



Escenarios de Cambio Climático de Alta Resolución sobre el Principado de Asturias

Informe metodológico y manual de usuario
del portal web para la consulta de los datos

Informe técnico
[Noviembre de 2025]



Principado de
Asturias



Con la colaboración de:







Escenarios de Cambio Climático de Alta Resolución sobre el Principado de Asturias

Informe metodológico y manual de usuario del portal web para la consulta de los datos

Informe técnico
[Noviembre de 2025]

Fernando G. Taboada ^{1,5}, Sixto Herrera García ^{2,6}, Ricardo Anadón Álvarez³, Miguel Ángel Álvarez García⁴, Arturo Colina Vuelta⁴, Juan Carlos Fernández Iglesias⁴, and Carlos Guardado Fernández³

¹ Centro Oceanográfico de Gijón, Instituto Español de Oceanografía-CSIC

² Depto. Matemática Aplicada y Ciencias de la Computación, Universidad de Cantabria.

³ Depto. Biología de Organismos y Sistemas, Universidad de Oviedo

⁴ Instituto de Recursos Naturales y Ordenación del Territorio — INDUROT, Universidad de Oviedo

⁵ fgtaboada@gmail.com – ⁶ sixto.herrera@unican.es



Con la colaboración de:



Taboada, F. G., Herrera García, S., Anadón Álvarez, R., Álvarez García, M. Á., Colina Vuelta, A., Fernández Iglesias, J. C., y Guardado Fernández, C. (2025). *Elaboración de escenarios de cambio climático de alta resolución sobre el Principado de Asturias: Informe metodológico y manual de usuario del portal web para la consulta de los datos* [Informe técnico]. Universidad de Oviedo Principado de Asturias.

El presente estudio ha sido promovido por la Cátedra de Cambio Climático de la Universidad de Oviedo (CuCC).

En su realización han participado miembros de la CuCC y del Centro Oceanográfico de Gijón, Instituto Español de Oceanografía-CSIC, del Depto. Matemática Aplicada y Ciencias de la Computación de la Universidad de Cantabria, del Depto. Biología de Organismos y Sistemas de la Universidad de Oviedo y del Instituto de Recursos Naturales y Ordenación del Territorio de la Universidad de Oviedo.

La CuCC nace de la colaboración entre la Administración del Principado de Asturias, a través de Dirección General de Medio Ambiente de la Consejería de Movilidad, Medio Ambiente y Gestión de Emergencias, y la Universidad de Oviedo, para la formación, la investigación y la difusión relativas a los retos, causas, impactos y riesgos del cambio climático en Asturias.

Imagen de portada generada parcialmente mediante IA (ChatGPT, OpenAI).

Diseño final: elaboración propia.

© 2025. CC BY-NC-ND 4.0

Índice

1	Introducción y antecedentes del estudio	1
2	Adquisición y análisis de series históricas de datos meteorológicos	4
2.1	Estaciones de precipitación y temperatura	4
3	Desarrollo del modelo de clima base de alta resolución (1km x 1km)	12
3.1	Control de calidad de la red de observaciones	12
3.2	Modelo orográfico	14
3.3	Modelos de regresión e interpolación	15
4	Índices climáticos: extremos	17
4.1	Extremos de precipitación y sequía	20
4.2	Extremos fríos y de calor	24
4.3	Extremos de temperatura	28
5	Proyecciones calibradas de cambio climático CORDEX	36
5.1	Búsqueda y selección de simulaciones EURO-CORDEX	38
5.2	Regionalización	41
6	Productos generados	43
6.1	Climatología base	43
6.2	Simulaciones durante el periodo histórico y proyecciones	44
6.3	Productos precalculados	45
7	Guía de usuario y preguntas frecuentes	47
7.1	Acceso a los datos	47
7.2	Condiciones de uso de los datos	47
7.3	Corrección de sesgos de los modelos	47
7.4	Tratamiento de la incertidumbre	47
7.5	Selección de subconjuntos de modelos	48
8	Portal interactivo para el análisis y divulgación en línea	49
8.1	Servidor de datos de la CuCC: cucc-uodata.es	49
8.1.1	Pila Tecnológica actual	49
8.1.2	<i>Backend</i> (lado del Servidor)	49
8.1.3	<i>Frontend</i> (lado del Cliente)	50
8.1.4	Base de datos principal (<i>Postgres</i>)	50
8.1.5	Base de datos espacial (<i>PostGIS</i>)	51
8.1.6	Archivos <i>NetCDF</i>	51
8.1.7	<i>GeoServer</i> (Servidor de Mapas Web)	53
8.1.8	Servidor Web de Catálogos de Datos (<i>TDS</i>)	53
8.2	Portal Web: cucc-uodata.es	53
8.2.1	Estructura	53
8.2.2	Inicio	55
8.3	Atlas del Cambio Climático en Asturias 2011	55
8.4	Atlas del Cambio Climático en Asturias 2024	60
8.4.1	Estaciones meteorológicas	60
8.4.2	Series temporales AEMet	61
8.4.3	Diagramas de Walter y Lieth	66
8.4.4	Climatología Base	69
8.4.5	Proyecciones	70
8.5	Visor de archivos <i>NetCDF</i>	71
9	Discusión y consideraciones finales	74

Índice de tablas

Tabla 1.	Índices climáticos de extremos	19
Tabla 2.	Proyecciones regionales EURO-CORDEX consideradas en el presente informe	40
Tabla 3.	Pila tecnológica	58
Tabla 4.	Variables e índices climatológicos almacenados en los archivos NetCDF	59

Índice de figuras

Figura 1.	Ilustración del proceso de regionalización	3
Figura 2.	Aproximación general del proyecto	4
Figura 3.	Mapas topográfico y de distancia a la costa	5
Figura 4.	Distribución espacial de las estaciones meteorológicas	6
Figura 5.	Número de estaciones meteorológicas activas entre 1950 y 2023	7
Figura 6.	Densidad de estaciones meteorológicas y topografía	8
Figura 7.	Densidad de estaciones meteorológicas y topografía (área de estudio)	9
Figura 8.	Dispersión espacial de las estaciones meteorológicas de precipitación y temperatura	10
Figura 9.	Dispersión espacial de las estaciones meteorológicas de precipitación y temperatura (área de estudio)	11
Figura 10.	Número de estaciones por año de precipitación y temperaturas	12
Figura 11.	Red de estaciones meteorológicas consideradas	14
Figura 12.	Correspondencia entre observaciones y los datos interpolados	17
Figura 13.	Relación entre los índices de extremos	18
Figura 14.	Relación entre los índices de extremos de precipitación	20
Figura 15.	Relación entre los índices de extremos de precipitación	25
Figura 16.	Relación entre los índices de extremos de temperatura	29
Figura 17.	Concentraciones de CO ₂ en las trayectorias de concentración representativas	38
Figura 18.	Búsqueda de datos en el nodo ESGF	39
Figura 19.	Tendencias en precipitación y temperatura regionalizadas a partir del experimento COR-DEX HISTORICAL, 1979–2005	42
Figura 20.	Estructura jerárquica del portal CuCC	54
Figura 21.	Esquema de distribución de elementos principales del portal CuCC	54
Figura 22.	Página de Inicio y acceso a productos del portal CuCC	55
Figura 23.	Antigua web Atlas de Cambio Climático de Asturias	57
Figura 24.	Atlas del Cambio Climático en Asturias 2024	60
Figura 25.	Página de presentación del Atlas 2024 y accesos al portal CuCC	61
Figura 26.	Página de Estaciones meteorológicas y accesos	62
Figura 27.	Partes de la página de Series temporales AEMet	64
Figura 28.	Ejemplo de gráfica de Series temporales	65
Figura 29.	Página de Diagramas de Walter y Lieth	67
Figura 30.	Detalle del diagrama de Walter y Lieth	69
Figura 31.	Desplegables y subniveles en la página de climatologías base	70
Figura 32.	Ejemplo de previsualización de miniaturas en la página de climatologías base	71
Figura 33.	Segundo ejemplo de previsualización de miniaturas en la página de climatologías base	71
Figura 34.	Ejemplo de previsualización de miniaturas en la página de proyecciones	72
Figura 35.	Vista general y elementos principales del visor de mapas	73

Resumen ejecutivo

Este informe proporciona una descripción detallada de la metodología empleada en la *Elaboración de Escenarios de Cambio Climático de Alta Resolución sobre el Principado de Asturias* [CuCC, 2024], publicada en 2024 a través del portal de la Cátedra de Cambio Climático de la Universidad de Oviedo (CuCC, <https://cucc-uo.es>). También incluye la metodología de las posteriores tareas de mantenimiento, actualización y ampliación completadas hasta octubre de 2025. El equipo de la Cátedra de Cambio Climático de la Universidad de Oviedo (CuCC, <https://cucc-uo.es>) ha analizado millones de registros procedentes de las bases de datos meteorológicas recopilados por la Agencia Estatal de Meteorología (Aemet, www.aemet.es), así como simulaciones de clima de alta resolución desarrolladas en el contexto de la iniciativa **EURO-CORDEX** para regionalizar los escenarios de cambio climático desarrollados en la 5ª Fase del Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados del IPCC (**CMIP5**), a la espera de las proyecciones regionalizadas a partir de la nueva generación de proyecciones globales del 6º Informe del IPCC (**CMIP6**). El punto de partida ha consistido en el desarrollo de un modelo de clima base de alta resolución usando métodos geoestadísticos a partir de las observaciones registradas por la red de estaciones meteorológicas de AEMet. Dicho modelo ha permitido reconstruir las condiciones de precipitación y temperatura en Asturias y su entorno a escala diaria y una resolución espacial de 1 km entre 1970 y 2022. A partir del modelo de clima base, se ha realizado la regionalización de los experimentos de simulación de la iniciativa **EURO-CORDEX**, también con una resolución espacial de 1 km y con frecuencia diaria. Estos experimentos consideran escenarios alternativos de emisiones asociados a distintas estrategias de uso humano de la energía y del territorio, lo que permite evaluar el impacto de distintos supuestos de acción política sobre el impacto del cambio climático en la región asturiana. De hecho, se presta particular atención al cálculo e interpretación de índices de extremos climáticos. Este informe detalla además una estrategia para la divulgación y transferencia de resultados a la sociedad que abarca desde el ámbito docente y científico hasta la colaboración activa con empresas y administración para la evaluación de distintas alternativas de mitigación y adaptación, que se basa en el desarrollo de una pila tecnológica que incluye una base de datos geoespacial, un servidor público de datos, y un portal web con gráficos y mapas interactivos. Estas herramientas permiten a los usuarios la exploración, análisis y explotación de los resultados obtenidos hasta la fecha. Estas actividades se alinean con los objetivos generales de la **CuCC**: avanzar en la formación y la investigación sobre los efectos del calentamiento global en Asturias y proporcionar soporte técnico y científico a la acción climática.

Palabras clave: Asturias, Cambio Climático, Escenarios, Extremos, Regionalización

1. Introducción y antecedentes del estudio

Este informe proporciona una descripción detallada de la metodología empleada en la *Elaboración de Escenarios de Cambio Climático de Alta Resolución sobre el Principado de Asturias* [CuCC, 2024], publicada en línea en diciembre de 2024 a través del portal de la Cátedra de Cambio Climático de la Universidad de Oviedo (CuCC, <https://cucc-uo.es>). También incluye la metodología de las posteriores tareas de mantenimiento, actualización y ampliación completadas hasta octubre de 2025. Se trata de una serie de trabajos planteados por un equipo de la CuCC cuyo objetivo es el desarrollo y difusión de bases de datos que faciliten el análisis del impacto del cambio climático en el Principado de Asturias. Estos trabajos se han desarrollado en colaboración con personal de la Consejería de Transición Ecológica, Industria y Desarrollo Económico del Principado de Asturias (<https://medioambiente.asturias.es>), y de la Delegación Territorial de la Agencia Estatal de Meteorología (Aemet, www.aemet.es) en el Principado de Asturias.

El trabajo que se describe a continuación incluye el desarrollo de una climatología base diaria para las principales variables climatológicas durante el periodo 1970–2022, la regionalización de proyecciones basadas en experimentos de simulación con modelos regionales del clima para lo que queda de este siglo (2025–2100), y el desarrollo de un portal web que facilita tanto la consulta y exploración de las bases de datos por parte de personal técnico, como la difusión de los principales resultados al público en general. El presente documento complementa el informe CuCC [2024], con respecto al que proporciona una descripción más detallada de diversos aspectos técnicos, así como de decisiones concretas sobre la publicación de los principales resultados en línea, concretando algunos aspectos que únicamente habían quedado esbozados en el informe anterior. Pese a que es inevitable que exista cierto grado de solapamiento entre ambos documentos, se ha procurado reducir posibles redundancias. Este documento combina también el carácter técnico con un espíritu pedagógico y divulgativo para permitir que el documento sea también accesible y provechoso para un público no especializado.

Justificación — Al igual que en el informe CuCC [2024], este trabajo nace de la necesidad de comprender y anticipar los efectos del cambio global a escala regional. Se trata de una cuestión que genera interés tanto desde el punto de vista científico como en un contexto puramente aplicado. Por un lado, tanto la reconstrucción y análisis de los cambios que se han producido en el clima, como el desarrollo de escenarios de cambio climático a futuro, exigen la revisión y evaluación del estado del arte en el análisis y regionalización de datos climáticos. Además, plantea el reto técnico de trabajar con grandes bases de datos, tanto durante la fase de análisis como en la difusión de resultados. Por otra parte, la información generada al realizar este tipo de análisis constituye una base de inteligencia climática que permite el desarrollo de aplicaciones en un amplio abanico de sectores, desde los usos del territorio a la sanidad pública. Ambos aspectos, tanto la generación de conocimiento como posibilitar su uso para una mejor toma de decisiones, cobran urgencia ante la constatación de que el cambio climático representa uno de los principales retos ambientales a los que se enfrenta la humanidad en su conjunto.

Los informes publicados por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático de la Organización de las Naciones Unidas no dejan margen de duda sobre el papel de la actividad humana en la alteración del sistema climático [IPCC, 2023]. El exceso de emisiones de gases de efecto invernadero (GEIs) y los cambios en el uso del territorio han alterado el balance radiactivo del planeta hasta el punto de provocar un aumento de 1,1 °C en la temperatura en superficie a escala global con respecto al periodo preindustrial (1850-1900). Estos cambios afectan al sistema climático en conjunto y se manifiestan a través de cambios en los patrones de precipitación y disponibilidad de recursos hídricos; una mayor frecuencia e intensidad de perturbaciones como fuegos, inundaciones y tormentas; la disminución de precipitaciones en forma de nieve y la reducción de casquetes polares y glaciares; el aumento del nivel del mar; y la pérdida de biodiversidad.

El último informe del IPCC [2023] también ha demostrado que los cambios en el clima global debidos al forzamiento antropogénico se manifiestan de forma diferente a nivel regional y local. De hecho, la península ibérica destaca como una de las zonas más afectadas por el incremento de los eventos de temperaturas extremas y por el cambio en el régimen de precipitaciones. Pese a que no se espera una disminución significativa en la precipitación anual total,

sí se proyectan cambios en su estacionalidad y severidad, y también una mayor incidencia de periodos de sequía. Ambas proyecciones son consistentes con los cambios observados durante las últimas décadas tanto en temperatura como en precipitación. Estos cambios afectan de manera transversal a la sociedad, con impactos que abarcan desde el deterioro de la calidad del aire y la salud de la población, hasta actividades productivas básicas como agricultura, ganadería y pesca, sin olvidar el sector secundario o el turismo.

La necesidad de incorporar los efectos del cambio global en la planificación y desarrollo de políticas de mitigación y adaptación implica disponer de proyecciones para distintos escenarios de cambio climático que aporten información adecuada para la toma de decisiones. El reto del cambio climático exige además la formación y concienciación del conjunto de la sociedad ante los retos que éste plantea. La participación pública en el proceso de toma de decisiones es imprescindible para resolver problemas que exigen el compromiso y cooperación del conjunto de la sociedad. Este proceso requiere el desarrollo y exploración de nuevos medios y estrategias de comunicación para la difusión a la sociedad de informaciones complejas que, en muchos casos, no están exentas de incertidumbre.

Los informes del IPCC proporcionan acceso de manera libre a los resultados de modelos globales de simulación para distintos escenarios de emisiones, dichas proyecciones consideran unidades de terreno con una extensión de varios miles de kilómetros cuadrados. Pese a que esta resolución es adecuada para el estudio del cambio climático a escala global y continental, el propio IPCC destaca la importancia de reducir la escala —aumentar la resolución— de los modelos para su aplicación a nivel regional y local [Doblas-Reyes *et al.*, 2023]. Las predicciones de cambio climático a escala regional incorporan aspectos como una topografía más fina, o la presencia de masas de agua, que condicionan la meteorología y el clima a escala local, por lo que facilitan tanto la planificación de políticas de adaptación y mitigación como la visualización del problema por la sociedad.

Objetivos — El equipo de la **CuCC** plantea responder a la creciente demanda de información climática de calidad contrastada con una resolución espacial y temporal adecuada para analizar el impacto del cambio climático en Asturias. Para ello, propone un análisis de los cambios ocurridos durante las últimas décadas y una regionalización de las proyecciones a futuro bajo escenarios alternativos de desarrollo socioeconómico, de acuerdo con las rutas de concentración utilizadas por el IPCC (Figura 1). El análisis incluye la detección y atribución de los cambios observados en distintas variables climáticas y sus tendencias a futuro. Estas actividades se alinean con los objetivos del Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático (**PNACC**) y, sobre todo, complementa las iniciativas y productos que está desarrollando la Plataforma Temática Interdisciplinar para el clima y los servicios climáticos (**PTI+ Clima**).

El objetivo principal de la **CuCC** es evaluar y dar a conocer cómo el cambio climático ha alterado el clima de Asturias, así como desarrollar y divulgar distintos escenarios de cambio climático a escala regional y local para el Principado de Asturias. Este documento detalla la estrategia seguida a la hora de realizar un primer conjunto de análisis centrado en el estudio de los cambios en precipitación y temperatura sobre la superficie continental de Asturias. Los siguientes apartados describen los avances en las tareas planteadas para completar estos análisis, que comprenden (Figura 2):

1. La adquisición y análisis de series históricas de datos meteorológicos.
2. La reconstrucción de las condiciones climáticas en Asturias durante las últimas décadas mediante técnicas de interpolación geoestadísticas.
3. La calibración de las simulaciones de cambio climático desarrolladas en el contexto del proyecto EURO-CORDEX con modelos regionales del clima a partir de los modelos globales del clima de la 5ª Fase del Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados (**CMIP5**), que se analizan en los distintos informes del IPCC (AR5 y AR6), alineando de este modo las actividades de la **CuCC** con las iniciativas nacionales e internacionales.
4. El cálculo y análisis de índices climáticos para la caracterización de extremos de precipitación y sequía, frío y calor, y temperatura, de acuerdo al grupo de expertos **ETCCDI** (CCI/CLIVAR/JCOMM Expert Team on Climate Change Detection and Indices).

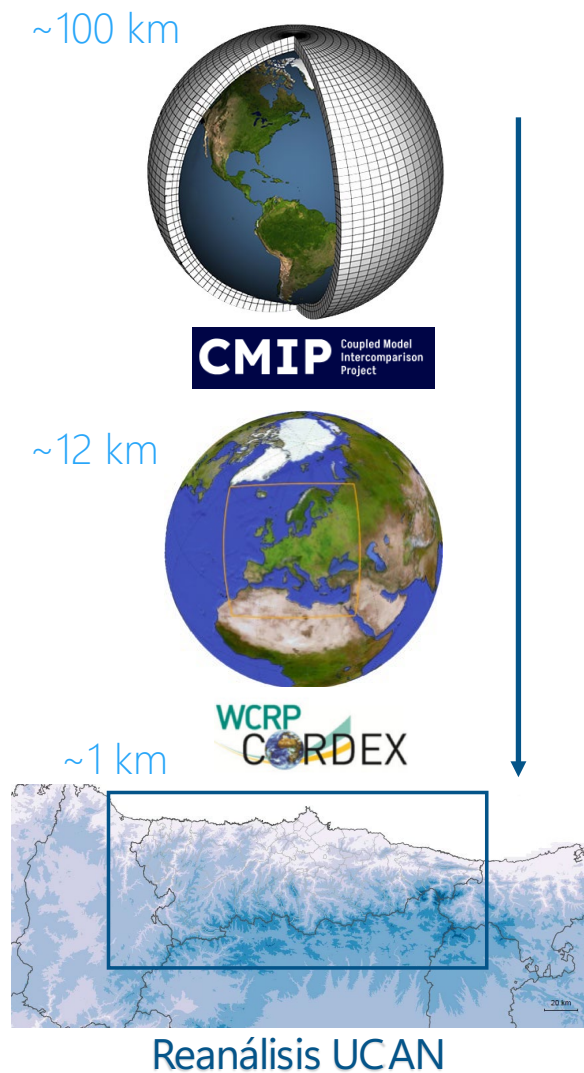


Figura 1: Ilustración del proceso de generación de escenarios de cambio climático para Asturias a través de la regionalización de proyecciones de la iniciativa EURO-CORDEX basadas en el proyecto CMIP del IPCC. La regionalización es posible gracias al desarrollo previo de un modelo de clima base denominado Reanálisis UCAN. El aumento de resolución a través de métodos dinámicos y estadísticos permite desarrollar proyecciones adecuadas para apoyar la evaluación de impactos y la toma de decisiones.

5. El análisis y síntesis de resultados, así como su diseminación a través de distintos medios (informes, presentaciones y colaboraciones con prensa) dirigidos tanto al público general como a gestores y empresas, y a científicos interesados en contribuir al análisis de los impactos que ocasiona o a la evaluación de posibles acciones de mitigación y adaptación al cambio.
6. El desarrollo de una base de datos geográfica en línea que permita la explotación de la información generada durante el proyecto por usuarios avanzados.
7. El desarrollo de un portal web para la divulgación de resultados que permite el acceso a resúmenes como mapas con promedios climatológicos y series temporales promediadas para distintas demarcaciones administrativas u otras áreas de interés como espacios protegidos.



Figura 2: Aproximación general del proyecto. Ilustración de los pasos seguidos para el desarrollo de los escenarios de alta resolución de cambio climático para Asturias.

2. Adquisición y análisis de series históricas de datos meteorológicos

2.1. Estaciones de precipitación y temperatura

La Agencia Estatal de Meteorología (AEMet, www.aemet.es) es la institución encargada de la recogida, control de calidad y distribución de los datos obtenidos por las diferentes redes y sistemas de observación meteorológica existentes a nivel nacional. Con el objetivo de facilitar el acceso de los investigadores de la Cátedra de Cambio Climático de la Universidad de Oviedo (CuCC) a estas bases de datos, durante los meses de julio y agosto de 2023, el Servicio de Calidad del Aire y Cambio Climático de la Consejería de Transición Ecológica, Industria y Desarrollo Económico del Principado de Asturias, a través de la Dirección General de Calidad Ambiental, estableció un convenio de colaboración con AEMet a través de su Delegación Territorial en Asturias. Los trabajos descritos en este informe se han desarrollado al amparo de este convenio. Hasta el momento se han completado tres solicitudes de prestaciones meteorológicas para disponer de las siguientes series temporales:

- Resúmenes diarios para estaciones de precipitación y temperatura
- Resúmenes mensuales para estaciones de precipitación y temperatura
- Datos de vientos, insolación, radiación solar y espesor de la capa de nieve

El Apéndice A del informe CuCC [2024] proporciona un listado detallado con el nombre y localización de cada una de las estaciones para las que se dispone de información, junto con las variables auxiliares y meteorológicas y sus unidades, además del periodo con observaciones y el porcentaje de fechas con datos.

En todos los casos, se solicitaron datos para Asturias y su entorno desde 1950 hasta la actualidad, definiendo como entorno un área de estudio delimitada por las coordenadas [8,0°W 42,4°N] y [3,7°W 44,0°N] (Figura 3). En términos geográficos, estas coordenadas corresponden de manera aproximada a la longitud en la que se sitúan los municipios Ferrol y Santander, mientras que, en el eje latitudinal, abarcaría desde Astorga por el sur hasta la línea de costa cantábrica. Esta región proporciona un contexto adecuado para mejorar la descripción y poder entender los cambios ocurridos cerca de los límites de Asturias. Concretamente, proporciona la información climática disponible en un margen de 50 km alrededor de la franja montañosa que domina la frontera sur de la comunidad. La zona de estudio se acota aún más en el eje longitudinal a la hora de presentar los resultados. De esta manera se evita la mayor incertidumbre de las estimas en las zonas cercanas a los límites del perímetro inicial, restringiendo el área con resultados utilizables

a las coordenadas [7,3°W 42,4°N] y [4,4°W 44,0°N].

AEMet ha cedido los datos al Principado de Asturias y bajo convenio, permitiendo el acceso y análisis por parte de los miembros del equipo de investigación del proyecto. Los datos brutos no están disponibles a otros usuarios dentro de la Universidad, pero sí lo están los productos derivados de los análisis descritos en este documento. En todos los casos, es necesario incluir el reconocimiento explícito «**Datos originales proporcionados por AEMet**».

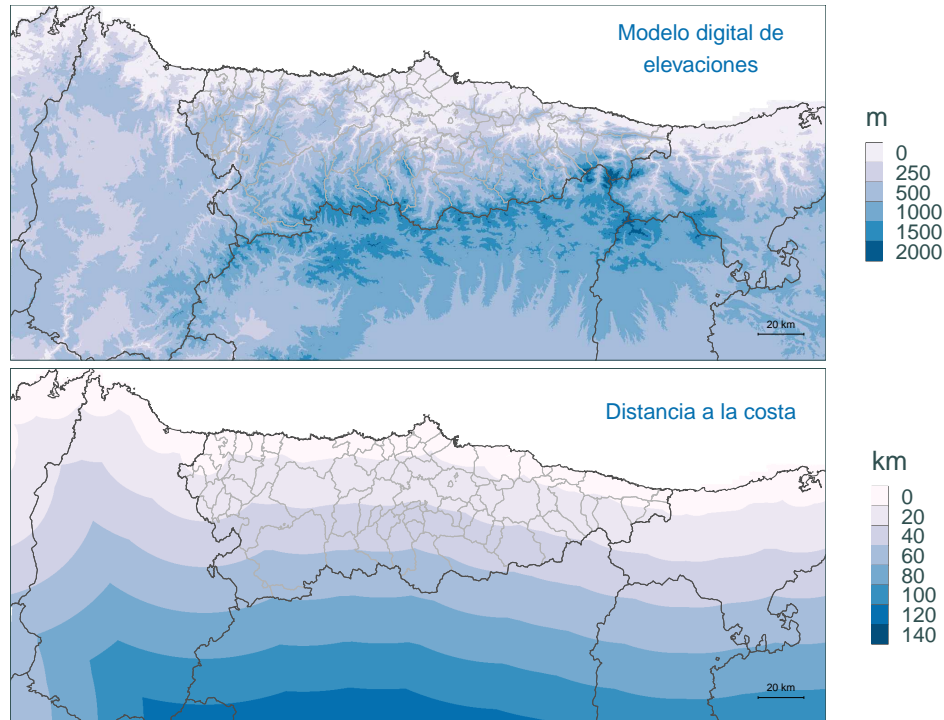


Figura 3: Mapas topográfico y de distancia a la costa del área de estudio. Fuente: [IGN](#), Modelo Digital del Terreno MDT02.

Las dos primeras solicitudes enumeradas anteriormente proporcionan las observaciones de las estaciones meteorológicas de la red de observación en superficie de AEMet. Las observaciones incluyen medidas *in situ* de precipitación acumulada (en principio, registradas a las 7 de la mañana en días consecutivos), y medidas de la temperatura mínima y máxima diaria a la sombra, a partir de las que se estima la temperatura media diaria como promedio simple. Históricamente, estas medidas se han registrado por observadores responsables de operar y mantener pluviómetros y termómetros de máximas y mínimas, aunque en la actualidad la mayoría de las estaciones de la red de observación en superficie de AEMet cuentan con sensores que miden y transmiten al instante las medidas meteorológicas que recogen de manera automática. Estas estaciones están equipadas con cubetas con registro digital del volumen de precipitación o con sensores que miden indirectamente la precipitación sin acumulación, y termómetros eléctricos. Estos sensores están conectados a una unidad de procesado y a un módem a través del que se transmite la información. El personal de AEMet reúne toda esta información, la cura y la ordena en un formato que facilita su procesamiento utilizando herramientas de software informático.

En conjunto, se han analizado más de 20 millones de registros diarios procedentes de 685 estaciones de precipitación y 323 estaciones de temperatura de la red principal y secundaria de observación en superficie de AEMet (Figura 4). Como puede apreciarse en la Figura 5, el número de estaciones ha fluctuado a lo largo del tiempo; además, los análisis han incorporado tanto registros diarios como registros de valores acumulados o medios con frecuencia mensual. Se han aplicado técnicas estándar para evitar sesgos en las medidas y para agrupar estaciones situadas en una misma localidad y que hayan tomado medidas de manera consecutiva para componer series con la mayor extensión posible.

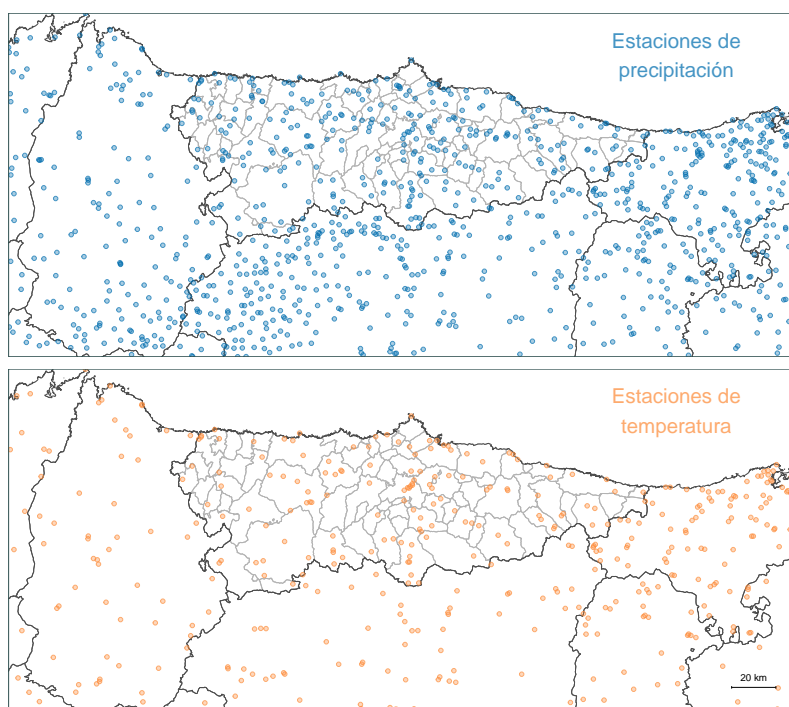


Figura 4: Distribución espacial de las estaciones meteorológicas de precipitación (panel superior) y temperatura (panel inferior) pertenecientes a la red de observación de AEMet en la zona de estudio que han estado en funcionamiento en algún momento durante el periodo 1950–2023.

Concretamente, se han combinado los registros procedentes de estaciones situadas a una distancia menor de 100 m. Para los cálculos de promedios a largo plazo [valores normales o climatologías] y tasas de cambio en el tiempo [tendencias], se han considerado únicamente estaciones con un mínimo de 20 años completos de observaciones, entendiendo como año completo aquél en que haya observaciones durante más de la mitad de los días de cada uno de los meses del año.

En Asturias, la red incluye en la actualidad alrededor de 80 estaciones de precipitación y 50 estaciones de temperatura (Figura 5). La cobertura de la red en Asturias es en general muy buena a partir de 1970 aunque, desde mediados de los años 90, el número de estaciones de precipitación ha ido disminuyendo. Frente a la temperatura, la precipitación requiere una red de observaciones más densa debido a que posee una estructura espacial compleja con grandes variaciones en distancias de unos pocos kilómetros, muchas veces asociadas a la orografía. Además, detrás de la aparente densidad de estaciones señaladas en la Figura 4, destaca la escasez de estaciones en zonas elevadas; prácticamente no se dispone de datos por encima de 1500 m (Figura 6). Esta es una característica común al resto del área de estudio (Figura 7). Otra manera de apreciar los cambios en la densidad de estaciones es a través del examen de su dispersión espacial. La Figura 8 muestra cómo ha ido cambiando a lo largo del tiempo la distancia más cercana entre pares de estaciones de la red. Se puede apreciar que la distancia media al vecino más cercano está alrededor de 5 km para la precipitación y por debajo de 10 km para la temperatura, especialmente a partir de 1970. Estos valores aumentan ligeramente al considerar el conjunto del área de estudio (Figura 8), lo que es razonable al considerar que la mayor complejidad del relieve de Asturias impone la necesidad de una red de observación con una distribución espacial más densa.

Debido a que la cobertura de la red de observación es más homogénea a partir de 1970, los análisis de series históricas se han centrado principalmente en el periodo 1970–2022 y en las tendencias observadas en precipitación y temperatura durante los últimos cincuenta años en Asturias. No obstante, se han analizado todas las observaciones disponibles para el periodo 1950–2022. Estas observaciones permiten extender los análisis hasta la década de los años 60 del siglo pasado, incluyendo la reconstrucción de las condiciones climáticas en Asturias mediante el desarrollo de un

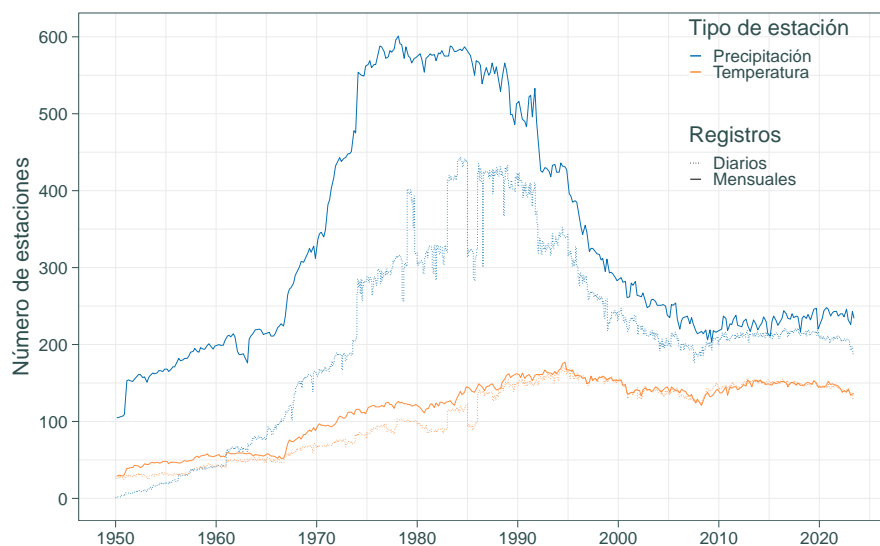


Figura 5: Número de estaciones meteorológicas de AEMet activas en el área de estudio entre 1950 y 2023. Para algunas estaciones solo se cuenta con registros mensuales, especialmente al principio del periodo de estudio, aunque, como se describe más adelante, el análisis consideró ambos tipos de datos. Las tendencias son similares al considerar únicamente las estaciones localizadas dentro de Asturias.

modelo de clima base (sección §3). Dicha extensión ha permitido estimar y comparar las condiciones climáticas para los periodos de referencia fijados por la Organización Meteorológica Mundial y el IPCC (1961–1990 y 1991–2020).

