Climatology 108, SE-60176, SMHI, Norrköping, Sweden.
- Kraak, M.-J. & F. Ormeling, 2010. *Cartography: Visualization of Geospatial Data*. Pearson Education Ltd, Nueva York, EE.UU, 3 edición. ISBN 978-0-273-72279-3.
- Lange, N., B. P. Carlin & A. E. Gelfand, 1992. Hierarchical bayes models for the progression of hiv infection using longitudinal cd4 t-cell numbers. *Journal of the American Statistical Association*, 87:615–626.
- Lenderink, G., B. van den Hurk, E. van Meijgaard, A. van Ulden & H. Cuijpers, 2003. Simulation of present-day climate in racmo2: first results and model development. Scientific Report TR-252, Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut.
- Longley, P. A., M. F. Goodchild, D. J. Maguire & D.W. Rhind, 2005. *Geographic Information Systems and Science*. John Wiley & Sons, Chichester, UK, 2 edición.
- Lorenz, E., 1963. Deterministic nonperiodic flow. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 20:130–141.
- McGuffie, K. & A. Henderson-Sellers, 2005. *A Climate Modelling Primer*. John Wiley & Sons, Chichester, UK, 3 edición. ISBN 978-0-470-85751-9.
- Michna, P., 2010. *RNetCDF: R Interface to NetCDF Datasets*. R package version 1.2-1.1.
- Moss, R. H., J. A. Edmonds, K. A. Hibbard, M. R. Manning, S. K. Rose, D. P. van Vuuren, T. R. Carter, S. Emori, M. Kainuma, T. Kram, G. A. Meehl, J. F. B. Mitchell, N. Nakicenovic, K. Riahi, S. J. Smith, R. J. Stouffer, A. M. Thomson, J. P. Weyant & T. J. Wilbanks, 2010. The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*, 463:747–756. doi:10.1038/nature08823.
- Nakicenovic, N., G. D. J. Alcamo, B. de Vries, J. Fenhann, S. Gaffin, K. Gregory, A. Grübler, T. Y. Jung, T. Kram, E. L. L. Rovere, L. Michaelis, S. Mori, T. Morita, W. Pepper, H. Pitcher, L. Price, K. Riahi, A. Roehrl, H.-H. Rogner, A. Sankovski, M. Schlesinger, P. Shukla, S. Smith, R. Swart, S. van Rooijen, N. Victor & Z. Dadi, 2000. *Special Report on Emissions Scenarios, Working Group III, Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Neuwirth, E., 2007. *RColorBrewer: ColorBrewer palettes*. R package version 1.0-2.
- Ninyerola, M., X. Pons & J. M. Roure, 2005. *Atlas Climático Digital de la Península Ibérica. Metodología y aplicaciones en bioclimatología y geobotánica*. Universidad Autónoma de Barcelona, Bellaterra, Barcelona. ISBN 932860-8-7.
- Paradis, E., J. Claude & K. Strimmer, 2004. APE: analyses of phylogenetics and evolution in R language. *Bioinformatics*, 20:289–290.
- Pierce, D., 2010. *ncdf: Interface to Unidata netCDF data files*. R package version 1.6.3.
- Plate, T. & R. Heiberger, 2004. *abind: Combine multi-dimensional arrays*. R package version 1.1-0.
- Plummer, D. A., D. Caya, A. Frigon, H. Côté, M. Giguère, D. Paquin, S. Biner, R. Harvey & R. de Elia, 2006. Climate and climate change over north america as simulated by the canadian rcm. *Journal of Climate*, 19(13):3112–3132. doi:10.1175/JCLI3769.1.

