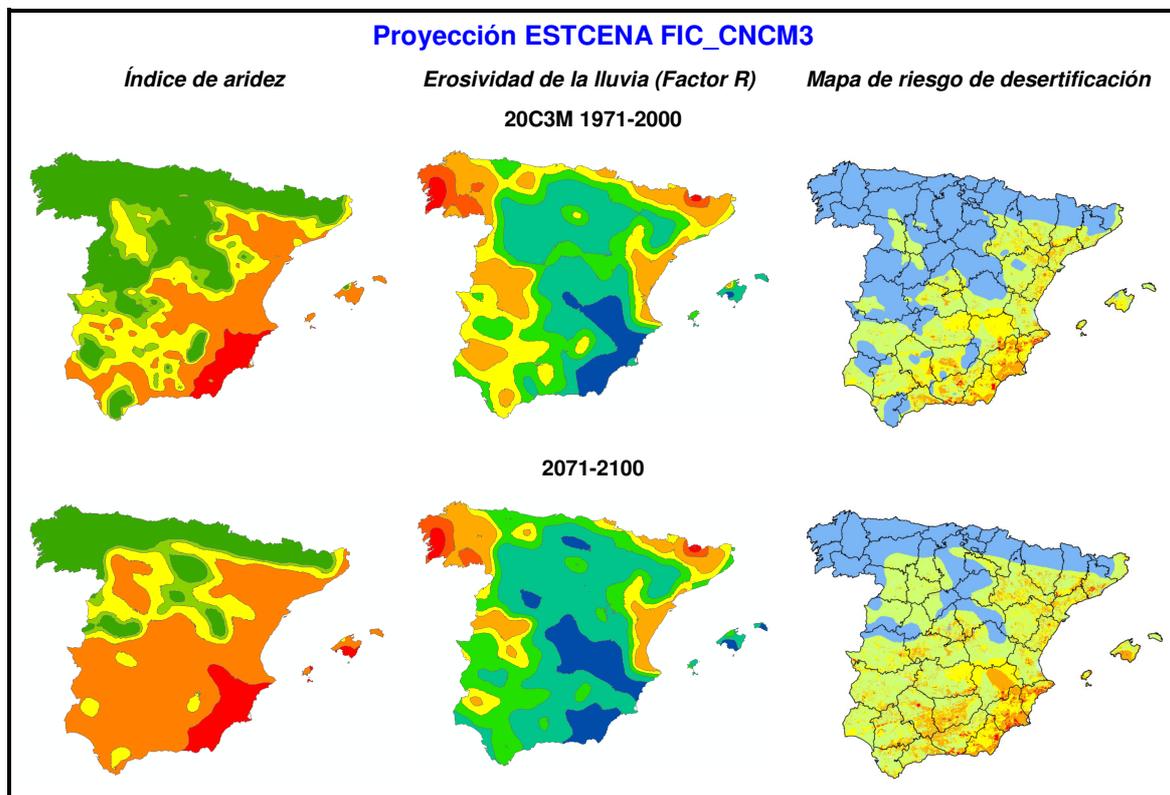


Análisis de los procesos de desertificación en España en función de los distintos escenarios climáticos



Junio de 2013

Análisis de los procesos de desertificación en España en función de los distintos escenarios climáticos

Programa de Acción
Nacional contra la
Desertificación



La coordinación de este trabajo ha sido realizada por Leopoldo Rojo Serrano. *Dirección General de Desarrollo Rural y Política Forestal. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente.*

En la redacción y preparación de la presente publicación han intervenido los siguientes técnicos:

Dirección General de Desarrollo Rural y Política Forestal. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente: LEOPOLDO ROJO SERRANO

Tecnologías y Servicios Agrarios, S.A. (TRAGSATEC, Grupo TRAGSA): ARACELI MARTÍNEZ RUIZ, JUAN JOSÉ SANABRIA DONOSO, BEATRIZ VILA MOLINA.

ÍNDICE

Presentación.....	1
1. Introducción	2
2. Definición del programa del trabajo y recopilación de la información previa	3
3. Análisis de los factores y procesos de desertificación en función del cambio climático y de las posibilidades de adaptación de la información para su integración en el mapa de desertificación del PAND.....	6
3.1. Planteamiento metodológico.....	6
3.2. Antecedentes de evaluación de la desertificación y la degradación de suelos en función de los escenarios de cambio climático.....	11
3.3. Aridez	13
3.4. Erosión	15
3.4.1. Referencias encontradas a la evaluación de la erosión en función de los escenarios de cambio climático.....	15
3.4.2. Índice de erosividad de la lluvia (Factor R de la USLE) y consideraciones sobre la incertidumbre en cuanto a la estimación de las precipitaciones, en particular de las precipitaciones máximas	23
3.4.3. Cubierta vegetal /Usos del suelo.....	29
3.4.4. Consideraciones sobre el factor K	37
3.5. Incendios	38
3.6. Sobreexplotación de acuíferos.....	40
3.7. Conclusiones	40
4. Generación de mapas de riesgo de desertificación en función del cambio climático.....	41
4.1. Datos de partida	41
4.2. Variables de partida.....	44
4.2.1. Contraste con datos observados.....	44
4.2.2. Evolución de las variables de partida: T, P y P24	51
4.3. Índice de aridez	57
4.3.1. Contraste con datos observados.....	58
4.3.2. Evolución de los valores anuales de ETP e índice de aridez	62
4.4. Índice de erosividad de la lluvia (Factor R de la USLE).....	67
4.4.1. Contraste con datos observados.....	68
4.4.2. Evolución de los valores del factor R	71
4.5. Comparativa de escenarios.....	78
4.6. Interpolación de los mapas de aridez y factor R.....	79
4.7. Cambios en el mapa de riesgo de desertificación como consecuencia del incremento de aridez	85
4.8. Los cambios en la erosión como consecuencia de las variaciones del factor R	90
4.9. Los cambios en el mapa de riesgo de desertificación como consecuencia del incremento de aridez y de los cambios en la erosividad de la lluvia (factor R).....	95
5. Resumen y conclusiones.....	100
BIBLIOGRAFÍA.....	119

ANEJO: Generación de mapas de riesgo de desertificación en función del cambio climático:
Mapas

ACRÓNIMOS

AEMET Agencia Estatal de Meteorología

AR4 Cuarto Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC) de las Naciones Unidas

CC Cambio Climático

CNULD Convención de Naciones Unidas para la Lucha contra la Desertificación

ETP Evapotranspiración potencial

GER: Generación de escenarios regionalizados

INES Inventario Nacional del Erosión de Suelos

IPCC Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático de las Naciones Unidas

MAGRAMA Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente

MEE Mapa de Estados Erosivos

NPP Productividad primaria neta (*Net Primary Productivity*)

OC Carbono orgánico

OECC Oficina Española de Cambio Climático

P Precipitación anual

PAND Programa de Acción Nacional contra la Desertificación

PNACC Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático

PNUMA Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente

RUSLE Ecuación Universal Revisada de Pérdida de Suelos (*Revised Universal Soil Loss Equation*)

SIEVD Sistema Integrado de Evaluación y Vigilancia de la Desertificación

USLE Ecuación Universal de Pérdida de Suelos (*Universal Soil Loss Equation*)

Presentación

El presente trabajo se desarrolló entre los años 2011 y 2013 en el marco del desarrollo del Programa de Acción Nacional contra la Desertificación (PAND) - 1ª Fase. Su objetivo ha sido el análisis de los procesos de desertificación en España en función de los distintos escenarios climáticos, a través de la generación de mapas de riesgo de desertificación inducido por el cambio climático a corto, medio y largo plazo, y partiendo de las variables implicadas en el mapa actual de la desertificación establecido en el PAND.

Los datos de precipitación y temperatura necesarios para la generación de dichos mapas (en particular para los mapas de aridez y del índice de erosividad de la lluvia) proceden de la “Segunda colección de escenarios de cambio climático regionalizados del PNACC” (Escenarios PNACC-2012), una colección completa de proyecciones obtenida como resultado de los proyectos de investigación en curso ESCENA, ESTCENA y AEMET, junto con el proyecto ENSEMBLES.

El ejercicio realizado ha sido uno de los primeros en la utilización en España de los Escenarios PNACC-2012, en concreto como un *usuario sectorial*, una tipología de usuario que la “GUÍA DE USUARIO Escenarios-PNACC” define como: “Gestores y especialistas sectoriales, con perfil técnico y capacidad de procesamiento y manejo de datos con un nivel medio de agregación”. Por lo tanto este estudio no ha pretendido alcanzar el nivel científico propio de un *usuario especializado* (“perfil científico-técnico altamente especializado y capacitado para procesamiento masivo de datos”).

No obstante, y salvando las distancias, esperamos que el presente trabajo sea de utilidad para otros usuarios, como ha sido para los autores del mismo la consulta de otros estudios de impactos, vulnerabilidad y adaptación al cambio climático de otros sectores (biodiversidad, recursos hídricos, bosques, ...) derivados de la 1ª Generación de escenarios de cambio climático. Con ese ánimo es que con el que se ha decidido la publicación en la web del MAGRAMA de este trabajo.

Agradecimientos:

Oficina Española de Cambio Climático (OECC): José Ramón Picatoste Ruggeroni, Alfonso Gutiérrez Teira.

Agencia Estatal de Meteorología (AEMET): Ernesto Rodríguez Camino, María Jesús Casado.

Universidad de Cantabria: Jose Manuel Gutierrez Llorente, Sixto Herrera García.

Fundación CEAM (Centro de Estudios Ambientales del Mediterráneo): José Antonio Alloza.

Otros expertos consultados: Javier Álvarez Rodríguez (Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX), María Anaya Romero (CSIC-IRNAS), Ángel M. Felicísimo (Universidad de Extremadura), Miguel Ángel Zavala (CIFOR-INIA / Universidad de Alcalá de Henares), Pilar Alvarez-Uría Tejero (Observatorio de la Sostenibilidad en España, OSE), Enrique Doblás Miranda (CREAF. Centre de Recerca Ecològica i Aplicacions Forestals), Santiago Sabaté Jorba (CREAF, Universidad del Barcelona).

1. Introducción

La Convención de Naciones Unidas para la Lucha contra la Desertificación (CNUCLD) considera la evaluación y seguimiento de la desertificación como una de las actividades fundamentales para su control. El Programa de Acción Nacional contra la Desertificación (PAND), necesita contar con procedimientos de evaluación, de seguimiento y de alerta temprana.

Por lo tanto, el PAND propone el desarrollo de un Sistema Integrado de Evaluación y Vigilancia de la Desertificación (SIEVD), cuyo principal objetivo es constituirse en un instrumento operativo de apoyo a la aplicación del Programa, a través de la determinación de zonas problemáticas en las que llevar a cabo las actuaciones preventivas y correctoras que correspondan, de acuerdo a la evaluación de la situación actual y a las previsiones futuras que determine el Sistema.

La presente publicación recoge, junto con otros trabajos publicados por el MAGRAMA sobre Evaluación de la desertificación en España (Mapa de la condición de la tierra 2000-2010, Procedimientos de alerta temprana y estimación de riesgos de desertificación mediante modelos de dinámica de sistemas), los primeros resultados de la puesta en marcha del SIEVD, de acuerdo a los objetivos, características y elementos del sistema que se recogen en el PAND.

Entre las características que define la configuración del SIEVD se incluye la comunicación y búsqueda de sinergias entre las actividades de seguimiento y evaluación en ámbitos comunes realizadas por otros observatorios y órganos con funciones similares, en particular, la Oficina Española de Cambio Climático (OECC). Así, el PAND establece que las líneas de trabajo que se integren en el Sistema deberán desarrollarse en estrecha colaboración con los responsables de las líneas de acción que se proponen en el Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático (PNACC) en cuanto a la evaluación de impactos y vulnerabilidad.

Uno de los objetivos del sistema es el de proporcionar pronósticos prospectivos acerca de la evolución en el tiempo de la desertificación de acuerdo con diferentes escenarios climáticos y socioeconómicos. Dado que las previsiones sobre el cambio climático en España apuntan hacia una creciente aridez y temperatura, es decir señalan unos escenarios más favorables a los procesos de desertificación, se planteó una línea de trabajo denominada "Análisis de los procesos de desertificación en España en función de los distintos escenarios climáticos" con el objetivo de conocer las consecuencias del cambio climático sobre el riesgo de desertificación, a través de los escenarios climáticos contemplados como probables a corto, medio y largo plazo.

En este contexto es en el que se planteó la generación de mapas de riesgo de desertificación inducido por el cambio climático a corto, medio y largo plazo, partiendo de las variables implicadas en el mapa actual de la desertificación establecido en el Programa de Acción Nacional contra la Desertificación (PAND) que además son susceptibles de generación de escenarios climáticos: Índice de Aridez y Erosión del Suelo.

El presente documento se estructura de acuerdo a las etapas del esquema de trabajo planteado:

- Definición del programa del trabajo y recopilación de la información previa.
- Análisis de los factores y procesos de desertificación en función del cambio climático y de las posibilidades de adaptación de la información para su integración en el mapa de desertificación del PAND.

- Generación de mapas de riesgo de desertificación en función del cambio climático.