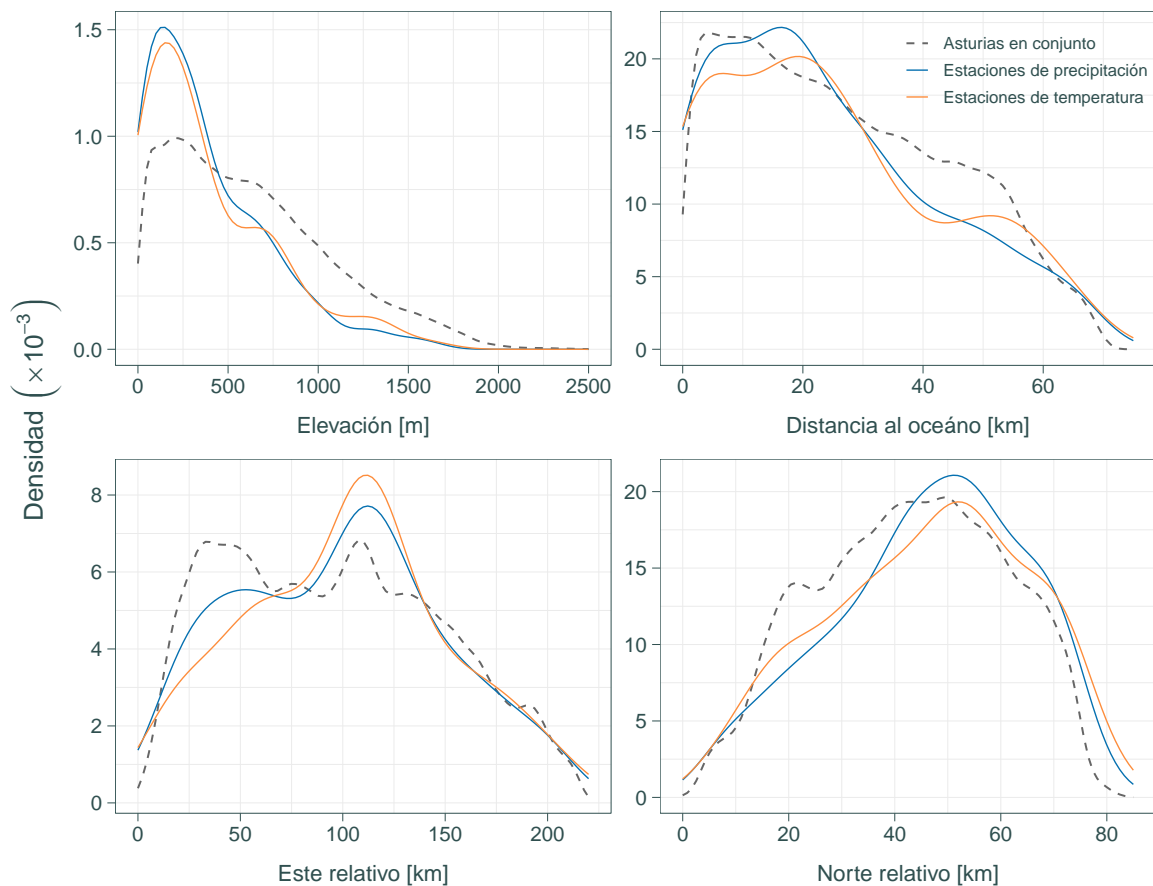


Figura 6: Densidad de estaciones meteorológicas respecto a la distribución de distintas características topográficas del territorio asturiano: la elevación sobre el nivel del mar y la distancia a la línea de costa (Figura 3), y la coordenada geográfica relativa en los ejes Oeste-Este y Sur-Norte. Si la cobertura de la red de observación AEMet correspondiera de manera perfecta a las características del territorio, las estimas de densidad basadas en las características de las estaciones coincidirían con las del conjunto de Asturias (línea gris discontinua). La densidad se estimó mediante un núcleo gaussiano para una secuencia de 101 puntos sobre el rango de cada una de las variables.

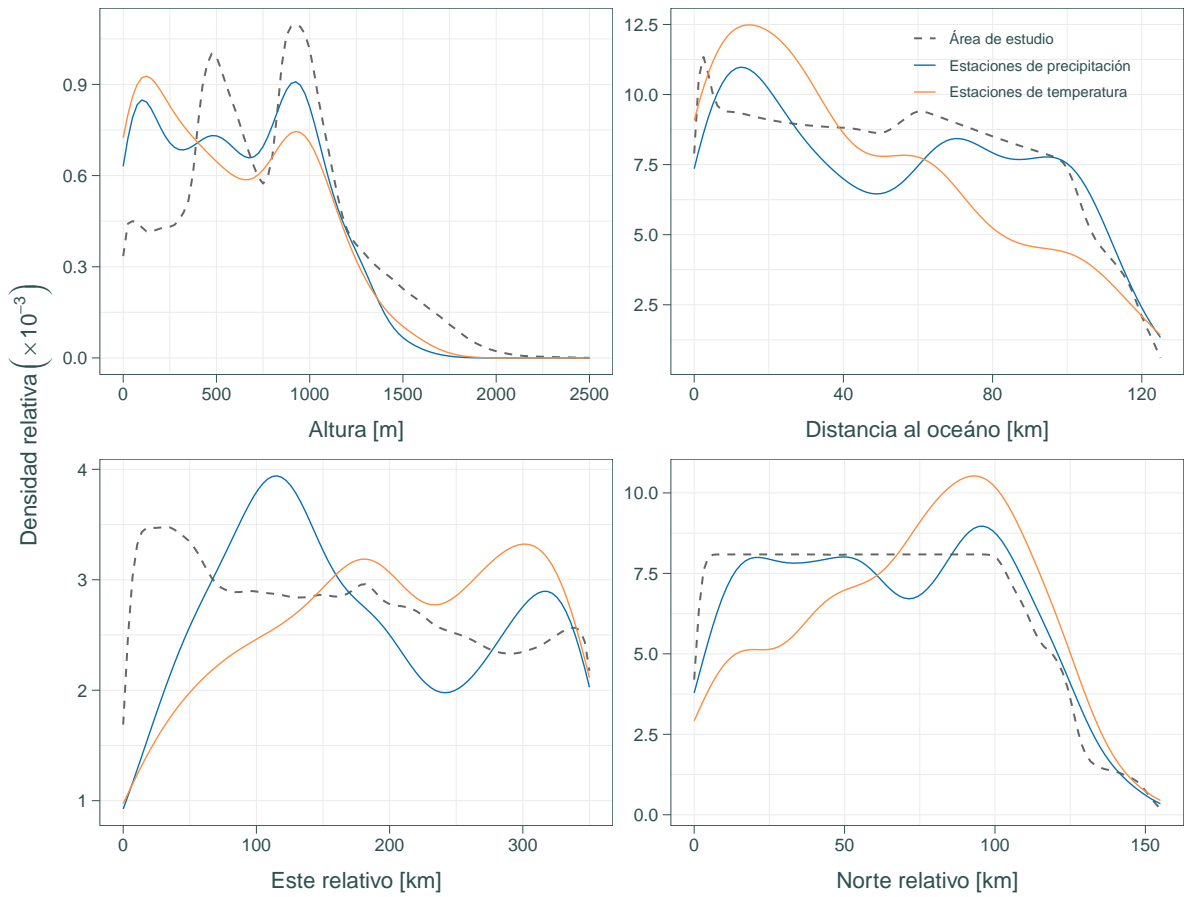


Figura 7: Misma información que en la Figura 6, pero para el conjunto del área de estudio delimitada por las coordenadas $[8,0^{\circ}\text{W } 42,4^{\circ}\text{N}]$ y $[3,7^{\circ}\text{W } 44,0^{\circ}\text{N}]$ (Figura 3).

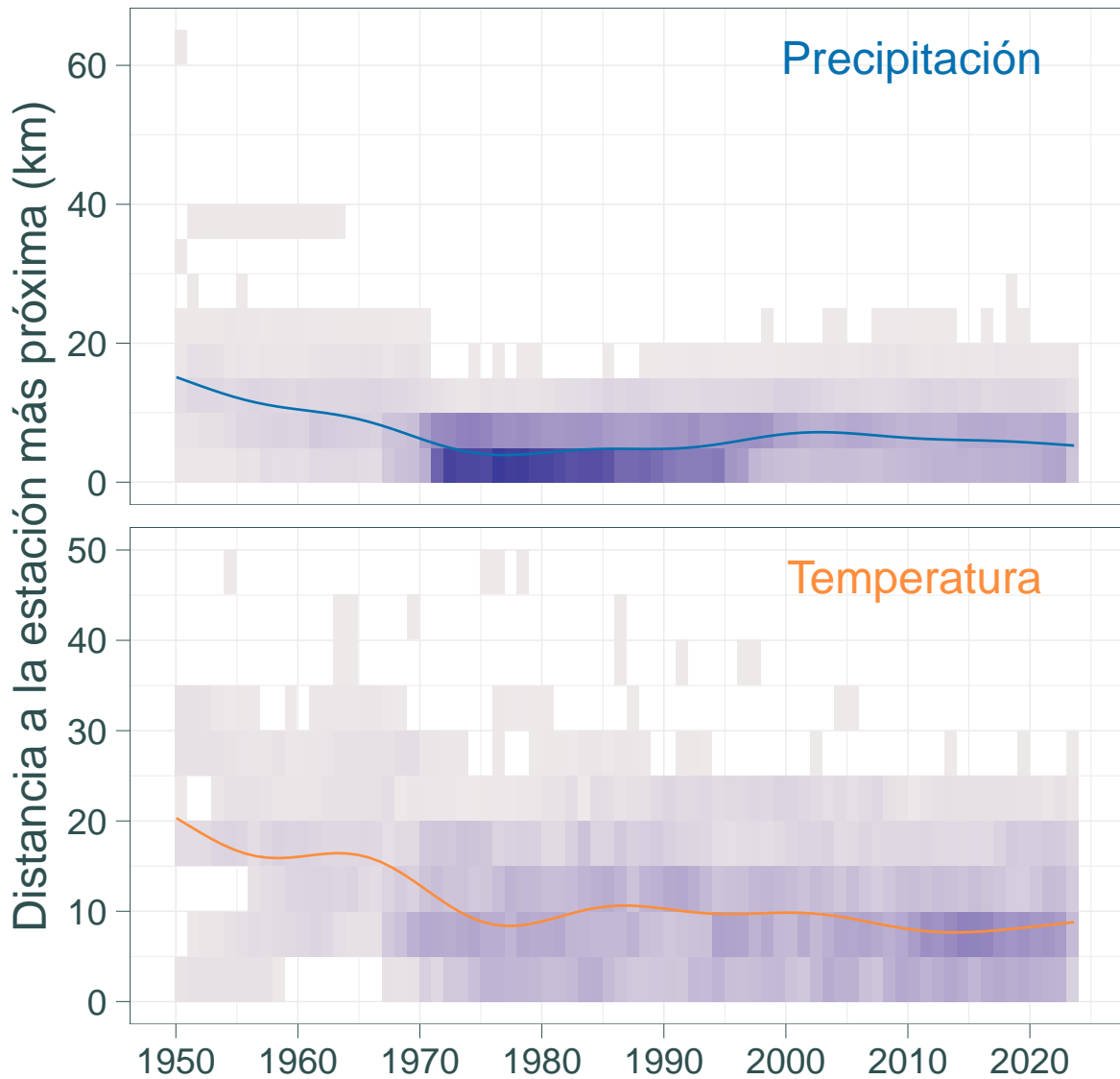


Figura 8: Variación temporal en la dispersión espacial de las estaciones meteorológicas de precipitación y temperatura pertenecientes a la red de observación AEMet en Asturias entre 1950 y 2010. En cada panel se incluye un diagrama de densidad bidimensional que representa la distribución de las distancias 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].

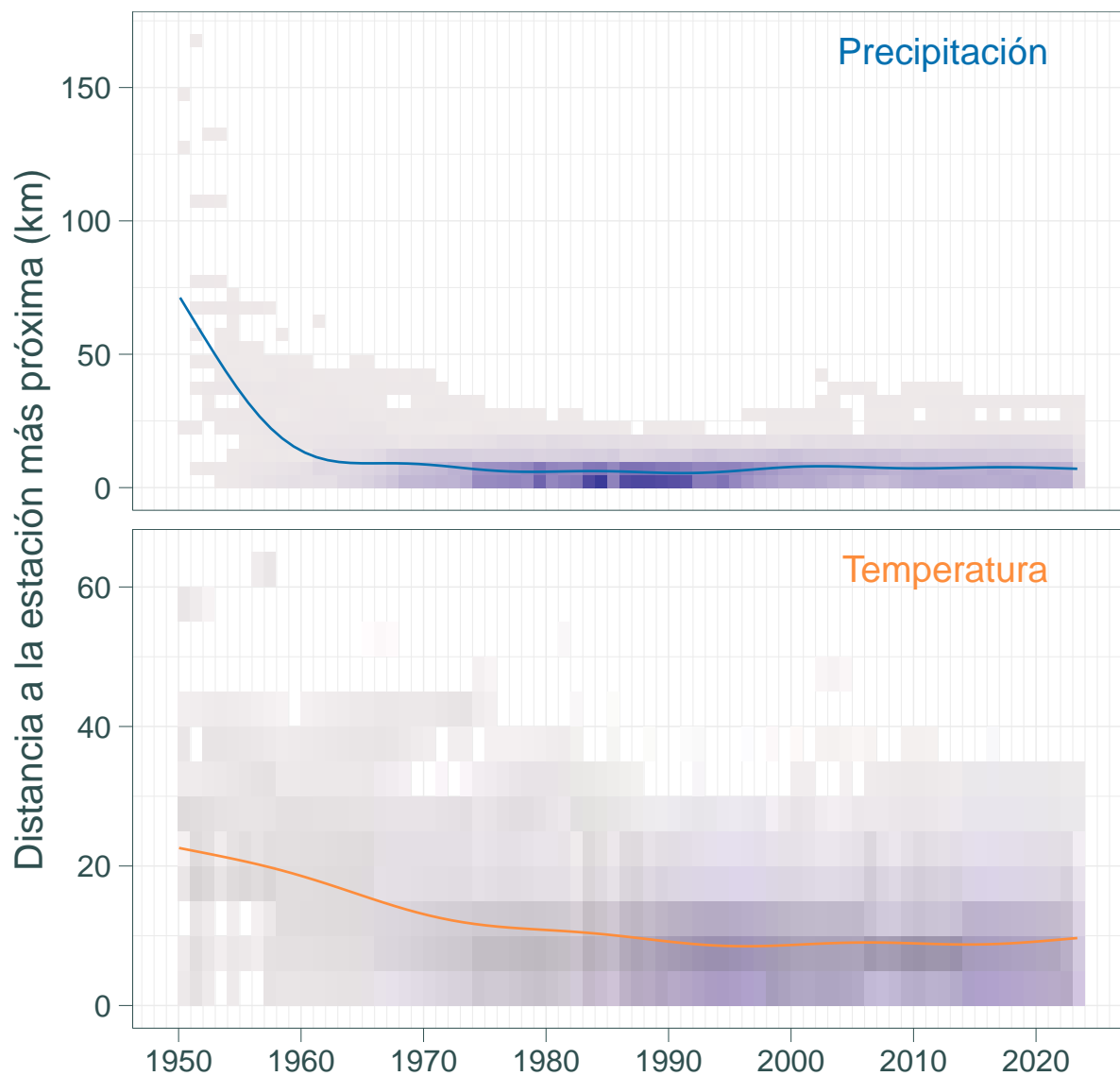


Figura 9: Misma información que en la Figura 6, pero para el conjunto del área de estudio delimitada por las coordenadas $[8,0^{\circ}\text{W } 42,4^{\circ}\text{N}]$ y $[3,7^{\circ}\text{W } 44,0^{\circ}\text{N}]$ (Figura 3).

3. Desarrollo del modelo de clima base de alta resolución (1km x 1km)

Este apartado describe la metodología empleada en el desarrollo de un modelo de clima base a partir del reanálisis de la información recogida por las estaciones meteorológicas de la red de superficie AEMet. El modelo de clima base consiste, en este caso, en una reconstrucción con frecuencia diaria y una resolución espacial de 1 km² de las condiciones de precipitación y temperatura en el área de estudio. Este primer producto de reanálisis sirve de base para análisis posteriores, incluyendo:

- La evaluación de posibles tendencias en precipitación y temperatura durante el periodo histórico.
- La calibración de proyecciones de cambio climático en escenarios alternativos de emisiones.
- El cálculo y análisis de tendencias en índices climáticos de interés.

Los tres aspectos se complementan entre sí y componen un ciclo de desarrollo que permite evaluar la calidad de cada paso de manera iterativa.

El punto de partida es la caracterización de la variación climática en la región durante el periodo observacional. A partir del análisis de la evolución temporal en el número de estaciones con información disponible, así como la homogeneidad temporal y espacial (Figura 5), se seleccionó el periodo 1970-2022. Dicho periodo incluye los principales periodos de referencia utilizados en el último informe del IPCC [2023], así como el periodo de referencia de calibración de las proyecciones de cambio climático.

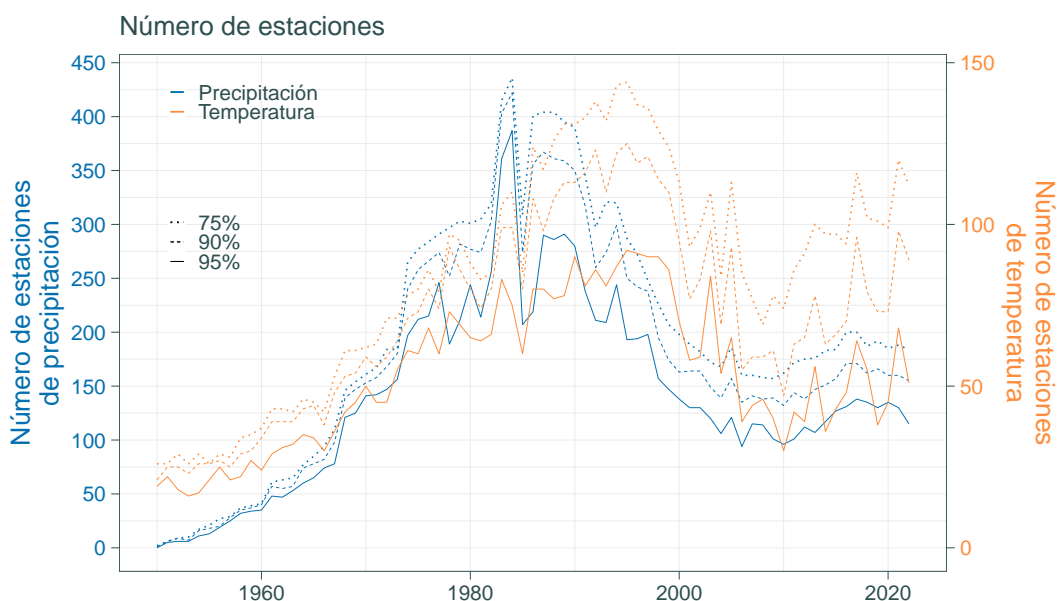


Figura 10: Número de estaciones por año de precipitación (azul) y temperaturas (naranja) con el 75% (-), 90% (-) y 95% (-) de los datos en cada año entre 1950 y 2022.

3.1. Control de calidad de la red de observaciones

La propia naturaleza de las redes de observación meteorológica resulta en una serie de inconvenientes a tener en cuenta antes de realizar cualquier tipo de análisis. Es bastante común, especialmente al trabajar con series que en algunos casos se remontan hasta los años 50 del siglo XX, enfrentarse a heterogeneidades derivadas del funcionamiento natural de este tipo de sistemas, así como cambios derivados de la disponibilidad de recursos y personal en cada momento. Por ejemplo, es común que las estaciones cambien de localización, o que presenten periodos más o menos extensos en los que no se cuenta con observaciones, que normalmente resultan de averías o problemas para la recogida de datos. Este tipo de incidencias se han ido reduciendo en paralelo a la modernización de la red de observación, hecho que en sí mismo también contribuye a introducir cierta heterogeneidad en las series analizadas.

Por tanto, antes de proceder al reanálisis de las series meteorológicas es necesario realizar un control de calidad exhaustivo que permita la identificación y filtrado de aquellas estaciones o registros parciales de una estación que planteen problemas desde el punto de vista de la heterogeneidad. Para ello, se han considerado cuatro aspectos para cribar observaciones anómalas o erróneas antes de proceder a la selección de las observaciones registradas en cada estación meteorológica que formará parte de la base de datos definitiva:

- **Detección de valores anómalos:** Inicialmente se procedió al cribado de valores atípicos extremos, que se definen como aquellos valores anormalmente altos o bajos de acuerdo a un umbral que se estima sumando o restando el triple del valor del rango intercuartílico al valor de los percentiles 75 ó 25, respectivamente. El rango intercuartílico se define como la diferencia entre el percentil 75 y el percentil 25, por lo que abarcaría un 50 % de la distribución empírica de la variable analizada. En el caso de la precipitación, al ser una variable no negativa y, por tanto, acotada inferiormente a un valor mínimo de cero, se definió como cota superior cuatro veces el percentil 90 de los días de lluvia y como cota inferior el cero.
- **Lagunas:** La presencia de periodos más o menos prolongados sin datos (huecos o lagunas) limita la representatividad y utilidad de una series de datos, llegando al extremo de que su inclusión en el reanálisis pueda resultar contraproducente cuando no existe suficiente información para evaluar la consistencia y fiabilidad de una serie. Por esta razón, se definió un número mínimo de años representativos (ver Figura 10), para identificar aquellas con al menos un 80 % de los datos. En particular, se adoptaron los umbrales de 15 y 35 años para precipitación y temperatura, respectivamente. La diferencia de criterio entre ambas variables responde a que las series de precipitación suelen ser más cortas y variables. Esto hace que sea mucho más difícil detectar una tendencia estadísticamente significativa para precipitación que para la temperatura. Además, la propia naturaleza de la precipitación requiere mantener la mayor cobertura espacial posible para representar adecuadamente su dependencia con la distancia al mar y las variables orográficas, de suma importancia en el contexto de una región con un relieve tan complejo como el asturiano.
- **Homogeneidad:** En ocasiones, sobre todo en el caso de series prolongadas, se producen cambios ajenos a la propia variación del sistema climático que alteran las condiciones en las que se realizan las medida de las variable meteorológicas de interés. Un ejemplo típico se produce cuando se realiza un cambio de emplazamiento de una estación o si se producen modificaciones en el entorno de una estación, o cuando un cambio de instrumental repercute en la calidad de las observaciones. Para detectar y evitar posibles problemas derivados de la falta de homogeneidad en las series anuales se aplicaron diferentes test de hipótesis para evaluar la homogeneidad de las series. Se analizaron tanto la homogeneidad absoluta, o dentro de una misma serie, como la homogeneidad relativa, utilizando series de referencia previamente identificadas. Aquellas series para las que el test resulta significativo a un nivel de confianza del 95 % se consideran no homogéneas y fueron excluidas de la base de datos definitiva. En el caso de la homogeneidad relativa se utilizaron como referencia el conjunto de estaciones de alta calidad utilizadas para la construcción de la base de datos Iberia01 [Herrera *et al.*, 2019].
- **Consistencia física:** Dado que las variables de temperatura están físicamente relacionadas, se eliminaron de la base de datos aquellos valores para los que se daba una incoherencia física entre ellas (p.e. temperatura mínima > temperatura máxima) o no existía alguna de las variables. De este modo tratamos de asegurar la coherencia física de las variables de temperatura en la base de datos de referencia.

Aplicando los criterios expuestos a las series de datos recogidas por la red de estaciones mostrada en la Figura 4 se obtuvo el subconjunto de estaciones que integran la base de datos definitiva que se puede observar en la Figura 11. Solamente contribuyen a la interpolación aquellas observaciones que haya superado todos los controles de calidad. Es importante recalcar que la base de datos contiene tanto registros diarios (la resolución original) como mensuales, de modo que los cálculos para los valores atípicos y lagunas se realizaron en base al dato diario, mientras que la consistencia física se preservó tanto a escala diaria como mensual.

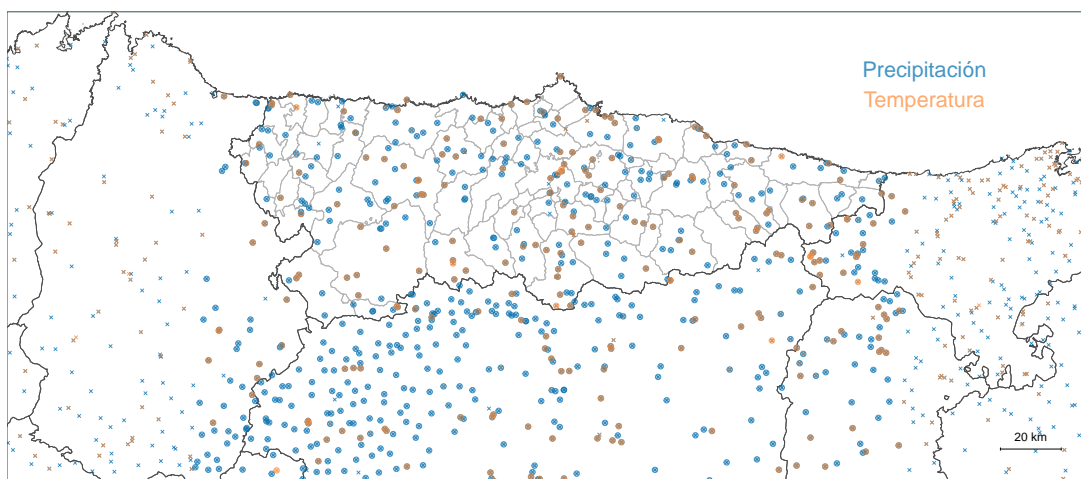


Figura 11: Red de estaciones consideradas para precipitación (667) y temperatura (221).

3.2. Modelo orográfico

La resolución de ~ 1 km que se pretende alcanzar mediante el reanálisis de la base de datos definitiva está por debajo de la distancia promedio entre las estaciones meteorológicas de la red de observación terrestre de AEMet (alrededor de 5 km ó 10 km para precipitación y temperatura, respectivamente, Figura 6). Para solventar esta limitación existen distintas estrategias, aunque en este estudio se ha optado por incluir en el análisis información auxiliar que permita predecir los gradientes de variación a pequeña escala. En el caso concreto de precipitación y temperatura, existe una sólida base física que relaciona la variación espacial en ambas variables con distintas características del territorio, tales como la elevación, la presencia de masas de agua, especialmente el mar, o posibles efectos derivados de gradientes a gran escala o alteraciones locales de la circulación atmosférica. Este tipo de efectos se pueden representar a través de la incorporación de co-variables orográficas a la base de datos [Herrera *et al.*, 2018]. Las co-variables se han calculado a partir del modelo digital de elevaciones global [GTOPO30](#), que tiene una resolución nativa de $30''$ [aproximadamente 1 km]. En particular, se han preparado las derivado las siguientes co-variables:

- **Orografía:** Se incorpora mediante un modelo de regresión polinomial de tercer grado para incluir un efecto que acomode la variación en precipitación y temperatura con la elevación mediante una función continua y suave:

$$P_{\text{orog}}(h) = a_3 h^3 + a_2 h^2 + a_1 h + a_0$$

donde h es la altura sobre el nivel medio del mar.

- **Continentalidad (distancia a costa):** Se considera también el efecto de la proximidad al mar mediante la distancia de cada punto de red («grid») a la costa, de nuevo mediante una función continua que mapea el efecto de la continentalidad mediante un modelo de regresión polinomial de tercer grado:

$$P_{\text{cont}}(d_c) = b_3 d_c^3 + b_2 d_c^2 + b_1 d_c + b_0$$

donde d_c es la distancia a la costa.

- **Curvatura:** Se considera la curvatura global de cada punto como resultado de las curvaturas longitudinal y latitudinal.
- **Bloqueos y Exposiciones:** En último lugar se considera la posible interacción de la orografía con la circulación atmosférica. Los bloqueos se definen tras identificar, alrededor de cada punto, la existencia de una cota más alta en una dirección o sector de interés. De manera similar, el grado de exposición de un punto depende

de su prominencia dentro del paisaje (es decir, que sobresalga por encima de cotas cercanas). Para identificar posibles bloqueos y exposiciones, se dividió el espacio alrededor de cada punto en ocho sectores que corresponden a la rosa de los vientos (N, NW, W, SW, S, SE, E y NE). De manera iterativa y alejándose progresivamente de cada uno de los puntos de la malla, se identificaron posibles bloqueos y exposiciones. Las co-variables resultantes contienen información sobre la presencia y distancia a los bloqueos y exposiciones más cercanos.

En conjunto resultan 24 co-variables candidatas para aportar información adicional a la interpolación. Las variables se incorporarán mediante un modelo de regresión que crecerá de manera progresiva mediante un proceso tipo «step-wise» (paso a paso), en el que en cada paso se introduce la co-variable que minimiza el residuo del modelo resultante.

3.3. Modelos de regresión e interpolación

Una vez realizada la selección de estaciones meteorológicas a incluir en la base de datos definitiva y tras consolidar la información para las co-variables orográficas que entran en el modelo de regresión, se procede a la selección de un método de interpolación que se adecúe a los problemas que presentan las variables a interpolar, la resolución de la rejilla y la introducción de co-variables. Tras revisar el estado del arte en este campo, se concluyó que la familia de métodos geoestadísticos tipo Kriging [Krige, 1951] es la que mejor se adapta a los problemas planteados. Estos métodos se han aplicado en un gran número de estudios climáticos [Atkinson & Lloyd, 1998; Biau *et al.*, 1999; Haylock *et al.*, 2008; Herrera *et al.*, 2016, 2012, , etc.] e incluyen un gran abanico de variantes para adaptar la metodología a la interpolación de variables discretas o la introducción de co-variables, entre otras.

En el presente estudio, la relación de dependencia entre la precipitación y las variables de temperatura con las co-variables orográficas descritas en la sección anterior se introduce a través de un modelo de regresión. La teoría y experiencia en este tipo de análisis permite avanzar que dicho modelo debe ser capaz de capturar la distribución a gran escala de variables como precipitación y temperatura, aunque no necesariamente la estructura espacial de asociación de estos campos en el espacio [*i.e.* su autocorrelación, o la semejanza que se espera entre valores tomados en dos puntos cualesquiera según la distancia espacial que los separe]. Para capturar esa estructura espacial residual se ha recurrido al método de Kriging Ordinario. Dicho método se fundamenta en la modelización de la dependencia espacial de la variable dependiente —precipitación, temperatura media y extremos— a través de la estima empírica del semi-variograma:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{|x_i - x_j|}^{N(h)} |y(x_i) - y(x_j)|^2 \quad (1)$$

Esta estima se utiliza para ajustar una aproximación basada en un variograma modelo (p.e. exponencial o Gaussiano), que usa una función de base para ajustar el comportamiento de la variabilidad del campo interpolado en función de la distancia h . En la ecuación anterior $N(h)$ representa el número de puntos separados una distancia h , x_i y x_j son los puntos donde tenemos dato y la función $y(x_i)$ es el valor de la variable a interpolar en el punto x_i .

La importancia del variograma queda clara al interpolar el valor del campo en una nueva localización p :

$$y_{OK}(x_p) = \sum_{i=1}^k w_i y(x_i) \quad (2)$$

como una combinación lineal de los valores observados en otras localizaciones. Concretamente, una media ponderada donde los pesos w_i se obtienen resolviendo el siguiente sistema de ecuaciones:

$$-\sum_{i=1}^k w_i \gamma(|x_i - x_j|) + \mu = -\gamma(|x_p - x_j|) \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^k w_i = 1 \quad (4)$$

donde la importancia relativa de cada peso se estima a través del variograma, y además se introduce el multiplicador de Lagrange μ para poder resolver el sistema con la restricción de que los pesos sumen uno.

De este modo, y siguiendo la metodología propuesta en Bedia *et al.* [2013] y Gutiérrez *et al.* [2010], la interpolación se divide en cuatro pasos consecutivos:

1. Se aproxima, mediante un modelo de regresión, el valor mensual de la variable (precipitación, temperatura máxima, temperatura mínima ó temperatura media). Este modelo permite considerar el efecto de la elevación, el gradiente de continentalidad y posibles alteraciones a escala local y regional de la circulación atmosférica a través de co-variables orográficas.
2. Se calcula el valor mensual asociado a cada punto de rejilla (MonthlyValueReg) y el residuo o error cometido por el modelo (Err), utilizando los coeficientes obtenidos con el modelo de regresión.
3. Se interpola el residuo mensual del modelo de regresión (Err) empleando el método de Kriging Ordinario (OK) para todos los puntos de la rejilla, corrigiendo de ese modo el valor mensual asignado por el modelo (MonthlyValueOK = MonthlyValueReg + ErrOK).
4. Finalmente, se interpola la anomalía diaria con un método de Kriging Ordinario que se añade aditiva (temperaturas) o multiplicativamente (precipitación) al dato mensual, obteniendo el dato final interpolado sobre la rejilla final de 1 km² de resolución espacial y con una frecuencia diaria.

La aplicación de la metodología anterior genera dos conjuntos de resultados para cada una de las cuatro variables de interés (precipitación y tres variables de temperatura): una base de datos mensual y otra diaria. Estas variables se almacenan en sendas bases de datos en las que cada entrada corresponde al promedio espacial de la variable de interés en cada una de las celdas de 1 km² que cubren el dominio. La base de datos generada recoge tanto el patrón espacial como la intensidad de las variables mensuales consideradas en este informe, por lo que suponen una base de referencia apropiada para el resto de las tareas del proyecto. Este resultado se refleja en la Figura 12, en la que se muestra el promedio espacial de los valores mensuales observados (línea negra) junto con el promedio de las celdas de la rejilla más cercanas a los puntos de observación (puntos rojos). Del mismo modo, se obtienen valores de correlación temporal por encima de 0.99 y espacial por encima de 0.90 para todas las variables (precipitación mensual, temperatura media, máxima y mínima mensual). Como se muestra en esta figura, los valores interpolados se corresponden con los observados en todo el rango de valores, no únicamente en su parte central, a pesar de los errores o incertidumbres esperados en cualquier modelización.

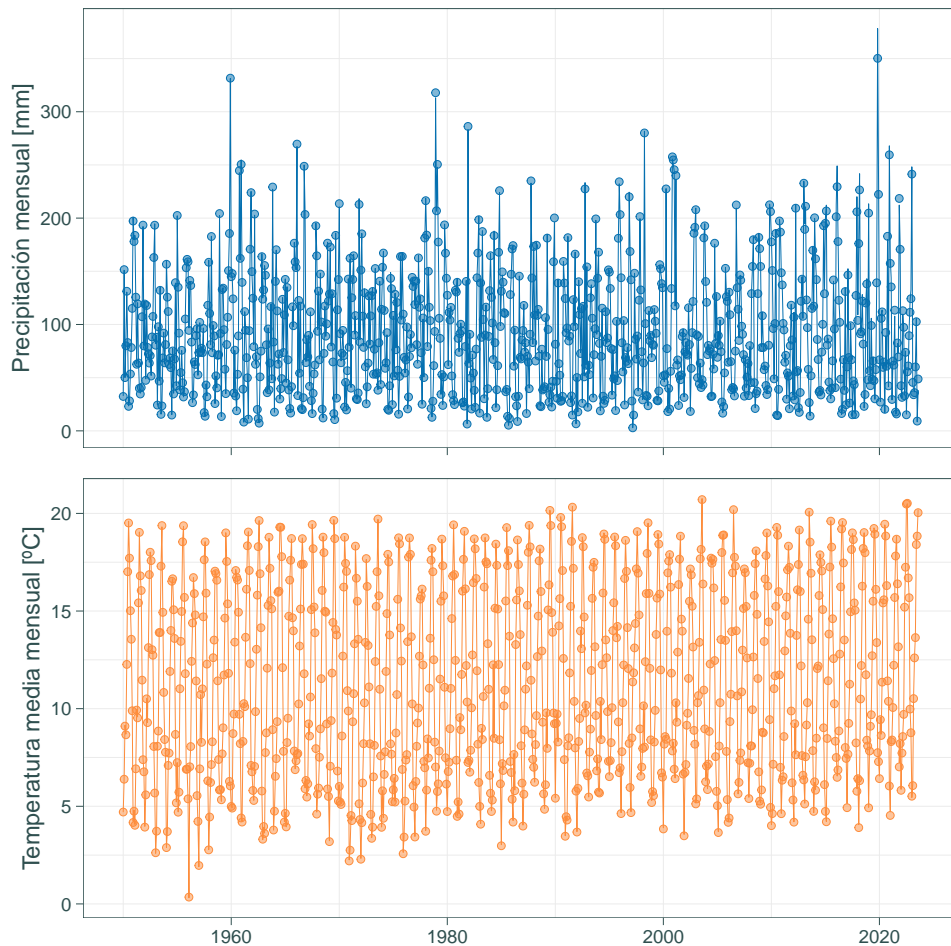


Figura 12: Correspondencia temporal entre los promedios espaciales de las observaciones y los datos interpolados en los puntos más cercanos a dichas estaciones para las precipitaciones y temperaturas medias mensuales.