- Plummer, M., N. Best, K. Cowles & K. Vines, 2010. *coda: Output analysis and diagnostics for MCMC*. R package version 0.13-5.
- Pope, V. D., M. Gallani, P. R. Rowntree & R. A. Stratton, 2000. The impact of new physical parametrizations in the hadley centre climate model - hadam3. *Climate Dynamics*, 16:123–146. doi:10.1007/s003820050009.
- R Development Core Team, 2010. *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0.
- Rahmstorf, S., A. Cazenave, J. A. Church, J. E. Hansen, R. F. Keeling, D. E. Parker & R. C. J. Somerville, 2007. Recent climate observations compared to projections. *Science*, 316:709. doi:10.1038/463284a.
- Randall, D. A., R. A. Wood, S. Bony, R. Colman, T. Fichefet, J. Fyfe, V. Kattsov, A. Pitman, J. Shukla, J. Srinivasan, R. J. Stouffer & A. Sumi, 2007. *Climate Models and Their Evaluation*, capítulo In: IPCC, *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor and H. L. Miller (eds.)], páginas 589–662. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA.
- Roqueñí, N. & P. Orviz, editores, 2009. *Información Ambiental y Participación Pública. Guía para la aplicación del Convenio de Aarhus en el Principado de Asturias*. Gobierno del Principado de Asturias. Consejería de Medio Ambiente, Ordenación del Territorio e Infraestructuras. Viceconsejería de Medio Ambiente. Oficina para la Sostenibilidad, el Cambio Climático y la Participación.
- Sarkar, D., 2008. *Lattice: Multivariate Data Visualization with R*. Springer, New York. ISBN 978-0-387-75968-5.
- Schaefer, J., R. Opgen-Rhein, & K. Strimmer, 2010. *corpcor: Efficient Estimation of Covariance and (Partial) Correlation*. R package version 1.5.7.
- Schiermeier, Q., 2010. The real holes in climate science. *Nature*, 463:284–287. doi:10.1038/463284a.
- Schlesinger, M. E. & N. Ramankutty, 1994. An oscillation in the global climate system of period 65-70 years. *Nature*, 367:723–726. doi:10.1038/367723a0.
- Stappeler, J., G. Doms, U. Schättler, H. W. Bitzer, A. Gassmann, U. Damrath & G. Gregoric, 2003. Meso-gamma scale forecasts using the nonhydrostatic model Im. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 82:75–96. doi: 10.1007/s00703-001-0592-9.
- Sturtz, S., U. Ligges & A. Gelman, 2005. R2winbugs: A package for running winbugs from r. *Journal of Statistical Software*, 12(3):1–16.
- Therneau, T. & T. Lumley, 2009. *survival: Survival analysis, including penalised likelihood*. R package version 2.35-8.
- Trenberth, K. E., 1993. *Climate System Modeling*. Cambridge University Press., ISBN 978-0-521-43231-3.
- van den Boogaart, K. G., 2010. *tensorA: Advanced tensors arithmetic with named indices*. R package version 0.35.
- van der Linden, P. & J. F. B. Mitchell, 2009. Ensembles: Climate change and its impacts: Summary of research and results from the ensembles project. Scientific report, Met Office Hadley Centre, FitzRoy Road, Exeter EX1 3PB, UK.
- Venables, W. N. & B. D. Ripley, 2002. *Modern Applied Statistics with S*. Springer, New York, fourth edición. ISBN 0-387-95457-0.
- Vidale, P. L., D. Lüthi, C. Frei, S. I. Seneviratne & C. Schär, 2003. Predictability and uncertainty in a regional climate model. *Journal of Geophysical Research*, 108(D18):4586. doi:10.1029/2002JD002810.

von Storch, H. & F. W. Zwiers, 2001. *Statistical Analysis in Climate Research*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, first (corrected) edición.

Wickham, H., 2007. Reshaping data with the reshape package. *Journal of Statistical Software*, 21(12).

Wickham, H., 2009. *ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis*. Springer New York. ISBN 978-0-387-98140-6.

Wickham, H., 2010. *plyr: Tools for splitting, applying and combining data*. R package version 1.2.1.

Williams, D. N., R. Ananthakrishnan, D. E. Bernholdt, S. Bharathi, D. Brown, M. Chen, A. L. Chervenak, L. Cinquni, R. Drach, I. T. Foster, P. Fox, D. Fraser, J. García, S. Hankin, P. Jones, D. E. Middleton, J. Schwidder, R. Schweitzer, R. Schuler, A. Shoshani, F. Siebenlist, A. Sim, W. G. Strand, M. Su & N. Wilhelmi, 2008. The earth system grid: enabling access to multimodel climate simulation data. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 90:195–205. doi:10.1175/2008BAMS2459.1.

Wood, S. N., 2006. *Generalized Additive Models: An Introduction with R*. Chapman & Hall/CRC Texts in Statistical Science, Boca Raton FL, USA, first edición.

Wood, S. N., 2008. Fast stable direct fitting and smoothness selection for generalized additive models. *J R Stat Soc B*, 70:495518. doi:10.1111/j.1467-9868.2007.00646.x.