2. Definición del programa del trabajo y recopilación de la información previa

El planteamiento del programa de trabajo se realizó en colaboración con los técnicos de la OECC, para coordinar esta línea de trabajo con el Segundo Plan de Trabajo del PNACC (Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático), adoptado en julio de 2009, que incluyó la evaluación de impactos y vulnerabilidad al cambio climático del **sector suelos**, en particular con referencia a la desertificación. Como resultado de esta colaboración se estableció un Programa de Trabajo conjunto, que incluía las siguientes fases:

- *Definición del método.* Definición del método para la proyección del riesgo de desertificación. (Metodología expuesta en el PAND, reemplazando las variables climáticas necesarias por sus proyecciones a lo largo del s. XXI. Identificación de variables climáticas necesarias. Posible consideración de otros factores en las proyecciones del riesgo de desertificación, tales como cambios en cobertura del suelo, incendios, recursos hídricos y su explotación...)
- *Pre-proceso de datos.* Selección de modelos y escenarios climáticos. Extracción y preparación de las variables climáticas o de otro tipo necesarias para calcular los Índices de Aridez y de Erosión del suelo, para los escenarios y modelos seleccionados, en los tres horizontes temporales previstos (corto, medio y largo plazo), a lo largo del siglo XXI.
- *Proyección de impactos.* Cálculo del índice de aridez y de erosión con las variables climáticas proyectadas para el siglo XXI, bajo distintos escenarios y modelos, en los tres horizontes previstos, e integración en los mapas de riesgo de desertificación. Valoración de los resultados, incluyendo un análisis de la incertidumbre de los distintos escenarios.
- *Evaluación de la Vulnerabilidad al cambio climático.* Elaboración de los mapas y análisis comparativos de las situaciones presente frente a las proyectadas (incluyendo índices de aridez, y de erosión.)

En esta fase preliminar se plantearon algunas cuestiones que, como se verá, han tenido una gran influencia en el desarrollo del trabajo, en particular en la decisión sobre los escenarios regionalizados a utilizar en esta línea de trabajo.

La más determinante ha sido que la OECC y la Agencia Española de Meteorología (AEMET) estaban coordinando los trabajos de desarrollo de la “2ª Generación de Escenarios Regionalizados (GER)” a partir de los modelos climáticos del Cuarto Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC) de las Naciones Unidas (también conocido como AR4). Esta línea de trabajo incluye el objetivo de elaborar “paquetes” de información para usuarios, con información más elaborada y adaptada a las necesidades de los usuarios.

En el marco de la colaboración con la OECC la entonces Subdirección General de Política Forestal y Desertificación (actual SG de Silvicultura y Montes) fue invitada a participar en el Seminario Sectorial del PNACC, titulado “TALLER TÉCNICO SOBRE ESCENARIOS CLIMÁTICOS Y REGIONALIZACIÓN”¹, que tuvo lugar del 27 al 29 de abril de 2011. El objetivo de este taller era poner en contacto a “productores”,

¹<http://www.magrama.gob.es/es/ceneam/grupos-de-trabajo-y-seminarios/seminarioPNACC/taller-escenarios-cc-regional.aspx>

entendiendo por tales a los que trabajan para proporcionar los escenarios climáticos regionalizados para España y “usuarios”, es decir, los que trabajan en evaluaciones sectoriales de los impactos del cambio climático.

Los temas tratados en este taller resultaron de gran utilidad para el planteamiento del trabajo, permitiendo conocer de primera mano el estado de la cuestión en cuanto a:

1) Los resultados y experiencias de los primeros trabajos sectoriales que se realizaron con la “1ª Generación de escenarios regionalizados de cambio climático en España” del Primer Programa de Trabajo del PNACC: sectores biodiversidad y recursos hídricos.

2) Los proyectos de regionalización en marcha en España a nivel nacional, tanto en el marco del Plan Nacional I+D+i 2008-2011 (Acción Estratégica Energía y Cambio Climático) que trabajan sobre el Cuarto Informe del IPCC (IPCC Fourth Assessment Report: Climate Change 2007 -AR4-):

- ESCENA, basado en técnicas dinámicas de regionalización (liderado por la Universidad de Castilla La Mancha);
- ESTCENA, basado en técnicas estadísticas de regionalización (liderado por la Universidad de Cantabria);

como los proyectos de regionalización de AEMET y el proyecto ENSEMBLES del 6º Programa Marco de I+D de la UE, ya finalizado.

3) La armonización de las demandas y ofertas de datos, productos y servicios: definición de un paquete básico de datos y productos para la modelización de impactos.

Extracto del Informe de la OECC sobre el “TALLER TÉCNICO SOBRE ESCENARIOS CLIMÁTICOS Y REGIONALIZACIÓN”:

En el marco del PNACC, cuyo desarrollo y ejecución coordina la Oficina Española de Cambio Climático (OECC), se encomienda a la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) la coordinación del programa de generación de escenarios climáticos regionalizados. Tras la aprobación del PNACC en 2006, la AEMET puso en marcha un proceso en dos fases, la primera de las cuales culminó en 2008 con la puesta a disposición de una primera colección de escenarios regionalizados para España, respondiendo a un criterio de urgencia para poder poner en marcha las primeras líneas de trabajo del PNACC y responder a las demandas iniciales de ciertos sectores. Tal colección de escenarios alimentó las evaluaciones sectoriales de impactos realizadas por la AGE en sectores como las costas, los recursos hídricos o la biodiversidad, y han sido empleadas además por otros usuarios de diversa índole.

Inmediatamente después se puso en marcha una segunda fase del programa de generación de escenarios climáticos regionalizados, consistente en coordinar los trabajos de diversos equipos y centros de investigación activos en este campo. Ello se tradujo en un conjunto de trabajos de la propia AEMET, a los que se unieron dos grandes proyectos de generación de escenarios, realizados en el marco del Plan Nacional de I+D+i 2008-2011: los proyectos ESCENA (generación de escenarios de cambio climático regionalizados con métodos dinámicos) y ESTCENA (generación de escenarios de cambio climático regionalizados con métodos estadísticos).

La proximidad del final de todos estos proyectos, que ofrecerán una plétora de productos sin comparación con los obtenidos en la primera fase, la complejidad que supone para los usuarios enfrentarse a los escenarios de cambio climático regionalizados, las carencias detectadas en la provisión de las proyecciones a los usuarios de forma amigable y comprensible, y el peligro de proliferación de trabajos de regionalización que podrían devenir en una duplicación de esfuerzos, un mal

uso de los limitados recursos financieros públicos y una pérdida de coherencia en la disposición de escenarios en el territorio nacional, pusieron de manifiesto la importancia y la necesidad de llevar a cabo un seminario específico sobre este tema.

En los debates mantenidos en el taller se puso de manifiesto repetidamente la conveniencia de la utilización de los resultados de estos proyectos de regionalización, conocidos como “*Segunda colección de escenarios de cambio climático regionalizados del PNACC*” (*Escenarios PNACC 2012*) para garantizar la coherencia y la eficacia en el uso de recursos públicos, y favorecer la coordinación y cooperación entre usuarios a distintas escalas.

Como resultado del taller, la OECC puso en marcha un proceso para la elaboración participativa de un inventario o paquete de productos básicos y de subproductos que tenga en cuenta la oferta (por parte de los “productores”: proyectos de regionalización) y la demanda (usuarios de distintos tipos y niveles de exigencia).

En el Taller Técnico sobre Escenarios Climáticos y Regionalización la S.G. de Política Forestal y Desertificación expuso la línea de trabajo de “Análisis de los procesos de desertificación en España en función de los distintos escenarios climáticos”: objetivos y métodos a emplear, información climática necesaria o deseable (variables, resolución, etc), así como las dudas, problemas o incertidumbres relacionadas con las proyecciones y escenarios climáticos en el planteamiento del trabajo.²

Tras la celebración del Taller, se formó un Grupo de Trabajo coordinado por la OECC y constituido por los investigadores principales de los proyectos de investigación en escenarios en curso - ESCENA, ESTCENA y AEMET, para desarrollar los pasos futuros que se acordaron durante el mismo, entre otros, la elaboración de un listado básico de datos y productos de utilidad para realizar las evaluaciones de impactos, vulnerabilidad y adaptación al cambio climático en los correspondientes sectores,

En relación con el perfil de los usuarios, en el Taller se identificaron tres tipos básicos y diferenciados de usuarios cuyas demandas requieren atención: un usuario con muy bajo nivel de especialización, con requerimientos de información altamente procesada y agregada, que en general no emplea datos sino productos de síntesis de los mismos (usuario tipo A); un usuario sectorial, con perfil técnico y capacidad de procesamiento y manejo de datos con un nivel medio de agregación, (usuario tipo B), y un usuario altamente especializado y capacitado para procesar y hacer uso de las salidas de los modelos climáticos, y trabajar con datos poco agregados (usuario tipo C).

El trabajo descrito en esta publicación se puede considerar un ejemplo de evaluación de impactos sectorial emprendido por un tipo de usuario B, en concreto del sector suelos/desertificación.

Mientras se finalizaban los trabajos para la puesta a disposición de los usuarios de los “productos para el uso de la segunda generación de escenarios”³ la OECC y la AEMET facilitaron a la SG de Selvicultura y Montes un contacto directo con el equipo de la Universidad de Cantabria encargado de la elaboración de esos productos para iniciar los trabajos previstos de utilización de los datos procedentes de la colección de “Escenarios PNACC 2012”. La OECC facilitó además un Borrador de la “GUÍA DE USUARIO Escenarios-PNACC 2012. Nueva colección de escenarios de cambio

²http://www.magrama.gob.es/es/ceneam/grupos-de-trabajo-y-seminarios/seminarioPNACC/14-Desertificacion-DGMNyPF_tcm7-158549.pdf

³ Como se ha dicho en la presentación, el presente trabajo se desarrolló durante los años 2011 y 2013. Posteriormente los productos de la 2ª GER se pusieron a disposición del público en la web de AEMET. http://www.aemet.es/es/elclima/cambio_climat/escenarios

climático regionalizados del Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático (PNACC) – 2012.”⁴

Así, y contando con el asesoramiento de los técnicos del Grupo de Meteorología de Santander pertenecientes a la Universidad de Cantabria, se ha realizado el tratamiento de dichos datos de partida para el cálculo del índice de aridez y del factor R de erosividad de la lluvia, los dos factores directamente relacionados con el cambio climático.

En cuanto a la consideración de otros factores y procesos de desertificación de cara a su posible integración en un proceso cartográfico para obtener futuros mapas de riesgo de desertificación, en el epígrafe 3 (Análisis de los factores y procesos de desertificación en función del cambio climático) se detallan la información recopilada y su tratamiento. Los técnicos de la OECC han facilitado también la consulta con investigadores sobre estos factores. Entre otras, se facilitó la participación en el taller “Escenarios forestales como fuente de información para la adaptación al cambio climático” organizado en abril de 2012 por WWF España con el apoyo de la Fundación Biodiversidad. En dicho taller se tuvo la oportunidad de contrastar las ideas e hipótesis que se estaban planteando en el equipo de trabajo en cuanto a la utilización de los resultados de los trabajos de varios grupos en investigación en “Modelización forestal como fuente de información para la adaptación al cambio climático”.

3. Análisis de los factores y procesos de desertificación en función del cambio climático y de las posibilidades de adaptación de la información para su integración en el mapa de desertificación del PAND

3.1. Planteamiento metodológico

El planteamiento metodológico para la generación de mapas de riesgo de desertificación inducido por el cambio climático para los escenarios climáticos que se consideren y su comparación con la situación actual, tiene como base de partida la metodología para generar dicho mapa expuesta en el Programa de Acción Nacional contra la Desertificación (PAND).

El diagnóstico de la situación en España realizado en el PAND permitió realizar un ejercicio de definición preliminar y teórica del nivel de riesgo de desertificación, aludiendo solamente a aspectos de tipo cualitativo, que ofrece una primera aproximación de la distribución del problema de la desertificación en el territorio español. En el PAND se insiste en que se trata de un estudio preliminar, en el que se han utilizado solamente indicadores de tipo físico y biológico disponibles en el nivel nacional. Se ha aplicado un modelo basado en la caracterización de la superficie de acuerdo a la intensidad en que se presentan determinados factores y procesos de desertificación. Los indicadores utilizados han sido:

- Índice de aridez.
- Erosión: pérdidas de suelo.
- Incendios: porcentaje de superficie acumulada recorrida por el fuego durante 10 años.
- Sobreexplotación de acuíferos: existencia de problemas de sobreexplotación.