4. Índices climáticos: extremos

Los índices climáticos son variables que permiten describir e interpretar de manera sencilla el estado y la variabilidad de un aspecto concreto del clima de una localidad o región. Existen una gran variedad de índices climáticos. Por ejemplo, en nuestro día a día encontramos el índice UV, que alerta sobre los niveles de radiación ultravioleta incidente, o el recuento de polen, que alerta sobre la presencia e intensidad de granos de polen en el aire para prevenir a las personas con alergia. De manera similar, aunque normalmente en ámbitos más especializados, se definen y utilizan índices que describen la probabilidad de que se produzcan fenómenos como una sequía o precipitaciones que aumenten el riesgo de inundación, así como otros eventos extremos como fuegos u olas de calor. En general, este tipo de índices combinan información de una o más variables, meteorológicas o de otra naturaleza, para caracterizar un aspecto de interés.

Del mismo modo, el estudio de la evolución de los índices climáticos a lo largo del tiempo permite detectar tendencias, evaluar riesgos y entender la contribución del cambio climático con respecto a la variabilidad de fondo del sistema climático. Por esta razón, complementamos el análisis de los cambios en precipitación y temperatura con el cálculo de un conjunto de índices climáticos que la Organización Meteorológica Mundial recomienda para caracterizar los impactos del cambio climático.

En esta sección, ampliamos el análisis de los cambios en precipitación y temperatura para considerar algunos de los índices climáticos recomendados para caracterizar los impactos del cambio climático. Concretamente, se han esti-

mado 38 de los índices propuestos por el grupo de expertos **ETCCDI** (CCI/CLIVAR/JCOMM Expert Team on Climate Change Detection and Indices), utilizados ampliamente tanto por el IPCC como por proyectos a nivel europeo como **ECA&D** (European Climate Assessment & Dataset). Dicho grupo de expertos se creó con el objetivo de definir medidas objetivas que permitiesen caracterizar la variabilidad climática, así como detectar y evaluar el cambio climático a escala regional. Atendiendo a los fenómenos climáticos que describen, los índices se han agrupado en tres categorías:

- Índices de precipitación y de sequía
- Extremos fríos y de calor
- Extremos de temperatura

donde puede ser conveniente aclarar la diferencia entre las dos últimas categorías, ya que puede generar cierta confusión. Los extremos fríos y de calor corresponden a una serie de índices climáticos que en la mayoría de los casos se calculan acumulando anomalías de temperatura o la frecuencia con que se rebasa un determinado umbral de interés. Los extremos de temperatura propiamente dichos incluyen principalmente promedios y rangos de temperatura durante un determinado periodo de interés, incluyendo promedios de temperaturas mínimas y máximas. También incluyen extremos absolutos de temperatura. Como en toda clasificación, existe cierto componente subjetivo al agrupar índices cuyo objetivo no deja de ser describir distintos aspectos de un mismo sistema.

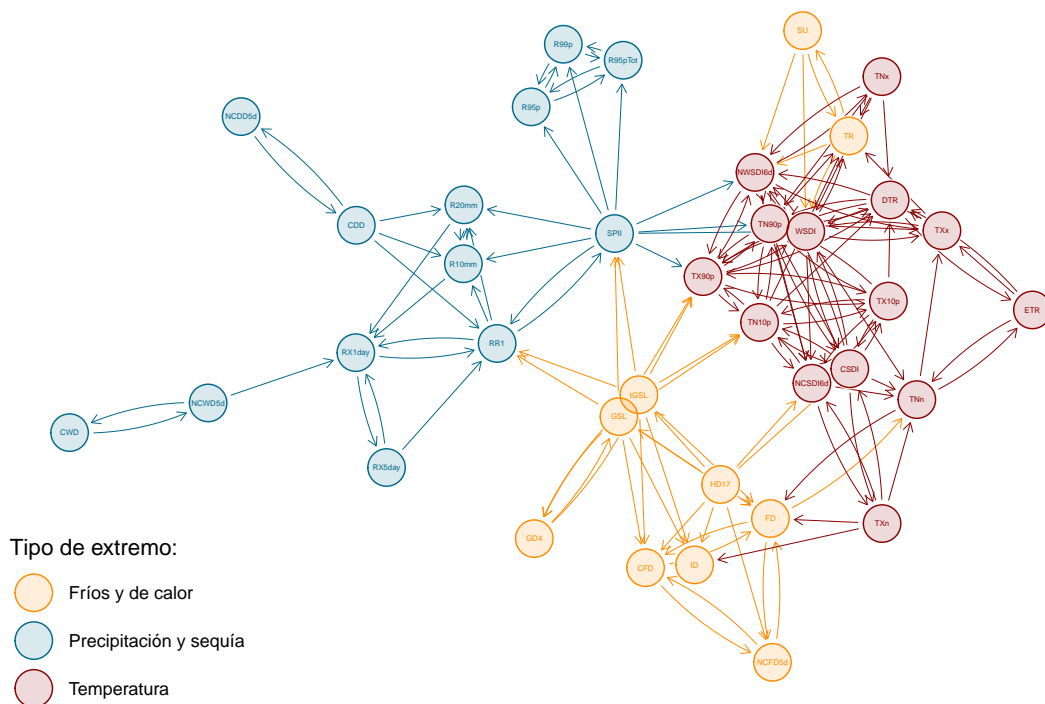


Figura 13: Relaciones que facilitan la interpretación de los índices de extremos. Cada nodo de la red corresponde a un índice, que se identifica por su acrónimo (Tabla 2). Los arcos que parten de cada nodo apuntan a los índices que es necesario considerar para interpretar el índice focal. Por ejemplo, la interpretación del índice simple de precipitación SPII, que es el índice con mayor número de arcos salientes, es mucho más completa cuando se consideran otros índices relacionados con la precipitación y con el impacto de la temperatura sobre el estrés hídrico. En el otro extremo, índices como el número máximo de días consecutivos con precipitación CWD, están mucho más aislados porque tienen una interpretación mucho más directa.

Los índices se han calculado a escala mensual o anual a partir de las series diarias del modelo base de clima y a partir de la regionalización de proyecciones a futuro bajo escenarios alternativos de cambio climático. Aunque los índices de extremos se pueden definir para cualquier periodo temporal, la mayoría de ellos cobran significado únicamente tras

agregar los valores durante periodos de un año natural, lo que facilita tanto su análisis como su interpretación. También es importante tener en cuenta que los índices se complementan entre sí, por lo que es recomendable considerar simultáneamente varios índices durante cualquier análisis (Figura 13).

La Tabla 1 enumera los índices utilizados y describe brevemente cómo se han calculado. Para ello se han utilizado, principalmente, las herramientas proporcionadas por CDO, que permite trabajar con datos de modelos climáticos y de predicción numérica del tiempo [Schulzweida, 2023]. En los apartados siguientes se incluye una explicación sencilla de cada uno de los índices empleados y su interpretación.

Tabla 1: Índices climáticos calculados a partir de las series diarias de precipitación y temperatura del modelo de clima base y para las proyecciones de GCMs/RCMs de la iniciativa EURO-CORDEX. Los índices se pueden definir para cualquier período temporal, aunque en este informe solo se han calculado a partir de series diarias para períodos de un año natural.

<i>Índices de precipitación y de sequía</i>		
CDD	días año ⁻¹	Período más largo sin precipitaciones.
NCDD5d	episodios año ⁻¹	Número de episodios con al menos cinco o más días sin precipitaciones.
CWD	días año ⁻¹	Número máximo de días consecutivos con precipitación [RR > 1 mm].
NCWD5d	episodios año ⁻¹	Número de episodios de al menos cinco o más días con precipitaciones.
RR1	días año ⁻¹	Días con precipitación [RR > 1 mm].
R10mm, R20mm	días año ⁻¹	Días con precipitación fuerte [RR > 10 mm] o muy fuerte [<i>pr</i> > 20 mm].
RX1day, RX5day	mm	Máxima precipitación acumulada en uno o en cinco días.
SPII	mm día ⁻¹	Ratio entre la precipitación total y el número de días con precipitación (promedio de precipitación en los días con precipitación).
R95p, R99p	%	Porcentaje de días con mucha precipitación o con precipitación extrema, definidos a partir de los percentiles diarios 95 y 99, respectivamente, para el período de referencia 1991–2020.
R95pTot	%	Porcentaje de precipitación acumulada en días muy lluviosos (descargas por encima del percentil diario 95 para el período de referencia 1991–2020).
<i>Extremos fríos y de calor</i>		
SU	días	Días de verano (temperatura máxima diaria por encima de 25 °C).
TR	días	Noches tropicales (temperatura mínima diaria por encima de 20 °C).
GD4	°C	Crecimiento en grados-día (suma de la diferencia positiva entre la temperatura media diaria y una temperatura de referencia fijada en este caso a 4 °C).
HD17	°C	Días de calefacción expresados en grados-día con respecto a 17 °C (suma de la diferencia positiva la temperatura de referencia y la temperatura media diaria).
GSL	días	Duración del período de crecimiento, definido como el período entre los primeros seis días consecutivos con una temperatura media diaria por encima de 5 °C y la ocurrencia de seis días con temperatura inferior a 5 °C en la segunda mitad del año.
t_{GSL}	días	Día del año en que comienza el período de crecimiento vegetativo.
CFD	días	Número máximo de días consecutivos con heladas [<i>TN</i> < 0 °C].
NCFD5d	episodios año ⁻¹	Número de períodos de al menos cinco o más días con heladas.
FD	días año ⁻¹	Número de días con heladas [<i>TN</i> < 0 °C].
ID	días año ⁻¹	Número de días con hielo [<i>TX</i> < 0 °C].
<i>Extremos de temperatura</i>		
ETR	°C	Amplitud térmica anual (diferencia entre el máximo y el mínimo absoluto de temperatura registrado a lo largo de un año).
DTR	°C	Amplitud térmica diaria (promedio de la diferencia entre el máximo y el mínimo absoluto diario de temperatura).
TNn	°C	Temperatura mínima anual
TNx	°C	Máxima anual de las temperaturas mínimas diarias
TXn	°C	Mínima anual de las temperaturas máximas diarias
TXx	°C	Temperatura máxima anual
TN10p	%	Porcentaje de noches frías, que son aquellas en las que la temperatura no supera percentil 10 de la media móvil de 5 días de la temperatura mínima durante el período 1991–2020.
TN90p	%	Porcentaje de noches cálidas, que son aquellas en las que la temperatura supera percentil 90 de la media móvil de 5 días de la temperatura mínima durante el período 1991–2020.
TX10p	%	Porcentaje de días fríos, que son aquellos en las que la temperatura no supera percentil 10 de la media móvil de 5 días de la temperatura máxima durante el período 1991–2020.
TX90p	%	Porcentaje de días cálidos, que son aquellos en las que la temperatura supera percentil 90 de la media móvil de 5 días de la temperatura máxima durante el período 1991–2020.
CSDI	días	Duración promedio de la ola de frío más larga cada año. Una ola de frío ocurre cuando la anomalía diaria de la temperatura mínima está al menos seis días consecutivos por debajo del percentil 10 para esas fechas, calculado para el período 1991–2020 tras aplicar una media móvil de 5 días.
NCSDI6d	episodios año ⁻¹	Número de episodios de ola de frío con una duración de al menos 6 días.
WSDI	días	Duración promedio de la ola de calor más larga cada año. Una ola de calor ocurre cuando la anomalía diaria de la temperatura máxima supera durante al menos seis días consecutivos el percentil 90 para esas fechas, calculado para el período 1991–2020 tras aplicar una media móvil de 5 días.
NWSDI6d	episodios año ⁻¹	Número de episodios de ola de calor con una duración de al menos 6 días.

4.1. Extremos de precipitación y sequía

Los índices de precipitación y de sequía describen la falta o el exceso de lluvia en un territorio. El modelo de clima base permite evaluar cambios en el número de días que llueve a lo largo del año, así como la duración promedio de los periodos sin precipitación. En este trabajo se han calculado un total de 13 índices de precipitación y sequía (Figura 14). A lo largo de todo este informe se consideran días húmedos o con precipitación aquellos en los que se registran precipitaciones por encima de 1 mm.

Extremos de precipitación y sequía

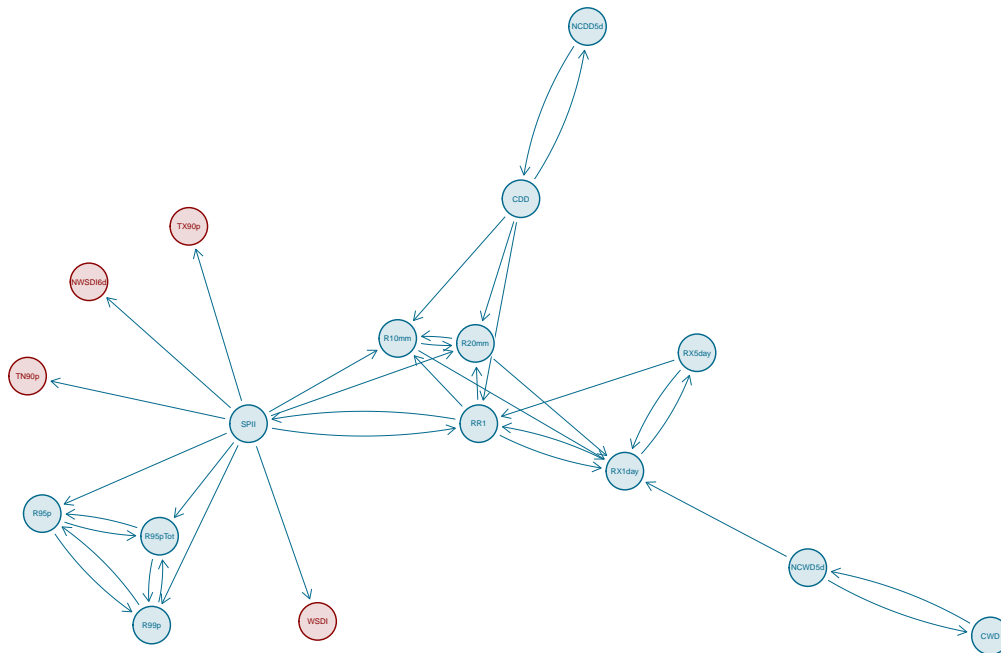


Figura 14: Relaciones que facilitan la interpretación de los índices de extremos de precipitación. La figura muestra un subconjunto de la información de la figura Figura 13.

CDD – Periodo más largo sin precipitaciones (Consecutive Dry Days): La racha seca más larga (CDD) es el periodo más prolongado de días seguidos en los que no llueve. Para su cálculo se identifican, en primer lugar, los días que no llueve o días secos, que son aquellos en los que la precipitación no supera el umbral de 1 mm. A continuación, se identifican todas las secuencias de días secos consecutivos durante el periodo de interés (año, estación, etc.), y se anota la cardinalidad de la secuencia más larga.

El CDD mide la persistencia de la sequía meteorológica; valores altos indican periodos prolongados sin lluvia y una interrupción tardía de la sequía. En verano, los valores altos de CDD incrementan el riesgo de incendios, el estrés hídrico para los cultivos y, por tanto, la demanda de riego. En invierno, un CDD elevado puede dejar suelos muy secos que favorezcan la escorrentía y la erosión y pérdida del suelo cuando vuelve a llover. Del mismo modo, y en combinación con los índices de temperatura, la sequía afecta también a la salud pública, con el aumento en la incidencias de diferentes afecciones, especialmente aquellas relacionadas con las alergias o la contaminación atmosférica, al no producirse en la atmósfera el efecto limpiador de la precipitación.

El CDD se debe interpretar junto con otros índices de precipitación como el número de días de lluvia (RR1) o la frecuencia de días con precipitación fuerte o muy fuerte (R10mm y R20mm, respectivamente). Una distribución concentrada de la precipitación en el tiempo (por ejemplo, si llueve pocos días pero de manera muy intensa), pueden elevar el CDD sin reducir la lluvia total.

En el contexto actual de cambio climático, es esperable que las sequías sean cada vez más frecuentes, intensas y prolongadas. Por tanto, el aumento del índice CDD proporcionaría un indicador para monitorear y valorar posibles impactos del cambio climático sobre la sequía, especialmente cuando la sequía se debe a cambios en el régimen de precipitaciones. El calentamiento también aumenta la evaporación y pérdida de humedad, tanto desde el suelo como a través de la transpiración de las plantas. Ambos procesos contribuyen a alargar las rachas de días secos, incluso a igual nivel de precipitación. En tales situaciones se recomienda complementar el CDD con el análisis de índices de evapotranspiración. En climas mediterráneos es coherente observar valores de CDD al alza y una mayor estacionalidad (veranos más secos, transiciones más irregulares).

NCDD5d — Número de episodios con al menos cinco o más días sin precipitaciones (Number of Dry Spells \geq 5 days): El número de rachas secas (NCDD5d) es la cantidad total de episodios de al menos cinco días secos consecutivos (rachas secas) que se producen a lo largo de un periodo de interés. Valores altos del índice NCDD5d apuntarían, en principio, a un mayor riesgo de sequía. El cálculo parte de la identificación de periodos de días secos consecutivos, antes de proceder a contar el número total de rachas secas que se han producido durante el periodo de referencia (año, estación, etc.).

Es recomendable interpretar el NCDD5d junto con el índice de la racha seca más larga (CDD). La combinación de un CDD alto con un NCDD5d bajo sugiere la ocurrencia de un único episodio de sequía muy prolongado; sin embargo, si tanto el NCDD5d como el CDD son altos, es muy probable que se hayan producido varios episodios de sequía de forma repetida. En relación con el cambio climático, las tendencias hacia patrones con menos días lluviosos, pero con lluvias más intensas, favorecen un mayor número de rachas secas. Así mismo es esperable que el valor del índice se incremente durante los veranos más calurosos, por lo que sería recomendable desglosarlo por periodos estacionales para identificar posibles variaciones del ciclo anual.

CWD — Número máximo de días consecutivos con precipitación (Consecutive Wet Days): La racha húmeda más larga (CWD) es el periodo más largo de días seguidos de lluvia registrado durante un periodo de interés. Los días húmedos o días de lluvia son los días en que se registra una precipitación superior a 1 mm. Para calcular el CWD se identifican, en primer lugar, todas las secuencias de días húmedos consecutivos en el periodo analizado (año, estación, etc.), y se toma nota de la longitud de la secuencia más prolongada.

La interpretación y valor del CWD depende de la época del año. Por lo general, en nuestras latitudes se alcanzan los valores más altos de CWD en otoño e invierno. Valores altos del CWD pueden implicar un suelo saturado, una mayor probabilidad de deslizamientos y crecidas, así como complicaciones en los sistemas de drenaje urbano. En relación con el cambio climático, las tendencias hacia una atmósfera más cálida, con mayor contenido de vapor, favorecen los patrones húmedos persistentes que pueden aumentar la duración de las rachas en determinadas épocas del año o situaciones meteorológicas particulares. La mayor concentración de la precipitación o torrencialidad puede llevar a un menor CWD en otras épocas del año.

NCWD5d — Número de episodios de al menos cinco o más días con precipitaciones (Number of Wet Spells \geq 5 days): El número de rachas húmedas (NCWD5d) es la cantidad total de periodos con una duración igual o superior a cinco días de lluvia (rachas húmedas). Los días de lluvia o días húmedos son días en los que se registra una precipitación superior a 1 mm. El cálculo del NCWD5d se basa en la identificación y recuento de las rachas húmedas con una duración igual o superior al umbral de cinco días que se han producido durante el periodo de referencia (año, estación, etc.).

La interpretación del NCWD5d viene condicionada por el valor de otros índices de precipitación. Por ejemplo, al comparar dos localidades o una misma localidad a lo largo del tiempo, un valor más elevado del NCWD5d indicaría normalmente un aumento de la precipitación. No obstante, incluso a igual nivel de precipitación, un aumento en el NCWD5d también puede indicar que las lluvias se producen de manera más o menos concentrada en el tiempo. Por esta razón, es conveniente interpretar los posibles cambios en el índice NCWD5d y las tendencias en precipitación

total conjuntamente, pero también junto con la máxima precipitación registrada en un día (RX1day). La combinación de valores altos de NCWD5d y RX1day moderados sugieren lluvias sostenidas, es decir, con una distribución más homogénea en el tiempo. Por el contrario, valores altos tanto en el NCWD5d como en el RX1day sugieren temporales largos con picos intensos de precipitación que irían asociados a un mayor riesgo de saturación del suelo y escorrenfía.

En latitudes templadas, el cambio climático promueve una mayor persistencia en los patrones de circulación e incluso de las situaciones de bloqueo atmosférico. Estos procesos se traducen en una mayor duración de los periodos de influencia de las masas de aires y borrascas, incluyendo una mayor recurrencia de rachas húmedas y la intensidad de sus efectos. El indicador se asocia a una mayor probabilidad de riesgos de inundación, erosión, inestabilidad y de deslizamientos de laderas.

RR1 — Días con precipitación o húmedos (Wet Days): El número de días de lluvia o días húmedos (RR1) contabiliza el número de días en los que se producen precipitaciones. Se trata de un índice que proporciona información básica sobre la meteorología de una localidad o región, ya que indica la frecuencia con la que se reparte la precipitación a lo largo del tiempo. Para su cálculo, simplemente es necesario identificar y contar el número de días en que se supera el umbral de precipitación de 1 mm durante un periodo de interés definido de antemano.

Para su interpretación se recomienda tener en cuenta otros índices relacionados con la frecuencia de días con precipitación fuerte o muy fuerte (R10mm y R20mm, que corresponden al número de días que alcanzan o superan 10 mm ó 20 mm de precipitación, respectivamente). También es interesante incluir en el análisis el índice de máxima precipitación en un día, RX1day. Si se identifica una tendencia a la baja de RR1, pero se incrementan los valores de cualquiera de los índices R10mm, R20mm o RX1day, se puede inferir que la precipitación se concentra en menos días, pero con mayor intensidad.

También es recomendable comparar el índice RR1 con el índice simple de la intensidad diaria de precipitación, SPII. Como veremos más adelante, el SPII mide la cantidad de precipitación que se registra cada vez que llueve, o lo que es lo mismo, la lluvia que cae en un día húmedo promedio. Un incremento de RR1 que no vaya acompañado de un aumento en el SPII indicaría un aumento de los episodios de lloviznas, poco eficaces, por ejemplo, para la recarga de acuíferos.

Debido al cambio climático, en muchas regiones de latitudes medias se observa una disminución en el número de días de lluvia, pero un aumento de la intensidad de las lluvias. Estas tendencias son consistentes con una mayor frecuencia de fenómenos extremos, incluyendo un aumento del riesgo de inundaciones debido a la mayor torrencialidad y concentración espacial de las precipitaciones. Es recomendable por tanto analizar la distribución estacional del indicador.

R10mm / R20mm — Días con precipitación fuerte / muy fuerte (Heavy / Very Heavy Precipitation Days): El número de días de precipitación fuerte o muy fuerte (R10mm y R20mm) contabiliza el número de días húmedos en los que las precipitaciones son intensas o muy intensas durante un periodo dado. Los días de precipitación intensa son aquellos en los que se registra una precipitación que alcanza o supera 10 mm, mientras que en los días de precipitación muy intensa se registran valores iguales o superiores a 20 mm en menos de 24 horas. Para calcular los índices R10mm y R20mm, simplemente se identifican los días de precipitación fuerte o muy fuerte, acumulando el recuento para un periodo de interés definido de antemano (mes, estación o año).

La tendencia al alza de los índices R10mm y R20mm (o de índices extremos afines, como Rx1day) registrada en muchas áreas continentales del planeta supone el incremento de la frecuencia e intensidad de los episodios de precipitación intensa, aunque con variaciones en su magnitud y estacionalidad.

El incremento de días con precipitaciones iguales o superiores a los 10 mm ó 20 mm, especialmente si se concentran en pocas horas, pueden indicar un incremento en la probabilidad de inundaciones, especialmente en zonas urbanas, por deficiencias de drenaje, o fluviales, debido a un incremento de los picos del caudal de los ríos.

Factores como la convección o la orografía pueden amplificar el aumento de los índices R10mm y R20mm incluso sin que se produzcan cambios en la lluvia total.

RX1day/RX5day — Máxima precipitación acumulada en uno o cinco días (*Maximum 1-day/5-day Precipitation*): La máxima precipitación acumulada en un día o en cinco días consecutivos (RX1day y RX5day, respectivamente) mide la máxima intensidad de precipitación que se produce en una localidad o región durante un periodo de interés. En otras palabras, estos índices registran el pico en la precipitación anual o estacional relevante para evaluar el riesgo de inundaciones urbanas o fluviales. El RX5day resulta más útil que RX1day para identificar las probabilidades de inundaciones fluviales, saturación de suelos o movimientos en laderas.

La comparación de estos índices entre las distintas estaciones del año contribuye a identificar las temporadas de mayor riesgo de inundación e inestabilidad. Aunque no es directamente un periodo de retorno, permite obtener indicios sobre su posible cambio.

Un incremento en los índices RX1day y/o RX5day, acompañado de un descenso de los días lluvia (RR1), implica una tendencia hacia un régimen de precipitaciones más extremo, con descargas más fuertes concentradas en un menor número de días.

Un aumento en el RX5day que no vaya acompañado de cambios en el índice RX1day sugiere un aumento en el riesgo de acumulación de la precipitación sostenida más que de episodios aislados. Los aumentos significativos de RX5day aconsejan revisar los planes de defensa contra avenidas o los sistemas de alerta temprana.

SPII — Índice Simple de Intensidad de Precipitación (*Simple Precipitation Intensity Index*): El índice simple de intensidad de precipitación (SPII) mide la precipitación esperada en un día de lluvia promedio durante un periodo de interés (mes, estación o año). Es muy común utilizar este índice para medir la anomalía de precipitación acumulada en 12 meses (SPI-12), expresada en unidades estandarizadas comparables entre climas. Para ello, se calcula como la ratio entre la precipitación total y el número de días con precipitación (es decir, es el promedio de precipitación en los días con precipitación).

El valor del índice se utiliza para evaluar el impacto de la precipitación sobre en los niveles de aguas subterráneas y sobre el almacenamiento en embalses más grandes. En este sentido resulta útil analizarlo por estaciones o meses.

Al no incluir variables como la temperatura o la evapotranspiración, resulta necesario complementarlo con otros índices a la hora de útil para estimar evaluar el estrés hídrico real debido al proceso de calentamiento atmosférico. No obstante, en un contexto de cambio climático y de transición hacia regímenes con menor precipitación más concentrada en el tiempo, un aumento del SPII sugeriría una mayor torrencialidad de la precipitación, típica de climas mediterráneos.

R95p/R99p — Porcentaje de días con mucha o extrema precipitación (*Very Wet Day Precipitation/Extremely Wet Day Precipitation*): Los porcentajes de días con precipitación muy alta y extrema (R95p y R99p, respectivamente) permiten analizar cambios en la frecuencia de días en los que la precipitación se puede considerar anormalmente alta y, por tanto, de la incidencia de tormentas que pueden provocar daños importantes. Los días con mucha precipitación y con precipitación extrema se definen a partir de los umbrales de precipitación de los percentiles 95 y el 99, respectivamente. Estos niveles señalan la magnitud de la precipitación recogida en los días con el 5 % y del 1 % de precipitación más copiosa durante un periodo de referencia (en nuestro caso, el periodo de referencia actual de la OMM, 1991-2020). El cálculo de este índice requiere un análisis previo para estimar los percentiles 95 y 99 para el periodo de referencia, antes de contar el número total de días en que se superan dichos umbrales y calcular el porcentaje que representan con respecto al total de días húmedos registrados durante el periodo de interés.

Los índices R95p y R99p cuantifican la proporción de los días más intensos con respecto al total de días con precipitaciones, y el grado de concentración de las lluvias en pocos días de alta intensidad. Por lo tanto, valores altos o tendencias al alza en los índices R95p y/o R99p sugerirían la posibilidad de que se produzcan eventos extraordinarios

o extremos, asociados al riesgo de inundación. Al igual que el SPII, dicho aumento es esperable en el contexto actual de cambio climático.

R95pTot — Porcentaje de precipitación acumulada en días muy húmedos (Contribution from Very Wet Days to Total Precipitation): El porcentaje total de precipitación en días muy húmedos cuantifica la cantidad total de precipitación acumulada en días muy lluviosos. Al igual que en el apartado anterior, se trata de un índice que mide la concentración temporal de la precipitación y el riesgo de descargas extremas. Los días muy lluviosos son aquellos en que se registra una precipitación por encima del percentil diario 95, es decir, el 5 % de los días de precipitación más copiosa para el periodo de referencia (en nuestro caso, de nuevo el periodo de referencia actual de la OMM, 1991-2020).

Se trata de un índice complementario a los índices de porcentaje de días con mucha precipitación (R95p) o con precipitación extrema (R99p). Un aumento en el R95pTot mientras la precipitación total permanece estable indica que la lluvia se concentra en unos pocos días. Este patrón de lluvias más concentradas e intensas implica mayor variabilidad diaria, mayor escorrentía superficial, incremento del riesgo de erosión y mayor probabilidad de episodios de avenidas e inundaciones. Dicho aumento sería consistente con un contexto de cambio climático que promoviera una transición hacia regímenes de precipitación de tipo mediterráneo.

Un incremento significativo de este índice aconseja la revisión de los planes de defensa contra avenidas o los sistemas de alerta temprana.

4.2. Extremos fríos y de calor

Uno de los efectos más claros del cambio climático es el incremento de las temperaturas observado en las últimas décadas, el cual se proyecta que continuará en el próximo siglo, independiente de la incertidumbre sobre la magnitud de dicho incremento. Además de los impactos reflejados para los extremos de precipitación y sequías, los extremos de temperatura tienen un gran impacto en la salud, sobre todo en poblaciones de riesgo como ancianos y niños, o en trabajadores con una alta carga física. Dicho impacto se magnifica en entornos urbanos merced al efecto de isla de calor que puede incrementar las temperaturas en las ciudades hasta 4 °C con respecto a las zonas verdes circundantes.

Por lo tanto, el cálculo sistemático de índices de extremos térmicos resulta esencial para evaluar, caracterizar y analizar el cambio climático, en términos de frecuencia, duración e intensidad de los extremos de calor y frío (Figura 15).

En este sentido, se han calculado 10 índices, incluyendo el inicio y la longitud del periodo de crecimiento activo de la vegetación o las necesidades de calefacción y refrigeración, con las que detectar tendencias. Estos índices son útiles para evaluar posibles impactos en salud, agricultura y ecosistemas, o turismo, así como para planificar la adaptación a escala local y regional.

SU — Días de verano (Summer Days): Este indicador cuantifica el número de días con temperatura máxima diaria (TX) igual o superior a 25 °C registrados durante el periodo de referencia. La frecuencia de días calurosos impacta en aspectos como el confort térmico, la demanda eléctrica o el riesgo de golpes de calor.

Su análisis por estaciones resulta útil para identificar cambios en los patrones climáticos. Así, por ejemplo, un SU alto en primavera o en otoño indica, respectivamente, un desplazamiento temprano o tardío del calor.

El análisis conjunto de SU con TR (noches cálidas) permite identificar periodos de estrés térmico continuo (día y noche cálidos). Se trata de un indicador relacionado con la ocurrencia de olas de calor (indicadores WSDI y NWSDI6d).

En relación con el cambio climático, el calentamiento global tiende a desplazar la distribución de las temperaturas máximas hacia valores más altos, aumentando la probabilidad de superar el umbral de referencia.

Se espera el ascenso de SU en la mayor parte de las latitudes medias. Un incremento de este indicador se asocia a una disminución de la productividad laboral, en especial al aire libre, al incremento en el consumo energético en refrigeración y al aumento de los problemas de salud, como los golpes de calor, en particular en algunos grupos poblacio-

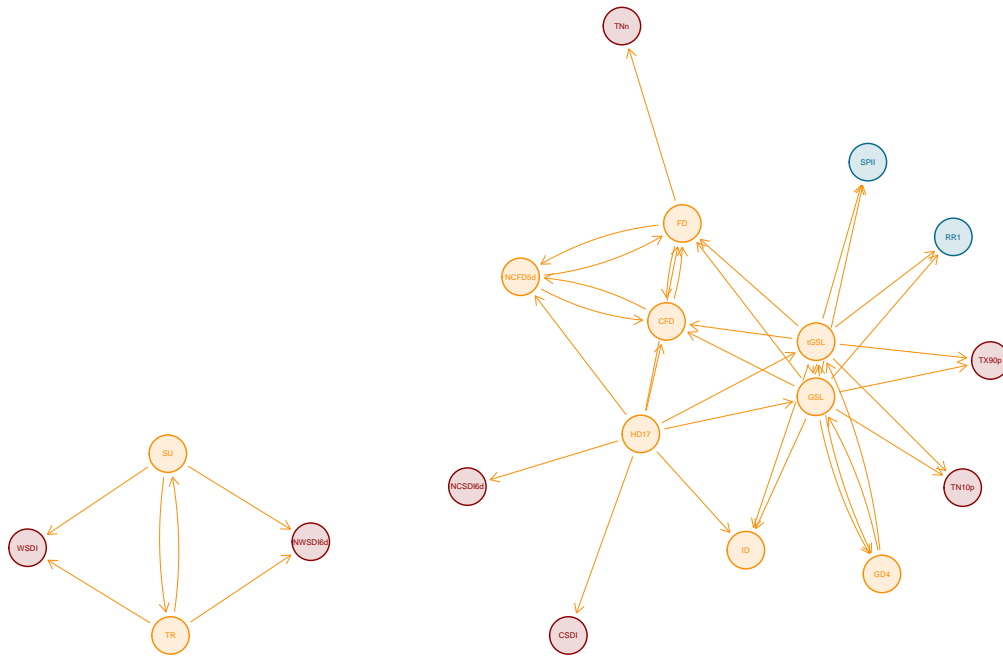


Figura 15: Relaciones que facilitan la interpretación de los índices de extremos fríos y de calor. La figura muestra un subconjunto de la información de la figura 13.

nales.

TR — Noches tropicales (Tropical Nights): Este indicador cuantifica el número de días con temperatura mínima diaria (TN) igual o superior a 20 °C registrados durante el periodo de referencia. Se trata de un indicador particularmente crítico en ciudades por el efecto isla de calor urbana.

Una frecuencia elevada de noches calurosas implica un leve descenso nocturno de las temperaturas, lo que incrementa el estrés térmico al dificultar el descanso, y aumenta los riesgos para la salud, en particular para las personas con patologías previas como las cardiorrespiratorias. Además, durante las noches calurosas también se produce un incremento de la demanda eléctrica.

El análisis de TR conjuntamente con SU (días de verano) permite identificar periodos de estrés térmico continuo (día y noche cálidos). De nuevo, se trata de un indicador relacionado con la ocurrencia de olas de calor (indicadores WSDI y NWSDI6d).

En relación con el cambio climático, los análisis muestran que, en muchas regiones y especialmente en verano, las temperaturas mínimas tienden a incrementarse más deprisa que las máximas, lo que favorece el incremento de TR.

GD4 — Crecimiento en grados-día, base 4 °C (Growing Degree Days, base 4 °C): GD4 cuantifica el calor útil acumulado para el crecimiento biológico a lo largo de un periodo (normalmente el año o una estación). Se calcula mediante la suma, día tras día, de cuánto supera la temperatura media diaria un determinado umbral de referencia. En nuestro caso, se toma como base 4 °C, una temperatura por debajo de la cual se asume que prácticamente se detiene crecimiento.

La temperatura base de 4 °C se considera adecuada para ecosistemas templados atlánticos y cuando se consideran especies que empiezan su actividad con poco calentamiento. Un mayor valor de GD4 implica una mayor cantidad de «energía térmica» disponible para el crecimiento de las plantas y para la actividad de organismos ectotermos (aque-

llos cuya temperatura corporal depende de la temperatura ambiental). Por tanto, un aumento de GD4 puede ir asociado a una mayor probabilidad de aparición y expansión de plagas y vectores que, en otras condiciones, verían su crecimiento limitado por condiciones más frías o por un periodo favorable menos prolongado.

Debe tenerse en cuenta que es un indicador meramente térmico que no incorpora factores como el fotoperiodo (cantidad de tiempo diario que un organismo está expuesto a la luz), la disponibilidad de agua y nutrientes, o la ocurrencia de heladas u olas de calor, factores todos ellos que pueden limitar tanto en conjunto como por separado el crecimiento real de un organismo, incluso aunque aumente el índice GD4.

El índice GD4 está relacionado con los indicadores de longitud e inicio del periodo de crecimiento (GSL/tGSL), que describen cuándo se dan las condiciones térmicas favorables. GD4 mide cuánto calor útil se acumula dentro del periodo de crecimiento. Por lo general, el calentamiento global promueve que ambos indicadores aumenten, aunque no siempre al mismo ritmo.

El calentamiento aumenta de forma sistemática los grados-día, provocando desajustes fenológicos (plantas, polinizadores, etc.) tanto en los ecosistemas como en los cultivos, pudiendo modificar calendarios agrícolas.

HD17 — Grados-día de calefacción, base 17 °C (Heating Degree Days, base 17 °C): Los grados-día de calefacción, HD17, cuantifican la demanda térmica potencial de calefacción debida al clima. Para ello suma, día a día, cuánto falta para alcanzar una temperatura de confort base de 17 °C con respecto a la temperatura media diaria. El umbral de 17 °C es una temperatura base fija ampliamente utilizada en climatología de extremos, lo que facilita la comparación entre países y grandes regiones.

Se trata de un índice climático muy útil para comparar las condiciones entre lugares y años, así como para analizar tendencias. No obstante, es importante tener en cuenta que no refleja el consumo o la demanda real de energía. Por ejemplo, en el contexto del análisis energético de edificaciones, se habla de una «temperatura de equilibrio» que corresponde al rango de temperaturas de confort térmico que se busca alcanzar. Esta temperatura de equilibrio depende del aislamiento de la edificación; las ganancias internas debidas al calor generado por fuentes dentro del propio edificio, principalmente por la ocupación (personas), los equipos eléctricos y la iluminación; la ventilación, y de los hábitos de los ciudadanos.

Aun así, el índice HD17 resulta útil para comparar cambios entre años y estaciones, y para el diseño y planificación de medidas de adaptación o el análisis de los cambios en la demanda energética. Por otra parte, los inviernos más suaves reducen parte del riesgo para la salud por frío, aunque los episodios extremos siguen siendo críticos.

Los valores altos de HD17 implican inviernos fríos y mayor necesidad de calefacción. Con independencia de los efectos pico provocados por intrusiones, en un contexto de calentamiento global se espera descenso de HD17 y, por tanto, una menor demanda de calefacción, aunque suele ir acompañada de un aumento en la demanda de refrigeración en otras épocas del año.

GSL — Duración del periodo de crecimiento (Growing Season Length): Conforme a la definición ETCCDI para el hemisferio norte, el indicador GSL mide la duración del periodo de crecimiento, definido como el número de días transcurridos entre el primer periodo de ≥ 6 días consecutivos con una temperatura media diaria por encima de 5 °C y la ocurrencia de un periodo de ≥ 6 días consecutivos con temperaturas inferior a 5 °C en la segunda mitad del año (tras el 1 de julio), que marca el final del periodo de crecimiento vegetativo.

Por lo tanto, en el GSL se identifican ambos tramos, el de inicio y fin térmico de la estación de crecimiento, calculando cuántos días del año reúnen condiciones térmicas sostenidas para el crecimiento vegetativo. Debe tenerse en cuenta que es un indicador fenológico térmico, por lo que no incluye otros factores como el fotoperiodo, la disponibilidad recursos hídricos o de nutrientes, ni la ocurrencia de heladas u olas de calor, que pueden limitar el crecimiento real.

En definitiva, un GSL más largo no garantiza un incremento del rendimiento o del crecimiento vegetativo en casos de

sequía o calor excesivo, por lo que conviene combinarlo con índices de humedad y de extremos de temperatura.

En relación con el cambio climático, la tendencia más generalizada en latitudes medias y altas es el incremento del GSL, lo que se traduciría en más tiempo potencial para cultivos o el incremento de la biomasa, pero también una mayor demanda hídrica y un mayor riesgo de olas de calor.

tGSL — Día del año en que comienza el período de crecimiento vegetativo (Start of Growing Season, day-of-year): El indicador tGSL se refiere al día juliano (1–365/366) en que comienza el periodo de crecimiento térmico según el estándar ETCCDI. Indica el día del año en el que se dan las condiciones mínimas de temperatura para la actividad vegetativa. Considera un umbral térmico mínimo base de 5 °C, una temperatura por encima de la que se considera que es posible la actividad vegetativa en general, no una especie o cultivo específico.

El tGSL señala el adelanto o el retraso del comienzo de la estación de crecimiento vegetativo, y resulta útil para los análisis de la fenología de los ecosistemas, la agricultura y la gestión de recursos hídricos.

Se trata de un indicador sensible a las condiciones y localización territorial. En el litoral y valles bajos el inicio puede ser temprano y poco variable; en zonas de cordillera y cuencas altas, más tardío y sensible a irrupciones frías. Para aplicaciones agroforestales conviene validar el umbral y combinar el análisis del tGSL con el índice FD (días de heladas) locales. Otros indicadores relacionados y complementarios son GSL (duración de la temporada de crecimiento), GD4 (grados-día de crecimiento), CFD (racha de heladas más larga) e ID (días de hielo).

En el contexto de cambio climático, se espera una tendencia al adelanto del tGSL en latitudes medias y altas. Los posibles efectos esperados son el adelanto de la floración o de los periodos de siembra, la expansión de plagas y un incremento de la demanda hídrica por el alargamiento de las temporadas de crecimiento, y un mayor riesgo de daños por heladas tardías si la variabilidad persiste.

FD — Número de días con heladas (Frost Days): El índice FD proporciona un recuento del número de días en los que se registra una temperatura mínima diaria por debajo del punto de congelación del agua (es decir, $TN < 0^{\circ}C$ medida a 2 m sobre el suelo), durante un determinado periodo de interés (por ejemplo, anual o estacional).

Se trata de un índice directo del riesgo de heladas y del potencial impacto sobre los cultivos, los ecosistemas y la seguridad en los servicios como carreteras, abastecimiento de agua y energía, entre otros. El FD resume la frecuencia de las heladas, no su persistencia o intensidad, para lo que habría que recurrir a indicadores como CFD (Racha de heladas más larga), NCFD5d (número de rachas de heladas) o el mínimo anual de TN (temperatura mínima diaria).

Bajo un escenario de calentamiento global, la tendencia de FD es a la baja en muchas regiones de latitudes medias y bajas, con notables diferencias altitudinales, costeras o urbanas, lo que no evita el efecto provocado por la ocurrencia de eventos extremos.

CFD — Número máximo de días consecutivos con heladas (Consecutive Frost Days): El CFD mide la duración máxima de una racha de heladas en un año, es decir, el número de días consecutivos en los que la temperatura mínima diaria registrada a 2 m sobre el suelo es menor que el punto de congelación del agua ($TN < 0^{\circ}C$).

El indicador expresa la persistencia del frío, por lo que complementa índices como FD, que registra la frecuencia de heladas, o como el mínimo absoluto de la temperatura mínima, que registraría una intensidad puntual de los extremos fríos. Un CFD bajo acompañado de un FD alto sugiere heladas frecuentes pero breves. Por el contrario, si ambos indicadores son altos, se producirían condiciones frías de manera frecuente y persistente.

En muchas regiones de latitudes medias se observa o se estima un descenso de la persistencia de heladas, coherente con inviernos más suaves. No obstante, la variabilidad interanual y ciertos patrones de circulación atmosférica, como por ejemplo irrupciones árticas, pueden seguir generando rachas frías notables aun cuando la tendencia de fondo sea descendente.

NCFD5d — Número de períodos de al menos cinco o más días con heladas (Number of Frost Spells): El índice NCFD5d cuenta el número de rachas de heladas registradas a lo largo de un periodo de interés (un año, estación o temporada). Una racha de heladas se define como un episodio de al menos 5 días consecutivos en los que la temperatura mínima diaria desciende por debajo del punto de congelación del agua ($TN < 0^{\circ}\text{C}$). El índice NCFD5d resume la persistencia repetida del frío, no solo su frecuencia total (FD) ni la duración máxima (CFD).

Para la gestión de riesgos y la adaptación, varias rachas medianas pueden ser más dañinas que una sola muy larga, sobre todo si coinciden con fases o periodos críticos. En los sectores agrícola y forestal el indicador cuantifica episodios dañinos prolongados (necrosis, congelación de suelo o estrés en especies perennes); en la gestión de infraestructuras puede implicar el incremento de las operaciones de mantenimiento y alterar el nivel de servicio; en el ámbito de la energía se traducirá en episodios que generan picos continuados de calefacción; y en relación con la salud, supondrá una mayor exposición al frío.

En muchas regiones templadas se observa o se estima que se producirá una reducción de NCFD5d (episodios largos menos frecuentes), aunque la variabilidad atmosférica puede seguir produciendo alguno esporádicamente. En áreas urbanas, la isla de calor suele disminuir NCFD5d respecto a zonas rurales, mientras que en áreas de alta montaña el descenso puede ser menor o más lento.

ID — Número de días con hielo (Ice Days): El índice ID cuenta los días del año en los que la temperatura máxima diaria a 2 m sobre el suelo no supera el punto de congelación del agua ($TX < 0^{\circ}\text{C}$), durante un periodo de referencia (anual o estacional). Valores altos de este índice corresponden a la ocurrencia de periodos de frío persistente, ya que solo considera días en los que ni siquiera durante las horas más cálidas del día se supera el punto de congelación.

Al igual que algunos de los índices anteriores, los ID tienen relevancia para la gestión de riesgos. El calentamiento global tiende a reducir la frecuencia de días con máximas bajo cero, acortando la temporada nival a baja o media altitud. Además, la disminución de ID afecta a la disponibilidad de recursos hídricos procedentes del deshielo, y limita o impide la viabilidad de la práctica de deportes de invierno. Por otra parte, la ocurrencia de heladas o los días con hielo proporcionan un índice complementario tanto para explorar posibles impactos sobre el crecimiento de vegetación y cultivos, así como riesgos en el transporte e incrementos en el gasto energético.

4.3. Extremos de temperatura

El tercer grupo de índices analiza cambios en los extremos de temperatura, incluyendo la amplitud térmica y los extremos absolutos de temperaturas mínimas y máximas. Estos índices utilizan criterios homogéneos para resumir cambios en la intensidad, frecuencia y duración de eventos térmicos relevantes a la hora de estudiar los riesgos e impactos de los extremos de temperatura sobre una amplia gama de procesos y sectores, desde el efecto directo sobre la salud humana, hasta aspectos como la producción y consumo de energía, la agricultura o los incendios. Se trata de un conjunto de indicadores estrechamente relacionados con el grupo de indicadores de extremos fríos y de calor.

En total se han calculado 14 índices que abarcan cuatro dimensiones complementarias de los extremos (Figura 16):

- la amplitud o contraste térmico que se experimenta en un determinado periodo de tiempo de interés (ETR, DTR),
- la severidad de los extremos absolutos de temperatura (TN_n , TN_x , TX_x , TX_n),
- la distribución relativa en el tiempo o en el espacio de extremos de frío o de calor (TN_{10p} y TX_{10p} , o TN_{90p} y TX_{90p}), y
- la persistencia o recurrencia de rachas durante las que se producen condiciones de temperatura extremas (WSDI/NWSDI6d para calor; CSDI/NCSDI6d para frío).

Extremos de temperatura

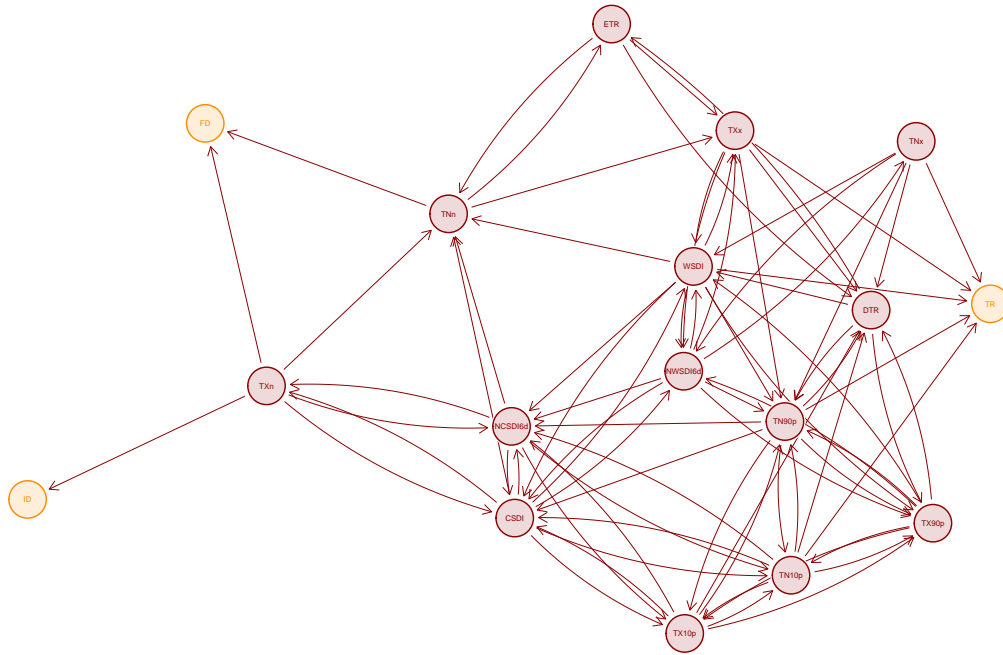


Figura 16: Relaciones que facilitan la interpretación de los índices de temperatura. La figura muestra un subconjunto de la información de la figura Figura 13.

ETR — Amplitud térmica anual (Extreme Temperature Range): El indicador cuantifica el contraste anual entre los extremos absolutos de temperatura, es decir, la diferencia en grados entre la temperatura máxima del día más caluroso (TXx) y la temperatura mínima de la noche más fría (TNn). Al no emplear percentiles, es un indicador de colas o extremos absolutos que resume el contraste térmico del año.

Un ETR alto indica años con extremos muy marcados, tanto por olas de calor muy intensas como por irrupciones severas de frío. Por esta razón, condiciones muy distintas de calor o frío pueden resultar en un mismo valor de ETR, por lo que es conveniente analizar este índice junto con las tendencias en los valores de los extremos absolutos de temperatura (TXx y TNn anuales), y considerando los cambios en la amplitud térmica diurna media (DTR).

DTR — Amplitud térmica diurna (Diurnal Temperature Range): El DTR cuantifica la amplitud media del rango diario de temperaturas, es decir, el promedio de la diferencia entre la temperatura máxima diaria (TX) y la temperatura mínima diaria (TN) a lo largo de un periodo de interés (año, estación, mes, etc.). En la práctica, este cálculo resulta al sustraer la mínima nocturna de la máxima diurna cada día, promediando después todas esas diferencias sobre el periodo de interés (o tomando directamente la diferencia entre las temperaturas medias si se parte de datos tabulados, ya que se trata de una operación lineal).

A diferencia de otros índices basados en extremos puntuales, el DTR describe el comportamiento típico del ciclo térmico diario y, por tanto, es especialmente sensible a los procesos que modulan el calentamiento durante el día y el enfriamiento durante la noche.

El DTR refleja el balance entre la insolación diurna y el enfriamiento nocturno. La isla de calor urbana suele elevar de forma preferente las temperaturas nocturnas, reduciendo así la diferencia día-noche. Del mismo modo, la influencia marítima y las brisas costeras tienden a suavizar el ciclo diario frente a situaciones más continentales.

En el contexto de cambio climático, frecuentemente el valor del DTR tiende a disminuir porque las noches se calientan más rápido que los días, aunque también puede ocurrir lo contrario en regiones con sequías y cielos más despeja-

dos, en los que las mínimas diarias tienden a disminuir o mantenerse, produciéndose un aumento en el DTR.

Para una lectura integral del riesgo térmico, es conveniente complementar el DTR con índices de extremos y persistencia, como ETR (Amplitud térmica anual de extremos), TN90p y TX90p (frecuencia de noches y días cálidos) y WSDI (olas de calor).

TNn — Temperatura mínima anual: noche más fría (Coldest Night): La TNn anual es la temperatura mínima absoluta diaria más baja registrada a lo largo de un año y, por tanto, describe la severidad del frío extremo en una localidad. A diferencia de los índices basados en percentiles, TNn no describe la frecuencia con la que se producen condiciones frías, sino su punto más bajo. Proporciona por tanto un indicador muy intuitivo para comunicar la rigurosidad de los periodos invernales en términos absolutos.

La interpretación es directa. Valores muy bajos de TNn revelan que en un lugar se pueden alcanzar temperaturas nocturnas extremas, con implicaciones para la salud, el consumo energético o la actividad agraria. Por el contrario, valores de TNn más altos sugieren un entorno en el que por alguna razón que se amortigua el frío (influencia marítima o isla de calor urbana).

Conviene interpretar la TNn junto con otros indicadores como el FD (número de días de helada), TXx (temperatura máxima anual) o el ETR (Amplitud térmica anual de extremos), ya que ayudan a caracterizar si cambian solo los valores fríos, los cálidos o el contraste entre ambos.

En relación con el cambio climático, muchas regiones muestran un incremento de TNn a lo largo de las últimas décadas, ya que los episodios de frío extremo tienden a ser menos severos. Este comportamiento se asocia al calentamiento asimétrico (las noches se calientan más que los días), con independencia de la ocurrencia de eventos extremos provocados por irrupciones frías puntuales.

TNx — Máximo anual de la temperatura mínima: noche más cálida (Warmest Night): La temperatura mínima absoluta más alta, TNx, corresponde a la noche más cálida durante un periodo de interés, en este caso, un año. Es el valor más alto alcanzado por la temperatura mínima diaria en un periodo anual (o estacional, si se calcula por estaciones). Su cálculo es directo: a partir de la serie diaria de temperaturas mínimas, se identifica el máximo anual.

A diferencia de indicadores de frecuencia, como TR (porcentaje de noches tropicales) o TN90p (porcentaje de noches cálidas), TNx resume el extremo absoluto del calor nocturno, es decir no indica cuántas noches cálidas hubo, sino cuán cálida llegó a ser la mínima en la noche más sofocante del año. Es un indicador especialmente útil para valorar el estrés térmico nocturno. En términos físicos y de interpretación, una TNx elevada revela noches que no consiguen disipar el calor acumulado durante el día.

Respecto al cambio climático, en muchas regiones se observa un calentamiento asimétrico que favorece el incremento de las temperaturas mínimas frente a las máximas. En ese contexto, TNx tiende a aumentar con el paso de las décadas. En salud pública, los valores altos de TNx se asocian a una mayor morbilidad y mortalidad durante olas de calor, al impedir el descanso térmico nocturno, especialmente en colectivos vulnerables. En energía y edificación, noches muy cálidas disparan y prolongan la demanda de refrigeración y reducen la eficacia de la ventilación nocturna. En agricultura, el incremento de las mínimas puede elevar la respiración nocturna, afectando rendimientos y calidad de los cultivos.

Para una lectura completa, TNx debería interpretarse junto con TN90p (frecuencia relativa de noches cálidas), TR (conteo de noches tropicales), DTR (amplitud diurna, que suele descender cuando suben las mínimas), o con indicadores de persistencia como WSDI (olas de calor).

TXn — Mínima anual de las temperaturas máximas diarias: día más frío (Coldest Day): El mínimo absoluto anual de la temperatura máxima diaria, TXn, corresponde a la temperatura registrada el día en que menos suben las temperaturas a lo largo de un año. Se trata de un índice que también se puede calcular para una estación o mes concreto,

correspondiendo siempre al valor más bajo de la temperatura máxima diaria registrado durante ese periodo. La interpretación de TXn anual combina el valor absoluto con su variabilidad interanual y con los contrastes espaciales: en general, las zonas costeras y los centros urbanos muestran TXn menos extremos por el efecto termorregulador del mar y la isla de calor urbana, mientras que los valles interiores pueden registrar valores muy bajos por acumulación o embolsamientos de aire frío. El índice TXn captura la intensidad del frío diurno, es decir, el periodo en que se concentra la mayor parte de la actividad. Por tanto, es una variable con implicaciones directas en la seguridad vial y ferroviaria (hielo en superficies y catenarias), en la demanda de calefacción, en el estrés por frío de la población vulnerable, y en el riesgo de heladas.

En el contexto del cambio climático, la tendencia más frecuente es hacia un aumento progresivo de los valores de TXn, debido a situaciones de frío menos extremos durante el invierno en las horas centrales del día y, aunque los episodios de frío extremo seguirán produciéndose, en general, se vuelven menos probables y, en promedio, menos severos.

Para una valoración completa, TXn se interpreta junto al índice TNn (frío nocturno), o con indicadores de frecuencia como FD/ID (días de helada/de hielo) y medidas de persistencia del frío como CSDI (olas de frío).

TXx — Temperatura máxima anual: día más cálido (Hottest Day): La temperatura máxima absoluta anual, TXx, corresponde a la temperatura más alta registrada durante el día más caluroso del año, es decir, el valor más alto de la temperatura máxima diaria (°C) observado en ese periodo. Se trata de un índice cuya utilidad reside en que resume la intensidad del calor extremo en un único número fácil de comunicar y directamente relevante para la salud pública, la planificación urbana y la gestión de riesgos. En suma, TXx es un indicador sencillo, robusto y altamente informativo, al condensar el máximo térmico anual, permitiendo seguir la huella del calentamiento en los picos.

En relación con el cambio climático, la evidencia acumulada muestra que TXx ha aumentado en gran parte de las regiones terrestres desde mediados del siglo XX, superándose más a menudo los umbrales críticos. Si se tradujese ese cambio a periodos de retorno, por ejemplo, un valor que en el pasado se registraba «1 vez cada 50 años», puede producirse actualmente «1 vez cada 10 años».

Para una lectura completa, TXx debería interpretarse junto con TN90p (frecuencia relativa de noches cálidas), TR (conteo de noches tropicales), DTR (amplitud diurna, que suele descender cuando suben las mínimas), o con indicadores de persistencia como WSDI (olas de calor).

TN10p — Porcentaje de noches frías (Cool Nights): El índice TN10p mide el porcentaje de noches que a lo largo de un periodo de interés que, normalmente, corresponde a un año o a una estación, resultan anómalamente frías. Una noche se considera «noche fría» cuando la temperatura mínima diaria (TN) no supera un valor de referencia que corresponde al percentil 10 de las temperaturas registradas durante un periodo de referencia, en este caso 1991–2020. Estos valores de referencia se calculan primero con una frecuencia diaria sobre la que, para evitar variaciones espurias, se calcula una media móvil de 5 días que suaviza la estacionalidad de los percentiles. Por tanto, se trata de valores de temperatura que se encuentran por debajo del 10 % de las temperaturas más bajas esperables para un día concreto del año.

En un clima estacionario obtendríamos un valor para TN10p situado en torno al 10 %. Sin embargo, en un clima cambiantes el valor de TN10p aumentaría o disminuiría en el tiempo. Los valores sistemáticamente menores apuntan a noches menos frías de lo habitual, mientras que los valores superiores indican temporadas con irrupciones frías más frecuentes. Más allá de las variaciones anuales, lo relevante es la tendencia en ventanas de 20–30 años. En la mayoría de las regiones TN10p desciende a medida que el clima se calienta a medida que las noches frías se vuelven menos frecuentes.

Se trata de un indicador útil para la adaptación en materias como la salud pública (riesgo por frío en población vulnerable), la energía (demanda de calefacción), la agricultura (heladas fuera de temporada) o la protección civil (activación de avisos).

Para una interpretación completa, es recomendable combinarlo con otros indicadores como TN90p (noches cálidas), TR (noches tropicales), TX10p/TX90p (frecuencia de días fríos/cálidos) y DTR (amplitud diurna) o CSDI (olas de frío).

TN90p — Porcentaje de noches cálidas (Warm Nights): El índice TN90p mide el porcentaje de noches que a lo largo de un periodo de interés que, normalmente, corresponde a un año o a una estación, resultan anómalamente cálidas. Una noche se considera «noche cálida» cuando la temperatura mínima diaria (TN) supera percentil 90 calculado sobre el periodo de referencia 1991–2020 y tras aplicar una media móvil de 5 días (véase TN10p para una explicación más detallada).

En un clima estacionario, el índice TN90p presentase un valor en torno al 10 %. Valores claramente superiores indican que las noches cálidas son más habituales de lo normal para la época, mientras que valores por debajo apuntan lo contrario. Más allá de las variaciones anuales, lo relevante es la tendencia en ventanas de 20–30 años. En el contexto de cambio climático, en la mayoría de las regiones el TN90p experimenta una tendencia al incremento volviéndose las noches anómalamente cálidas se vuelven más frecuentes.

Se trata de un indicador útil para la adaptación en materias como la salud pública (recuperación térmica nocturna, mortalidad en olas de calor), la energía (picos de demanda de refrigeración nocturna), el confort térmico urbano y sectores como agricultura y ganadería (estrés térmico sostenido).

Para una interpretación completa, es recomendable combinarlo con otros indicadores como TN10p (noches frías), TR (noches tropicales), TX10p/TX90p (frecuencia de días fríos/cálidos) y DTR (amplitud diurna) o CSDI (olas de frío).

TX10p — Porcentaje de días fríos (Cool Days): El índice TX10p mide el porcentaje de días que a lo largo de un periodo de interés que, normalmente, corresponde a un año o a una estación, fueron más fríos de lo normal para esa fecha en términos de temperatura máxima. Se considera que un día es «frío» cuando la temperatura máxima diaria (TX) no supera percentil 10 de las temperaturas máximas calculado sobre el periodo de referencia 1991–2020, y tras aplicar una media móvil de 5 días. El percentil 10 es el valor de temperatura por debajo del cual se encuentra el 10 % de las temperaturas más altas registradas.

En un clima estacionario, lo esperable sería un valor de TX10p de alrededor del 10 %. Los valores altos señalan temporadas con más irrupciones frías diurnas de lo normal, mientras que los valores bajos apuntan a menos días fríos, coherentes con un suavizamiento del clima o con la influencia de los ambientes urbanos. Más allá de las variaciones anuales, lo relevante es la tendencia en ventanas de 20–30 años. En el contexto de cambio climático, en la mayoría de las regiones TX10p tiende a descender a medida que se calienta el clima, por lo que cada vez se registrarían menos días anómalamente fríos en máximas.

Se trata de un indicador útil para la adaptación en materias como la salud pública (estrés por frío), la energía (demanda de calefacción), el transporte (riesgo de hielo en las vías), o la agricultura (heladas diurnas y daños en cultivo).

Para una interpretación completa, es recomendable combinarlo con otros indicadores como TX90p (días muy cálidos), TN10p/TN90p (noches frías/cálidas, contraste día-noche), CSDI (olas de frío, persistencia) o DTR (amplitud diurna).

TX90p — Porcentaje de días cálidos (Warm Days): El índice TX90p mide el porcentaje de días que a lo largo de un periodo de interés que, normalmente, corresponde a un año o a una estación, fueron más cálidos de lo normal para esa fecha en términos de temperatura máxima. Este índice se calcula mediante el recuento del número de días en que la temperatura máxima supera el percentil 90 de la temperatura máxima, calculado sobre el periodo de referencia 1991–2020 y tras aplicar una media móvil de 5 días. El percentil 90 es el valor de temperatura por debajo del cual se encuentra el 90 % de las temperaturas más altas registradas.

En un clima estacionario, lo esperable sería que los valores de TX90p se situasen en torno al 10 %. Los valores claramente superiores señalan periodos con más días anómalamente cálidos de lo habitual, mientras que los valores inferiores indican una disminución de los días más cálidos. Más que un año aislado, importa la tendencia en periodos de

20–30 años. En relación con el cambio climático, el índice TX90p está aumentando en la mayoría de las regiones, debido a que los extremos cálidos son cada vez más frecuentes. Esto no implica que no se produzcan años con menos días cálidos, pero describe un desplazamiento de la distribución hacia más jornadas muy cálidas, lo que es consistente con un aumento progresivo de las temperaturas en el contexto de calentamiento observado a escala global.

Se trata de un indicador útil para la adaptación en materias como la salud pública (recuperación térmica nocturna, mortalidad en olas de calor), la energía (picos de demanda de refrigeración nocturna), el confort térmico urbano y sectores como agricultura y ganadería (estrés térmico sostenido).

Para una interpretación completa, es recomendable combinarlo con otros indicadores como TX10p (días fríos), TR (noches tropicales), TN10p/TN90p (frecuencia de noches frías/cálidas) y DTR (amplitud diurna) o WSDI (olas de calor).

CSDI - Duración promedio de la ola de frío más larga cada año (Cold Spell Duration Index): El CSDI determina la duración promedio de la ola de frío más larga cada año. Una ola de frío ocurre cuando la anomalía diaria de la temperatura mínima (TN) está al menos seis días consecutivos por debajo del percentil 10 para esas fechas, calculado para el periodo 1991–2020 tras aplicar una media móvil de 5 días.

El CSDI no mide un pico aislado, sino la persistencia del frío extremo, que es lo que realmente acumula impacto. Valores altos, como, por ejemplo, mayores o iguales a 10 días, señalan inviernos con episodios fríos largos y persistentes, mientras que valores bajos, de 6 o 7 días, indican olas cortas. En cualquier caso, lo relevante del índice no son los valores anuales sino la tendencia y la evolución temporal de los mismos.

En relación con el cambio climático, en muchas regiones se observa una reducción de la persistencia del frío (CSDI a la baja), coherente con menos noches frías (TN10p) y mínimas menos extremas (TNn). Aun así, la variabilidad atmosférica permite irrupciones frías puntuales y, por tanto, la ocurrencia de eventos extremos de frío.

Se trata de un indicador útil para la gestión del riesgo y la adaptación en materias como la salud pública (riesgo por exposición prolongada), la energía (demanda sostenida de calefacción), las infraestructuras y la movilidad (persistencia de hielo en vías de comunicación) o en agricultura (daños por heladas continuadas).

Para una correcta interpretación del CSDI es aconsejable complementarlo con otros índices como TN10p / TX10p (frecuencia de noches/días fríos), TNn / TXn (intensidad de los extremos fríos), NCSDI6d (número de episodios de olas de frío) o WSDI (Índice de duración de olas de calor).

NCSDI6d - Número de episodios de ola de frío con una duración de al menos 6 días (Number of Cold Spells): El NCSDI6d hace un recuento, para cada año, cuántos episodios de ola de frío se producen con duración mínima de 6 días consecutivos. Una ola de frío ocurre cuando la temperatura mínima diaria (TN) permanece por debajo del percentil 10, calculado sobre el periodo de referencia 1991–2020 y suavizado con una ventana móvil de 5 días.

Se trata de un índice que proporciona información sobre la recurrencia de periodos fríos prolongados. No se centra en un día extremo aislado, sino en cuántas veces se instala un frío persistente.

En relación con el cambio climático, en muchas regiones se observa una disminución del número de olas de frío prolongadas (NCSDI6d a la baja), coherente con menos noches frías y mínimos invernales menos extremos. Eso no impide que, debido a la variabilidad atmosférica, aparezcan inviernos con varios episodios de olas de frío, aunque, en conjunto se vuelven menos probables.

Se trata de un indicador útil para la gestión del riesgo y la adaptación en materias como la salud pública (estrés por frío en grupos de población vulnerables), la energía (demanda de calefacción), las infraestructuras y la movilidad (presencia de hielo en vías de comunicación) o en agricultura (daños por heladas repetidas).

Para la interpretación complementaria del NCSDI6d es recomendable recurrir a otros índices como CSDI (duración promedio de la ola de frío más larga cada año) y con indicadores de frecuencia/intensidad como TN10p/TX10p (no-

ches y días fríos) o TNn/TXn (mínimos anuales).

WSDI — Duración promedio de la ola de calor más larga cada año (Warm Spell Duration Index): El índice WSDI determina el número total de días que, a lo largo de un periodo de interés, corresponderían a una situación de ola de calor. En general, se entiende que una ola de calor corresponde a un periodo más o menos prolongado durante el que una región determina se ve afectada por unas condiciones de temperaturas anormalmente altas para ese lugar en la época del año en que se producen. Aunque no existe una definición universal para identificar cuándo se produce una ola de calor Barriopedro *et al.* [2023], es común partir de la definición de un ciclo estacional de referencia que permita clasificar si un día es anormalmente cálido o no. En nuestro caso, calculamos la estacionalidad a partir del percentil 90 de la temperatura máxima registrada durante cada día durante el periodo 1991-2020, suavizando la serie diaria resultante aplicando una media móvil de cinco días. A continuación, definimos una ola de calor como aquellos periodos de seis o más días consecutivos durante los que la temperatura máxima diaria supera el valor de referencia. Se identificaron todas las olas de calor que ocurrieron a lo largo del periodo de interés durante cada año. Para calcular el WSDI se anotó el número total de días de ola de calor por año.

El WSDI no se centra en un pico aislado de calor ni en un único episodio, sino en la persistencia de calor extremo en uno o más episodios a lo largo del año. Los valores altos (mayores o iguales a 10 ó 12 días) describen olas de calor largas y persistentes, mientras que los valores bajos (de 6 ó 7 días) indican episodios aislados de corta duración y poco persistentes.

En relación con el cambio climático, se ha detectado que las olas de calor se han vuelto más largas y/o frecuentes en muchas regiones, por lo que el WSDI tiende a aumentar en el tiempo.

Se trata de un índice útil para la gestión del riesgo y la adaptación a los efectos del cambio climático, ya que episodios de calor más largos implican mayor presión sobre sistemas sanitarios, picos sostenidos de demanda eléctrica por refrigeración, deterioro del confort térmico urbano y estrés térmico en agricultura y ganadería.

Para una correcta interpretación del WSDI, es recomendable recurrir a otros índices como TX90p (frecuencia de días muy cálidos), TN90p / TR (calor nocturno), TXx (intensidad pico cálido), CSDI / NCSDI6d (frío persistente) o DTR (amplitud diurna).