⁴ La “GUÍA DE USUARIO Escenarios-PNACC Datos mensuales (Versión Febrero 2015)” se puede consultar en:

http://www.aemet.es/documentos/es/serviciosclimaticos/cambio_climat/datos_mensuales/Guia_de_Usuario_Escenarios_PNACC_Datos_mensuales.pdf

Mediante un tratamiento metodológico sencillo se ha obtenido un mapa de riesgo de desertificación, clasificadas según el nivel de riesgo definido por el modelo aplicado. La tabla adjunta muestra la asignación de niveles de riesgo

EROSIÓN	INCENDIOS	SOBREEXPL. ACUÍFEROS	ARIDEZ	SUMA	RIESGO DE DESERTIFICACIÓN
>25 t/ha·año	>10 %	SI	árido	7	Muy alto
>25 t/ha·año	>10 %	SI	semiárido	6	
>25 t/ha·año	>10 %	NO	árido	6	
>25 t/ha·año	<10 %	SI	árido	6	
12 (10) ¹ -25 t/ha·año	>10 %	SI	árido	6	
>25 t/ha·año	>10 %	SI	subhúmedo seco	5	
>25 t/ha·año	>10 %	NO	semiárido	5	
>25 t/ha·año	<10 %	SI	semiárido	5	
>25 t/ha·año	<10 %	NO	árido	5	
12 (10) ¹ -25 t/ha·año	>10 %	SI	semiárido	5	
12 (10) ¹ -25 t/ha·año	>10 %	NO	árido	5	
12 (10) ¹ -25 t/ha·año	<10 %	SI	árido	5	
<12 (10) ¹ t/ha·año	>10 %	SI	árido	5	
>25 t/ha·año	>10 %	NO	subhúmedo seco	4	
>25 t/ha·año	<10 %	SI	subhúmedo seco	4	
>25 t/ha·año	<10 %	NO	semiárido	4	
12 (10) ¹ -25 t/ha·año	>10 %	SI	subhúmedo seco	4	
12 (10) ¹ -25 t/ha·año	>10 %	NO	semiárido	4	
12 (10) ¹ -25 t/ha·año	<10 %	SI	semiárido	4	
12 (10) ¹ -25 t/ha·año	<10 %	NO	árido	4	
<12 (10) ¹ t/ha·año	>10 %	SI	semiárido	4	
<12 (10) ¹ t/ha·año	>10 %	NO	árido	4	
<12 (10) ¹ t/ha·año	<10 %	SI	árido	4	
>25 t/ha·año	<10 %	NO	subhúmedo seco	3	Medio
12 (10) ¹ -25 t/ha·año	>10 %	NO	subhúmedo seco	3	
12 (10) ¹ -25 t/ha·año	<10 %	SI	subhúmedo seco	3	
12 (10) ¹ -25 t/ha·año	<10 %	NO	semiárido	3	
<12 (10) ¹ t/ha·año	>10 %	SI	subhúmedo seco	3	
<12 (10) ¹ t/ha·año	>10 %	NO	semiárido	3	
<12 (10) ¹ t/ha·año	<10 %	SI	semiárido	3	
<12 (10) ¹ t/ha·año	<10 %	NO	árido	3	
12 (10) ¹ -25 t/ha·año	<10 %	NO	subhúmedo seco	2	Bajo
<12 (10) ¹ t/ha·año	>10 %	NO	subhúmedo seco	2	
<12 (10) ¹ t/ha·año	<10 %	SI	subhúmedo seco	2	
<12 (10) ¹ t/ha·año	<10 %	NO	semiárido	2	
<12 (10) ¹ t/ha·año	<10 %	NO	subhúmedo seco	1	

1.- Inventario Nacional de Erosión de Suelos.

Tabla de asignación de niveles de riesgo (PAND, 2008)

De entre los factores y/o parámetros que intervienen en el mapa de riesgo de desertificación, se considera que los que están más directamente implicados con las variables climáticas, y por tanto, son susceptibles de realizar previsiones de futuro en función del cambio climático, son el índice de aridez y la erosión del suelo (en concreto el factor R de erosividad de la lluvia, o índice de erosión pluvial).

En lo referente a la erosión, tras el estudio de los anteriores antecedentes y sin perjuicio de la eventual consideración de evaluaciones de tipo cualitativo (UNEP-EEA. 2000. MicroLEIS DSS; De la Rosa et al., 2004) se analizarán las posibilidades de evaluar la erosión en función de los escenarios climáticos con los modelos paramétricos cuantitativos de estimación de las pérdidas de suelo por erosión hídrica y en regueros (USLE, RUSLE)⁵ en los que se lleva trabajando muchos años en la Administración y que, además son los métodos utilizados en el mapa de riesgo de desertificación.

La Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo (USLE) por erosión laminar y en regueros, que establecen Smith y Wischmeier, permite la evaluación de las pérdidas de suelo por erosión laminar y en regueros mediante la expresión:

$$A = R \cdot K \cdot S \cdot L \cdot C \cdot P$$

A ($t \cdot ha^{-1}$) – pérdidas de suelo.

R ($J \cdot m^{-2} \cdot cm \cdot hora^{-1}$) – índice de erosión pluvial.

K ($\frac{t \cdot m^2 \cdot hora}{ha \cdot J \cdot cm}$) – factor de erosionabilidad del suelo.

L (adimensional) – factor longitud de pendiente.

S (adimensional) – factor pendiente.

C (adimensional) – factor cultivo.

P (adimensional) – factor prácticas de cultivo.

Conceptualmente, A es la pérdida de suelo por unidad de superficie, que se obtiene por el producto del resto de los factores; R, factor lluvia, el número de unidades del índice de erosión E · 130 en el período considerado, y mide la fuerza erosiva de una lluvia determinada⁶; K, factor de erosionabilidad del suelo, valor de la erosión por unidad de índice de erosión pluvial, para un suelo determinado en barbecho continuo con una pendiente del 9% y una longitud de declive de 22,1 m; L, factor longitudinal de declive, la relación entre la pérdida para una longitud determinada y la pérdida para una longitud de 22,1 m del mismo tipo de suelo; S, factor de pendiente, la relación entre las pérdidas para una pendiente determinada y las pérdidas para una pendiente del 9% del mismo tipo de suelo; C, factor de cultivo y ordenación, la relación entre las pérdidas de suelo en un terreno cultivado en condiciones específicas y las pérdidas correspondientes para ese suelo en barbecho continuo; P, factor de prácticas de conservación de suelo, la relación entre las pérdidas del suelo con cultivo a nivel, en fajas y en terrazas, y las pérdidas de suelo correspondientes a un cultivo en surcos según la pendiente.

Como se ve, sólo la R depende directamente de factores climáticos, si bien tanto C como P, en definitiva, el tipo de uso de suelo y su manejo, se verán indefectiblemente influidos por el cambio climático.

En la hipótesis de que no se consideren las variaciones en el resto de parámetros, en esencia se trataría de “aislar” la R y volver a obtener las pérdidas de suelo para las

⁵ USLE: Ecuación Universal de Pérdida de Suelos (*Universal Soil Loss Equation*) RUSLE: Ecuación Universal Revisada de Pérdida de Suelos (*Revised Universal Soil Loss Equation*)

⁶ Ver más información sobre el cálculo del factor R en el capítulo 4.

hipótesis que se consideren: una R en el periodo actual y las R correspondientes a los distintos escenarios.

Como datos de partida se utilizarán el Mapa de Estados Erosivos (MEE, 1987-2002) y el Inventario Nacional de Erosión de Suelos (INES, 2002- ...).

El planteamiento inicial del trabajo fue el siguiente:

- Mapas de aridez de la situación actual y de las futuras.
- Mapas del índice de erosividad de la lluvia (R) de la situación actual y de las futuras.
- Consideración y eventual generación de escenarios de cobertura vegetal del suelo (factor C USLE) coherentes con los escenarios de Cambio Climático considerados de cara a su incorporación al modelo USLE.
- Estimación de la erosión hídrica y en regueros (actual y futuras) mediante la Ecuación Universal de Pérdidas de Suelos (USLE), utilizando como base para el resto de factores la información procedente del Mapa de Estados Erosivos (MEE, modelo USLE) y/o del Inventario Nacional de Estados Erosivos (INES, modelo RUSLE).
- Consideración del resto de factores que integran el mapa de riesgo de desertificación del PAND: incendios y sobreexplotación de acuíferos.
- Integración paulatina, en función de su viabilidad, de los anteriores resultados en los mapas de riesgo de desertificación:

Este esquema inicial ya planteaba, y así se expuso en las sucesivas reuniones de trabajo, una serie de dudas, problemas o incertidumbres relacionadas con las proyecciones y escenarios climáticos:

- Métodos de cálculo de la ETP más apropiados en el contexto de los escenarios de cambio climático.
- Tratamiento de las incertidumbres en cuanto a eventos extremos
- Métodos de cálculo del factor R de erosividad de la lluvia más apropiados en el contexto de los escenarios de cambio climático y de las incertidumbres asociadas a la utilización de métodos basados en estimaciones actuales de intensidad y distribución de la lluvia.
- Generación de escenarios de cobertura vegetal del suelo / uso y manejo del suelo, frecuencias de incendios, sobreexplotación de acuíferos: aproximaciones y posibilidades.

En relación con este último párrafo, y con el objetivo de solucionar estas incertidumbres, buena parte de los trabajos realizados en esta estudio han consistido en analizar las distintas aproximaciones y posibilidades de generación de escenarios de cambio climático en la cobertura vegetal del suelo (factor C USLE) y en el resto de factores del mapa de riesgo no directamente dependientes del clima: frecuencia de incendios y sobreexplotación de acuíferos.

Para ello se ha realizado una recopilación de estudios y trabajos, más o menos recientes, de evaluaciones del impacto del cambio climático sobre dichos factores con objeto de analizar las posibilidades de utilizar estos estudios, bien en el marco del planteamiento metodológico expuesto, bien para recopilar conclusiones de estos estudios que permitan, de una forma cualitativa, evaluar la influencia que los cambios previstos por la comunidad científica tienen en los procesos de desertificación en España. La recopilación y análisis incluye, lógicamente estudios de evaluación de la desertificación y la degradación de suelos en general.

Toda la información se fue recopilando en un documento de trabajo, que resumía el estado de la cuestión, las distintas opciones y las dudas e incertidumbres planteadas como consecuencia del análisis de la información, actualizándose según se iba avanzando en el proceso de decisión.

Como se verá, el análisis realizado (que ha incluido la consulta a expertos investigadores sobre diferentes propuestas para obtener coberturas cartográficas) no ha permitido materializar el propósito inicial de contar con coberturas cartográficas que estimen con un mínimo de rigor los cambios en la cubierta vegetal y los usos del suelo desde el punto de vista de la protección del suelo, o en el riesgo de incendios y el estado de los acuíferos. No obstante, el análisis ha permitido una evaluación cualitativa del impacto del cambio climático en los factores y procesos de desertificación, con base en resultados obtenidos por la comunidad científica en las últimas décadas.

Por lo tanto, la generación del mapa de riesgo de desertificación en función de los escenarios de cambio climático tiene en cuenta únicamente los factores directamente afectados, la aridez y el factor R de la USLE. En el epígrafe 4 se incluyen los resultados obtenidos.

Este resultado es similar a la metodología aplicada en los ejercicios encontrados similares a éste realizados en España, que son sendas estimaciones de la desertificación en función del cambio climático en Andalucía y la Comunidad Valenciana.

En la primera (*Rodríguez Surián et al, 2008*), se realiza una evaluación y seguimiento de la desertificación en Andalucía en la que, para las estimaciones futuras, sólo modifican el clima utilizando los escenarios climáticos, manteniendo constantes las evaluaciones derivadas de la vegetación de 2003:

“En las proyecciones al futuro (2040, 2070 y 2100) se han mantenido, no obstante, constantes las evaluaciones derivadas de la vegetación de 2003 ya que la evolución de la vegetación en función de las condiciones climáticas previstas aún no ha podido ser valorada al constituir en si misma materia para un nuevo proyecto”

En la estimación realizada en la Comunidad Valenciana, a la que se hará referencia más adelante, la metodología de estimación de la erosión se fundamentó únicamente en la variación del factor R de la USLE.

Por último, para finalizar este epígrafe dedicado al planteamiento metodológico del trabajo, es preciso hacer una referencia al tratamiento de las incertidumbres en cuanto a eventos extremos, que ha supuesto, como se verá, uno de los principales condicionantes en la evaluación de los procesos de desertificación en función del cambio climático, particularmente en lo que se refiere a la erosión. Ya durante el taller de usuarios de los escenarios de cambio climático organizado por la OECC en abril de 2011, se puso de manifiesto en repetidas ocasiones la preocupación existente por las altas incertidumbres que se obtuvieron con la 1ª GER en cuanto al comportamiento de los modelos en los valores extremos, sobre todo en lo relativo a las precipitaciones. Dado que el cálculo del factor R, índice de erosión pluvial, de la USLE se basa precisamente en las P máximas, se consideró necesario profundizar en esta cuestión. En esencia, la pregunta que se planteó era que, aún sabiendo que las previsiones apuntan a una mayor frecuencia en los eventos extremos, ¿podría llegar a pasar que se obtuviera una “R futura” menor debido a que los modelos climáticos no recogen bien los extremos?.

Se ha profundizado en la cuestión, mediante el estudio de los resultados del trabajo del CEDEX “Evaluación del impacto del cambio climático en los recursos hídricos en régimen natural”, en contacto con los autores del mismo. Asimismo se ha consultado con otros expertos en el tema, y se ha realizado una revisión bibliográfica de artículos

e informes que analizan, a escala europea o incluso de la Península, algún aspecto relacionado con las precipitaciones extremas y su comportamiento en los escenarios de cambio climático.

3.2. Antecedentes de evaluación de la desertificación y la degradación de suelos en función de los escenarios de cambio climático

En materia de adaptación y evaluación de impactos del cambio climático en España, una de las primeras acciones que la OECC ha llevado a cabo es un proyecto que finalizó en 2005, llamado “Evaluación Preliminar de Impactos en España por Efecto del Cambio Climático” (Proyecto ECCE). Este estudio, pionero en España, constituyó el esfuerzo de un numeroso grupo de científicos españoles, con vistas a valorar cuáles son los cambios que vienen ocurriendo en nuestro clima y cuáles pueden ser los cambios previsibles, como consecuencia del calentamiento global del planeta, así como tales cambios climáticos pueden afectar a los ecosistemas naturales, a la salud y a los principales sectores productivos españoles. El estudio aportó numerosas conclusiones e importantes datos particularizados al ámbito nacional y reafirmó resultados ya constatados en el Tercer Informe de Evaluación del IPCC (TAR 2001) y en el Informe de Evaluación de los Impactos en Europa.