NWSDI6d – Número de episodios de ola de calor con una duración de al menos 6 días (Number of Warm Spells): El NWSDI6d es un índice que complementa al índice de duración de olas de calor WSDI, ya que consiste en un recuento del número total de episodios de ola de calor que se producen a lo largo del periodo de interés que, en nuestro caso, es un año natural. Tal y como se detalla en el apartado anterior, definimos las olas de calor como periodos con unas condiciones de calor anormalmente alto durante un periodo de al menos seis días consecutivos, en los que la temperatura máxima diaria (TX) supera una temperatura de referencia basada en el percentil 90 de la temperatura máxima calculado sobre el periodo de referencia 1991–2020 y suavizado con una ventana móvil de 5 días.

Se trata de un índice que proporciona información sobre la recurrencia de periodos cálidos prolongados. No se centra en un día extremo aislado, sino en cuántas veces se instala un calor persistente. Si se registran entre 0 y 1 episodios al año puede considerarse una temporada relativamente tranquila; si se registran más 3 episodios nos encontramos ante una temporada excepcional por alta recurrencia.

Se trata de un indicador útil para la gestión del riesgo y la adaptación, ya que la ocurrencia de múltiples olas de calor en una temporada presupone una acumulación de presión sobre el sistema sanitario y la salud pública, algunos sectores productivos, como la agricultura (estrés térmico), descensos en la productividad (estrés térmico laboral sobre todo en trabajos al aire libre), el sistema energético (picos sostenidos de demanda eléctrica por refrigeración) y degradación del confort urbano e isla de calor.

Para una correcta interpretación del NWSDI6d conviene analizar conjuntamente otros índices como WSDI (duración de los episodios de ola de calor), TN90p/TNx (estrés nocturno asociado), TXx (intensidad del pico del calor), TX90p

(frecuencia de días muy cálidos) o CSDI / NCSDI6d (frío persistente).

5. Proyecciones calibradas de cambio climático CORDEX

Los estudios de evaluación y atribución de los impactos del cambio climático emplean tanto observaciones del clima como proyecciones a futuro para anticipar y valorar los costes y beneficios de distintas políticas y actuaciones, así como para identificar y prevenir posibles amenazas. Al igual que en el caso de las observaciones (secciones §2 y §3), las proyecciones del clima futuro deben proporcionar información fiable y adecuada para analizar impactos que dependen y se manifiestan en una amplia variedad de escalas espaciales y temporales. A la vez, estas proyecciones deben considerar un abanico de posibilidades lo suficientemente amplio como para ser de utilidad en el proceso de planificación y toma de decisiones.

Esta sección describe la regionalización de proyecciones basadas en experimentos de simulación con modelos regionales del clima de alta resolución desarrolladas en el contexto de la iniciativa [EURO-CORDEX](#) [Giorgi *et al.*, 2009; Jacob *et al.*, 2013]. Se trata de una iniciativa global que nació en 2009 bajo el auspicio de la Organización Meteorológica Mundial (OMM) con el objetivo de suplir la necesidad de información sobre el cambio climático a escala local y regional [Giorgi *et al.*, 2009]. La iniciativa juega un papel doble, ocupándose tanto de la evaluación de la calidad como la eficiencia de distintos modelos climáticos para la regionalización, como del diseño y realización de experimentos para desarrollar proyecciones climáticas para su uso en estudios de impacto y adaptación.

La iniciativa CORDEX ha completado la regionalización de los escenarios de cambio climático desarrollados en la 5ª Fase del Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados del IPCC ([CMIP5](#)). En la actualidad, está completando las proyecciones regionalizadas para la nueva generación de proyecciones globales del 6º Informe del IPCC ([CMIP6](#)). La regionalización dinámica [EURO-CORDEX](#) implica un cambio de escala de dos órdenes de magnitud desde los $\sim 10^4$ km² que abarcan cada una de las celdas de la rejilla de un modelo global hasta los $\sim 10^2$ km² de los modelos regionales [EURO-CORDEX](#). Partiendo del modelo de clima base de alta resolución (sección §3) y mediante regionalización estadística, en este estudio reducimos la resolución de las proyecciones [EURO-CORDEX](#) hasta 1 km² manteniendo la frecuencia diaria. El objetivo es desarrollar una base de datos que sirva de referencia para el análisis y evaluación de los impactos del cambio climático en Asturias.

El aumento de la resolución espacial en dos pasos tiene por objetivo incorporar de manera progresiva procesos de circulación cuya importancia se manifiesta principalmente a pequeñas escalas. A nivel de superficie estos procesos se manifiestan principalmente a través de la interacción con distintas características del relieve y de los ecosistemas como pueden ser la distribución de masas de agua y continentales y, a resoluciones aún más finas, los efectos de la orografía y los cambios en los usos del suelo y la cobertura vegetal. Lejos de la superficie, considerando el eje vertical, una mayor resolución permite introducir mejoras en el tratamiento de la interacción de la circulación y la radiación con las nubes, y un mayor detalle en la batimetría. Todos estos procesos tienen un impacto sobre la circulación y el clima que se manifiesta en la heterogeneidad del clima a nivel regional y local que, en última instancia, condiciona nuestra actividad cotidiana.

Un modelo de sistema Tierra como los que emplea el IPCC simula el clima sobre celdas de $1^\circ \times 1^\circ$, es decir, alrededor de 10⁴ km², similar a la superficie del conjunto de Asturias (10604 km²). Se trata de una resolución adecuada para reproducir los grandes patrones y tendencias en el clima a escala continental y global. De hecho, estos modelos capturan estos patrones y su variación a lo largo del tiempo y en el espacio con gran éxito [e.g. McGuffie & Henderson-Sellers, 2014]. Buscando un ejemplo regional, un modelo global apenas puede «ver» la cordillera Cantábrica, que apenas abarcaría unas cinco celdas en el eje zonal. De igual manera, un modelo regional CORDEX tiene una resolución nominal de 12 km \times 12 km. En la práctica, se trata de un salto de unos dos órdenes de magnitud con respecto a los modelos globales (para una localidad con latitud 42°N, tendríamos unas 65 celdas por cada celda original). En este caso, sí se trata de un modelo capaz de capturar la morfología costera, y la presencia de grandes cordilleras, por lo que son modelos capaces de reproducir patrones y tendencias a escala regional como, por ejemplo, las diferencias entre Asturias y la submeseta norte. Sin embargo, no cuenta con un grano lo suficientemente fino como para resolver efectos asociados a los pequeños valles y a la compleja orografía de Asturias. La reducción hasta 1 km² mediante regionalización estadística resuelve gran parte de los efectos asociados a los accidentes geográficos locales. Propor-

ciona una línea de costa y una orografía realistas y, por tanto, una resolución adecuada para la planificación y una base para el desarrollo de modelos operacionales que incorporen efectos de microescala (ej. presencia de edificios y vegetación, lagos y ríos, etc.).

Aparte de una mayor resolución, la regionalización estadística incorpora información local que permite reducir los sesgos presentes en los modelos dinámicos. De nuevo, es conveniente recalcar que los modelos climáticos, por lo general, con la notable excepción de variables de velocidad de flujo, devuelven el promedio de las variables climáticas sobre el conjunto de cada celda. Por tanto, es esperable que exista una desviación entre dicho promedio y las condiciones que se pueden medir en una localización concreta o en un área más pequeña dentro de una celda. Precisamente, los métodos de regionalización buscan patrones consistentes en dichas desviaciones para realizar una transformación o calibración entre escalas. Esta calibración permite refinar las proyecciones añadiendo detalle a escala regional y local, por lo que resultan en diferencias por lo general significativas que afectan tanto a los resultados de las proyecciones en sí, como a los resultados y predicciones elaboradas a partir de ellas en el contexto de los estudios de impacto y adaptación [e.g. Bedia *et al.*, 2013]. La trascendencia de los resultados de las regionalizaciones resaltan de nuevo la importancia de apoyar el mantenimiento, modernización y expansión de las redes de observación y monitoreo del clima, así como del desarrollo de bases de datos de observaciones climáticas de referencia. Por este motivo, en los últimos años varias regiones (País Vasco, Castilla y León o Cantabria) han desarrollado bases de datos climáticas de alta resolución a partir de observaciones de calidad contrastada, como la descrita en las anteriores secciones para Asturias. Estos modelos base permiten calibrar las proyecciones de cambio climático para que, de esta manera, puedan ser utilizadas por técnicos y científicos para analizar los impactos esperables bajo diferentes futuros climáticos (véase Gutiérrez *et al.* 2010 para un ejemplo en Cantabria o Taboada & Anadón 2011 en Asturias).

En el presente trabajo, esos posibles futuros climáticos se identifican con escenarios alternativos de emisiones y usos del territorio para lo que queda de este siglo (2025-2100). En el contexto del CMIP5, se adoptaron como escenarios de cambio climático las trayectorias de concentración representativas o RCPs, por sus siglas en inglés, que describen tendencias en la concentración de gases de efecto invernadero (GEI); es decir, proyecciones de los cambios en el forzamiento radiativo consistentes con distintas estrategias de emisión y mitigación durante las próximas décadas. Por tanto, es importante destacar que las RCPs no son escenarios completos, sino que sirven de base para el desarrollo de escenarios que incluyan cambios socioeconómicos, en los usos del suelo, y en el clima, incluyendo los escenarios adoptados en el CMIP6.

En concreto, entre las siete RCPs consideramos dos escenarios extremos y un escenario intermedio que hoy en día se considera el más plausible de los tres;

1. **RCP 2.6** es una trayectoria que corresponde a una estrategia de mitigación estricta, con una reducción paulatina de las emisiones hasta alcanzar un forzamiento radiativo por GEI de $2,6 \text{ W m}^{-2}$ en 2100 [van Vuuren *et al.*, 2007]. Esta cifra equivaldría a revertir la alteración acumulada desde 1750 (estimada por el IPCC en $2,72 \text{ W m}^{-2}$), y evitaría que la temperatura global aumentara por encima de $2,0 \text{ }^\circ\text{C}$ con respecto a la media 1850-1900 (el objetivo de mínimos del Acuerdo de París, que persigue evitar un aumento de $1,5 \text{ }^\circ\text{C}$).
2. **RCP 4.5** es una trayectoria que corresponde a un escenario de estabilización intermedio a través de una estrategia basada en el desarrollo de tecnologías de mitigación hasta alcanzar un forzamiento radiativo por GEI de $4,5 \text{ W m}^{-2}$ en 2100. Implica una reducción de las emisiones de GEIs a partir de 2045 e iría asociado a incrementos en la temperatura global entre $2,5 \text{ }^\circ\text{C}$ - $3,0 \text{ }^\circ\text{C}$ [Clarke *et al.*, 2007].
3. **RCP 8.5** es una trayectoria heredera del escenario A2 (desarrollo económico regional: primarían aspectos económicos sobre ambientales en un contexto de alianzas regionales y poca colaboración internacional, ?). El aumento sostenido del consumo y las emisiones de GEIs culminaría en un forzamiento radiativo por GEI de $8,5 \text{ W m}^{-2}$ en 2100, y en un aumento por encima de $5,0 \text{ }^\circ\text{C}$ en la temperatura global. Tal aumento supondría una disrupción importante del sistema climático, un horizonte de riesgo desconocido más allá de los impactos dañinos e incluso catastróficos a escala planetaria esperables para incrementos por encima de $3,0 \text{ }^\circ\text{C}$ [Xu & Ramanathan,

2017]. Se considera por ello un escenario a evitar, aunque plausible hasta mediados de siglo de acuerdo a las tendencias observadas en la actualidad.

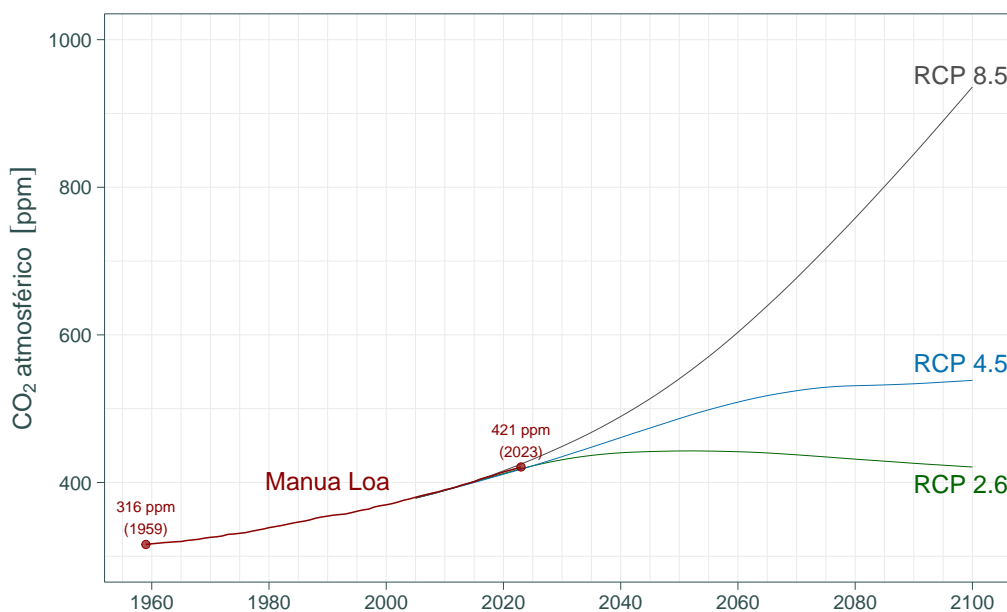


Figura 17: Concentración media anual de CO₂ registrada en el observatorio de Manua Loa en Hawaii (conocida como *curva de Keeling*) junto con las trayectorias de concentración representativas (RCPs) de los escenarios RCP2.6 [van Vuuren *et al.*, 2007], RCP4.5 [Clarke *et al.*, 2007] y RCP 8.5 [Riahi *et al.*, 2007] utilizadas en el CMIP5 [RCP database 2.0].

5.1. Búsqueda y selección de simulaciones EURO-CORDEX

En enero de 2024 se realizó una búsqueda e inventario de las simulaciones disponibles en la infraestructura ESGF [Earth System Grid Federation, Cinquini *et al.*, 2014] del Experimento Coordinado de Regionalización [CORDEX, Giorgi *et al.*, 2009; Jacob *et al.*, 2013] como distribuidor oficial de dichas proyecciones. Para ello, se seleccionaron los datos descritos anteriormente en el área de estudio (ver Figura 18), resultantes de la búsqueda siguiente:

Project: CORDEX
Domain: EUR-11
Time Frequency: day
Experiment: historical, rcp45 y rcp85
Variable: pr, tas, tasmax y tasmin

Una vez descargadas las simulaciones disponibles, éstas fueron procesadas para poder ser tratadas con las librerías incluidas en el entorno de *R Climate4R* [Iturbide *et al.*, 2019, <https://github.com/SantanderMetGroup/climate4R>], recientemente utilizado para el desarrollo del Atlas Interactivo del IPCC-WGI [Gutiérrez *et al.*, 2021, <https://github.com/IPCC-WG1/Atlas>]. En particular, para su lectura [Cofiño *et al.*, 2018, *loadR*: <https://github.com/SantanderMetGroup/loadR>] y calibración con métodos estadísticos [Bedia *et al.*, 2020, *downscaleR*: <https://github.com/SantanderMetGroup/downscaleR>]. Como se detalla más adelante, estas librerías permitieron exportar y almacenar los productos resultantes en formato NetCDF, siguiendo los estándares y convenciones de metadatos para clima y predicciones en ciencias de la Tierra (CF por sus siglas en inglés), para su posterior procesamiento utilizando paquetes de software de amplio uso (Climate Data Operators, CDO, [Schulzweida, 2023], y NetCDF Operators, NCO [Zender, 2008, 2023]).

Como se observa en la Figura 18 existen hasta 642 combinaciones como resultado de la búsqueda anterior, de modo que debemos establecer un sistema o nomenclatura para identificar de forma unívoca cada una de las simulaciones

generadas. Para ello, se ha partido del Data Reference System definido en el proyecto CORDEX (http://is-enes-data.github.io/cordex_archive_specifications.pdf) de modo que se consideraron los elementos establecidos en dicho documento para la construcción del nombre del fichero correspondiente. La Tabla 2 muestra las simulaciones disponibles para los experimentos HISTORICAL (1971-2005) y los escenarios RCP2.6, RCP4.5 y RCP8.5 (2006-2100), todas ellas ejecutadas sobre el dominio EUR-11 (~12 km).

The screenshot displays the ESGF search interface for CORDEX data. The page header includes logos for DKRZ, is-enes, and ESGF. The main content area shows search filters on the left, a search bar at the top, and a list of search results in the main area. The results include details like Data Node, Version, Total Number of Files, and Full Dataset Services for various CORDEX experiments.

Search Filters:

- Project: CORDEX (642)
- Product: +
- Domain: EUR-11 (642)
- Institute: +
- Driving Model: +
- Experiment: historical (274), rcp45 (98), rcp85 (270)
- Experiment Family: +
- Ensemble: +
- RCM Model: +
- Downscaling Realisation: +
- Time Frequency: day (642)
- Variable: pr (162), tas (162), tasmax (159), tasmin (159)
- Variable Long Name: +
- CF Standard Name: +
- Datanode: +

Search Bar: Enter Text: [] Search Reset Display 10 results per page [More Search Options]

Search Constraints: Show All Replicas Show All Versions Search Local Node Only (Including All Replicas)
 ✖ CORDEX | ✖ EUR-11 | ✖ historical,rcp45,rcp85 | ✖ day | ✖ pr,tas,tasmax,tasmin

Total Number of Results: 642
 -1- 2 3 4 5 6 Next >>
 Please login to add search results to your Data Cart
 Expert Users: you may display the search URL and return results as XML or return results as JSON

Search Results:

- cordex.output.EUR-11.CLMcom.CNRM-CERFACS-CNRM-CM5.historical.r1i1p1.CCLM4-8-17.v1.day.tasmax**
 Data Node: esgf1.dkrz.de
 Version: 20140515
 Total Number of Files (for all variables): 12
 Full Dataset Services: [Show Metadata] [List Files] [THREDDS Catalog] [WGET Script] [Globus Download]
- cordex.output.EUR-11.CLMcom.CNRM-CERFACS-CNRM-CM5.historical.r1i1p1.CCLM4-8-17.v1.day.tasmin**
 Data Node: esgf1.dkrz.de
 Version: 20140515
 Total Number of Files (for all variables): 12
 Full Dataset Services: [Show Metadata] [List Files] [THREDDS Catalog] [WGET Script] [Globus Download]
- cordex.output.EUR-11.CLMcom.CNRM-CERFACS-CNRM-CM5.historical.r1i1p1.CCLM4-8-17.v1.day.tas**
 Data Node: esgf1.dkrz.de
 Version: 20140515
 Total Number of Files (for all variables): 12
 Full Dataset Services: [Show Metadata] [List Files] [THREDDS Catalog] [WGET Script] [Globus Download]
- cordex.output.EUR-11.CLMcom.CNRM-CERFACS-CNRM-CM5.rcp45.r1i1p1.CCLM4-8-17.v1.day.tasmax**
 Data Node: esgf1.dkrz.de
 Version: 20140515
 Total Number of Files (for all variables): 19
 Full Dataset Services: [Show Metadata] [List Files] [THREDDS Catalog] [WGET Script] [Globus Download]
- cordex.output.EUR-11.CLMcom.CNRM-CERFACS-CNRM-CM5.rcp45.r1i1p1.CCLM4-8-17.v1.day.tasmin**
 Data Node: esgf1.dkrz.de
 Version: 20140515
 Total Number of Files (for all variables): 19
 Full Dataset Services: [Show Metadata] [List Files] [THREDDS Catalog] [WGET Script] [Globus Download]
- cordex.output.EUR-11.CLMcom.CNRM-CERFACS-CNRM-CM5.rcp45.r1i1p1.CCLM4-8-17.v1.day.tas**
 Data Node: esgf1.dkrz.de
 Version: 20140515

Figura 18: Búsqueda en el nodo ESGF correspondiente al centro DKRZ (<https://esgf-data.dkrz.de/search/cordex-dkrz>) en enero de 2024.

Tabla 2: Proyecciones regionales obtenidas con distintos acoplamientos de GCMs/RCMs de la iniciativa EURO-CORDEX considerados en el presente informe. Para cada experimento de regionalización, las primeras dos columnas de la tabla detallan el acrónimo del modelo de sistema Tierra (ESM) y la etiqueta de la variante seleccionada (realización, inicialización y p por el tipo de «física» del modelo). Las tres últimas columnas detallan el acrónimo del modelo climático regional (RCM) CORDEX y su versión, así como el acrónimo de la institución responsable del mismo.

Modelo de Sistema Tierra (ESM)	Variante	Modelo regional (RCM)	Versión	Institución
CNRM-CERFACS-CNRM-CM5	r1i1p1	CCLM4-8-17	v1	CLMcom
CNRM-CERFACS-CNRM-CM5	r1i1p1	crCLIM-v1-1	v1	COSMO-CLM
CNRM-CERFACS-CNRM-CM5	r1i1p1	HIRHAM5	v2	DMI
CNRM-CERFACS-CNRM-CM5	r1i1p1	RACMO22E	v2	KNMI
CNRM-CERFACS-CNRM-CM5	r1i1p1	RCA4	v1	SMHI
CNRM-CERFACS-CNRM-CM5	r1i1p1	WRF381P	v2	IPSL-INERIS
ICHEC-EC-EARTH	r12i1p1	HIRHAM5	v1	DMI
ICHEC-EC-EARTH	r12i1p1	RACMO22E	v1	KNMI
ICHEC-EC-EARTH	r12i1p1	RCA4	v1	SMHI
ICHEC-EC-EARTH	r12i1p1	WRF381P	v1	IPSL-INERIS
ICHEC-EC-EARTH	r1i1p1	CCLM4-8-17	v1	CLMcom
ICHEC-EC-EARTH	r1i1p1	crCLIM-v1-1	v1	COSMO-CLM
ICHEC-EC-EARTH	r1i1p1	HIRHAM5	v1	DMI
ICHEC-EC-EARTH	r1i1p1	RACMO22E	v1	KNMI
ICHEC-EC-EARTH	r1i1p1	RCA4	v1	SMHI
ICHEC-EC-EARTH	r3i1p1	HIRHAM5	v2	DMI
IPSL-IPSL-CM5A-LR	r1i1p1	REMO2015	v1	HZG-GERICS
IPSL-IPSL-CM5A-MR	r1i1p1	HIRHAM5	v1	DMI
IPSL-IPSL-CM5A-MR	r1i1p1	RACMO22E	v1	KNMI
IPSL-IPSL-CM5A-MR	r1i1p1	RCA4	v1	SMHI
IPSL-IPSL-CM5A-MR	r1i1p1	WRF381P	v1	IPSL-INERIS
MOHC-HadGEM2-ES	r1i1p1	CCLM4-8-17	v1	CLMcom
MOHC-HadGEM2-ES	r1i1p1	crCLIM-v1-1	v1	COSMO-CLM
MOHC-HadGEM2-ES	r1i1p1	HIRHAM5	v2	DMI
MOHC-HadGEM2-ES	r1i1p1	RACMO22E	v2	KNMI
MOHC-HadGEM2-ES	r1i1p1	RCA4	v1	SMHI
MOHC-HadGEM2-ES	r1i1p1	WRF381P	v1	IPSL-INERIS
MPI-M-MPI-ESM-LR	r1i1p1	CCLM4-8-17	v1	CLMcom
MPI-M-MPI-ESM-LR	r1i1p1	crCLIM-v1-1	v1	COSMO-CLM
MPI-M-MPI-ESM-LR	r1i1p1	RACMO22E	v1	KNMI
MPI-M-MPI-ESM-LR	r1i1p1	RCA4	v1a	SMHI
MPI-M-MPI-ESM-LR	r1i1p1	REMO2009	v1	MPI-M
MPI-M-MPI-ESM-LR	r2i1p1	HIRHAM5	v1	DMI
MPI-M-MPI-ESM-LR	r2i1p1	RCA4	v1	SMHI
MPI-M-MPI-ESM-LR	r2i1p1	REMO2009	v1	MPI-M
NCC-NorESM1-M	r1i1p1	crCLIM-v1-1	v1	COSMO-CLM
NCC-NorESM1-M	r1i1p1	HIRHAM5	v3	DMI
NCC-NorESM1-M	r1i1p1	RACMO22E	v1	KNMI
NCC-NorESM1-M	r1i1p1	RCA4	v1	SMHI
NCC-NorESM1-M	r1i1p1	WRF381P	v1	IPSL-INERIS
NOAA-GFDL-GFDL-ESM2G	r1i1p1	REMO2015	v1	HZG-GERICS

5.2. Regionalización

A pesar del incremento progresivo de la resolución espacial de los modelos regionales, ~12 km en el caso de EURO-CORDEX, dichos modelos presentan sesgos sistemáticos que limitan su uso por parte de las comunidades de impactos [Casanueva *et al.*, 2015]. Estos efectos son especialmente necesarios en una región como Asturias, que se caracteriza por un relieve muy complejo con valles estrechos y profundos entre la cordillera Cantábrica, con elevaciones superiores a 1000 m a pocos kilómetros de la línea de costa. Por tanto, es importante calibrar la salida de los modelos EURO-CORDEX mediante un procesado *a posteriori* utilizando métodos estadísticos. En este sentido, partimos de la evaluación del estado del arte de los métodos de calibración de sesgos a escala Europea desarrollada en el contexto de la Acción COST VALUE (<http://www.value-cost.eu>).

Entre otros objetivos, la acción COST VALUE ha desarrollado una serie de protocolos y experimentos para comparar la precisión y eficiencia de distintos métodos de regionalización [Gutiérrez *et al.*, 2018], concluyendo que la técnica de Ajuste Empírico de los Cuantiles (EQM, por sus siglas en inglés, Amengual *et al.* 2012; Wilcke *et al.* 2013) es uno de los métodos con mejores resultados. Se trata de uno de los métodos aplicables en un entorno multivariado más utilizados actualmente por las comunidades de impacto. Fue el método utilizado inicialmente para la publicación de las proyecciones de CORDEX calibradas en el visor de AdapteCCa (<https://escenarios.adaptecca.es>), portal de acceso a las proyecciones desarrolladas en las diferentes fases del Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático (PNACC). Actualmente dicho portal ha optado por utilizar una versión paramétrica del EQM que preserva las tendencias a largo plazo. Dicho método ha sido adoptado en el marco de la iniciativa ISIMIP (<https://www.isimip.org>) para la corrección de modelos globales del clima [Lange, 2021], y también es el método utilizado para calibrar las proyecciones del IPCC WGI Interactive Atlas (<https://interactive-atlas.ipcc.ch>). En este sentido, y para alinear las actividades de la CuCC con las iniciativas nacionales e internacionales, queda abierta la posibilidad de aplicar, en una segunda fase, dicho método.

La aplicación directa del método EQM resulta en unos campos que presentan fuertes gradientes discontinuos en los límites entre las celdas de los modelos regionales de 12 km × 12 km. Para evitar este artefacto, se realizó un preprocesado de la salida de las simulaciones regionales. Concretamente, se realizó una interpolación bilineal sobre la malla con la resolución final objetivo de 1 km × 1 km, asumiendo que el valor promedio para cada celda regional correspondía al de la celda de la malla fina situada en el centro de la misma. Este paso se realizó para cada uno de los campos diarios predichos por los modelos regionales, permitiendo suavizar la transición entre las celdas de los modelos regionales a la resolución final aplicando el método EQM sobre los datos interpolados.

Como base de datos de referencia se considera el modelo de clima base de alta resolución espacial (1 km × 1 km) descrito en la sección §3 del presente informe, tomando como periodo de referencia el periodo de 27 años incluido en el escenario HISTORICAL 1979-2005. La Figura 19 muestra como la regionalización mediante mapeo de cuantiles reconcilia los sesgos presentes en los experimentos EURO-CORDEX con las observaciones disponibles (en este caso, tendencias basadas en el reanálisis UCAN, CuCC [2024]). El resultado son unas simulaciones que se alinean con las tendencias observadas y reproducen su variabilidad, reforzando la confianza en la regionalización de los escenarios a futuro.

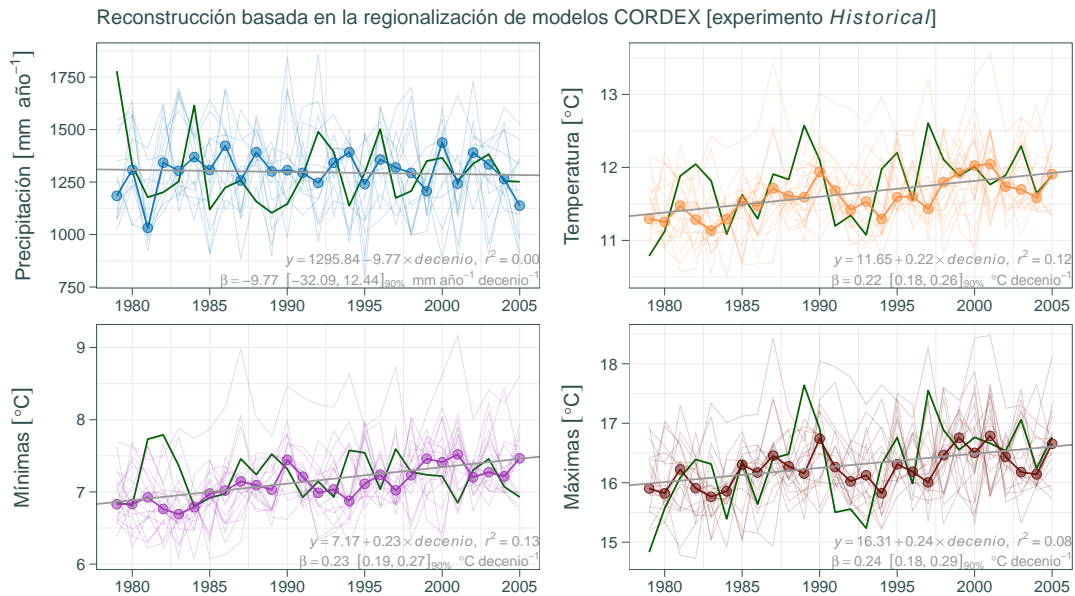


Figura 19: Tendencias en la precipitación anual acumulada, la temperatura media y las medias de las mínimas y las máximas, basadas en la regionalización mediante mapeo de cuantiles de los experimentos de simulación de la iniciativa [EURO-CORDEX](#) para el escenario HISTORICAL. Para la calibración y corrección de posibles sesgos, se empleó como modelo de referencia el modelo clima de base de alta resolución descrito en la sección §3. La línea de color verde corresponde precisamente al promedio del modelo clima de base. Las líneas más tenues corresponden a simulaciones basadas en distintos modelos, mientras que la línea de mayor grosor que une los puntos perfila la tendencia de la media entre modelos. Cada panel incluye además una recta de regresión lineal de color gris que permite evaluar la magnitud y robustez de posibles tendencias. La recta se estimó mediante ajuste de un modelo de regresión simple usando métodos Bayesianos [Goodrich *et al.*, 2024]. Las media de las estimas para la ordenada en el origen y la pendiente de dicho modelo se detallan en la parte inferior de cada gráfico. La ordenada en el origen corresponde a la media durante el periodo analizado [que corresponde al valor de y para 1992]. Se detallan además el coeficiente de determinación (r^2) y, para la estima de la tendencia, el intervalo de confianza al 90 %.

6. Productos generados

Uno de los objetivos de este estudio consiste en favorecer el uso y aplicación del modelo base de clima y los escenarios de cambio climático por una comunidad de usuarios lo más amplia y variada posible. Para facilitar tanto la difusión de resultados como para eliminar aquellas barreras que tradicionalmente han limitado el uso de este tipo de productos, se han desarrollado una serie de análisis dirigidos a generar productos diseñados para satisfacer las necesidades de distintos perfiles de usuario. Dichos productos han sido cargados en una base de datos para su publicación y distribución a través de los portales y visores desarrollados en el marco del servidor de datos de la Cátedra de Cambio Climático de la Universidad de Oviedo (cucc-uodata.es).

Detallamos a continuación los productos desarrollados y sus principales características.

6.1. Climatología base

Los productos de la climatología base corresponden a una rejilla diaria de alta resolución ($1\text{ km} \times 1\text{ km}$) para las variables climáticas básicas que capturan la variación de las condiciones en superficie como son la precipitación acumulada en milímetros [mm] (pr), y la temperatura media (tas), mínima ($tasmin$) y máxima ($tasmax$) en grados Celsius [$^{\circ}\text{C}$]. La rejilla se ha preparado aplicando los métodos de control de calidad y los modelos de regresión e interpolación descritos en la sección §3 para cada una de las variables. También se incluyen variables derivadas como los índices de extremos (sección §4).

Los valores brutos diarios presentan las siguientes características:

- **Tipo de dato:** serie temporal.
- **Formato:** NetCDF.
- **Resolución espacial:** $1\text{ km} \times 1\text{ km}$.
- **Extensión temporal y frecuencia:** Dato diario para el periodo 1971-2022.
- **Escenarios:** Clima base.
- **Ejemplo de nombre archivo:** `pr_yr_UCAN_reanalysis_v17_1km_19700101-20221231-ts.nc` (5,4 GB).

Además de los valores brutos diarios, se han calculado una serie de promedios para períodos representativos con frecuencia anual y para cada una de las cuatro estaciones meteorológicas: { invierno [DEF], primavera [MAM], verano [JJA] y otoño [SON] }.

- Climatologías de alta resolución para las variables básicas { pr , tas , $tasmin$ y $tasmax$ }, con frecuencia anual y estacional. Se ha calculado la media climatológica durante el periodo de estudio 1970–2022, medias durante cada una de las cinco décadas completas para las que se disponen de datos, así como promedios para los dos períodos de referencia de la OMM incluidos en el estudio.
- Series temporales de alta resolución para índices de extremos climáticos: series de datos con una frecuencia anual o mensual para cada uno de los índices que se enumeran en la Tabla 2.
- Climatologías de alta resolución para índices de extremos climáticos (véase la Tabla 2): mapas promedios con frecuencia anual y, en algunos casos mensual, para cada uno de los índices climatológicos. Se han calculado climatologías para el período de estudio, así como promedios por década y para los períodos de referencia de la OMM.

Para el segundo conjunto de productos de climatología base se cumple:

- **Tipo de dato:** mapa climatológico.
- **Formato:** NetCDF.
- **Resolución espacial:** $1\text{ km} \times 1\text{ km}$.
- **Extensión temporal y frecuencia:** Series temporales con frecuencia anual o mensual { ts }, o mapas climatológicos { $clim$ } con un único valor representativo de los siguientes periodos: {1970–2022, 1971–1980, 1981–1990,

1991–2000, 2001–2010, 2011–2020, 1961–1990, 1991–2020 }.

- **Escenarios:** Clima base.

- **Ejemplo de nombre archivo:**

tas_seas_UCAN_reanalysis_v17_1km_1971-1980-clim.nc (855 kB).

R99p_yr_UCAN_reanalysis_v17_1km_1970-2022-ts.nc (11 MB).

CDD_seas_UCAN_reanalysis_v17_1km_1971-1980-clim.nc (855 kB).

DTR_mon_UCAN_reanalysis_v17_1km_1981-1990-clim.nc (2,5 MB).

6.2. Simulaciones durante el periodo histórico y proyecciones

Los productos de simulación son un conjunto de datos calculado y almacenado sobre la misma rejilla diaria de alta resolución (1 km × 1 km) utilizado para crear la climatología base. Constituyen el grueso de la información disponible en el servidor de datos [cucc-uodata](#). El punto de partida es la regionalización de la salida de los experimentos de regionalización dinámica realizados en el contexto de la iniciativa EURO-CORDEX. Sobre estos datos, se ha aplicado un preprocesamiento para el suavizado de los datos regionales y una regionalización utilizando el método de ajuste empírico de los cuantiles (EQM) (véase la sección §5).