Sin perjuicio de que en los epígrafes siguientes se utilice la información procedente de este estudio para el análisis de los distintos factores, se extractan a continuación las conclusiones de mayor interés para los ecosistemas y sectores relacionados con la desertificación:

Impactos en los recursos edáficos

- Extensas zonas de España están actualmente amenazadas por procesos de desertificación; especialmente como consecuencia de los incendios forestales y de pérdida de fertilidad en suelos de regadío por salinización y erosión. El cambio climático incrementará este problema, especialmente en regiones áridas y semiáridas de la cuenca mediterránea.
- La erosión hídrica en condiciones mediterráneas es altamente episódica en la actualidad. Evidentemente, los cambios predichos sobre un aumento de los eventos climáticos extremos en España (Millán et al 2004, en prensa) redundarían en un agravamiento del riesgo de erosión.
- Las zonas más vulnerables son las que se ven más afectadas por los procesos de desertificación, que se prevé se acentuarán en los supuestos de una mayor aridización del clima.
- Se espera una disminución generalizada del carbono orgánico (OC) en el suelo como consecuencia del incremento de temperatura y del aumento de la sequía. Las zonas donde cabe esperar pérdidas mayores serían las más húmedas (Norte de España) y para los usos de suelos que comportan contenidos en OC más elevados (prados y bosques). En el otro extremo, donde el contenido de OC es menor, pequeñas pérdidas de C pueden significar la superación de un umbral crítico para el mantenimiento de la funcionalidad del suelo.
- Los impactos del cambio climático en el suelo interaccionan de forma muy significativa con el uso y manejo del suelo. Dichas interacciones y la evolución de los factores socioeconómicos que regularán los tipos de uso y las prácticas de manejo constituyen importantes incertidumbres.

Impactos en agricultura

- Los impactos serán amplios y muy diversos, ya que este medio se encuentra muy vinculado a los ecosistemas que lo rodean.

- Los efectos en la agricultura serán contrapuestos y no uniformes en las regiones españolas. Los agrosistemas identificados como más vulnerables son: cultivos extensivos de secano en zonas áridas y semiáridas, olivares, regadíos y cultivos forzados bajo plásticos

Impactos en bosques

- La reserva de agua en el suelo disminuirá conforme aumente la temperatura y la demanda evaporativa de la atmósfera. Esto supondrá un importante factor de estrés para el arbolado. En las zonas con déficit hídrico esto puede ocasionar cambios en la densidad del arbolado o de especies. En casos extremos, áreas susceptibles de albergar sistemas arbolados pueden perder esta condición, pasando a soportar matorrales u otra vegetación de menor porte.
- El retorno al suelo de materia orgánica en forma de hojarasca y raíces finas aumentará, al tiempo que disminuirá la producción de madera. La cantidad de carbono devuelta a la atmósfera aumentará sensiblemente con el paso del tiempo.
- La producción primaria aumentará inicialmente, para disminuir conforme discurra el siglo. Existe un riesgo elevado de que muchos de nuestros ecosistemas forestales se conviertan en emisores netos de carbono durante la segunda mitad del presente siglo.
- Aumentará el riesgo de incendios forestales, y de plagas y enfermedades en bosques.
- Las áreas y taxones identificados como más vulnerables son: poblaciones de *Abies pinsapo*, poblaciones aisladas meridionales de *Pinus sylvestris*, *P. nigra* y *P. uncinata*, bosques riparios en corrientes de fuerte estacionalidad, bosques mediterráneos de ambientes xéricos

Impactos en la biodiversidad

- Los impactos directos del cambio climático sobre la diversidad vegetal se producirán a través de dos efectos antagónicos: el calentamiento y la reducción de las disponibilidades hídricas. Se proyectan cambios en la distribución de los pisos bioclimáticos, con riesgo de extinción de algunas especies y pérdida de biodiversidad
- Las migraciones altitudinales / latitudinales de formaciones vegetales se intensificarán. La «mediterraneización» del norte peninsular y la «aridización» del sur son algunas de las tendencias más significativas.
- La vegetación de alta montaña, los bosques y arbustadas caducifolios sensibles a la sequía estival, los bosques esclerofilos y lauroides del sur y suroeste peninsular y la vegetación litoral se cuentan entre los tipos más vulnerables.
- La simplificación estructural de la vegetación y el predominio de las extinciones locales sobre las recolonizaciones son tendencias recurrentes de los distintos impactos

Riesgo de crecidas fluviales

- En las cuencas mediterráneas y del interior la mayor irregularidad del régimen de precipitaciones ocasionará un aumento en la irregularidad del régimen de crecidas y de crecidas relámpago.
- Es necesario el desarrollo de modelos regionales acoplados clima-hidrología que permitan obtener escenarios fiables para los extremos hidrológicos

teniendo en cuenta las particularidades de las cuencas atlánticas y mediterráneas.

Riesgo de inestabilidad de laderas

- A la espera de confirmación por modelos climáticos más afinados, el aumento de la torrencialidad conllevará un mayor número de deslizamientos superficiales y corrientes de derrubios, cuyos efectos pueden verse exacerbados por los cambios de uso del suelo y un menor recubrimiento vegetal
- Como consecuencia de ello, se espera un aumento de la erosión en las laderas y la pérdida de calidad de las aguas superficiales, por el aumento de la turbidez, y un mayor ritmo de colmatación de los embalses.

Riesgo de incendios forestales

- Las temperaturas y la falta de agua en el suelo aumentarán, lo que inducirá a una mayor y más duradera desecación de los combustibles. Por lo tanto, la inflamabilidad de los combustibles aumentará.
- Los índices medios de peligro aumentarán y, en particular, la frecuencia de situaciones extremas. La duración media de la temporada de peligro aumentará.
- Las igniciones causadas por rayos aumentarán, así como las causadas por negligencias. La frecuencia, intensidad y magnitud de los incendios aumentará.
- Los planes de conservación de la biodiversidad o de lucha contra la desertificación deben incorporar los nuevos escenarios de peligro creciente

3.3. Aridez

La evaluación de la aridez se realizó en el PAND mediante el índice de aridez del PNUMA:

$$\text{Índice de aridez} = P/ETP$$

donde P es la precipitación anual y ETP la evapotranspiración potencial.

Para la elaboración de mapas de aridez, bien de la situación actual, bien de situaciones futuras la información climática necesaria o deseable es resúmenes mensuales para cada estación de:

- precipitación media mensual,
- temperatura media de las máximas mensuales,
- temperatura media mensuales
- temperatura media de las mínimas mensuales.

Variables que se pueden obtener a partir de las series de datos diarios de precipitación, temperatura máxima y mínima que son el principal resultado de todas las proyecciones climáticas. Así pues, y como ya se ha dicho, la aridez es uno de los factores que intervienen en la desertificación para los que será posible obtener mapas de las situaciones futuras.

En la elección del método de cálculo de la ETP hay que tener en cuenta las disponibilidades de datos de los escenarios climáticos, por lo que a priori deberían considerarse preferentemente los métodos basados en parámetros térmicos (Thornthwaite, Hargreaves & Samani, ...).

Varios estudios del Primer Programa de Trabajo del PNACC, realizados a partir de la 1ª Generación de Escenarios Regionalizados elaboraron productos que pudieran

haber servido para la generación de los mapas de aridez de situaciones futuras (fueron objeto de análisis en el marco de este estudio en prevención de que no se hubieran podido utilizar los resultados de la 2ªGER), entre ellos:

- **IMPACTOS, VULNERABILIDAD Y ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO DE LA BIODIVERSIDAD ESPAÑOLA. 1. FLORA Y VEGETACIÓN.** Proyecciones de las áreas de distribución potencial de la flora amenazada y las especies forestales de la España peninsular por efecto del cambio climático. Universidad de Extremadura, Real Jardín Botánico-CSIC, Universidad de Castilla-La Mancha.
- Evaluación del impacto del cambio climático en los recursos hídricos en régimen natural. CEDEX, diciembre de 2010.

El estudio del CEDEX “Evaluación del impacto del cambio climático en los recursos hídricos en régimen natural” ha sido estudiado con detenimiento, constituyendo un valioso referente para este trabajo. En este trabajo se han simulado las fases del ciclo hidrológico utilizando un modelo de recursos hídricos desarrollado por el CEDEX (modelo SIMPA) bajo las condiciones impuestas por las proyecciones de precipitación y temperatura seleccionadas. La escala de trabajo ha sido mensual y se ha adoptado un procedimiento directo de análisis basado en obtener desviaciones porcentuales entre los resultados de cada periodo del siglo XXI (2011-2040, 2041-2070 y 2071-2100) y el periodo de control (1961-1990), asumiendo que el clima se hubiera comportado según los datos de las proyecciones durante dicho periodo de control

En este estudio se han utilizado las proyecciones climáticas regionales preparadas por la AEMET en el Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático bajo el título “Generación de escenarios climáticos regionalizados de cambio climático para España” (2008). Esas proyecciones derivan a su vez de los escenarios climáticos del 3er informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos del Cambio Climático de 2001.

Los resultados de interés para los parámetros y factores utilizados en la determinación de la desertificación en España, son los relativos a:

- precipitación: potencial utilización en los cálculos del índice de aridez,
- evapotranspiración: potencial utilización en los cálculos del índice de aridez,
- precipitaciones máximas: para cálculos de R, factor de la USLE,
- recarga de los acuíferos: potencial extrapolación a la estimación de la sobreexplotación de los acuíferos.

Considerando que pueden ser de utilidad para poder contrastarlos con los resultados obtenidos con la 2ª GER en el cálculo de la aridez, se extractan a continuación los resultados y conclusiones obtenidos en este estudio relativos a la precipitación media y la evapotranspiración:

Precipitación

- La comparación de las proyecciones y los datos observados en el período de control revela importantes diferencias en cuanto a escala, variabilidad y evolución estacional, especialmente en el caso de la precipitación.
- Las proyecciones pronostican una reducción generalizada de la precipitación conforme avanza el siglo XXI, por lo que se reducirían las disponibilidades de agua.
- En la zona oriental de la Península se prevén menores disminuciones e incluso algún aumento para el periodo y el escenario considerados.
- Las precipitaciones proyectadas y observadas⁷ en el periodo de control presentan diferencias notables en cuanto a media, variabilidad, tendencia, fluctuaciones de ciclos húmedos y secos, y estacionalidad.
- Todas las proyecciones dan un ciclo estacional más suavizado que el observado, no alcanzando los valores medios de otoño y superando los de verano.

Evapotranspiración potencial (ETP)

- Se prevé un aumento de temperatura y, por tanto, de evaporación y transpiración por las plantas (evapotranspiración). Sin embargo, el efecto de este aumento en el ciclo hidrológico es menor por concentrarse en verano durante el cual el suelo tiene un reducido contenido de agua.
- Los incrementos de ETP reflejan los de la temperatura media. Se estiman incrementos medios en España en todas las proyecciones entre un 6% y un 28%.

3.4. Erosión

Se recogen en este epígrafe por un lado, las referencias encontradas a la evaluación de la erosión en función de los escenarios de cambio climático, y por otro, las posibilidades relacionadas con los distintos factores que, de acuerdo con el modelo USLE, intervienen en la estimación de la erosión: factor R de erosividad de la lluvia (que incluye consideraciones sobre la incertidumbre en cuanto a la estimación de las precipitaciones, en particular de las precipitaciones máximas); factor C, dependiente de la cubierta vegetal y el uso del suelo, y factor K de erosionabilidad del suelo.

3.4.1. Referencias encontradas a la evaluación de la erosión en función de los escenarios de cambio climático

En función de la información recopilada las estimaciones sobre el efecto del cambio climático en las tasas de erosión resultan todavía bastante imprecisas. Las referencias bibliográficas consultadas no permiten extraer resultados muy concluyentes, existiendo, eso sí, cierto consenso en la dificultad de evaluar el impacto del cambio climático en la erosión debido fundamentalmente a las incertidumbres sobre la magnitud del propio cambio y a las interacciones (a veces contrapuestas) que se establecen entre los agentes que influyen directa o indirectamente en el proceso

⁷ En el Resumen Ejecutivo del estudio del CEDEX se incluye un Anejo dedicado a los resultados de comparar los datos observados del periodo de control y los datos de ese mismo periodo pero utilizando las proyecciones climáticas, obteniendo así una estimación de la incertidumbre asociada a las proyecciones.

(precipitación, temperaturas, crecimiento vegetal, etc...). Se resumen a continuación algunas de las referencias encontradas en la bibliografía:

- Con la aplicación del modelo SWAT, Nunes et al (2008) indican que los cambios en la erosión dependerán de las interacciones entre el descenso de escorrentía y el crecimiento de biomasa. Analizando los efectos combinados (incremento de temperaturas, concentración de CO₂ y descenso de la precipitación), los resultados indican una disminución de la escorrentía y, para la mayoría de los tipos de vegetación, una disminución en la producción de biomasa. Sin embargo, esta disminución presenta un amplio rango (con descensos superiores al 80%) dependiendo del rango de cambios en la precipitación.
- Con base en una simulación con el modelo MEFIDIS, Nunes et al (2009) indican que los impactos del cambio climático sobre la escorrentía y la erosión en las cuencas mediterráneas son difíciles de evaluar debido al aumento esperado en la frecuencia de las tormentas, junto con una disminución de la precipitación total, la humedad del suelo y la cubierta vegetal. Sus resultados indican que la disminución de los niveles de humedad del suelo causados por el cambio climático podría ser suficiente para compensar el impacto de una mayor intensidad de las tormentas en las cuencas mediterráneas.
- En un análisis con datos del periodo 1951- 2000, De Luis et al (2010) señalan para el Mediterráneo peninsular una tendencia al descenso en la precipitación. Debido a las complejas interacciones, la tendencia en la agresividad de la lluvia muestra un complejo patrón espacial. En este mismo sentido, más que los valores medios habría que considerar la posible desproporción entre periodos secos y húmedos y el patrón de tormentas, especialmente a principios de otoño y en las zonas más costeras (Diodato & Bellocchi; 2009).
- Pardo et al (2009), con una aproximación que supone una fuerte disminución de la precipitación estival, indican que se podría producir una disminución de la erosión potencial.