La regionalización se ha realizado sobre las mismas variables climáticas básicas seleccionadas para capturar la variación de las condiciones en superficie: la precipitación acumulada en milímetros [mm] (*pr*), y la temperatura media (*tas*), mínima (*tasmin*) y máxima (*tasmax*) en grados Celsius [°C]. Sobre los conjuntos de datos resultantes para cada variable y modelo EURO-CORDEX, se han calculado los índices de extremos (sección §4). Al igual que en el apartado anterior, el servidor [cucc-uodata](#) incluye series temporales de distinta resolución y mapas climatológicos promedio. En este caso se incluyen además «mapas delta» calculados como la diferencia o el ratio entre los valores durante períodos de interés (por ejemplo, para estimar el aumento de temperatura que se proyecta para un determinado escenario a finales de siglo con respecto a las condiciones actuales).

Los productos de simulación incluyen tanto proyecciones basadas en experimentos EURO-CORDEX individuales como promedios para el conjunto de experimentos disponibles para un determinado escenario (denominado comúnmente empleando el anglicismo *ensemble*). Este tipo de productos calculados a partir de una colección de experimentos son especialmente útiles para generar visualizaciones, ya que permiten valorar la incertidumbre alrededor de una proyección. Para ello, se suele considerar que cada experimento proporciona una estima independiente del proceso que se pretende medir como, por ejemplo, el cambio en el nivel medio de una variable entre dos períodos de tiempo de interés o bajo distintos escenarios de cambio climático. La siguiente lista enumera los conjuntos de productos desarrollados a partir de las simulaciones durante el periodo histórico y las proyecciones bajo escenarios alternativos de emisiones y usos del suelo:

- Series temporales diarias de alta resolución calibradas para las variables básicas {*pr*, *tas*, *tasmin* y *tasmax*}, serían la extensión natural de la climatología diaria base. Se trata de un producto que se tiene sentido utilizar al trabajar con cada experimento individual, como base para calcular mapas climatológicos, deltas o ensembles. También sirven de base para calcular series temporales mensuales, estacionales y anuales de alta resolución para las variables básicas {*pr*, *tas*, *tasmin* y *tasmax*}, y los índices de extremos climáticos.
- Climatologías de alta resolución para las variables básicas {*pr*, *tas*, *tasmin* y *tasmax*}, con frecuencia anual y estacional, tanto durante el período histórico como para los escenarios de escenarios alternativos de emisiones y usos del territorio. Se trata de un producto que se puede calcular tanto para cada experimento individual como para un conjunto de experimentos.
- Señal de cambio climático a alta resolución para las variables básicas {*pr*, *tas*, *tasmin* y *tasmax*}, calculadas por diferencia entre las proyecciones para distintos escenarios de emisiones respecto a la climatología basada en la regionalización de la misma variable durante el período histórico. Se trata de un producto que se puede calcular tanto para cada experimento individual como para un conjunto de experimentos.
- Mapas de incertidumbre para la señal de cambio climático a alta resolución para las variables básicas {*pr*, *tas*, *tasmin* y *tasmax*}, calculadas por diferencia entre las proyecciones para distintos modelos con res-

pecto a la proyección promedio. Se trata de producto que se calculan a partir de un conjunto de experimentos. A veces también tiene interés conservar valores extremos de las proyecciones con respecto al conjunto.

- Series temporales de alta resolución para los índices de extremos climáticos. Se trata de series de datos con una frecuencia anual o mensual para cada uno de los índices que se enumeran en la Tabla 2. Se calculan como variables derivadas a partir de las variables básicas, por lo que su calibración es indirecta. Tras calcular el producto para cada experimento individual, se calculan también promedios y medidas de dispersión para el conjunto de experimentos. A partir de las series temporales se calculan, de manera similar a como se hace en el caso de las variables básicas, climatologías y mapas delta.

En el caso de las climatologías y las señales de cambio, se han calculado promedios tanto para los correspondientes período de estudio (1971–2005 para el experimento EURO-CORDEX bajo el escenario HISTORICAL, y 2005–2100 para el resto de escenarios). Se incluyeron períodos de 20 años que se ajustan mejor a los efectos esperados a partir del presente (2021–2040, 2041–2060, 2061–2080, 2081–2100). Finalmente, también se calcularon promedios para períodos de referencia clásicos para proyecciones para un futuro cercano, medio y lejano (2011–2040, 2041–2070 y 2071–2100, respectivamente).

Para el segundo conjunto de productos de climatología base se cumple:

- **Tipo de dato:** series temporales y mapas climatológicos y tipo delta.
- **Formato:** NetCDF.
- **Resolución espacial:** 1 km × 1 km.
- **Extensión temporal y frecuencia:** Series temporales con frecuencia diaria, mensual, estacional o anual {t_s}, o mapas climatológicos {c_lim} con un único valor representativo de los siguientes periodos dependiendo del experimento:

HISTORICAL: {1979–2005, 1981–2000 }.

RCP2.6, RCP4.5 y RCP8.5: {2021–2040, 2041–2060, 2061–2080, 2081–2100 }.

En el caso de mapas delta, solo tienen sentido las diferencias para los distintos escenarios de emisión con respecto al escenario HISTORICAL.

- **Escenarios:** HISTORICAL, RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5. Se pueden calcular *ensembles* (en general promedios, pero también medidas de dispersión o extremos).
- **Ejemplo de nombre archivo:**

pr_seas_ensemble_historical_mean-UCAN-EQM-Asturias-1km-1976-2005_1km_1981-2000-clim.nc
(855 kB).

pr_mon_ensemble_historical_mean-UCAN-EQM-Asturias-1km-1976-2005_1km_198101-200012-clim.nc
(2,5 MB).

TN90p_yr_ensemble_rcp85_mean-UCAN-EQM-Asturias-1km-1976-2005_1km_2011-2040-delta.nc
(234 kB).

pr_yr_ICHEC-EC-EARTH_rcp45_KNMI-RACMO22E-v1-UCAN-EQM-Asturias-1km-1976-2005-r12i1p1_1km_2
(19,6 MB).

6.3. Productos precalculados

Los productos de datos en rejilla permiten calcular de manera relativamente sencilla resúmenes para períodos y/o áreas de interés. En general, en el caso de resúmenes por períodos sobre la propia rejilla de alta resolución de 1 km × 1 km, es decir, promedios u otras estadísticas calculados para cada celda de la rejilla, se ha preferido mantener el formato NetCDF, tal y como se detallo en las anteriores secciones.

Por otra parte, existen una serie de resúmenes que se calculan para áreas de interés, sobre todo unidades geográficas de tipo administrativo, geomorfológico o ecológico. Este tipo de productos se han calculado tanto para facilitar el funcionamiento del visor de datos (véase la sección §8), como para ahorrar tiempo a los usuarios, ya que se prevé que serían resúmenes de interés para un gran número de usuarios. Entre los resúmenes disponibles, se han calculado

resúmenes para las variables básicas y para los índices de extremos para el conjunto de Asturias y para cada uno de los municipios. También se han calculado los estadísticos necesarios para la presentación de datos en los diagramas de Walter y Lieth y en los diagramas de ciclo estacional y de serie temporal que se describen en la sección §8. Todos estos datos están disponibles a través de tablas en formato CSV y JSON.

Una tercera categoría incluye series temporales de datos para localidades puntuales, donde se encuentran tanto resúmenes elaborados a partir las observaciones registradas por la red de superficie de AEMet, como proyecciones para esas mismas localidades basadas en el modelo base de clima o en la regionalización de experimentos EURO-CORDEX.

En resumen, entre los productos precalculados encontramos:

- Series temporales para unidades administrativas y otras unidades geográficas de interés. Se ha considerado el conjunto de Asturias, los municipios, y las comarcas definidas en la comarcalización propuesta por la propia CuCC.
- Resúmenes para la preparación de visualizaciones. Se trata principalmente de estadísticos que resumen series temporales diarias para caracterizar la estacionalidad o ciclo estacional promedio a lo largo de un período prolongado de tiempo, así como valores extremos. Estos resúmenes son necesarios para construir los diagramas de Walter y Lieth y los diagramas de ciclo estacional de cada estación meteorológica. Además, los diagramas de serie temporal incluyen estimas de la tendencia lineal para cada variable climática para la que se disponga de información.
- Series temporales para localidades puntuales. En principio, solo capitales de municipio y localizaciones de estaciones meteorológicas.

Los productos precalculados comparten además las siguientes características:

- **Tipo de dato:** series temporales y estadísticos que resumen propiedades de las mismas.
- **Formato:** CSV/JSON.
- **Resolución espacial:** [—] (puntual: estadística calculada sobre un área de interés).
- **Extensión temporal y frecuencia:** Series temporales con frecuencia diaria, mensual, estacional o anual, o un único valor que resume una serie para un período de tiempo de interés.
- **Escenarios:** climatología base, HISTORICAL, RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5. También se pueden calcular *ensembles* (en general promedios, pero también medidas de dispersión o extremos).
- **Ejemplo de nombre archivo:**
 - pr_day_UCAN_reanalysis_v17_1km_19500101-20221231_asturias.csv (2,5 MB).
 - tnn_day_UCAN_reanalysis_v17_1km_1950-2023_asturias.csv (7,4 kB).
 - tasmin_yr_ICHEC-EC-EARTH_rcp85_KNMI-RACMO22E-v1-UCAN-EQM-Asturias-1km-1976-2005-r12i1p1_1 (985 kB).

7. Guía de usuario y preguntas frecuentes

La información climática regional disponible para llevar a cabo estudios de impacto y adaptación al cambio climático exige combinar diferentes modelos globales, modelos regionales, resoluciones, escenarios, métodos de corrección de sesgos, etc. Tal nivel de complejidad provoca en muchos casos que los usuarios de esta información se encuentren con problemas más o menos bien conocidos. A continuación se trata de dar respuesta a alguno de ellos.

7.1. Acceso a los datos

Dado el volumen y cantidad de los datos de proyecciones generados en los distintos proyectos e iniciativas regionales, nacionales e internacionales, éstos suelen ser almacenados en formatos comprimidos óptimos (p.e. en ficheros binarios en formato NetCDF), de difícil lectura para los usuarios no expertos, y distribuidos en servidores específicos (como el Earth System Grid Federation, ESGF, para los datos de CMIP6 y CORDEX) cuyo uso es complejo para usuarios no iniciados y sin experiencia previa. Por ello, el acceso a los datos necesarios para realizar un proyecto concreto puede consumir una gran cantidad de tiempo y recursos disponibles, pudiendo llegar a comprometer los resultados del mismo.

En el presente proyecto se han tenido en cuenta estas dificultades de uso definiendo y generando, a partir de la información almacenada en formato NetCDF, formatos de uso común entre las comunidades de impacto. En particular, el formato CSV es fácilmente accesible desde lenguajes de programación estándares (R, Python, Matlab) o herramientas de ofimática (Microsoft Office, OpenOffice, LibreOffice, etc.).

7.2. Condiciones de uso de los datos

Dos tipos de licencias suelen ser aplicadas a los datos de proyecciones globales y regionales (por ejemplo, los datos de CMIP6 y CORDEX) según sean de uso libre (licencia «unrestricted») o de uso para actividades de investigación (licencia «non-comercial»). En el marco del presente proyecto únicamente se han considerado aquellas proyecciones con licencia «unrestricted», de modo que puedan ser utilizadas por el mayor espectro posible de usuarios que analicen posibles impactos. Por ello, todos los datos generados en el presente proyecto se distribuyen bajo esta licencia. De hecho, se ha hecho un gran esfuerzo por facilitar el acceso a la información generada para distintos tipos de usuarios, incluyendo el desarrollo de un servidor de datos geoespaciales y la preparación de tanto de resúmenes como herramientas para explorar las bases de datos generadas. Además del portal interactivo para el acceso de datos que se describe en la sección §8, existe una dirección de correo electrónico, CuCC@uniovi.es, para atender las dudas que puedan surgir a los usuarios y para resolver solicitudes especiales de datos.

7.3. Corrección de sesgos de los modelos

Las salidas de los RCMs no pueden ser utilizadas de forma directa para estudios de impacto, ya que contienen sesgos importantes cuando se comparan con las observaciones. En consecuencia, se hace necesario un proceso de calibración antes de utilizar estos datos en aplicaciones reales. Un estudio en el marco de la acción COST VALUE [Gutiérrez *et al.*, 2018, <http://www.value-cost.eu>] ha llevado a cabo una inter-comparación de técnicas de corrección de sesgos sobre Europa considerando las distintas metodologías que han sido propuestas hasta la fecha. En el presente proyecto hemos aplicado la técnica basada en ajustes de cuantil (quantile-quantile mapping). La evaluación de la regionalización sugieren que la calidad de los resultados se ajusta al estado del arte (e.g. sección §5.2 y Figura 19).

7.4. Tratamiento de la incertidumbre

Las proyecciones de clima varían ampliamente dependiendo tanto del escenario de emisiones que se analice como del modelo climático en el que se base la proyección. El escenario de emisión es la principal fuente de incertidumbre para la segunda mitad del siglo XXI. Por ello, es necesario analizar varios escenarios (al menos dos para obtener una horquilla de resultados) para caracterizar adecuadamente la incertidumbre y tener una representación plausible del clima futuro. En este estudio se han considerado tres trayectorias de concentración representativa que corres-

ponden a escenarios que abarcan la adopción de medidas de mitigación estrictas (RCP2.6), un escenario de estabilización intermedio basado en el desarrollo de tecnologías de mitigación (RCP4.5), y un escenario de altas emisiones (RCP8.5). Estos escenarios se heredan de la última iteración disponible de los experimentos de regionalización dinámica del proyecto EURO-CORDEX, y corresponden a la 5ª Fase del Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados (CMIP5). Es importante tener en cuenta que estas mismas trayectorias de concentración representativas sirven de base para la definición de las trayectorias socioeconómicas compartidas o SSPs adoptadas por el CMIP6 y en el último informe del IPCC [2023]. A la espera de la regionalización dinámica del CMIP6 por EURO-CORDEX, se espera poder extender el presente trabajo para incluir nuevas proyecciones según vayan estando disponibles.

Hasta mediados de siglo, la incertidumbre que aportan los distintos modelos es similar o incluso superior a la de los escenarios, sobre todo a nivel regional, por lo que algunos estudios se basan en un único escenario. Sin embargo, existe una gran variabilidad de resultados dependiendo de la variable considerada y la región de interés [para más detalles ver Hawkins & Sutton, 2009, 2010; Deser, 2020; Deser & Phillips, 2023], por lo que un tratamiento adecuado de la incertidumbre ha de tener en cuenta siempre los resultados de distintos escenarios para poder caracterizar el clima futuro. Dentro de cada escenario es importante considerar varios modelos. Idealmente, y sobre todo en el caso de funciones no lineales de las variables climáticas básicas, se recomienda utilizar un *ensemble* o conjunto de modelos para propagar la incertidumbre de las proyecciones del clima y poder evaluar la incertidumbre asociada en la variable de interés. Igualmente, mientras sea posible, se recomienda analizar los procesos a la mayor frecuencia disponible para poder incorporar posibles cambios en la variabilidad de las variables climáticas y el impacto de valores extremos.

7.5. Selección de subconjuntos de modelos

Cuando se llevan a cabo estudios de cambio climático en una región concreta un primer paso suele consistir en la evaluación de los distintos modelos disponibles (ver Tabla 2), su capacidad para representar adecuadamente tanto los procesos atmosféricos relevantes que afectan a la región, como el clima regional para las variables de interés (típicamente precipitación, temperatura o viento). En este sentido, [Casanueva *et al.*, 2015] proporcionan una evaluación de los modelos de EURO-CORDEX sobre la península Ibérica que sirve de referencia y permite la selección del conjunto final considerado para el desarrollo de las proyecciones regionales sobre el Principado de Asturias.

Dado que el número de proyecciones (realizaciones) que se pueden ejecutar con algunos modelos de impacto (por ejemplo, con modelos hidrológicos) es limitado, resulta necesario seleccionar un subconjunto de modelos representativo de la variabilidad dada por las diferentes combinaciones de GCMs y RCMs (ver columnas 2 y 3 de la Tabla 2) para las variables de interés. Aunque existen técnicas objetivas para la selección de este subconjunto para un problema dado [ver Ruane & McDermid, 2017], puede también optarse por una metodología más simple, que consiste en evitar duplicidades de GCMs y RCMs que puedan sesgar las proyecciones regionales resultantes [Weigel *et al.*, 2010], muestreando de manera equilibrada los modelos existentes (o las familias de modelos). Un subconjunto balanceado podría formarse evitando duplicidades, incluyendo una única copia de los GCMs participantes y de los RCMs (a excepción del modelo RCA, del cual podría cogerse otra de las proyecciones anidadas a uno de los experimentos de EC-EARTH).

8. Portal interactivo para el análisis y divulgación en línea

Los visores geográficos son una de las herramientas más útiles y populares para la difusión y exploración en línea de datos con una componente espacial. En los últimos años, estas herramientas han evolucionado hasta el punto de ejecutar tareas que tradicionalmente exigían un procesamiento complejo, supliendo en ocasiones a aplicaciones de escritorio utilizadas por expertos en Sistemas de Información Geográfica. En el contexto del cambio climático, algunos ejemplos interesantes de este tipo de visores incluye el Atlas Interactivo del IPCC (<https://interactive-atlas.ipcc.ch>), el sistema de exploración de datos de ciencias de la Tierra Worldview de la NASA (<https://worldview.earthdata.nasa.gov>), la aplicación MyOcean del Programa Copernicus de la ESA (<https://marine.copernicus.eu>), o el visor de escenarios de la plataforma AdapteCCa (<http://adaptecca.es>). Este tipo de sistemas permiten al usuario visualizar y explorar de manera interactiva bases de datos geográficas, seleccionar y extraer subconjuntos de datos para zonas de interés, preparar gráficos en línea o solicitar su descarga. Por estas razones, una de las prioridades del equipo CuCC ha sido desarrollar un servidor de datos y un portal web para facilitar el acceso a la información generada durante el proyecto.

8.1. Servidor de datos de la CuCC: cucc-uodata.es

Esta sección describe el funcionamiento técnico interno del servidor de datos de la CuCC, disponible a través de la URL <https://cucc-uodata.es>. La descripción de la pila tecnológica abarca tanto el *hardware* que contiene el servidor como el *software* que implementa la parte funcional, así como la finalidad de cada uno de sus componentes. También se explicará la nomenclatura de nombres utilizada para el manejo de archivos *NetCDF* (*Network Common Data Form*) y cómo se ha establecido su almacenamiento para la consulta.

8.1.1. Pila Tecnológica actual

El Servidor de la CuCC está conformado por una serie de tecnologías, librerías, *frameworks* y *software* que se encuentran configuradas para trabajar conjuntamente entre sí. A este conjunto se le denomina pila tecnológica.

A la hora de diseñar este conjunto se ha tenido en cuenta, además de utilizar una tecnología actual, la compatibilidad entre versiones ya que es necesario para garantizar tanto la escalabilidad del proyecto como la durabilidad del *software* de cara a actualizaciones al ser el mantenimiento una tarea implícita en el desarrollo de cualquier proyecto.

Por esta razón, de cara a escoger librerías y *software*, se han elegido plataformas de código abierto (*Open Source*) en la versión más actual que permita una compatibilidad con los datos que el servidor de la CuCC gestiona y publica. Para alojar el servidor se ha escogido una máquina virtual ya que es adecuada para cubrir las necesidades técnicas y garantizar la capacidad de respuesta óptima a las peticiones.

A modo de resumen, la Tabla 3 muestra la pila tecnológica actual que posee el servidor.

8.1.2. *Backend* (lado del Servidor)

Dentro del propio servidor existen diferentes plataformas y tecnologías que funcionan de forma asíncrona y coordinada. Se puede considerar notablemente que, aún siendo la parte no visible para los usuarios, constituye el grueso del desarrollo del servidor ya que es en ella donde se ejecuta toda la lógica.

Para el desarrollo del lado del servidor se utiliza el lenguaje de programación *Java* al ser un lenguaje maduro, multiplataforma y fiable.

En esta parte, mediante una Máquina Virtual Java (JVM), se ejecuta un servidor *Apache Tomcat* que ejecuta tanto las Aplicaciones Web Java como los *Servlets* o las páginas JSP (*JavaServer Pages*).

Este Servidor principal despliega entre otras las aplicaciones web (*Webapps*): la web principal *CUCCdata*, el servidor

de mapas *Geoserver* y el servidor de catálogos de datos *THREDDS*.

Al mismo tiempo, en la parte del Servidor se encuentra en funcionamiento la base de datos principal *PostgreSQL* con su extensión espacial *PostGIS*, que almacena y suministra de forma dinámica información alfanumérica y gráfica tanto a la aplicación principal *CUCCdata* como al Servidor *GeoServer*.

8.1.3. *Frontend* (lado del Cliente)

Dentro de la parte de la aplicación que es visible (páginas) para los usuarios finales del portal Web y con la que pueden interactuar directamente, se encuentran los componentes Web que son un conjunto de características y especificaciones HTML y DOM que permiten la creación de widgets o componentes reutilizables dentro del sitio y que se ejecutan directamente en el propio navegador de los usuarios.

Estos componentes se han diseñado en función de las distintas necesidades que han ido surgiendo en el proyecto utilizando las tecnologías HTML, CSS y JavaScript.

Con el fin de minimizar el uso de librerías de terceros ya que su uso implica una dependencia continuada y obligatoria de las mismas de cara a su mantenimiento, compatibilidad y principalmente su obsolescencia, se ha omitido el uso de librerías no necesarias realizando un desarrollo nativo y manteniendo únicamente las librerías esenciales que no se pueden replicar o cuya tecnología está altamente desarrollada como podría ser la librería de JavaScript: *OpenLayers* la cual se encarga de la manipulación de sistemas de coordenadas y de mantener una comunicación coherente entre el servidor de mapas *Geoserver* y el navegador del cliente a la hora de mostrar mapas web.

Cabe destacar, que el desarrollo nativo de algunos de estos componentes HTML (*tags*) personalizados que se reutilizan dentro del portal, se han realizado en la parte del *Backend* ya que están desarrollados en Java por medio de la librería *taglibs-standard*.

Para el diseño del portal, con el fin de facilitar a los usuarios accesibilidad y cierta compatibilidad entre los distintos navegadores que existen, se ha utilizado el framework multiplataforma de código abierto *Bootstrap*.

Esta herramienta, además de aportar estilos CSS de calidad, permite adaptar y mostrar el diseño de la aplicación correctamente tanto en navegadores de escritorio como en dispositivos móviles o tablets. Esta funcionalidad extra en aplicaciones web se denomina como diseño web adaptable (*responsive web design*).

Para la representación de los datos en forma de gráficas o diagramas, se han utilizado varias librerías JavaScript especializadas para este fin.

8.1.4. Base de datos principal (*Postgres*)

Para el almacenamiento persistente de toda la información a la cual se accede de forma continuada durante el uso del portal web se ha utilizado el sistema de gestión de bases de datos *Postgres*. Este sistema es ampliamente utilizado por su fiabilidad, robustez y escalabilidad.

Previamente al alojamiento de toda la información, estudiando la naturaleza de los distintos datos, se ha diseñado una estructura lógica-relacional de tablas y vistas de tal forma que la información se encuentre almacenada de forma coherente. Al mismo tiempo se asegura, mediante la definición de tanto claves primarias como foráneas, que la información se actualice automáticamente en cascada cuando la misma sea modificada.

Cabe señalar que, durante el almacenamiento inicial de los datos, dado al gran volumen de información, ha sido necesario el desarrollo de aplicaciones y scripts auxiliares a modo de herramientas para homogeneizar los datos y posteriormente ser enviados en lote a la base de datos por medio de tecnologías de programación como: Java EE, curl, api-rest, vba, batch/bash y SQL entre otras.

Dentro de la base de datos Postgres también se han alojado tras ser tratados todos los datos resultantes de distintos *Scripts* en R dado que su formato de salida en CSV no es óptimo ni seguro para su publicación y consulta en un portal Web. Cabe destacar que el número de registros que contenían algunos de estos archivos CSV superaban el millón, llegando a alcanzar los 5 millones.

De igual forma, por cuestiones de optimización y reutilización de la información, se ha almacenado en esta base de datos la información de la estructura contenida en cada uno de los archivos ráster NC proporcionados con datos de clima, proyecciones, índices, etc. Esta medida facilita la localización y coexistencia tanto de variables de datos propiamente dichas como de variables tipo coordenada. Dichas variables codifican la información sobre la localización geográfica (*longitude* y *latitude*) o sobre las fechas para las que un archivo NC contiene información (*times*). Las variables tipo coordenada son necesarias, por ejemplo, para poder realizar consultas al servidor de datos espaciales *GeoServer*.

De esta forma se evita acceder de forma aislada y segregada a archivos y se centraliza toda la información permitiendo su consulta e incluso el cruce con otros datos almacenados.

8.1.5. Base de datos espacial (*PostGIS*)

Como extensión de datos espaciales para el almacenamiento de información geográfica dentro de una base de datos Postgres, se encuentra *PostGIS*.

Esta extensión ha sido instalada y habilitada en el servidor con la finalidad de contener centralizada y de forma relacional con el resto de la información existente los distintos datos geográficos que utiliza el portal: estaciones meteorológicas, límites administrativos, etc.

De igual forma que ha sido necesario el tratamiento para la conversión de datos en formato CSV a tablas, para el almacenamiento en *PostGIS* se ha transformado archivos recibidos en formato JSON a entidades o geometrías *PostGIS*.

Esta labor de transformación se ha realizado principalmente porque al contener y servir a los usuarios la información ya sea en JSON o CSV existe redundancia al mismo tiempo que se fuerza al cliente a la descarga completa del archivo en lugar de únicamente los datos que desea consultar. Al encontrarse la información en tablas *PostGIS*, es posible filtrar cualquier consulta y retornar de forma dinámica el resultado al usuario reduciendo notablemente el consumo de recursos y tiempo tanto para el usuario final como para el servidor.

8.1.6. Archivos *NetCDF*

Dentro de los componentes que se utilizan internamente en el portal *cucc-uodata.es* se encuentran muy presentes los archivos en formato *NetCDF* (*Network Common Data Form*).

Este formato es muy utilizado internacionalmente para el intercambio y almacenamiento de datos científicos ya que permite contener en un mismo archivo distintas dimensiones siendo esta característica de especial utilidad para almacenar, por ejemplo, en el caso de este portal, diferentes valores de variables meteorológicas para una misma extensión geográfica.

Nomenclatura para los archivos *NetCDF* — Dado que el número de archivos *NetCDF* que contiene el portal es considerable, que cada uno contiene a su vez variables y para cada una de ellas un arreglo con diferentes fechas, se ha definido una nomenclatura para nombrar los mismos.

Esta estructura en los nombres, además de evitar duplicados de cara al almacenamiento en *GeoServer*, facilita tanto reconocer el contenido del archivo visualmente como la localización por medio de, por ejemplo, una consulta parametrizada procedente de la base de datos.

La estructura del nombre de un archivo *NetCDF* se establece por medio de una concatenación separada por guiones

bajos (_) de distintas variables y el contenido del propio archivo:

```
[Año]_[table_id]_[source_id]_[experiment_id]_[member_id]_[grid_label]_[time_range]_[table_suffix]_[table_suffix2]_[table_suffix3].nc
```

- **Año.** Año en que se realiza el estudio.
- **table_id.** Rango de tiempo del conjunto de datos. Estos valores pueden ser: *day, mon, yr* (diario, mensual, anual).
- **source_id.** Nombre del reanálisis: *UCAN, ensemble*.
- **experiment_id.** Identificador del experimento. Ya sea reanálisis o la etiqueta de un experimento del IPCC (por ej. *rcp85*).
- **member_id.** Versión de reanálisis (por ej. *v17, mean-UCAN-EQM-Asturias-1km-1976-2005*).
- **grid_label.** Resolución espacial (por ej. *1km*).
- **time_range.** Rango de tiempo de las mediciones o cálculos, adaptado a '*table_id*'.
- **table_suffix.** Etiqueta descriptiva del NC puede ser: *clim, delta, ts* (climatología, incremento, serie temporal).
- **table_suffix2.** Tipo de agrupación: *atmos* (Variables atmosféricas y meteorológicas: precipitación y temperatura) o *extremes* (Índices extremos ECA/ETCCDMI).
- **table_sufix3.** Facilita la descripción del periodo calculado para los valores. Por ejemplo. Cálculos por décadas (*decadal*), estaciones (*seasonal*), anuales (*annual*), mensuales (*monthly*) o de periodo largo (*lngtrm*).

Por ejemplo, dadas las siguientes propiedades:

```
[2024] _ [seas] _ [UCAN] _ [reanalysis] _ [v17] _ [1km] _ [1971-1980] _ [clim] _ [atmos] _ [decadal]
```

el nombre resultante para el archivo NC correspondería a:

```
2024_seas_UCAN_reanalysis_v17_1km_1971-1980_clim_atmos_decadal.nc
```

Contenido de los archivos *NetCDF* — Cada archivo *NetCDF* o NC contiene una estructura interna que ha sido previamente establecida por el equipo de la CuCC para garantizar tanto la coordinación de las tareas como el intercambio o actualización de estos archivos.

Básicamente el contenido de los NCs consiste en una colección de *rasters* (imágenes georeferenciadas) con datos en sus píxeles que representan valores de variables en una determinada fecha.

Cada variable se almacena en una dimensión independiente y dentro de cada dimensión se ubican tantos *rasters* como número de fechas contiene el NC.

De esta forma, es posible albergar en un único archivo NC imágenes de Asturias con valores de precipitaciones (*pr*), temperaturas medias (*tas*), temperaturas máximas (*tasmax*) y temperaturas mínimas (*tasmin*) de, por ejemplo, todos los días de un año (365 x 4 variables = 1460 imágenes).

Actualmente se han alojado y configurado en el servidor 332 archivos NC en los cuales se distribuyen, en función del tipo, las variables detalladas en la Tabla 4.

Cada archivo NC contiene una colección determinada de fechas de los datos alcanzando actualmente registradas en el servidor la suma total de 3556 fechas.

Teniendo en cuenta el número total de NCs y las fechas que contiene cada una de sus variables, actualmente el servidor ofrece 21.315 imágenes *raster* disponibles para su consulta por parte de los usuarios.

8.1.7. GeoServer (Servidor de Mapas Web)

Dentro del mismo servidor principal, se ha instalado y configurado *GeoServer* como herramienta para servir las distintas imágenes y datos contenidos en la colección de los archivos NC.

Por defecto, *GeoServer* no admite este tipo de formato por lo que ha sido necesario instalarle adicionalmente un *Plugin* de *Geoserver* para manejar *DataSets* multidimensionales.

Ha sido necesario configurar y dar de alta en *Geoserver* 332 Almacenes de datos y 3082 *Coverages* para contener suministrar los archivos NC que son accesibles vía Web desde las distintas páginas del portal.

8.1.8. Servidor Web de Catálogos de Datos (TDS)

Aunque se encuentra instalado y configurado en el servidor, actualmente no es accesible al público ya que está en fase de desarrollo.

Se trata de un Servidor Web con un servicio de catálogo de datos integrado que proporciona una plataforma para publicar información vía web.

El objetivo de este servidor es permitir que los usuarios puedan realizar consultas efectivas del conjunto de datos por medio de la utilización de sus metadatos.

8.2. Portal Web: cucc-uodata.es

Esta sección describe la interfaz del portal de datos de la CuCC cucc-uodata.es como las instrucciones de uso por parte de los usuarios. Dado que el portal se compone de diferentes páginas web con un funcionamiento y contenido distinto, los siguientes apartados se centran de manera individual en cada una de sus páginas.

Con el objetivo de reutilizar componentes de diseño, a modo general, algunas de estas páginas presentan similitudes tanto en su funcionamiento como en la distribución del contenido.

8.2.1. Estructura

El portal tiene una estructura jerárquica, siendo esta la forma utilizada para organizar el contenido en niveles que se subdividen desde una página principal (Inicio) hasta secciones y subsecciones (Figura 20).

A excepción de la página inicial, el resto de páginas comparten una estructura en su diseño para facilitar tanto la navegación como la comprensión del contenido por parte de los usuarios.

Esta estructura básica se compone de: Cabecera, Navegador, Contenido y Pie de página.

Dado que el portal ha sido desarrollado incluyendo un diseño web adaptativo (*responsive*), la distribución de estos elementos puede variar ligeramente dependiendo tanto del dispositivo desde el cual acceda el usuario como de la orientación de la pantalla (PC, Tablet, móvil, etc.).

A modo general, la disposición principal será como se muestra en la Figura 21.

- **Cabecera.** Zona superior donde se sitúan los logotipos principales del portal.
- **Navegador.** Se trata de una barra horizontal que facilita el acceso directo a las páginas principales que contiene el producto que se esté consultando. Esta barra, con el fin de adaptarse al tamaño de pantalla, se contraerá mostrando únicamente un icono de acceso tipo menú (3 barras horizontales).
- **Contenido.** Espacio reservado donde se mostrará el contenido correspondiente de cada página.

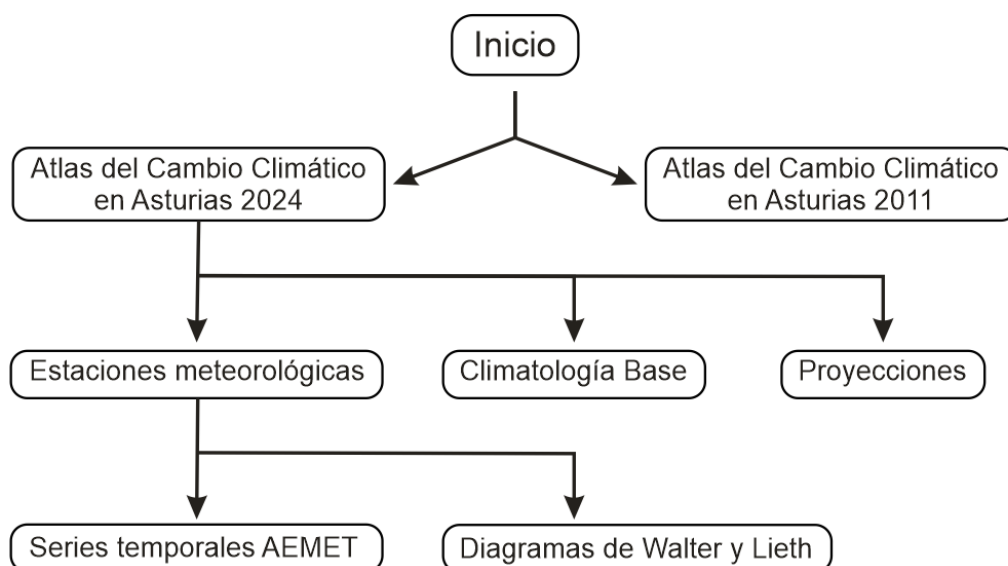


Figura 20: Estructura jerárquica del portal CuCC.