A una escala más general, las principales referencias a la evaluación de la erosión en función del cambio climático en España se han encontrado en el Capítulo 8 IMPACTOS SOBRE LOS RECURSOS EDÁFICOS de la *Evaluación Preliminar de los Impactos en España por efecto del Cambio Climático (Proyecto ECCE, 2005)*, en el que también se recogen algunas referencias de carácter genérico que relaciona erosión y cambio climático:

“La influencia de la precipitación sobre la erosividad de los suelos se puede aproximar a partir del factor R del modelo USLE, o bien a partir de relaciones más sencillas que permiten su cálculo a partir de valores mensuales o anuales de precipitación (Renard *et al.* 1994). Nearing, *et al.* (2004), aplicando el modelo WEEP determina para suelos característicos de EEUU que por cada incremento del 1% en la precipitación anual existe un incremento del 2% en la escorrentía superficial y de 1,7% en la erosión. Esta menor sensibilidad al cambio de la erosión frente a la escorrentía se debe al incremento de la protección del suelo que se genera por incremento de la biomasa epigea, debido al aumento de la precipitación. Se considera que la intensidad de las precipitaciones experimentará también un incremento de acuerdo con la intensificación del ciclo hidrológico que se supone provocará el calentamiento de la tierra.”

Por otra parte, como consecuencia del incremento de las temperaturas y de la sequía estival previsto para las áreas mediterráneas, se acepta que existirá también una mayor incidencia de los incendios forestales, por lo que los cambios que estos provocarían sobre la erosionabilidad y protección vegetal del suelo se sumarían a los generados por el incremento en la erosividad de la lluvia. Al mismo tiempo, la disminución en el contenido en OC de los suelos actuaría también en el mismo sentido de incrementar la erosionabilidad del suelo (factor K de la USLE). “

Las estimaciones y/o iniciativas relacionadas con el territorio nacional, recogidas en el capítulo 8 del Proyecto ECCE, en concreto en el epígrafe 8.3.8. *Impactos sobre la degradación física del suelo y la erosión*, son las siguientes

1. Cita a una estimación previsión del riesgo de erosión en 2050 de UNEP-EEA 2000.
2. Evaluación del riesgo de erosión en Andalucía, De la Rosa et al. (1996), uso del modelo Raizal (MicroLEIS DSS; De la Rosa et al.2004) suponiendo una perturbación climática previsible para el año 2050.
3. Estimación con USLE en la Comunidad Valenciana: modificando el factor R.

1. *Cita a una estimación previsión del riesgo de erosión en 2050 de UNEP-EEA 2000*

La cita es: “Se estima un aumento del 20% de la superficie agrícola española amenazada por riesgo muy alto de erosión, mientras que las superficies con riesgo alto y moderado disminuirían en un 8 y un 19 % respectivamente”, y aparece enmarcada en el siguiente párrafo:

“Bajo el cambio climático es previsible una disminución de la precipitación media, así como un aumento de la frecuencia de los eventos extremos. Ello puede provocar un incremento peligroso de la erosión del suelo en amplias zonas del país y ser crítico en áreas donde la acumulación de procesos históricos de erosión ha derivado en suelos muy poco profundos. Considerando el escenario climático para el año 2050, el riesgo de erosión de los suelos agrícolas de la UE es previsible que aumente en un 80 % (UNEP-EEA 2000). Este incremento se producirá preferentemente en las zonas que ya presentan un riesgo severo. Según las mismas fuentes, se estima un aumento del 20% de la superficie agrícola española amenazada por riesgo muy alto de erosión, mientras que las superficies con riesgo alto y moderado disminuirían en un 8 y un 19 % respectivamente.”

Dado que era la única referencia encontrada a una estimación cuantitativa del riesgo futuro de erosión en función del cambio climático se realizó una búsqueda encadenada de referencias bibliográficas a partir de la citada en el texto del proyecto ECCE:

- UNEP-EEA. 2000. Down to Earth: Soil Degradation and Sustainable Development in Europe. Environmental Issue Series No. 16. European Environmental Agency Pub. Copenhagen.
- EEA, 1999a. Environment in the European Union at the Turn of the Century. European Environment Agency. <http://www.eea.europa.eu/publications/92-9157-202-0/page306.html>
- European Commission, 1999 (forthcoming). “Economic Assessment of Priorities for a European Environmental Policy Plan (working title)”. Report prepared by RIVM, EFTEC, NTUA and IIASA for Directorate General XI (Environment, Nuclear Safety and Civil Protection).

La búsqueda nos condujo finalmente al siguiente informe como origen de la estimación, que forma parte de ese trabajo general de evaluación de la Comisión Europea de 1999 citado en tercer lugar.

RIVM report 481505018. *Technical Report on Soil Degradation in Europe: an integrated economic and environmental assessment*. G.J. van den Born, B.J. de Haan, D.W. Pearce, A. Howarth. May 2000
<http://www.rivm.nl/bibliotheek/rapporten/481505018.pdf>

En el cuadro de texto adjunto se pueden consultar algo de información sobre cómo se obtuvo esa estimación. Se ha utilizado un modelo denominado Modelo IMAGE 2 (Alcamo et al) en el que se realiza una evaluación cualitativa del riesgo de erosión

basado en tres parámetros: erodibilidad del terreno, erosividad de la lluvia, y presión del uso del suelo.

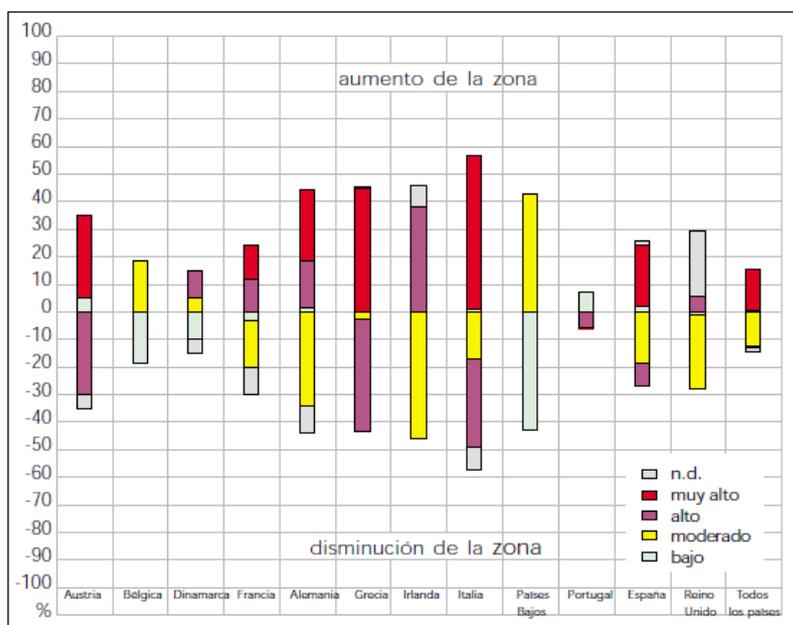
Here, the impact of climate change is calculated using the computer model IMAGE 2, which is a geographically explicit, integrated model developed to simulate the interactions between climate, biosphere and society (Alcamo et al., 1994a; Alcamo et al., 1994b; Alcamo et al., 1998). This section describes the spillover from the issue of greenhouse gas emissions. The emission scenario chosen corresponds with the Kyoto agreement on greenhouse gas emission reduction.

The goal of the assessment is to assess the *qualitative* water erosion risk (e.g. no risk, low, moderate or high) and its impact on crop productivity. Its methodology is based on Batjes (1996) and Hootsmans et al., (1999). The water erosion impact module generates for each grid cell of 0.5° x 0.5° a water erosion risk index based on three main

parameters: terrain erodibility, rainfall erosivity, and land use pressure. Terrain erodibility is based on soil type (FAO, 1991) and on certain soil characteristics (ISRIC's WISE Database) and on landform, which are regarded as constant parameters. Landform is classified into general types (flat, undulated, mountainous, etc.) by using the difference between minimum and maximum altitudes for each grid cell (FNOC, 1995). The rainfall intensity is derived from monthly precipitation divided by the number of wet days. This is considered to be indicative of rainfall erosion potential. Precipitation is considered a dynamic variable, while the number of wet days is assumed to remain constant. The potential erosion risk is converted to actual erosion risk by land use pressure considerations which are determined by applying the degree of protection afforded by various land covers to land cover maps (Global Ecosystem Database, Kineman 1992). Natural forests give an optimum protection showing 'no risk' and agricultural crops give a much lower protection showing various levels of water erosion risk.

Los resultados de este informe fueron incorporados en la publicación en español de la Agencia Europea de Medio Ambiente (AEMA) (UNEP-EEA. 2000. *Down to Earth: Soil Degradation and Sustainable Development in Europe*):

Figura 3 Cambios previstos en el riesgo de erosión hídrica en tierras agrícolas. Período 1990–2050 en % de la superficie terrestre total



Fuentes: Comisión Europea, 2000a; elaboración de los datos de la AEMA

“De acuerdo con la hipótesis de partida de la CE, se prevé que el riesgo de erosión hídrica aumente en un 80% de los terrenos agrícolas de la UE para el año 2050, como consecuencia del cambio climático. Dicho aumento afectará principalmente a las zonas en las que la erosión del suelo es grave actualmente (AEMA, 1999a). En la figura 3, se muestra la dirección en que se producirá el cambio en diversos países”

Figura 1. Extracto de UNEP-EEA. 2000. *Down to Earth: Soil Degradation and Sustainable Development in Europe*

Y en el “Informe de situación del medioambiente en Europa de 1999” (EEA, 1999a. *Environment in the European Union at the Turn of the Century. European Environment Agency*) se incluyeron los mapas de la Figura 2 que reflejan la estimación de cambio en la erosión hídrica en las áreas agrícolas:

No se han encontrado en los sucesivos Informes sobre el medio ambiente en Europa, líneas de trabajo que hayan actualizado estas aproximaciones.

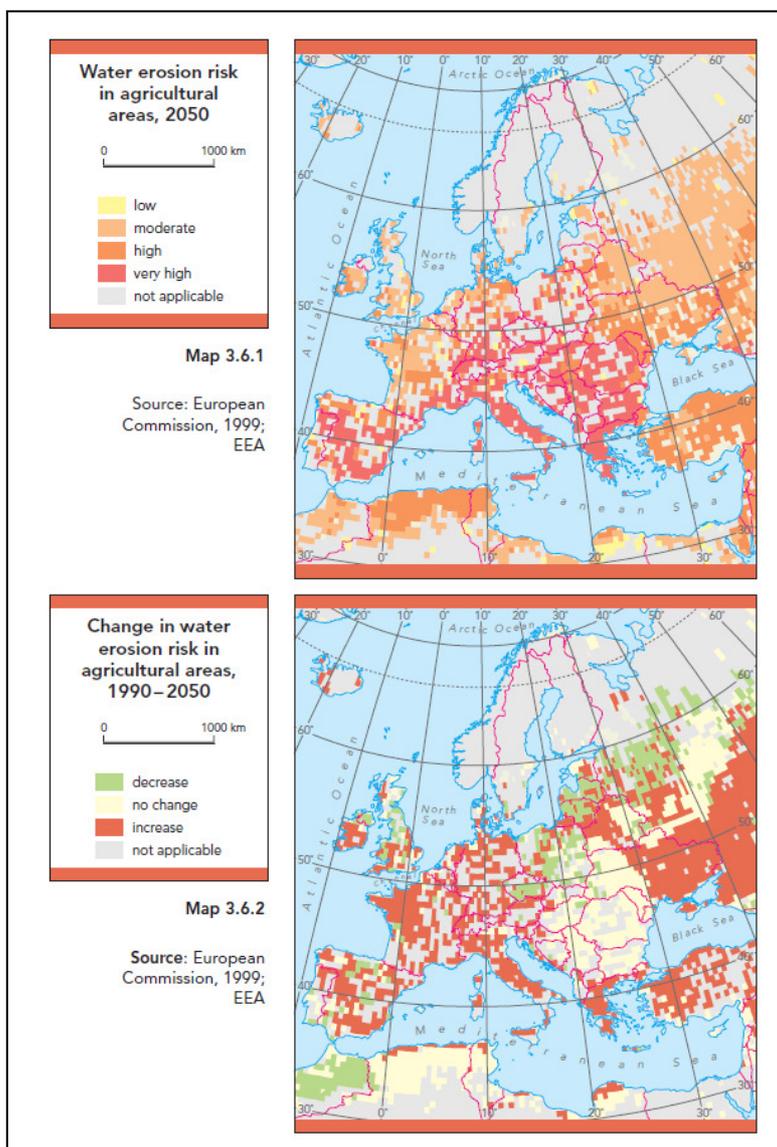


Figura 2: Extracto de “Informe de situación del medioambiente en Europa de 1999 (AEMA)”

2. Evaluación del riesgo de erosión en Andalucía, De la Rosa et al. (1996), uso del modelo Raizal (MicroLEIS DSS; De la Rosa et al.2004) suponiendo una perturbación climática previsible para el año 2050

La cita en el proyecto ECCE es la siguiente:

“En el caso de Andalucía, haciendo uso del modelo Raizal (MicroLEIS DSS; De la Rosa et al. 2004) y suponiendo una perturbación climática previsible para el año 2050, el riesgo de erosión hídrica aumenta en un 47 % de los suelos, aunque disminuye en otro 18 % de los suelos. Los primeros suelos se localizan en el noroeste de Almería, las sierras norte de Córdoba, el noroeste de la provincia de Granada y el sur de Jaén. A su vez, los suelos en donde disminuye el riesgo de erosión se localizan preferentemente en la sierra sur de Córdoba, la parte central de la provincia de Granada y el norte de Jaén, así como en las mejores zonas agrícolas de la provincia de Sevilla (De la Rosa et al. 1996). No obstante, el cambio climático puede inducir cambios en los usos de los suelos a través, por ejemplo, de nuevos cultivos y prácticas agronómicas, o de un aumento en el abandono de cultivos, cambios que repercutirían en el impacto erosivo descrito más arriba.”

Siendo las referencias bibliográficas las siguientes:

- De la Rosa D., Crompvoets J., Mayol F. y Moreno J.A. 1996. Land Vulnerability Evaluation and Climate Change Impacts in Andalucía, Spain. *International Agrophysics Journal* 10: 225-238.
- De la Rosa D., Mayol F., Diaz-Pereira E., Fernández M. y De la Rosa D. Jr. 2004. A Land Evaluation Decision Support System (MicroLEIS DSS) for Agricultural Soil Protection. *Environmental Modelling y Software*: 19, 929-942. <http://www.microleis.com>.

El equipo del IRNAS-CSIC lleva décadas trabajando en un Sistema de Apoyo a la Decisión para Evaluación de Suelos, MicroLEIS DSS.

MicroLEIS DSS constituye un amplio conjunto de herramientas informáticas de utilidad en la toma de decisiones para la sostenibilidad de múltiples esquemas agroecológicos. Su diseño sigue un esquema de caja de herramientas integradas de diferentes tipos de software: bases de datos, aplicaciones estadísticas, sistemas expertos, redes neuronales, desarrollos Web, aplicaciones GIS y otras tecnologías de la información.

El Modelo Raizal es del tipo “sistema experto” y se utiliza para predecir los riesgos de vulnerabilidad de la tierra a la erosión hídrica. En función de un conjunto de características relacionadas con el lugar, del suelo y del clima se evalúan los riesgos de vulnerabilidad a la degradación por erosión hídrica y eólica de las tierras agrícolas (es aquí donde entran los parámetros del clima, teniéndose en cuenta en el modelo la precipitación media mensual y la precipitación máxima mensual). Los árboles de decisión relacionan las cualidades de la tierra con las características de la tierra. Todos los modelos de MicroLEIS son modelos de área simple y no espaciales, pero tienen la potencialidad de espacialización, es decir de integrarse en SIG

Mediante el modelo Raizal se podría realizar una evaluación cualitativa utilizando el Mapa de Suelos de España Península y Baleares (Escala 1:1.000.000. CSIC. 1968) obteniendo un valor de riesgo para cada unidad de suelo, en función de los distintos escenarios climáticos, cuestión que podría plantearse en futuros estudios, pero que quedan fuera del ámbito de este estudio, dado que el modelo propuesto en el planteamiento metodológico es la ecuación USLE.

3. Estimación con USLE en la Comunidad Valenciana: modificando el factor R

La cita en el proyecto ECCE es la siguiente:

“La aplicación de los supuestos de cambio climático del capítulo 1 de este informe a la estimación del riesgo de erosión con la USLE en la Comunidad Valenciana sólo produce incrementos moderados del riesgo de erosión extremo, entre un 5 y un 6 %. (...) En general, el riesgo de erosión será mayor en aquellas zonas que ya presentan un riesgo alto (Fig. 11) y será igual, o incluso puede disminuir, en aquellas zonas de suelos más ricos.”

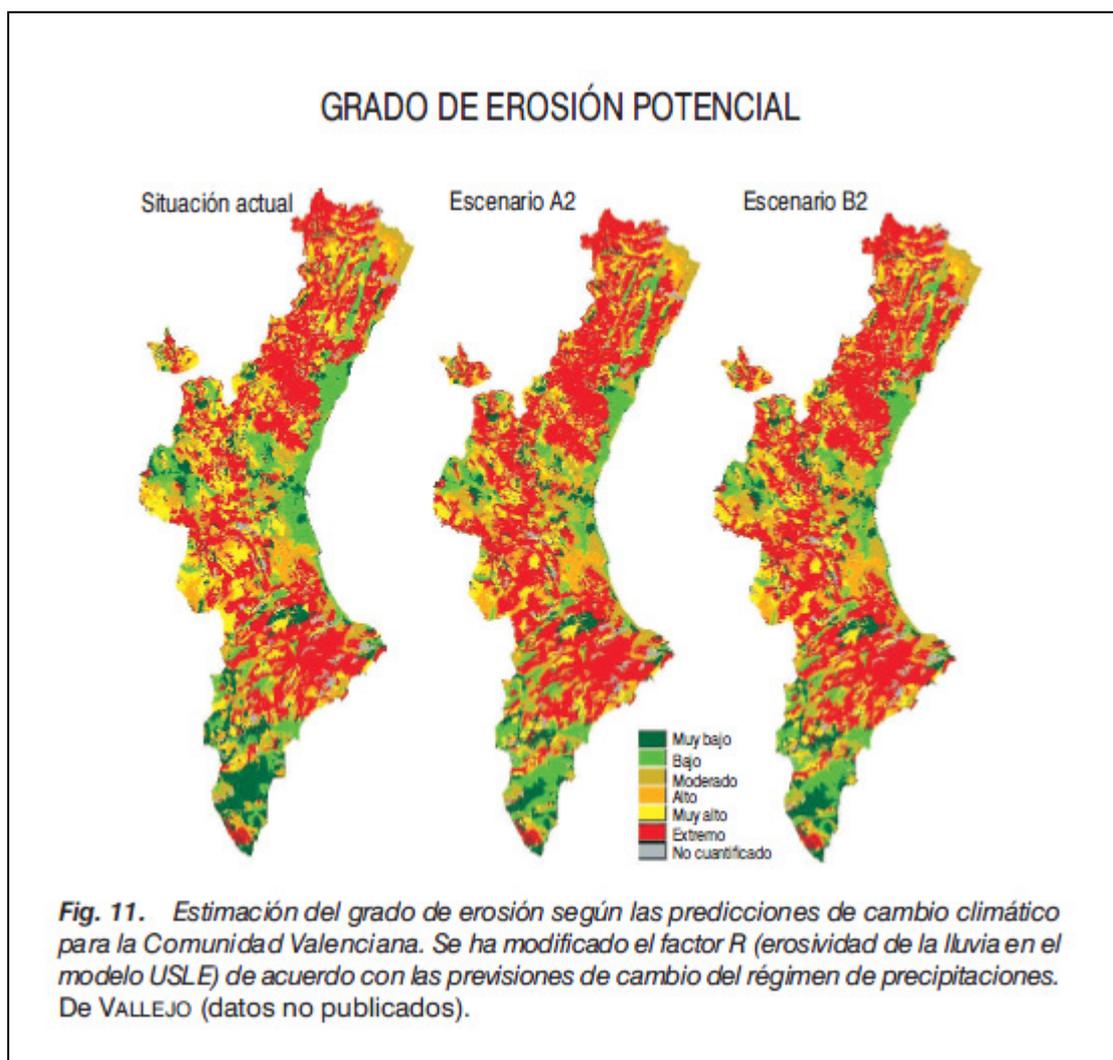


Figura 3: Extracto de “Evaluación Preliminar de Impactos en España por Efecto del Cambio Climático” (Proyecto ECCE, 2005).

Se realizó una consulta a los expertos que habían realizado esta estimación en la Fundación CEAM (Centro de Estudios Ambientales del Mediterráneo). Utilizaron una aplicación del modelo USLE disponible para la Comunidad Valenciana, en la que discriminaron el factor R del resto de parámetros.

Obsérvese en el gráfico que lo que se estimó en este ejercicio fue la erosión potencial, es decir sin tener en cuenta el factor C de la USLE que estima el grado de protección del suelo por la vegetación.

Para cuantificar el impacto de las variaciones climáticas en el grado de erosión potencial, se han estimado las pérdidas de suelo en función de la USLE, para lo cual se ha recalculado el factor R (Erosividad de la lluvia) en cada uno de los escenarios (para validar los resultados, también se ha recalculó el factor R en la situación actual para compararlo con los valores disponibles). Se aplicó la regresión formulada por ICONA-Intecsa (1981) para la cuenca mediterránea:

$$R = 2.375 Pd2 + 0,513 Pmex - 94.4 + 37Z$$

Pd2 = Precipitación máxima diaria con un periodo de retorno de dos años

Pmex = Precipitación del mes más lluvioso

Como datos de proyecciones se utilizaron las proporcionadas por el proyecto PROMES. Sin embargo, los valores de la precipitación máxima diaria con un periodo de retorno de dos años no provenían de las proyecciones de PROMES, sino que se estimaron de acuerdo con la siguiente hipótesis: “En un escenario de cambio climático, cabe suponer que las precipitaciones se producirán de forma más irregular y con un incremento en la torrencialidad, no obstante, en los diferentes escenarios se ha estimado que se verá incrementada en una proporción similar a la variación (positiva o negativa) en la precipitación anual (en comparación con la precipitación promedio).”⁸

3.4.2. Índice de erosividad de la lluvia (Factor R de la USLE) y consideraciones sobre la incertidumbre en cuanto a la estimación de las precipitaciones, en particular de las precipitaciones máximas

La erosividad de la lluvia es el segundo de los factores que intervienen en la desertificación para los que será posible obtener mapas de las situaciones futuras. La consideración de la erosividad de la lluvia en el mapa de riesgo de desertificación del PAND se establece a través del factor R de la USLE. El cálculo de la R, tanto para el modelo USLE en el caso del Mapa de Estados Erosivos, como para el modelo RUSLE en el caso del Inventario Nacional de Erosión de Suelos (INES) se basa en el estudio “Agresividad de la lluvia en España” (1988) publicado por el Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Este trabajo, a través de la formación de un banco de datos y el tratamiento de la información pluviográfica y pluviométrica recopilada, logró obtener el factor R mediante ecuaciones de regresión utilizando variables pluviométricas y la zonificación de la distribución mensual del factor R (la metodología empleada se explica con detalle en el capítulo 4 de generación de mapas)

Para la elaboración de una cartografía de la erosividad de la lluvia, bien de la situación actual, bien de situaciones futuras, las variables climáticas necesarios son resúmenes mensuales para cada estación de:

- Precipitación total mensual
- Precipitación máxima en 24 horas mensual

Estas variables se pueden obtener a partir de las series de datos diarios de precipitación de las proyecciones climáticas.

Como ya se ha dicho, durante la etapa del planteamiento metodológico de este trabajo se puso de manifiesto la preocupación existente por las altas incertidumbres que se obtuvieron con la 1ª Generación de Escenarios Regionalizados (1ªGER) en cuanto al comportamiento de los modelos en los valores extremos, sobre todo en lo relativo a las precipitaciones. Dado que el cálculo del factor R se basa precisamente en las P máximas, se consideró necesario profundizar en esta cuestión, estudiando detalladamente los resultados de trabajos existentes en España sobre el tema, entre otros:

- “Evaluación Preliminar de Impactos en España por Efecto del Cambio Climático” (Proyecto ECCE). 2005: Capítulo 12. Impactos sobre los riesgos naturales de origen climático. A. Riesgo de crecidas fluviales
- Evaluación del impacto del cambio climático en los recursos hídricos en régimen natural. CEDEX, diciembre de 2010.

⁸ Esta hipótesis, como veremos, contrasta con la utilizada en el ejercicio de generación de los mapas de riesgo de desertificación realizado para el presente trabajo, puesto que se ha contado con las proyecciones de precipitaciones máximas diarias procedentes de las simulaciones de la 2ª GER.

Además, se ha tenido en cuenta el Informe Especial de 2010 sobre eventos extremos del IPCC: *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation (SREX)*, que constituye una importante referencia para este trabajo.

Se incluyen a continuación extractos de estos trabajos en los que se aborda el tratamiento de las incertidumbres en cuanto a eventos extremos.

- “Evaluación Preliminar de Impactos en España por Efecto del Cambio Climático” (Proyecto ECCE). 2005. 12. Impactos sobre los riesgos naturales de origen climático. A. Riesgo de crecidas fluviales

El impacto del cambio climático debido al efecto invernadero sobre las inundaciones constituye una de las principales incertidumbres de todos los informes realizados hasta el momento por los organismos internacionales. En el último informe⁹ realizado por el IPCC (IPCC 2001) se indica que el incremento en las concentraciones de gases de invernadero y aerosoles en la atmósfera producirá un aumento de la variabilidad climática y de los eventos extremos en numerosas partes del mundo. En Europa, la frecuencia y severidad de las crecidas podría incrementarse, especialmente en las grandes cuencas del centro y oeste de Europa debido a la concentración de la precipitación en los meses de invierno y primavera (IPCC 1996). Igualmente, el incremento de las temperaturas al final de la primavera y durante el verano puede conducir al incremento de las precipitaciones torrenciales de carácter convectivo en pequeñas cuencas y, por tanto, al aumento de los riesgos debidos a crecidas relámpago, especialmente en zonas de montaña y en las regiones mediterráneas.

En el informe Acacia (Parry 2000) se señala que el principal riesgo en los países del sur de Europa se deriva de las crecidas relámpago debidas a lluvias torrenciales. En este informe, se indica que para el 2020, los veranos anómalamente calurosos, como el producido en el 2003, ocurrirán con una frecuencia entre cuatro y cinco veces mayor que en la actualidad. A pesar de todas estas conjeturas, la realidad es que ninguno de los modelos de circulación atmosférica global o regional es capaz de generar escenarios fiables sobre los cambios esperables en relación con los eventos extremos, y estas suposiciones parten de la base de que el cambio climático alterará todo el volumen de precipitación mensual en la misma proporción, sin tener en cuenta la concentración de lluvia en periodos temporales cortos (escala horaria o diaria).