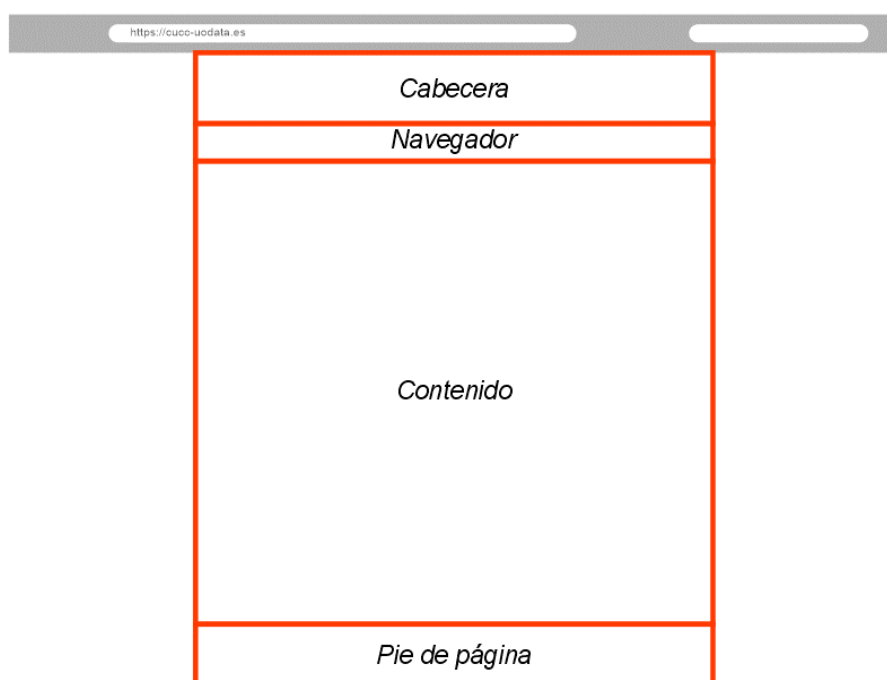


Figura 21: Esquema de distribución de elementos principales del portal CuCC.

- **Pie de página.** En esta parte se mostrarán, en función del producto que se esté consultando, las autorías correspondientes. También puede ser usada esta zona para indicar algún tipo de observación o aviso general.

A continuación, se describe individualmente cada una de las páginas que conforman el portal web de datos de la CuCC cucc-uodata.es.

8.2.2. Inicio

Se trata de la página principal o raíz del portal desde la cual se da una breve bienvenida a los usuarios y se facilitan los accesos a los distintos productos disponibles.

Actualmente se encuentran disponibles para la comunidad científica y para el público en general dos estudios o productos: Atlas del Cambio Climático en Asturias 2024 y Atlas del Cambio Climático en Asturias 2011.

Para acceder a cada uno de ellos, simplemente se realizará un clic sobre el producto que se desee consultar (Figura 22).

The image shows the homepage of the CuCC portal. At the top, there are logos for CuCC (Cátedra de Cambio Climático de la Universidad de Oviedo), the University of Oviedo, and the Principado de Asturias. The main heading is 'Acceso y visualización de datos'. Below this, a welcome message and a paragraph explain the portal's purpose. A section titled 'Productos disponibles:' lists two products: 'Atlas del Cambio Climático en Asturias 2024' and 'Atlas del Cambio Climático en Asturias 2011'. A red arrow labeled 'Accesos' points to both product boxes. Below the products, there is a section 'Acercas de la Cátedra de Cambio Climático de la Universidad de Oviedo' with a brief description and a link to the website.

Figura 22: Página de Inicio y acceso a productos del portal CuCC.

8.3. Atlas del Cambio Climático en Asturias 2011

La anterior edición de escenarios de cambio climático para Asturias incluyó el desarrollo de una página web y un visor básico acoplado a un servidor de mapas y una base de datos geográfica que permitía explorar tanto los datos de estaciones meteorológicas como climatologías y escenarios de cambio climático [Taboada & Anadón, 2011]. El sistema estuvo operativo hasta 2017, momento en el que un problema con el hardware interrumpió el servicio. Por esta razón, el equipo del proyecto ha trabajado para modernizar y recuperar su funcionalidad de la página original, que se encuentra de nuevo disponible desde diciembre de 2023 a través del portal <https://cucc-uodata.es>. La página original había quedado obsoleta tanto desde un punto de vista técnico como en sus contenidos, requiriendo no solo una actualización, sino prácticamente el desarrollo, partiendo de cero, de un sistema capaz de integrar y servir el volumen

de datos generado en esta nueva edición de escenarios.

Al igual que le resto de tareas de implementación del portal, la tarea de actualización del código de la antigua página ha sido liderada por Juan Carlos Fernández y Arturo Colina desde el [Indurot](#), centro con amplia experiencia en el desarrollo de este tipo de aplicaciones. Las páginas estáticas se han vuelto a codificar conservando textos y figuras originales en Java utilizando la tecnología Servlets para desarrollar una página web dinámica en la que los contenidos se actualizan de acuerdo a las acciones del usuario. La página se ubica en el servidor adquirido recientemente por la [CuCC](#) y en el que se ha instalado y configurado un servidor de aplicaciones [Apache Tomcat](#) (v9), una base de datos geográficos sobre la última versión de [PostgreSQL/PostGIS](#) (v14 y v3) y un srvidor de mapas [GeoServer](#) (v2.22.5) que permiten acoplar los contenedores [OpenLayers](#) en los que el usuario puede explorar las climatologías y mapas de incrementos de temperatura y precipitación de [Taboada & Anadón, 2011].

El objetivo de este manual es describir el funcionamiento del portal en la actualidad. Por esta razón, y dado que tanto el contenido como las tecnologías que contiene han sido rescatadas de un servidor ajeno al actual, este manual no incluye la descripción ni el funcionamiento del este producto.

Puede consultar las instrucciones y descripción que se elaboraron en su momento accediendo a la siguiente dirección: <https://cucc-uodata.es/CUCCdata/Ayuda> ya que también han sido recuperadas y restauradas.

ADVERTENCIA: La Cátedra de Cambio Climático de la Universidad de Oviedo [CuCC] ha recuperado la página web del Atlas del Cambio Climático en Asturias como documento que atestigüa los primeros trabajos sobre cambio climático liderados por la Universidad. La página recoge los principales resultados del informe Análisis de Escenarios de Cambio Climático en Asturias, **publicado en 2011**, por lo que se deben interpretar con precaución. La CuCC trabaja en la actualidad para actualizar estos contenidos.

Atlas del Cambio Climático en Asturias

Inicio

Estaciones meteorológicas

Climatologías 1970-2009

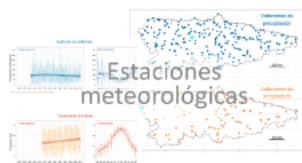
Proyecciones 2010-2100

Acerca de este sitio

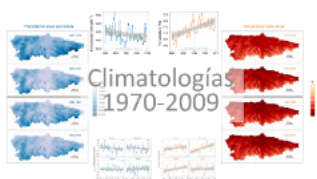
Presentación

Esta página Web recoge los principales resultados del informe *Análisis de Escenarios de Cambio Climático en Asturias* ([pdf](#)), realizado en 2011 por el Depto. de Biología de Organismos y Sistemas de la Universidad de Oviedo (www.uniovi.es) en colaboración con la Oficina para la Sostenibilidad, el Cambio Climático y la Participación del Principado de Asturias (www.asturias.es/portal/site/medioambiente).

La página ofrece una serie de mapas interactivos que permiten explorar los resultados obtenidos tras analizar la variación en las condiciones de precipitación y temperatura en el Principado de Asturias durante las últimas cuatro décadas (1970-2009), así como los impactos esperados durante lo que queda de este siglo (2010-2100). Los mapas disponibles ofrecen distintos tipos de información:



- **Estaciones meteorológicas:** observaciones de precipitación y temperatura recogidas por la red de estaciones meteorológicas de la Agencia Estatal de Meteorología ([AEMET](#)) durante el período 1970-2009 ([más información](#))



- **Climatología 1970-2009:** conjunto de mapas con las promedios decadales de precipitación y temperatura durante el período 1970-2009, reconstruidas a partir de observaciones ([más información](#))



- **Proyecciones 2010-2100:** proyecciones para los escenarios A2, A1B y B2 empleados por el [IPCC](#), con resolución aumentada a partir de los resultados de los proyectos [PRUDENCE](#) y [ENSEMBLES](#) para el período 2010-2100 ([más información](#))

Figura 23: Antigua web Atlas de Cambio Climático de Asturias [Taboada & Anadón, 2011], recuperada por el proyecto y disponible de nuevo en <https://cucc-uodata.es> a través de los servidores de la CuCC.

Tabla 3: Pila tecnológica actual que posee el Servidor:.

	Denominación tecnológica	Descripción	Versión
	Sistema Operativo	<i>Linux Ubuntu</i>	22.04.03 LTS
	Máquina virtual de Java (JVM)	<i>Java 11</i>	11.0.2+9 openjdk-amd64
	Servidor Web principal	<i>Apache Tomcat</i>	9.0.82
	Servidor de Mapas	<i>Geoserver</i>	2.22.5
	Seguridad Web	<i>Certificado SSL TSL</i>	-
	Base de Datos Principal	<i>PostgreSQL</i>	14
	Base de Datos Espacial	<i>PostGIS</i>	3
	Driver JDBC	<i>Driver de conexión postgresql</i>	42.6.0
	Librería de Tags HTML	<i>taglibs-standard</i>	1.2.5
	Gestor de Bases de Datos	<i>pgAdmin</i>	4
	Servidor Web de Catálogos de Datos (TDS)	<i>THREDDS</i>	5.4
	Librería manejo de NetCDFs	<i>netcdfAll</i>	5.5.3
	Plugin de Geoserver para DataSets multidimensionales	<i>NetCDF-4</i>	4
	Librería JS,CSS y HTML	<i>Bootstrap</i>	4.0.0
	Librería Javascript Mapas Web	<i>OpenLayers</i>	8
	Librería JavaScript Gráficos	<i>D3</i>	7
	Librería JavaScript Fechas	<i>Datejs</i>	1.0.0
	Librería JavaScript	<i>jQuery</i>	1.11.0

Tabla 4: Variables e índices climatológicos almacenados en los archivos NetCDF.

Variables meteorológicas

pr	Precipitación acumulada
tas	Temperatura media
tasmax	Temperatura máxima
tasmin	Temperatura mínima

Índices de precipitación y de sequía

CDD	Período más largo sin precipitaciones
CWD	Número máximo de días con precipitación consecutivos [RR >1 mm]
NCDD5d	Períodos de cinco o más días seguidos sin precipitaciones
NCWD5d	Número de períodos con con cinco o más días consecutivos con precipitaciones
R10mm	Días con precipitación fuerte [RR >10 mm]
R20mm	Días con precipitación muy fuerte [RR >20 mm]
R95p	Porcentaje de días con mucha precipitación [RR >RR95p (1991–2020)]
R95pTot	Porcentaje de precipitación acumulada en días muy lluviosos
R99p	Porcentaje de días con precipitación extrema [RR >RR99p (1991–2020)]
RR1	Días con precipitación [RR >1 mm]
RX1day	Máxima precipitación acumulada en un día
RX5day	Máxima precipitación acumulada en cinco días
SPII	Ratio entre la precipitación total y el número de días con precipitación

Extremos fríos y de calor

CFD	Número máximo de días consecutivos con heladas [TN <0 °C]
FD	Número de días con heladas [TN <0 °C]
GD4	Crecimiento en grados-día [TG >4 °C]
GSL	Duración del período de crecimiento [período con TG >5°C]
HD17	Días de calefacción en grados-día [TG <17 °C]
ID	Número de días con hielo [TX <0 °C]
NCFD5d	Número de períodos de al menos cinco o más días con heladas
SU	Días de verano [TX >25 °C]
tGSL	Día del año en que comienza el período de crecimiento vegetativo
TR	Noches tropicales [TN >20 °C]

Extremos de temperatura

CSDI	Duración promedio de la ola de frío más larga cada año [TN <TN10p (1991–2020)]
DTR	Amplitud térmica diaria [TX - TN]
ETR	Amplitud térmica anual [TXx - TNn]
NCSDI6d	Número de olas de frío al año [al menos 6 días]
NWSDI6d	Número de olas de calor al año [al menos 6 días]
TN10p	Porcentaje de noches frías [TN <TN10p (1991–2020)]
TN90p	Porcentaje de noches cálidas [TN >TN90p (1991–2020)]
TNn	Temperatura mínima
TNx	Máxima absoluta de las temperaturas mínimas diarias
TX10p	Porcentaje de días fríos [TX <TX 10p (1991–2020)]
TX90p	Porcentaje de días cálidos [TX >TX90p (1991–2020)]
TXn	Mínima absoluta de las temperaturas máximas diarias
TXx	Temperatura máxima
WSDI	Duración promedio de la ola de calor más larga cada año [TX <TX90p (1991–2020)]

8.4. Atlas del Cambio Climático en Asturias 2024

La web del Atlas del Cambio Climático en Asturias 2024, y el conjunto de subpáginas que contiene, son un resumen de los principales resultados del informe *Elaboración de Escenarios de Cambio Climático de Alta Resolución sobre el Principado de Asturias* [CuCC, 2024]. La Figura 24 resume la organización y contenidos de la web.

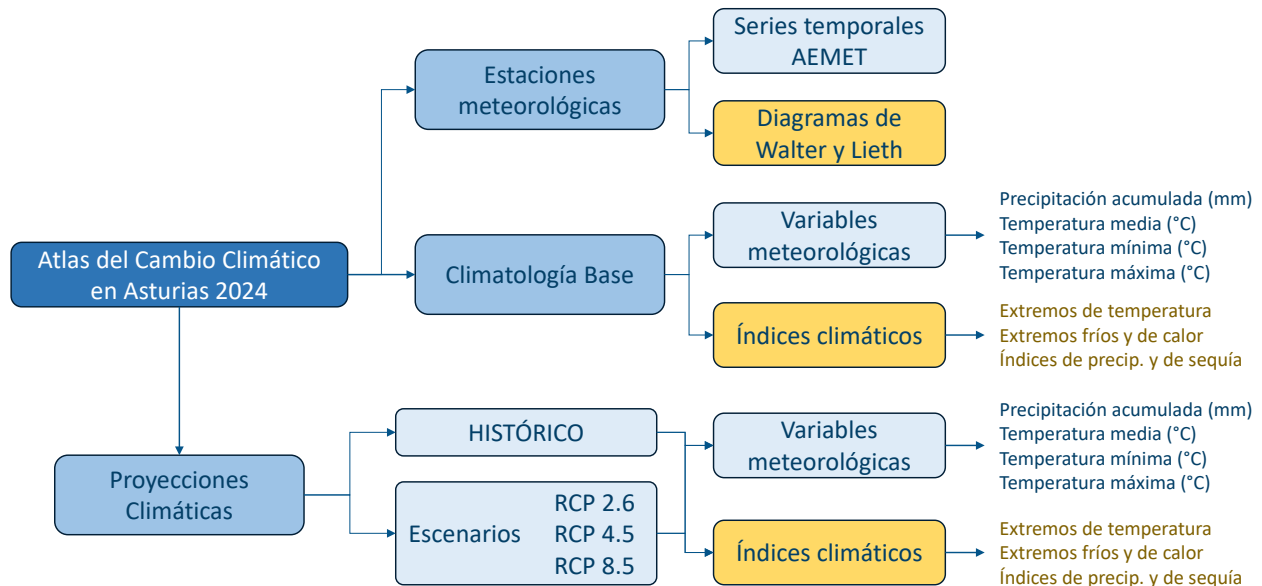


Figura 24: Esquema de la organización y contenidos del Atlas del Cambio Climático en Asturias 2024 (cucc-uodata.es).

La Figura 25 muestra la página principal y de presentación del *Atlas del Cambio Climático en Asturias 2024* y desde la cual se puede acceder a los distintos apartados del Atlas a través de las siguientes subpáginas:

- Estaciones meteorológicas.
- Climatología base.
- Proyecciones.

8.4.1. Estaciones meteorológicas

Contiene enlaces que permiten explorar los cambios en la temperatura y precipitación en Asturias registrados por las estaciones meteorológicas de la red observación de *AEMet*, así como las condiciones promedio del clima de Asturias y su variación estacional.

Esta página proporciona el acceso a dos bloques de información:

- Series temporales AEMet.
- Diagramas de Walter y Lieth.

Atlas del Cambio Climático en Asturias 2024

Presentación

Este sitio web resume los principales resultados del informe Elaboración de Escenarios de Cambio Climático de Alta Resolución sobre el Principado de Asturias (ECCAst 2024), desarrollado por el equipo de la Cátedra de Cambio Climático de la Universidad de Oviedo (<https://cucc-uo.es>), en colaboración con la [Consejería de Transición Ecológica, Industria y Desarrollo Económico del Principado de Asturias](#), a través del Servicio de Calidad del Aire y Cambio Climático de la Dirección General de Calidad Ambiental, y la Agencia Estatal de Meteorología (Aemet).

El principal objetivo de este proyecto es evaluar y dar a conocer el impacto del cambio climático sobre el clima de Asturias, tanto los cambios registrados durante las últimas décadas (1970-2022), como los cambios esperados en lo que queda de este siglo (2025-2100) bajo escenarios alternativos de emisiones de gases de efecto invernadero asociados a distintas estrategias de uso de energía y del territorio.

Análisis y proyecciones del clima en Asturias

Los siguientes enlaces permiten explorar los principales resultados:

Accesos

Estaciones meteorológicas

Este apartado permite explorar las observaciones de precipitación y temperatura recogidas por la red de estaciones meteorológicas de la Agencia Estatal de Meteorología (Aemet) durante el período 1970-2023. Incluye un análisis de las condiciones promedio en cada localidad, así como de las tendencias recientes e incidencia de extremos.

Climatología base

Esta página presenta análisis basados en una reconstrucción de las condiciones diarias de precipitación y temperatura para el conjunto del territorio asturiano sobre una malla regular con una resolución de 1 km² desarrollada durante el proyecto. La página permite explorar mapas con promedios decadales para precipitación y temperatura, así como tendencias en promedios estacionales y anuales.

Proyecciones (actualmente en revisión)

Explore las consecuencias de distintas políticas climáticas a través de los escenarios de cambio climático en Asturias para el período 2025-2100. Estos escenarios se han generado mediante técnicas de regionalización aplicadas sobre las proyecciones de cambio de clima de la iniciativa EURO-CORDEX (<https://www.euro-cordex.net>), que se basan a su vez en las simulaciones desarrolladas como parte del sexto Informe de Evaluación del Cambio Climático del IPCC.

Otros recursos

Cada página incluye un breve resumen de los principales resultados, información sobre las bases de datos analizadas y sobre la metodología del proyecto. Por último, la página de ayuda incluye enlaces a otros sitios web de interés e información sobre cómo acceder y utilizar los datos generados durante este estudio (pulse aquí para saber más).

Durante los próximos meses, el atlas incorporará nuevos análisis e información sobre otros indicadores de cambio climático. Puede estar al tanto de estas y otras iniciativas relacionadas con el impacto del cambio climático en Asturias a través de las redes sociales de la Cátedra de Cambio Climático de la Universidad de Oviedo (<https://cucc-uo.es>).

Autores	
Centro Oceanográfico de Gijón, Instituto Español de Oceanografía - CSIC	
Fernando González Taboada (Científico Titular del Centro Oceanográfico de Gijón)	
Departamento de Matemática Aplicada y Ciencias de la Computación de la Universidad de Cantabria	
Sixto Herrera García (Profesor Titular del Departamento de Matemática Aplicada y Ciencias de la Computación de la Universidad de Cantabria)	
INDUROT (Universidad de Oviedo)	
Juan Carlos Fernández Iglesias	
Arturo Colina Vuelta	

Figura 25: Página de presentación del Atlas 2024 y accesos al portal CuCC.

8.4.2. Series temporales AEMet

Esta página permite, a través de un mapa interactivo y una serie de gráficos, valorar los cambios en las condiciones climáticas de una localidad o región en el tiempo gracias al análisis de series históricas de datos meteorológicos.

Estaciones meteorológicas de la red AEMet en Asturias

Las series históricas de datos meteorológicos permiten evaluar posibles cambios en las condiciones climáticas de una localidad o región a lo largo del tiempo. La temperatura del aire cerca de la superficie (tas) y la precipitación (pr) son dos de las variables meteorológicas más importantes a la hora de definir el clima de una región y analizar posibles cambios.

Los siguientes enlaces permiten explorar los cambios en la temperatura y precipitación en Asturias registrados por las estaciones meteorológicas de la red observación de [Aemet](#), así como las condiciones promedio del clima de Asturias y su variación estacional.

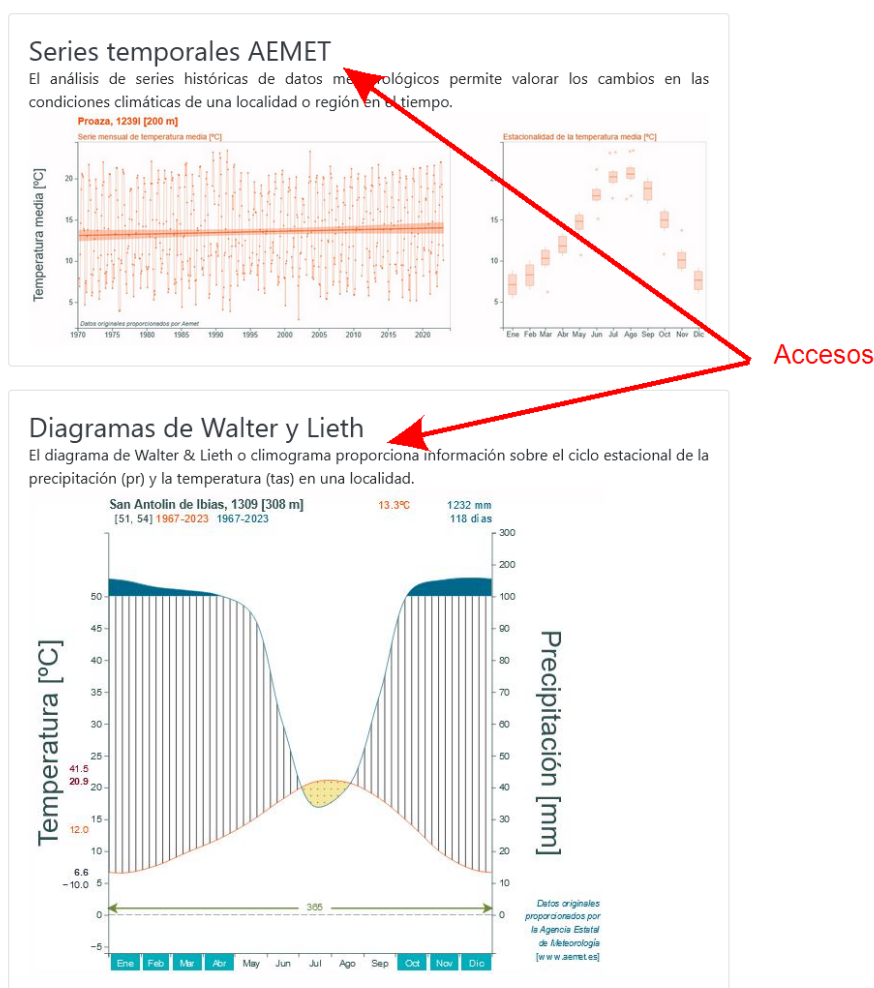


Figura 26: Página de Estaciones meteorológicas y accesos.

Al acceder se presenta un mapa por defecto enfocado en Asturias desde el cual, haciendo uso del ratón, es posible explorar un subconjunto de estas estaciones para analizar la variación interanual a escala mensual a través de series mensuales y del ciclo estacional.

El mapa incluye estaciones de precipitación (●), temperatura (○), y algunas estaciones que proporcionan información para ambas variables a la vez. Dependiendo de la disponibilidad de datos, se pueden explorar hasta once variables

distintas para una misma estación:

- Precipitación [mm]
- Temperatura media [°C]
- Media de las mínimas [°C]
- Media de las máximas [°C]
- Temperatura mínima absoluta [°C]
- Temperatura máxima absoluta [°C]
- Días libres de heladas [#]
- Días de lluvia [#]
- Precipitación máxima diaria [mm]
- Días con precipitación fuerte [díasmes⁻¹]
- Días con precipitación muy fuerte [díasmes⁻¹]

En la Figura 27 se muestran las tres zonas principales en las que se divide la página.

Mapa principal — Mapa interactivo en el que se representan las estaciones disponibles y desde el cual el usuario, haciendo uso de los botones de navegación, puede desplazarse o variar el zoom.

También se proporciona información añadida en la parte inferior del mapa como son las coordenadas actuales del cursor o el sistema de referencia utilizado en el mapa.

El mapa principal contiene una serie de botones que el usuario puede utilizar tanto para navegar como para obtener información adicional:



Permiten ampliar o reducir el zoom del mapa.



Restablece el zoom y la extensión del mapa al estado inicial.



Muestra / oculta la información de las autorías del mapa.



Visualizar el mapa a pantalla completa.

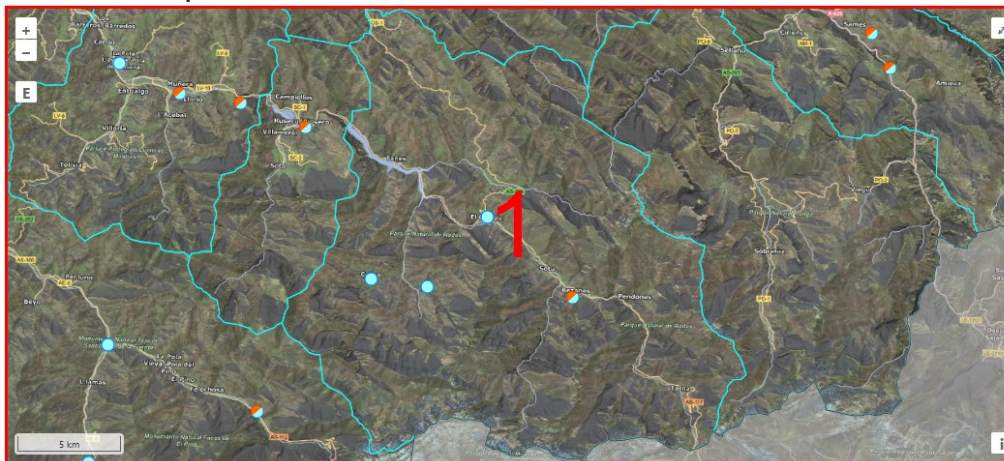
Para consultar los datos de una estación, existen dos métodos:

1. Seleccionando directamente una estación sobre el mapa.
2. Realizando un filtrado por medio de los cuadros de lista situados en la parte inferior del mapa.

Ambos métodos, generarán como resultado una gráfica en función de la variable seleccionada.

Método 1. Se realiza haciendo clic con el ratón sobre una estación del mapa. Tras seleccionar la estación, se mostrarán los datos de la misma en una ventana flotante (*popup*).

Series temporales AEMET



Utilice los botones de navegación para desplazarse sobre el mapa o para aumentar o reducir el zoom. Puede hacer clic en cualquier estación localizada en el mapa para consultar sus datos.

Posición (ETRS89 UTM 30N)
324082, 4793654

Filtrar estaciones por municipio:

Caso

LIMPIAR GRÁFICAS

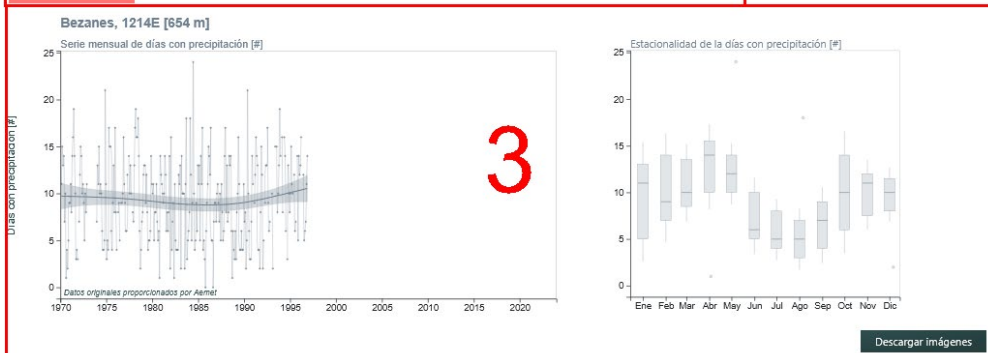
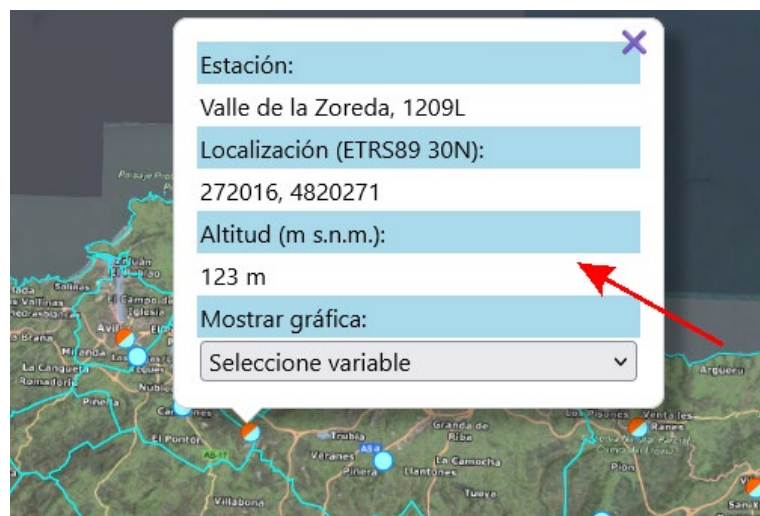


Figura 27: Partes de la página de Series temporales AEMet: Mapa principal (1), Zona de filtro de datos (2) y Zona de resultados (3).



Dentro de esta ventana aparecen una serie de datos y, en la parte inferior del mismo, un cuadro de lista desplegable que contendrá las variables disponibles para la estación seleccionada.

Si se despliega este cuadro y se selecciona una variable, automáticamente se consultarán los datos al servidor y, una vez se retornen, serán utilizados para mostrar el resultado en forma de gráfica/s en la zona de resultados (3).

Método 2. Por medio de filtros.

Zona de filtro de datos — Esta página permite filtrar las estaciones por municipio. Este método resulta más útil si el usuario precisa centrarse en ámbitos concretos.

Filtrar estaciones por municipio:

Caso 1 Bezares (1214E) 2 Días con precipitación muy fuerte [#] 3

El funcionamiento es el siguiente:

1. Por medio del cuadro de lista más a la izquierda (1), se selecciona un municipio.
2. Una vez se indique el municipio, automáticamente el mapa se desplazará a la extensión geográfica del mismo y, al mismo tiempo que se resalta en el mapa la selección, se mostrará el segundo cuadro de lista (2) que contendrá las estaciones ubicadas en dicho territorio si es que existen.
3. Tras seleccionar una estación, aparecerán en el siguiente cuadro (3) un listado con todas las variables que contiene disponibles la estación.
4. Finalmente, de igual forma que en el método 1, al seleccionar una variable se mostrará la información en forma de gráfica/s en la Zona de Resultados.

Zona de Resultados— Como se ha indicado previamente, este espacio está reservado para mostrar los resultados y las gráficas de las consultas (Figura 28).

Cada vez que se genera una gráfica en esta zona, se mostrará un botón en el parte inmediatamente superior denominado: *Limpiar gráficas*, que permite quitar todas las gráficas mostradas.

Todas las gráficas resultantes se generan en tiempo real en formato vectorial *SVG* lo que permite mostrar información adicional al pasar por encima de los elementos de la gráfica. También es posible exportar la gráfica a formato imagen *PNG* haciendo uso del botón *Descargar imágenes* situado en la parte inferior de las gráficas.

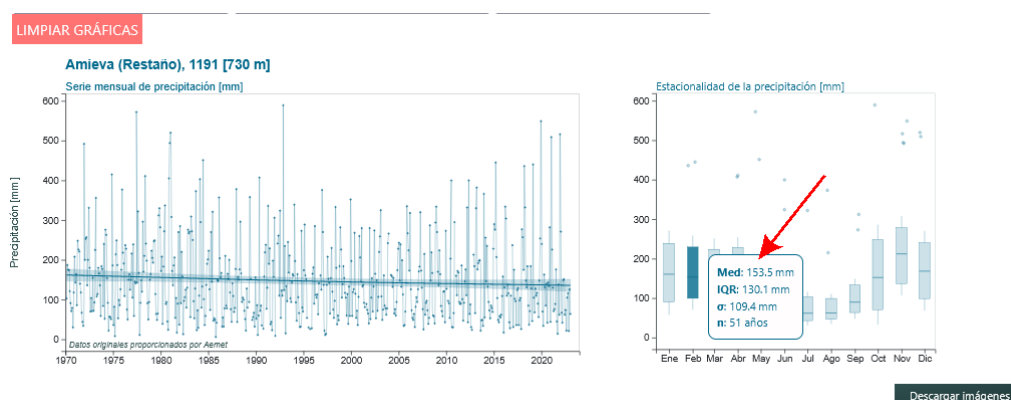


Figura 28: Ejemplo de gráfica de Series temporales.

Las gráficas de series temporales se han codificado empleando la librería de JavaScript [D3](#) [Bostock *et al.*, 2011] y tienen dos paneles. El panel de la izquierda muestra la evolución de la variable seleccionada mediante una línea que une puntos que corresponden al total (precipitación acumulada y número de días), al promedio (temperaturas medias), o

al índice de extremos para cada mes en el que hay observaciones disponibles (al menos un 75% de los días). A modo de guía, el gráfico incluye el ajuste de un modelo generalizado aditivo que trata de capturar la tendencia media en la serie temporal. Las estimas de la media durante el período 1970-2022, la tendencia lineal y los intervalos de confianza se han calculado utilizando el método de Theil-Sen. Al situar el puntero sobre dicha tendencia, un panel emergente muestra estimas para la media y la tendencia lineal.

El panel de la derecha representa la variación estacional mediante un diagrama de caja para cada mes del año. Estos diagramas se han elaborado a partir de todas las observaciones acumuladas a lo largo de los años para cada mes, e incluyen tanto información sobre las condiciones promedio y su variación (mediana y cuartiles), como sobre la ocurrencia de valores extremos (destacados como puntos). Cada caja abarca el rango intercuartílico [Q_1 a Q_3] de las observaciones disponibles para cada mes, mientras que la línea horizontal corresponde a la mediana [Q_2]. Los bigotes abarcan el máximo y el mínimo de los datos excluyendo los valores atípicos, que se han identificado previamente usando el criterio de Tukey. Al situar el puntos del ratón a las cajas o a los valores atípicos aparece un cuadro emergente con información sobre:

- **Med:** mediana de los valores el mes seleccionado (Q_2)
- **IQR:** rango intercuartílico ($IQR = |Q_3 - Q_1|$)
- σ : desviación estándar
- **n:** número de observaciones

Los valores atípicos se definieron como aquellos valores por encima o por debajo del resultado de añadir o sustraer 1.5 veces el rango intercuartílico a los cuartiles Q_1 y Q_3 , respectivamente.

8.4.3. Diagramas de Walter y Lieth

El diagrama de Walter & Lieth o climograma proporciona información sobre el ciclo estacional de la precipitación (pr) y la temperatura (tas) en una localidad (Figura 29, Figura 30).

En cuando a distribución de los elementos/zonas y funcionamiento, esta página es muy similar a la página anteriormente descrita (sección §8.4.2).

Se compone de un mapa principal, una zona de filtrado por municipios y otra zona para mostrar los resultados.