En relación con las cuencas mediterráneas, los mecanismos que se establecen entre clima y crecidas son mucho más complejos y, hasta el momento, no se han establecido índices válidos ni se han desarrollado modelos que permitan realizar predicciones dentro de un escenario de cambio climático. En principio, resulta probable que el incremento de la temperatura durante los meses de verano puede favorecer la generación de tormentas (Tabla 12.1.2). Estas tormentas tendrían un carácter netamente local, y podrían desencadenar crecidas relámpago en cuencas de tamaño pequeño. En estos casos, las diferencias de temperatura entre el Mediterráneo y el continente favorecen la creación de núcleos convectivos de precipitación especialmente en otoño.

⁹ Este párrafo es un extracto literal del Proyecto ECCE elaborado en el año 2005. Desde entonces ha habido otros informes del IPCC.

Tabla 12.A.2. Análisis cualitativo de la respuesta de diferentes cuencas españolas a posibles impactos del Cambio Climático.

Posible impacto del Cambio Climático	Guadalquivir Guadiana Tajo	Duero	Norte	Ebro	Cuencas Internas de Cataluña	Levante/Sur
Cambio en la circulación zonal (NAO positiva)	-Extremos (+intensos) +Ordinarias (-Intensas)	-Extremos (+intensos) +Ordinarias (-Intensas)				
Aumento de fenómenos de gota fría			+Irregularidad de extremos		+Irregularidad de extremos	+Irregularidad de extremos crecida/sequías
Generación de núcleos convectivos	+Crecidas relámpago	+Crecidas relámpago	+Crecidas relámpago	+Crecidas relámpago	+Crecidas relámpago	+Crecidas relámpago
Cambios bruscos en la temperatura		+Crecidas por deshielo		+Crecidas por deshielo	+Crecidas por deshielo	

- Evaluación del impacto del cambio climático en los recursos hídricos en régimen natural. CEDEX, diciembre de 2010.

El estudio del CEDEX dedica un capítulo al análisis de eventos extremos centrándose en las precipitaciones máximas y en las sequías. Se destaca en el mismo la importancia de este análisis para el estudio del impacto del cambio climático en los cálculos de caudales máximos y, por consiguiente, en las inundaciones. Para el trabajo que nos ocupa es también fundamental porque la precipitación máxima diaria es un parámetro fundamental para el cálculo de la erosividad de la lluvia.

Pero una de las conclusiones más importantes del análisis realizado sobre las precipitaciones máximas diarias es que existen importantes incertidumbres derivadas de las diferencias de resultados entre proyecciones y del contraste entre los datos observados y los datos proyectados para el periodo de control.

El análisis se introduce con previsiones y estimaciones ya existentes, que apuntan a la evidencia de un aumento de la frecuencia e intensidad de los episodios de precipitación:

Las previsiones del VI Documento Técnico del IPCC (Bates et al, 2008) en latitudes medias similares a la que ocupa España indican como probable el aumento de la frecuencia e intensidad de los episodios de precipitación, así como una disminución de valores medios en verano. Según el documento referido, Christensen (2003), Giorgi et al (2004), Kjellström (2004) y Kundzewicz et al (2006) pronostican que a lo largo del siglo XXI habrá un aumento de la intensidad de los episodios de lluvia diaria que afectaría a áreas en las que disminuye la PRE media, como en Europa central o en el Mediterráneo. España se encuentra situada bajo el ámbito de influencia mediterránea y atlántica, lo que complica la elaboración de previsiones y el uso de los resultados de los MCGAO¹⁰ y regionalizaciones posteriores. Algunos autores destacan la presencia de mecanismos generadores de lluvia extrema que escapan a la escala de trabajo de los MCGAO. Sumner et al (2003) y Llasat (2001) indican que el impacto del cambio climático sobre la región mediterránea durante los veranos no es evidente, debido al fuerte componente de convectividad de la precipitación y a su gran variabilidad espacial.

Sin embargo, los resultados de las proyecciones en cuanto a las precipitaciones máximas arrojan las siguientes conclusiones:

“No hay evidencias de un aumento generalizado de precipitación máxima diaria conforme avanza el s. XXI. Solo en algunas zonas de la submeseta norte, Duero,

¹⁰ MCGAO: Modelos de la circulación general acoplada atmósfera-océano

cabeceras del Tajo al Segura y Pirineo se observa un crecimiento que no es evidente en el resto de España. No obstante, sí aumenta la proporción de la precipitación máxima diaria respecto a la precipitación anual debido al mayor peso del descenso de esta última. En cuanto a la estacionalidad, no parece haber variaciones importantes salvo ligeros desplazamientos mensuales. Las proyecciones dan diferentes resultados en las distintas regiones, lo que hace difícil concluir un patrón espacial de variación.”

Como para el resto de variables estudiadas, el trabajo del CEDEX incluye la comparación entre los datos observados del periodo de control y los datos de ese mismo periodo pero utilizando las proyecciones climáticas, obteniendo así una estimación de la incertidumbre asociada a las proyecciones.

Al comparar las características de las series observadas y las proyectadas durante el periodo 1961-1990, se comprueba que las propiedades estadísticas de las series de precipitaciones máximas de las proyecciones resultan infravaloradas y que sus distribuciones de frecuencia son distintas de las procedentes de las series observadas. Tal como ocurre con la precipitación media anual, los valores de Pmax anual simulados presentan importantes diferencias con respecto a los valores observados, siendo las medias de las series registradas mayores que las de las proyecciones. Además, los errores de cada una de las proyecciones varían con la región, lo que entra en conflicto con la hipótesis de equiprobabilidad de cualquiera de las proyecciones

En definitiva, y tal y como se recoge en el apartado 7.1.4 Resultados finales (del análisis de las precipitaciones máximas):

“Las discrepancias entre valores observados y proyectados añaden incertidumbre a cualquier tipo de conclusión que se pueda extraer de este análisis. Los cambios de las leyes de frecuencia regionales estimados para el s. XXI son reducidos. Las diferentes proyecciones no muestran un patrón común, aspecto que destaca en los mapas de desviaciones de periodo de retorno de 100 años. Por último, los escenarios B2 llegan a dar resultados pesimistas respecto a los A2. Conforme a las conclusiones del informe técnico del IPCC y los cambios en lluvia y temperatura, cabría esperar impactos más claros en el régimen de extremos.”

En el informe de la RED TEMÁTICA CLIVAR-ESPAÑA: “*Clima en España: pasado, presente y futuro. Informe de evaluación del cambio climático regional*. (Enero, 2010)”, que resume los informes realizados para España con la anterior generación de escenarios, se apuntaba a un descenso de las precipitaciones totales pero no a un aumento en los valores extremos.

Por último, las conclusiones de la publicación “*Generación de escenarios regionalizados de cambio climático para España*. (AEMET, 2009)”, recogen también la escasa consistencia de los resultados en relación con las proyecciones de la precipitación:

“Las proyecciones de precipitación muestran una mayor dispersión de resultados aunque parece haber una tendencia a la reducción en el sur de la Península con un gradiente en el cambio que en general suele ser sur-norte. La distribución anual muestra también poco acuerdo entre las diferentes proyecciones. La poca robustez de los resultados relativos a la precipitación consecuencia, por una parte, del error que introducen los métodos de regionalización cuando se aplican a la precipitación y, por otra, de la posición de la Península Ibérica en la zona de transición entre las latitudes altas, en las que aumentará la precipitación, y la zona subtropical, en la que habrá reducciones de precipitación, plantea para los próximos años el desafío de la mejora de estas proyecciones que serán determinantes para muchos sectores socioeconómicos.

En conclusión, es destacable la gran incertidumbre del comportamiento de los modelos de la 1ª GER en cuanto a las precipitaciones, en la media anual y en los máximos y mínimos de precipitación, tanto en lo que se refiere a la distribución

estacional, como en lo que se refiere a las precipitaciones máximas diarias, sobre todo en estas últimas, factores de gran importancia para el cálculo de la erosividad de la lluvia.

En lo que se refiere a los escenarios manejados en la segunda generación de escenarios regionalizados, es decir, en la colección de Escenarios PNACC-2012, todavía no se puede afirmar con seguridad que las predicciones en cuanto a los valores extremos de precipitación tengan una menor incertidumbre que en la 1ª GER. Estudios realizados en el marco del proyecto ENSEMBLES, concluyen que en lo que respecta a las precipitaciones máximas diarias se aprecia, para finales de siglo (2071-2100), una leve disminución pero con mucha incertidumbre en toda la península. Es decir, en la mayor parte de la Península el porcentaje de modelos que coinciden en el signo del cambio está entorno al 50-60%. Por otro lado, en lo que respecta a la precipitación total existe un mayor consenso (>90%) por parte de los modelos en su disminución en todo el territorio peninsular y las Islas Baleares.

No se han publicado todavía las conclusiones derivadas de los grandes proyectos que se han dedicado a la generación de escenarios regionalizados, esTcena y ESCENA, y la mayoría de los análisis realizados hasta ahora se han centrado más en los valores medios que en los extremos. No obstante, al igual que se ha observado con los modelos del proyecto ENSEMBLES, no se obtienen resultados concluyentes en el signo y la magnitud del cambio para las precipitaciones máximas diarias medias.¹¹

Los resultados obtenidos en este trabajo con los escenarios analizados corroboran estas apreciaciones preliminares: las variaciones de cambio en las precipitaciones máximas diarias no reflejan tendencias significativas ni de disminución ni de aumento de las precipitaciones máximas.

- IPCC, 2012: Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change

En cuanto a las evidencias de las observaciones recopiladas desde 1950 en algunos extremos, este informe del IPCC sitúa en el nivel de “probable” los cambios observados en las precipitaciones intensas: “Es probable que haya más regiones en las que haya habido aumentos estadísticamente significativos en el número de episodios de precipitación intensa (por ejemplo, el percentil 95) que regiones en las se hayan producido disminuciones estadísticamente significativas, pero hay fuertes variaciones regionales y subregionales en las tendencias.”

Al referirse a la probabilidad y/o confianza en las proyecciones del clima para el final del siglo XXI en relación con el del siglo XX, el informe enumera tres fuentes principales de incertidumbre de las proyecciones: la variabilidad natural del clima, incertidumbres en los parámetros y estructura de los modelos climáticos y la incertidumbre derivada de las proyecciones de las emisiones futuras. Pues bien, en el caso de los eventos de precipitaciones extremas, se señala que: “la incertidumbre en los cambios proyectados para el final del siglo XXI es más el resultado de incertidumbres en los modelos climáticos que en la emisiones futuras. Por el contrario, para el caso de las temperaturas extremas se señala a las emisiones como la principal causa de incertidumbre.”

Es relevante la gran diferencia en el nivel de probabilidad (ver cuadro de texto) otorgado en este informe a los cambios previstos en temperatura y precipitación. A la predicción sobre la temperatura se le otorga el máximo nivel de probabilidad (*Virtually*

¹¹ Recuérdese que el presente trabajo se desarrolló durante los años 2011 y 2013.

certain) mientras que a la predicción sobre la frecuencia de precipitaciones intensas se le otorga únicamente el nivel de “*likely*”:

- Es *prácticamente cierto* el aumento de la frecuencia y magnitud de las temperaturas máximas diarias y la disminución de las mínimas a escala global a finales del siglo XXI.
- Es *probable* que la frecuencia de fuertes precipitaciones o la proporción de las precipitaciones intensas respecto a la precipitación total se incrementen en el siglo XXI en muchas áreas del mundo. Este es particularmente el caso en las altas latitudes y regiones tropicales, y en invierno en las latitudes medias septentrionales. (...) Hay *un nivel medio de confianza* en que, en algunas regiones, el aumento de precipitaciones intensas se produzca a pesar de la disminución en la precipitación total proyectada. Para un conjunto de escenarios de emisiones (SRES A2, A1B y B1), es *probable* que el valor máximo anual de la precipitación en 24 horas para un periodo de retorno de 20 años pase a serlo para un periodo de retorno de entre 5 a 15 años a finales del siglo XXI en muchas regiones. En la mayoría de las regiones los escenarios de emisiones altas (A1B y A2) conducen a una mayor disminución prevista del período de retorno. No obstante, en algunas regiones lo que se prevé son aumentos en los períodos de retorno o cambios estadísticamente no significativos.

Extracto de “*Box SPM.2 | Treatment of Uncertainty*” (p.21)

The following terms indicate the assessed likelihood:

Term*	Likelihood of the Outcome
Virtually certain	99–100% probability
Very likely	90–100% probability
Likely	66–100% probability
About as likely as not	33–66% probability
Unlikely	0–33% probability
Very unlikely	0–10% probability
Exceptionally unlikely	0–1% probability

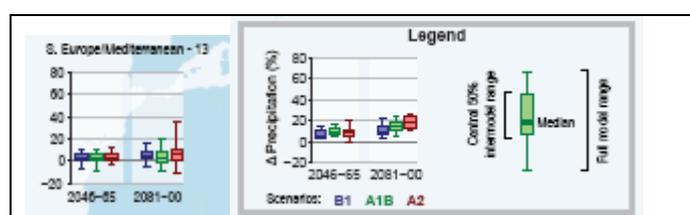
* Additional terms that were used in limited circumstances in the Fourth Assessment Report (extremely likely: 95–100% probability, more likely than not: >50–100% probability, and extremely unlikely: 0–5% probability) may also be used when appropriate.