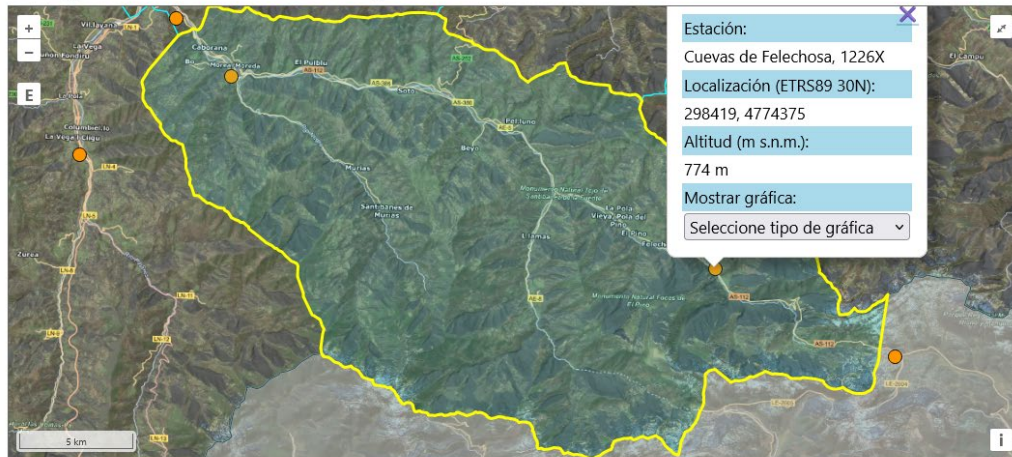
Las principales diferencias en cuanto a contenido y funcionamiento son las siguientes:

- **Mapa principal:** representa un conjunto de estaciones situadas por el territorio las cuales, al ser seleccionadas por el usuario directamente sobre el mapa o mediante un filtro, ofrecerán la posibilidad de generar un *Diagrama de Walter & Lieth* con los datos de la propia estación meteorológica.
- **Zona de filtrado:** en esta ocasión, consiste de 2 cuadros de lista: Municipios y Estación. De esta forma, en el momento de seleccionar una estación, se generará automáticamente el *Diagrama de Walter & Lieth* correspondiente.
- **Zona de Resultados:** con el objetivo de facilitar al usuario la comparación entre distintos diagramas, se presentarán de forma continua y sin eliminarse todos los siagramas que el usuario genere.

Como medida adicional, se facilitan individualmente por cada diagrama que el usuario vaya generando, las opciones en forma de botón de *Quitar* o *Descargar* el gráfico.

Las diagrama de Walter & Lieth se han codificado empleando la librería de JavaScript D3 [Bostock *et al.*, 2011]. También se ha incluido una tabla resumen junto a cada gráfico. Este diagrama nace con la idea de facilitar la comparación

Diagramas de Walter y Lieth



Utilice los botones de navegación para desplazarse sobre el mapa o para aumentar o reducir el zoom. Puede hacer clic en cualquier estación localizada en el mapa para consultar sus datos. Posición (ETRS89 UTM 30N): 309927, 4751047

Filtrar estaciones por municipio:



Figura 29: Página de Diagramas de Walter y Lieth.

de las condiciones climáticas entre distintas localidades. El gráfico presenta los promedios de precipitación, y los promedios y valores extremos de temperatura para cada mes del año (Figura 30). Estos valores se calculan a partir de series largas –normalmente 30 ó más años, aunque puede pueden ser menos.

El diagrama que se presenta en la página es interactivo; al mover el ratón sobre los distintos elementos el usuario puede obtener información sobre ellos. Además, puede encontrar un resumen de los distintos elementos en un *gif* al final de la página.

La parte superior del gráfico detalla la siguiente información:

- el nombre de la estación, su código identificativo, y la altitud a la que se encuentra la estación (las coordenadas de la estación se detallan en la descripción emergente),
- la precipitación anual media,
- el número de días al año con más de 1mm de precipitación.
- la temperatura media anual,

- el período de tiempo para el que se ha calculado el gráfico (los años y rango de años con observaciones de precipitación y temperatura, respectivamente),

El cuerpo del diagrama representa el ciclo estacional de precipitación y temperatura mediante dos líneas:

- la línea de color azul muestra los milímetros de precipitación acumulados cada mes, mientras que,
- línea de color naranja muestra la variación en la temperatura media mensual en grados Celsius.

El eje de abscisas corresponde al mes del año, que empieza en enero (julio) para estaciones localizadas en el hemisferio norte (sur). En el eje ordenadas, los valores de precipitación aumentan el doble de rápido que los de temperatura ($10^{\circ}\text{C} = 20\text{ mm}$). La escala relativa entre los ejes de ordenadas cambia de nuevo cuando la precipitación mensual es alta, pasando a un ratio 1:20 para valores del promedio mensual de precipitación acumulada superiores a los 100 mm (por ejemplo, el incremento desde 50°C a 60°C corresponde a un incremento de 200 mm en la precipitación). Esta convención facilita la identificación de:

- *períodos secos*: definidos como aquéllos durante los que la precipitación mensual, expresada en milímetros, está por debajo del doble de la temperatura media mensual en grados Celsius ($pr < 2tas$, criterio conocido como [índice xerotérmico de Gaussen](#)). Se indican mediante un sombreado de puntos sobre fondo amarillo.
- *períodos húmedos*: durante los que los milímetros de precipitación mensual están por encima del doble de la temperatura media mensual en grados Celsius, aunque por debajo de 100 mm ($pr \geq 2tas$, $pr < 100\text{ mm}$), y
- *períodos con precipitación alta*: que corresponden a meses con $pr \geq 100\text{ mm}$ que se destacan mediante una trama sólida de color azul.

El gráfico detalla en la parte central la duración promedio del período vegetativo, definido como el período más largo libre de heladas ($TN < 0^{\circ}\text{C}$) en el promedio a largo plazo (climatología) para cada día del año.

Alrededor del del gráfico se proporciona información sobre los extremos de temperatura. En la parte izquierda se indican, de arriba a abajo,

- **temperatura máxima absoluta** durante el período de estudio,
- **media de las máximas** durante el mes más cálido,
- **rango anual de temperatura** (la diferencia entre la temperatura media del mes más cálido y del mes más frío),
- **media de las mínimas durante el mes más frío**, y
- **temperatura mínima absoluta** registrada durante el período de estudio.

Finalmente, en la parte inferior del gráfico, sobre las etiquetas de los meses, se incluye una barra que indica la probabilidad de heladas para cada mes, distinguiendo tres casos:

- **TNn < 0**: cuando el promedio durante los años estudiados de la temperatura media de las mínimas diarias es menor que cero se considera que la ocurrencia de heladas es segura. Se indica con un relleno más oscuro de la barra inferior.
- **TNn < 0 y TN \geq 0**: cuando la media de las temperaturas mínimas absolutas de ese mes a lo largo del período considerado es menor que cero, aunque no el promedio de la media de las mínimas, se considera que la probabilidad de ocurrencia de heladas es moderada. Se indica con un relleno más claro de la barra inferior.

- **TNn ≥ 0 (y TN ≥ 0):** los meses en que la media de las mínimas absolutas está por encima de cero se considera que la probabilidad de heladas es baja, por lo que la barra no se rellena de ningún color.

La tabla aneja permite explorar directamente los promedios sobre los que se construye el gráfico además de otros índices climáticos como el número de días libres de heladas y el número de días con precipitaciones por encima de 1 mm.

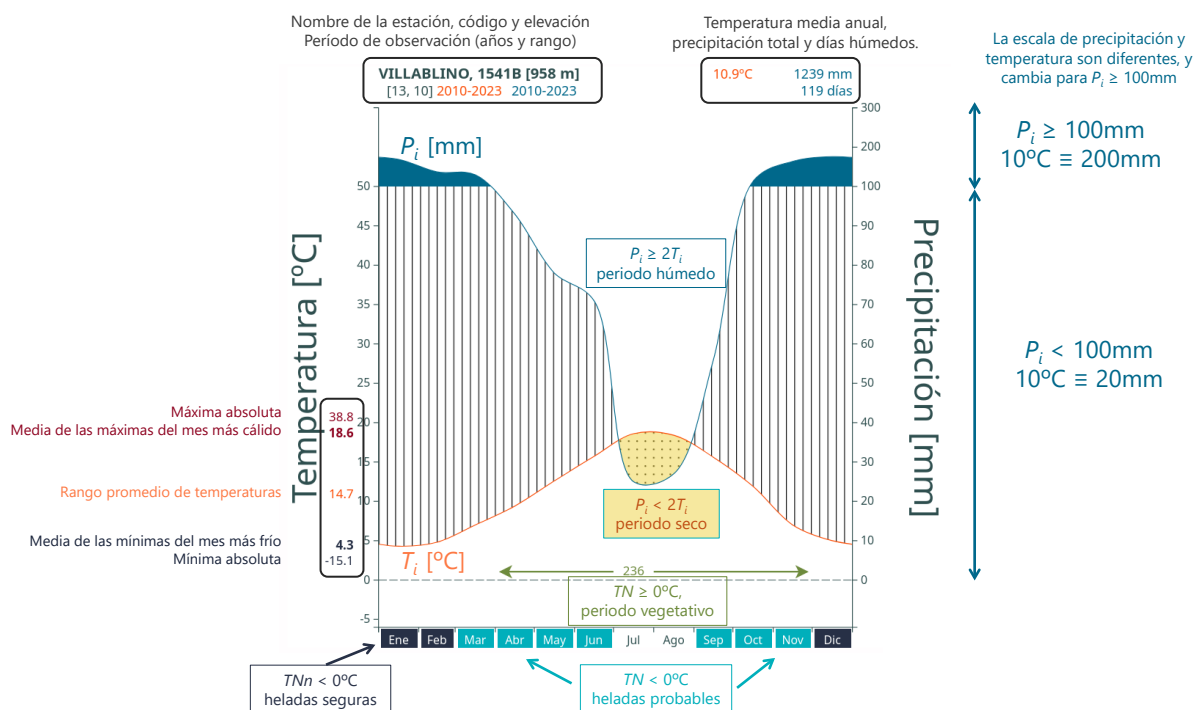


Figura 30: Detalle de la construcción e información que contiene el diagrama de Walter y Lieth.

8.4.4. Climatología Base

Esta página presenta análisis basados en una reconstrucción de las condiciones diarias de precipitación y temperatura para el conjunto del territorio asturiano.

Esta página, al igual que sucede con la de página de *Proyecciones*, facilita el acceso a un gran volumen de información clasificada por tipos de variables, variables, intervalos de tiempo, frecuente, etc.

Por esta razón, con el objetivo de proporcionar facilidad de acceso y navegación a los recursos que contiene esta página, la información se ha organizado mediante una serie de *Desplegables*, tal y como se muestra en la Figura 31.

Estos desplegados, permiten al usuario expandir y contraer la información que contiene cada uno haciendo clic sobre los mismos. En algunos casos, cuando es preciso utilizar subniveles, un desplegado puede contener a su vez varios desplegados.

De esta forma, al mismo tiempo que se facilita la navegación al usuario, también se ahorran recursos tanto del Servidor como del propio usuario ya que únicamente se realizan las peticiones correspondientes al servidor cuando un desplegado es accionado.

La página brinda acceso a todos los mapas existentes en el servidor correspondientes a Climatologías e índices Climáticos.

Para acceder a un mapa determinado, se navegará por medio de los Desplegables accionando cada uno de los mismos

Climatologías



Figura 31: Desplegables y subniveles en la página de climatologías base.

hasta llegar a visualizar las miniaturas de los mapas en cuestión.

Las previsualizaciones o miniaturas de los mapas de una variable se presentan en forma de tabla donde, en el caso de tratarse de Climatologías, la primera columna indica el periodo de los datos y el resto la estación del año correspondiente (Figura 32).

En el caso de tratarse de datos correspondientes a Índices Climáticos, actualmente la información se presenta por periodos que abarcan más de un año. Por esta razón se muestran los mapas seguidos y etiquetados por el periodo correspondiente (Figura 33).

Los usuarios pueden explorar en detalle los mapas a través del visor incorporado en el portal haciendo clic directamente sobre cualquiera de los mismos.

8.4.5. Proyecciones

La página de proyecciones permite la exploración de las consecuencias de distintas políticas climáticas a través de los escenarios de cambio climático en Asturias para el periodo 2025–2100.

Esta página contiene gran cantidad de información que está clasificada y organizada por categorías. Por esta razón, al igual que la página de climatología base (§8.4.4), se han dispuesto una serie de desplegables para facilitar la navegación.

En esta ocasión, los datos de proyecciones se reparten en dos apartados principales: *Históricos* y *Escenarios* que se desglosan en varios desplegables que permiten acceder los datos (Figura 34).

Cada uno de los mapas presentados puede ser visualizado en detalle haciendo clic sobre el mismo.

Climatologías

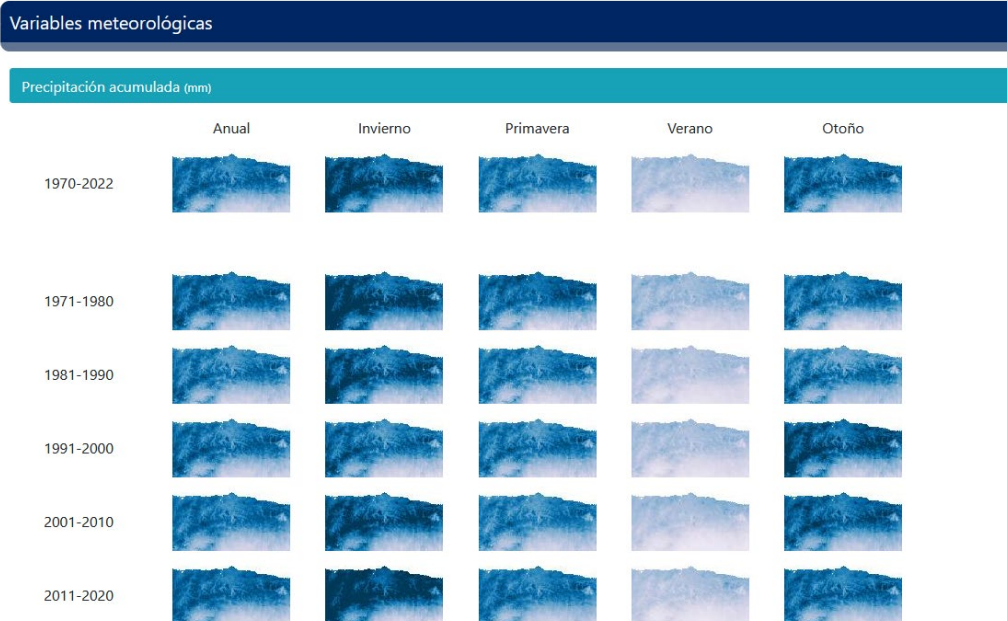


Figura 32: Previsualización de miniaturas en la página de climatologías base. El ejemplo muestra mapas de precipitación en miniatura.

Índices Climáticos

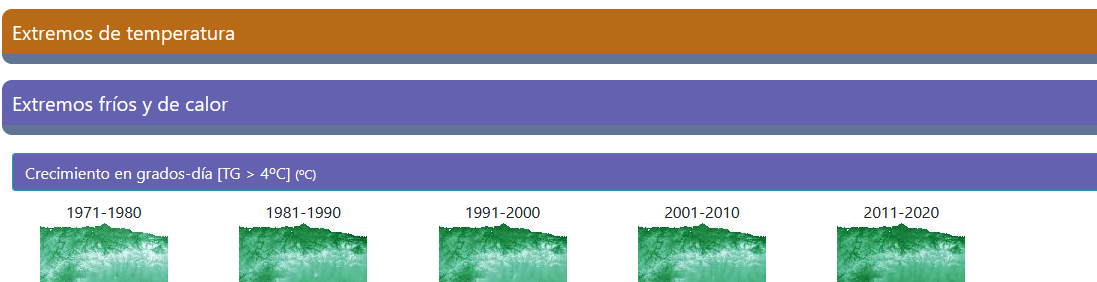


Figura 33: Ejemplo de previsualización de miniaturas de mapas de índices de extremos climáticos.

8.5. Visor de archivos *NetCDF*

Como se ha mencionado anteriormente, el portal de datos de la *CuCC* contiene un visor cartográfico propio que permite a los usuarios visualizar con detalle y de una manera sencilla el contenido de los archivos *NetCDF* almacenados en el servidor (Figura 35).

Este visor se abre automáticamente al hacer clic sobre cualquier mapa presentado en miniatura en las páginas del atlas.

Por defecto, cuando se inicia mostrará el mapa que el usuario a seleccionado. Al mismo tiempo, ya que un archivo *NetCDF* puede contener multitud de mapas con distintas variables y fechas, el visor contendrá toda esta información para que los usuarios puedan cambiar estos parámetros para visualizar otras variables o fechas sin la necesidad de seleccionar otra miniatura desde un listado.

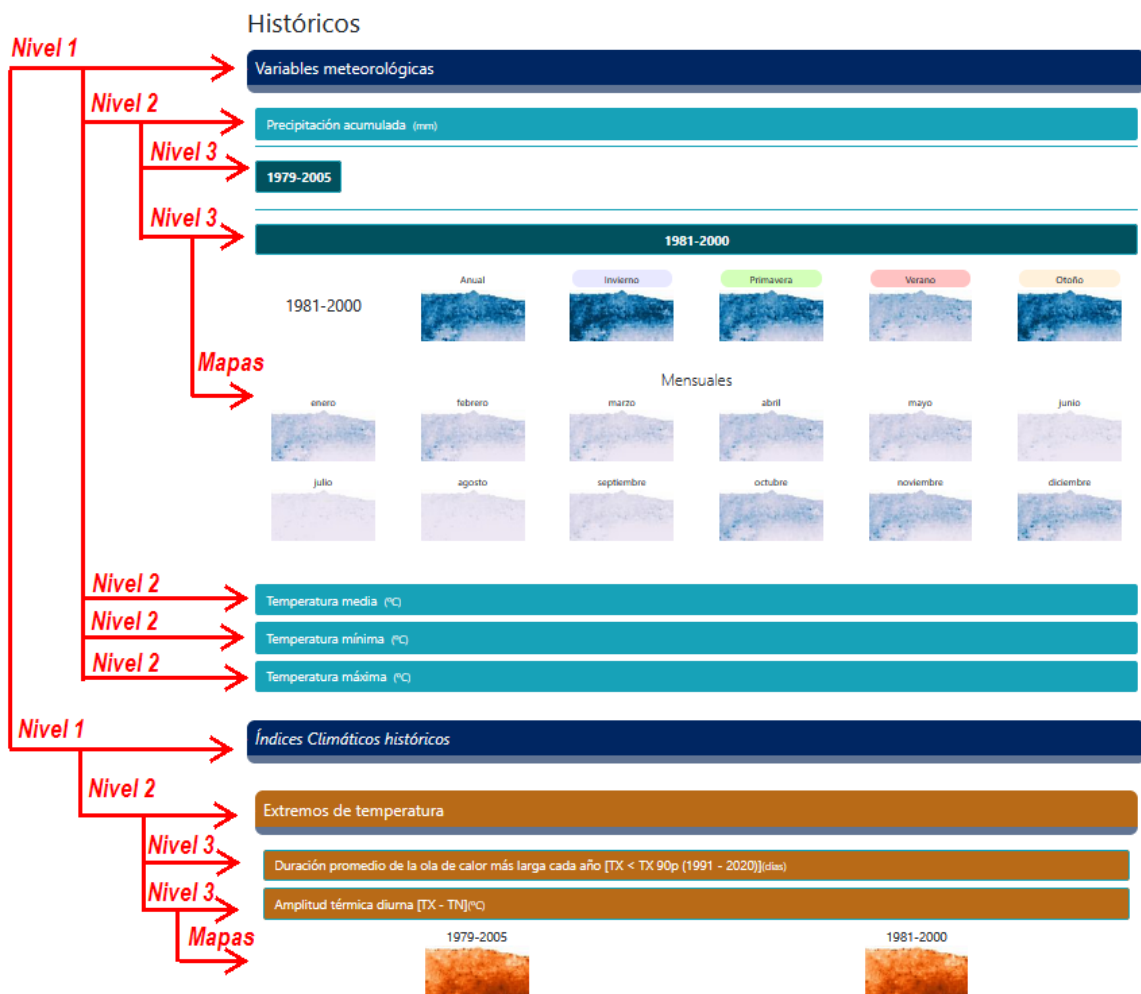


Figura 34: Ejemplo de visualización de miniaturas de mapas distribuidos en distintos niveles en la página de Proyecciones.

Los mapas contienen los distintos elementos que se enumeran y describen a continuación:

1. **Botones de navegación.** Cuadro de herramientas para ampliar, reducir o restablecer el zoom.
2. **Leyenda del mapa.** La leyenda se adaptará al mapa y mostrará una rampa de color con los valores, unidades y la sigla de la variable actual.
3. **Cuadro de consulta** o *popup*. Al hacer clic sobre cualquier pixel del mapa, se consultará el valor y se mostrará en esta ventana emergente junto a con las coordenadas correspondientes.
4. **Cuadro selector de Variables.** Este cuadro contendrá todas las variables disponibles en el mapa actual. De esta forma, al cambiar de variable se cargará el mapa correspondiente.
5. **Cuadro selector de Fechas.** Muestra todas las fechas que contiene el mapa o archivo *NetCDF* permitiendo, al cambiar el valor, visualizar la información en distintos puntos temporales. Como alternativa o método rápido, en la parte central inferior del visor, se representarán en forma de barras cada fecha disponible mostrándose de color anaranjado la fecha actual. Al hacer clic sobre cualquier barra, el mapa cambiará mostrando la información de la fecha seleccionada.



Figura 35: Vista general y elementos principales del visor de mapas

9. Discusión y consideraciones finales

Este informe resume y justifica la metodología adoptada para el desarrollo de escenarios de cambio climático en el dominio terrestre del Principado de Asturias. Se trata de una acción desarrollada desde la Cátedra de Cambio Climático de la Universidad de Oviedo (CuCC) como parte de una iniciativa hacia el desarrollo de un sistema para la difusión de información sobre el impacto del cambio climático en Asturias. Uno de los principales objetivos es concienciar a la población sobre la trascendencia del cambio climático para el conjunto de la sociedad, así como dotar a los ciudadanos con herramientas que les permitan analizar la eficacia potencial de distintas alternativas de mitigación y adaptación, o su comparación con la alternativa de no intervenir. Para ello, es fundamental contar con información fiable tanto desde un punto de vista técnico como científico, aunque sin dejar de lado la necesidad de dotar a todas aquellas personas interesadas de todos los detalles e incertidumbres a los que está sujeto este tipo de información.

En este sentido, el propósito de este informe ha sido doble. Por un lado, se detallan aspectos técnicos sobre la construcción de las bases de datos, modelos de climatología base y proyecciones regionalizadas de clima para la construcción de escenarios de cambio climático. Se proporcionan referencias a los lectores interesados en profundizar en los aspectos examinados, especialmente en lo referente a la adecuación de las técnicas estadísticas seleccionadas para el análisis en relación al estado del arte. También se ha procurado exponer la tremenda dificultad y las limitaciones que se encuentran tanto a la hora de reconstruir las condiciones climáticas que han ocurrido en un lugar a partir de un conjunto limitado e imperfecto de observaciones, así como la necesidad de considerar escenarios que implementan múltiples asunciones y decisiones sobre el desarrollo socioeconómico y tecnológico a la hora de realizar proyecciones a futuro para el medio y largo plazo.

Un segundo objetivo de este informe ha consistido en documentar de manera detallada los esfuerzos que se han realizado para facilitar el acceso a la información generada como parte del informe *Elaboración de Escenarios de Cambio Climático de Alta Resolución sobre el Principado de Asturias* CuCC [2024]. Para ello, se han desarrollado un servidor de datos y una interfaz web que incluye un conjunto de páginas dinámicas y adaptables con gráficos y mapas interactivos cucc-uodata.es. Se trata de un conjunto de herramientas destinadas a cubrir las necesidades de usuarios con distinto grado de maestría en el uso de herramientas informáticas y con distintos intereses. Este desarrollo exige un trabajo constante de mantenimiento y actualización para asegurar el correcto funcionamiento de las bases de datos, el servidor y el portal.

El equipo CuCC mantiene líneas de investigación en análisis de datos climáticos y en regionalización. En un futuro, se plantea incorporar nuevos escenarios según estén disponibles (e.g. la iteración CMIP6 de EURO-CORDEX), y se mantiene alerta a los desarrollos e innovaciones que aparecen en el campo, incluyendo aquellos relacionados con tecnologías emergentes como el aprendizaje automático o la inteligencia artificial. Además, está atento a todos los comentarios y sugerencias de los usuarios y personas interesadas en explorar o utilizar las bases de datos generadas hasta el momento. De hecho, ha tomado un papel proactivo para promocionar y publicitar los resultados obtenidos hasta la actualidad, así como para testar y evaluar la eficacia de distintas herramientas y su facilidad de uso para distintos grupos de interés.

Por todo ello, en el futuro se deben continuar apoyando las acciones destinadas a apoyar la enseñanza, divulgación y participación ciudadana, pero también el desarrollo de herramientas de carácter técnico que puedan ser aprovechadas para impulsar la investigación y el desarrollo de nuevas iniciativas a nivel regional. La reconstrucción de las condiciones climáticas y el desarrollo de escenarios de cambio climático son un primer paso hacia la detección y atribución del impacto del cambio climático en la región y hacia el desarrollo de estrategias eficaces para la adaptación a los cambios esperables en las próximas décadas.

Referencias

- Amengual A, Homar V, Romero R, Alonso S, Ramis C (2012) A statistical adjustment of regional climate model outputs to local scales: Application to Platja de Palma, Spain. *Journal of Climate*, **25**, 939–957. doi:10.1175/jcli-d-10-05024.1.
- Atkinson PM, Lloyd CD (1998) Mapping precipitation in Switzerland with ordinary and indicator kriging. *Journal of Geographic Information and Decision Analysis*, **2**, 65–76.
- Barriopedro D, García-Herrera R, Ordóñez C, Miralles DG, Salcedo-Sanz S (2023) Heat waves: Physical understanding and scientific challenges. *Reviews of Geophysics*, **61**, e2022RG000780. doi:<https://doi.org/10.1029/2022RG000780>.
- Bedia J, Baño-Medina J, Legasa MN, et al. (2020) Statistical downscaling with the downscaleR package (v3.1.0): contribution to the VALUE inter-comparison experiment. *Geoscientific Model Development*, **13**, 1711–1735. doi:10.5194/gmd-13-1711-2020.
- Bedia J, Herrera S, Gutiérrez JM (2013) Dangers of using global bioclimatic datasets for ecological niche modeling: limitations for future climate projections. *Global and Planetary Change*, **107**, 1–12. doi:10.1016/j.gloplacha.2013.04.005.
- Biau G, Zorita E, von Storch H, Wackernagel H (1999) Estimation of precipitation by Kriging in the EOF space of the sea level pressure field. *Journal of Climate*, **12**, 1070–1085. doi:10.1175/1520-0442(1999)012<1070:eopbki>2.0.co;2.
- Bostock M, Ogievetsky V, Heer J (2011) D³ Data-Driven Documents. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, **17**, 2301–2309. doi:10.1109/tvcg.2011.185.
- Casanueva A, Kotlarski S, Herrera S, et al. (2015) Daily precipitation statistics in a EURO-CORDEX RCM ensemble: added value of raw and bias-corrected high-resolution simulations. *Climate Dynamics*, **47**, 719–737. doi:10.1007/s00382-015-2865-x.
- Cinquini L, Crichton D, Mattmann C, et al. (2014) The earth system grid federation: An open infrastructure for access to distributed geospatial data. *Future Generation Computer Systems*, **36**, 400–417. doi:<https://doi.org/10.1016/j.future.2013.07.002>. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167739X13001477>. Special Section: Intelligent Big Data Processing Special Section: Behavior Data Security Issues in Network Information Propagation Special Section: Energy-efficiency in Large Distributed Computing Architectures Special Section: eScience Infrastructure and Applications.
- Clarke L, Edmonds J, Jacoby H, Pitcher H, Reilly J, Richels R (2007) *Scenarios of Greenhouse Gas Emissions and Atmospheric Concentrations*. Sub-report 2.1A of Synthesis and Assessment Product 2.1 by the U.S. Climate Change Science Program and the Subcommittee on Global Change Research, Department of Energy, Office of Biological & Environmental Research, Washington, 7 DC., USA, 154 pp.
- Cofiño A, Bedia J, Iturbide M, et al. (2018) The ECOMS user data gateway: Towards seasonal forecast data provision and research reproducibility in the era of climate services. *Climate Services*, **9**, 33–43. doi:10.1016/j.cliser.2017.07.001.
- CuCC (2024) Elaboración de Escenarios de Cambio Climático de Alta Resolución sobre el Principado de Asturias. Informe técnico, Cátedra de Cambio Climático de la Universidad de Oviedo, Oviedo, Asturias. URL <https://cucc-uodata.es>. Autores: F. González Taboada, S. Herrera, R. Anadón, M.A. Álvarez, A. Colina, E. Gutiérrez, J.C. Fernández, C. Guardado.
- Deser C (2020) Certain uncertainty: The role of internal climate variability in projections of regional climate change and risk management. *Earth's Future*, **8**, e2020EF001854. doi:10.1029/2020ef001854.
- Deser C, Phillips AS (2023) A range of outcomes: the combined effects of internal variability and anthropogenic forcing on regional climate trends over Europe. *Nonlinear Processes in Geophysics*, **30**, 63–84. doi:10.5194/npg-30-63-2023.
- Doblas-Reyes F, Sörensson A, Almazroui M, et al. (2023) *Linking Global to Regional Climate Change*, pp. 1363–1512. Cambridge University Press. doi:10.1017/9781009157896.012.
- Giorgi F, Jones C, Asrar GR (2009) Addressing climate information needs at the regional level: the CORDEX framework. *WMO Bulletin*, **58**, 175–183. URL <https://library.wmo.int/idurl/4/58817>.
- Goodrich B, Gabry J, Ali I, Brilleman S (2024) rstanarm: Bayesian applied regression modeling via Stan. URL <https://mc-stan.org/rstanarm/>. R package version 2.32.1.
- Gutiérrez J, Herrera S, San-Martín D, et al. (2010) *Escenarios Regionales Probabilísticos de Cambio Climático en Cantabria: Termopluiometría*. Gobierno de Cantabria. URL <http://hdl.handle.net/20.500.11765/1367>.
- Gutiérrez J, Jones R, Narisma G, et al. (2021) *Atlas*. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1927–2058 pp. doi:10.1017/9781009157896.021.
- Gutiérrez JM, Maraun D, Widmann M, et al. (2018) An intercomparison of a large ensemble of statistical downscaling methods over Europe: Results from the VALUE perfect predictor cross-validation experiment. *International Journal of Climatology*, **39**, 3750–3785. doi:10.1002/joc.5462.
- Hastie TJ, Tibshirani RJ (1990) *Generalized Additive Models*. Chapman & Hall/CRC Monographs on Statistics & Applied Probability, Boca Raton FL, USA, first edn., 352 pp.
- Hawkins E, Sutton R (2009) The potential to narrow uncertainty in regional climate predictions. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **90**, 1095–1108. doi:10.1175/2009bams2607.1.
- Hawkins E, Sutton R (2010) The potential to narrow uncertainty in projections of regional precipitation change. *Climate Dynamics*, **37**, 407–418. doi:10.1007/s00382-010-0810-6.
- Haylock MR, Hofstra N, Klein Tank AMG, Klok EJ, Jones PD, New M (2008) A European daily high-resolution gridded data set of surface temperature and precipitation for 1950–2006. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **113**. doi:10.1029/2008jd010201.
- Herrera S, Cardoso RM, Soares PM, Espírito-Santo F, Viterbo P, Gutiérrez JM (2019) Iberia01: a new gridded dataset of daily precipitation and temperatures over Iberia. *Earth System Science Data*, **11**, 1947–1956. doi:10.5194/essd-11-1947-2019.
- Herrera S, Fernández J, Gutiérrez JM (2016) Update of the Spain02 gridded observational dataset for EURO-CORDEX evaluation: assessing the

- effect of the interpolation methodology. *International Journal of Climatology*, **36**, 900–908. doi:10.1002/joc.4391.
- Herrera S, Gutiérrez JM, Ancell R, Pons MR, Frías MD, Fernández J (2012) Development and analysis of a 50-year high-resolution daily gridded precipitation dataset over Spain (Spain02). *International Journal of Climatology*, **32**, 74–85. doi:10.1002/joc.2256.
- Herrera S, Kotlarski S, Soares PMM, Cardoso RM, Jaczewski A, Gutiérrez JM, Maraun D (2018) Uncertainty in gridded precipitation products: Influence of station density, interpolation method and grid resolution. *International Journal of Climatology*, **39**, 3717–3729. doi:10.1002/joc.5878.
- IPCC (2023) *IPCC, 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland*. Cambridge University Press. doi:10.59327/ipcc/ar6-9789291691647.
- Iturbide M, Bedia J, Herrera S, *et al.* (2019) The R-based Climate4R open framework for reproducible climate data access and post-processing. *Environmental Modelling & Software*, **111**, 42–54. doi:10.1016/j.envsoft.2018.09.009.
- Jacob D, Petersen J, Eggert B, *et al.* (2013) EURO-CORDEX: new high-resolution climate change projections for European impact research. *Regional Environmental Change*, **14**, 563–578. doi:10.1007/s10113-013-0499-2.
- Krige D (1951) A statistical approach to some basic mine valuation problems on the Witwatersrand. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, **52**, 119–139. doi:10.10520/AJA0038223X_4792.
- Lange S (2021) ISIMIP3b bias adjustment fact sheet. URL <https://www.isimip.org/gettingstarted/isimip3b-bias-adjustment/>.
- McGuffie K, Henderson-Sellers A (2014) *The Climate Modelling Primer*. John Wiley & Sons, 464 pp.
- Riahi K, Grübler A, Nakicenovic N (2007) Scenarios of long-term socio-economic and environmental development under climate stabilization. *Technological Forecasting and Social Change*, **74**, 887–935. doi:10.1016/j.techfore.2006.05.026.
- Ruane AC, McDermid SP (2017) Selection of a representative subset of global climate models that captures the profile of regional changes for integrated climate impacts assessment. *Earth Perspectives*, **4**. doi:10.1186/s40322-017-0036-4.
- Schulzweida U (2023) CDO user guide (2.3.0). doi:10.5281/zenodo.10020800.
- Taboada F, Anadón R (2011) *Análisis de Escenarios de Cambio Climático en Asturias*. Gobierno del Principado de Asturias, Consejería de Medio Ambiente, Ordenación del Territorio e Infraestructuras, Oficina para la Sostenibilidad, el Cambio Climático y la Participación. URL <https://cucc-uodata.es>.
- van Vuuren DP, den Elzen MGJ, Lucas PL, *et al.* (2007) Stabilizing greenhouse gas concentrations at low levels: an assessment of reduction strategies and costs. *Climatic Change*, **81**, 119–159. doi:10.1007/s10584-006-9172-9.
- Weigel AP, Knutti R, Liniger MA, Appenzeller C (2010) Risks of model weighting in multimodel climate projections. *Journal of Climate*, **23**, 4175–4191. doi:10.1175/2010jcli3594.1.
- Wilcke RAI, Mendlik T, Gobiet A (2013) Multi-variable error correction of regional climate models. *Climatic Change*, **120**, 871–887. doi:10.1007/s10584-013-0845-x.
- Wood SN (2006) *Generalized Additive Models: An Introduction with R*. Chapman & Hall/CRC Texts in Statistical Science, Boca Raton FL, USA, first edn., 410 pp.
- Xu Y, Ramanathan V (2017) Well below 2 °C: Mitigation strategies for avoiding dangerous to catastrophic climate changes. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **114**, 10315–10323. doi:10.1073/pnas.1618481114.
- Zender CS (2008) Analysis of self-describing gridded geoscience data with netCDF Operators (nco). *Environmental Modelling & Software*, **23**, 1338–1342. doi:10.1016/j.envsoft.2008.03.004.
- Zender CS (2023) netCDF Operator (NCO) User Guide, Version 4.4.3. URL <https://nco.sourceforge.net/nco.pdf>.