El informe desciende al nivel regional, señalando para el sur de Europa lo siguiente:

- *Cambios observados* (en general utilizando como valores de referencia los del periodo 1960-1990): Para Europa en general se considera un nivel medio de confianza en las tendencias de las precipitaciones fuertes, debido en parte a las inconsistencias detectadas en los diversos estudios y en las diversas regiones, sobre todo en lo que se refiere a las precipitaciones fuertes estivales. La incertidumbre en general es mayor en el sur de Europa y la región mediterránea, donde hay poca confianza en las tendencias (Kiktev et al., 2003; Klein Tank and Können, 2003; Alexander et al., 2006; García et al., 2007; Pavan et al., 2008; Zolina et al., 2009; Rodrigo, 2010).
- *Cambios proyectados* (comparando el periodo de 1961-1990 o 1980-2000 con el periodo 2071-2100 o 80-2100, y para los escenarios de emisiones A2/A1B): para la región del sur de Europa y el Mediterráneo las predicciones en cuanto a las precipitaciones fuertes tienen un bajo nivel de confianza, dependiendo de la región y de la estación del año. Se pronostica un cambio, si bien lo califican

como “inconsistente”, en la intensidad de las precipitaciones fuertes , pero mientras que en algunas regiones se prevé un aumento de la intensidad en todas las estaciones excepto en el verano, en otras regiones, como en la Península Ibérica, se prevé una disminución, (Goubanova y Li, 2007; Giorgi y Lionello, 2008; Giannakopoulos et al., 2009).

La figura adjunta muestra un extracto de la Figura 3-7a del informe del IPCC, en la que se muestran los cambios proyectados (%) en los valores de la precipitación máxima anual en 24 horas para un periodo de retorno de 20 años. Los gráficos de barras (véase la leyenda para mayor información) muestran los resultados del promedio de las proyecciones regionales para dos horizontes temporales, 2046-2065 y 2081-2100, en comparación con finales del siglo XX (1981-2000) y para tres escenarios de emisiones SRES diferentes (B1, A1B, A2). Los resultados se basan en 14 Modelos de Circulación Global que contribuyen al proyecto CMIP3 (*Coupled Model Intercomparison Project*).



Como se ve en la figura, la media de los cambios es de muy baja magnitud y hay valores de cambio tanto en un signo como en otro, lo que justifica que se califique estos cambios previstos en las P24 para el periodo de retorno de 20 años, de nuevo como de “baja confianza”.

En definitiva, y como se pone de manifiesto en el resumen del informe: “los modelos climáticos simulan los cambios observados en las temperaturas extremas relativamente bien, pero la frecuencia, distribución e intensidad de las precipitaciones se simula bastante peor. Asimismo, las proyecciones en los distintos modelos climáticos de los cambios en las temperaturas extremas tienden a ser más consistente (en términos de tendencia) que para los extremos de precipitación (húmedos y secos)”.

A pesar de todas estas inconsistencias, el informe pone de manifiesto que: “Son muchos los factores que intervienen en el nivel de confianza de los resultados sobre los cambios en los extremos, pero sin embargo, un bajo nivel de confianza en los cambios observados y proyectados en un evento extremo determinado, no implica ni excluye la posibilidad de cambios en ese extremo.”

3.4.3. Cubierta vegetal /Usos del suelo

Se ha realizado una recopilación de estudios y trabajos más o menos recientes de evaluaciones del impacto del cambio climático sobre la cubierta vegetal y los usos del suelo, con objeto de analizar las posibilidades de utilizar estos estudios, bien en el marco del planteamiento metodológico expuesto (principalmente para el factor C de la USLE), bien para recopilar conclusiones de estos estudios que permitan, de una forma cualitativa, evaluar la influencia que los cambios previstos por la comunidad científica tienen en los procesos de desertificación en España.

Se han realizado contactos con los responsables de los proyectos considerados de interés, planteando una serie de ideas o sugerencias para la aplicación de sus estudios en el ejercicio de evaluación del riesgo de desertificación en función de los escenarios climáticos. De forma general, la cuestión que se planteaba trataba de

dilucidar si de dichos estudios se podía derivar una cobertura cartográfica en el nivel nacional que estimara, de acuerdo con los escenarios climáticos, los cambios en la cubierta vegetal / usos del suelo y de ahí deducir los cambios en la capacidad de protección del suelo por parte de la vegetación. En definitiva, obtener un hipotético cambio del factor C para su introducción en el modelo USLE.

Se realizó también una recopilación de evaluaciones de carácter genérico recogidas en diversos trabajos y publicaciones relacionadas con el impacto del cambio climático en la cubierta vegetal y en los usos del suelo, como son:

- Impactos en bosques. “Evaluación Preliminar de Impactos en España por Efecto del Cambio Climático” (Proyecto ECCE). 2005.
- Sostenibilidad en España 2011. CAPÍTULO ESPECIAL. LOS BOSQUES EN ESPAÑA (2011) AÑO INTERNACIONAL DE LOS BOSQUES. Impactos del cambio global sobre los ecosistemas forestales españoles.

De forma resumida, los principales efectos del cambio climático sobre diferentes aspectos relacionados con la estructura y el funcionamiento de los ecosistemas terrestres son los cambios fenológicos, el decaimiento forestal, la pérdida de especies, los cambios en la estructura y diversidad de las comunidades y los cambios en la disponibilidad de nutrientes en el suelo.

Los cambios previstos o esperables derivan fundamentalmente del hecho de que la reserva de agua en el suelo disminuirá conforme aumente la temperatura y la demanda evaporativa de la atmósfera. Esto, unido a la previsible disminución de las precipitaciones supondrá, un importante factor de estrés para el arbolado. Los principales efectos provocados por la previsión de un incremento del déficit hídrico en los bosques serían:

- La reserva hídrica de los suelos forestales se reducirá dificultando la superación de los episodios de sequía estival: En aquellos enclaves en los que el bosque dispone de agua suficiente para compensar la mayor demanda hídrica asociada al aumento de temperatura y evapotranspiración potencial, se puede prever un aumento de la producción forestal. Ahora bien, en los lugares con déficit hídrico, que son frecuentes entre los ecosistemas forestales de España, se pueden esperar cambios importantes que van desde la reducción de la densidad de árboles hasta cambios en la distribución de las especies. En casos extremos, áreas actualmente ocupadas por bosques pueden ser sustituidas por matorrales o pastizales y áreas actualmente ocupadas por matorral pueden quedar expuestas a importantes impactos erosivos.
- Numerosos estudios documentan la magnitud del problema, en forma de reducciones significativas del crecimiento, episodios de mortalidad masiva, o limitaciones manifiestas en la regeneración, etc., en diversas formaciones forestales.
- Consecuencia de lo anterior, se reduciría el papel de los bosques como creadores de suelo y reguladores del ciclo hidrológico.

En cuanto a los cambios en los usos del suelo, en el proyecto ECCE se puso de manifiesto que, a corto plazo, los cambios de uso del territorio obedecen sobre todo a factores culturales, políticos y socioeconómicos, más que al impacto directo del clima, y que los efectos de estos cambios sobre el suelo pueden ser tanto o más importantes que los del mismo cambio climático. En el último medio siglo, España, como gran parte de Europa, ha sufrido grandes transformaciones del territorio, transformaciones que continúan manifestándose e interaccionarán de forma compleja con los efectos del cambio climático en los suelos. De ahí la dificultad inherente de estimar qué consecuencias puede haber sobre el incremento del riesgo de desertificación.

Los cuatro escenarios económicos del IPCC conllevan predicciones sobre cambios de usos de suelos entre 1990-2050. Se pueden resumir en los aspectos que afectan a los usos de suelos como sigue:

- A1 (rápido crecimiento económico): disminución ligera de tierras cultivadas, aumento de pastos. Disminución de bosques y otros usos. Este escenario supone que se mantienen las tendencias anteriores en los cambios de usos de suelos, gobernadas por las fuerzas económicas.
- A2 (identidades locales). No se han desarrollado explícitamente cambios de usos de suelos en este escenario.
- B1 (economía de servicios e información): disminución más ligera que en A1 de la superficie cultivada, disminución de pastos y aumento de bosques y otros usos.
- B2 (economías locales, sostenibilidad): aumento importante de los cultivos y pastos, disminución de bosques y fuerte disminución de otros usos.

En Europa (y España), los escenarios económicos A1 y B1 comportarían a medio plazo la continuidad del lento abandono de tierras agrícolas marginales. Probablemente, a pesar de las predicciones de A1 y B2, los bosques aumentarían su superficie a partir de la colonización de cultivos abandonados.

Se repasan a continuación los principales proyectos analizados y sus resultados, así como las posibilidades de aprovechamiento para este trabajo que se plantearon.

En lo que se refiere a los estudios centrados en los ecosistemas forestales, se ha considerado que existen dos principales líneas de trabajo que hemos agrupado así:

- Estudios de evaluación de la *evolución de las distribuciones potenciales* de especies forestales.
- Estudios de impacto del cambio climático sobre el *funcionamiento de los ecosistemas forestales*

Se han analizado también los proyectos relacionados de forma más o menos directa con la evaluación del impacto del cambio climático en la agricultura, si bien, como se verá, en este caso, no se encontró nada que pudiera ser de utilidad para el objetivo de cartografiar los cambios.

- ***Estudios de evaluación de la evolución de las distribuciones potenciales de especies forestales***

Bajo la línea de trabajo de impactos del cambio climático sobre el sector "biodiversidad" se han realizado o están en curso varios estudios y/o proyectos que estiman la distribución de determinadas especies, entre ellas las principales especies forestales. Los proyectos analizados en esta línea son:

- ***IMPACTOS, VULNERABILIDAD Y ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO DE LA BIODIVERSIDAD ESPAÑOLA. 1. FLORA Y VEGETACIÓN. "Proyecciones de las áreas de distribución potencial de la flora amenazada y las especies forestales de la España peninsular por efecto del cambio climático"***
 - *Fuente: Proyecto en el marco del 1^{er} PNACC.*
 - *Objetivos: Realizar una identificación de los hábitat y los taxones españoles más vulnerables al cambio climático en España, y estimar su capacidad de adaptación al mismo durante el siglo XXI*

- Proyecto MARBOCLIM. Efectos del cambio climático sobre la distribución actual y pasada de los bosques ibéricos.

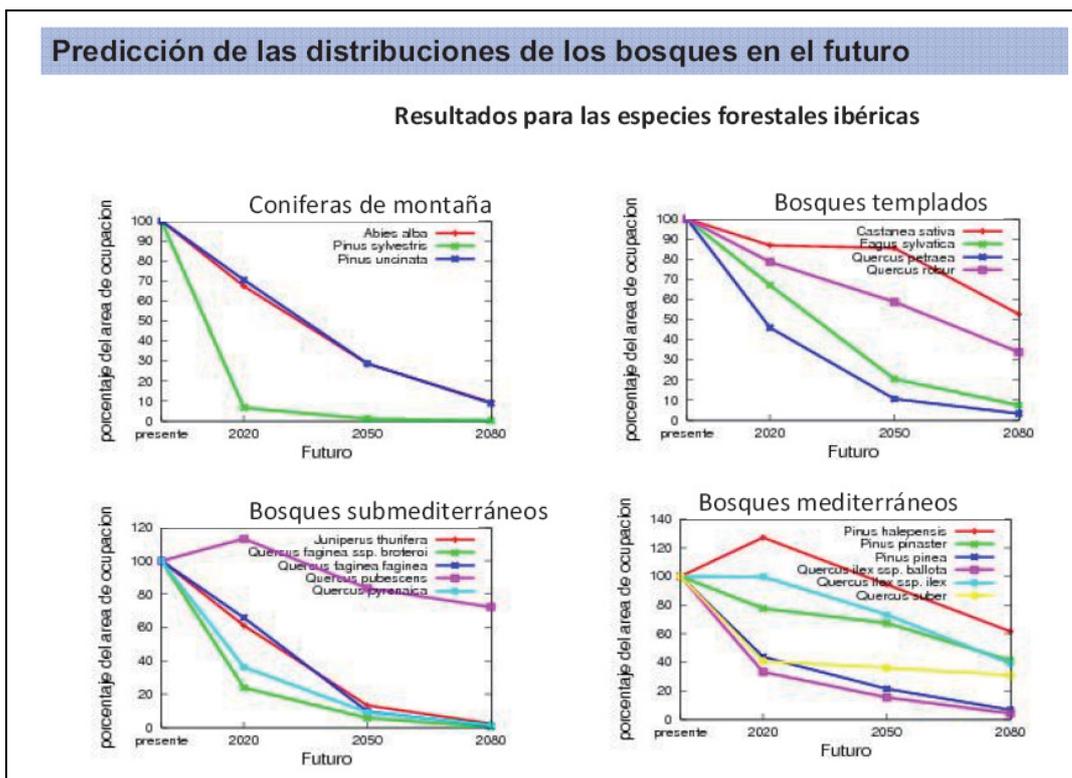
<http://www.uam.es/proyectosinv/Mclim/results.html>

- Fuente: Proyecto presentado en el Seminario Sectorial Adaptación al Cambio Climático en Bosques. Noviembre de 2011
- Objetivos: estimación del efecto del cambio climático sobre la distribución de los bosques peninsulares, tanto en el pasado como en el futuro
- Contacto: Rut Sánchez de Dios (UCM).

- Atlas de idoneidad de especies arbóreas de la Península Ibérica

<http://www.opengis.uab.cat/ldoneitatPI/presentacio.html>

- Fuente: servidor cartográfico desarrollado en el marco del Ministerio de Ciencia y Tecnología, Plan Nacional I+D+I, Proyecto “Cambio climático y vulnerabilidad de especies leñosas a diferentes escalas: distribución regional y dinámica poblacional local” (CGL2006-01293/BOS) y Proyecto Consolider Montes (CSD2008-00040).
- Objetivos: “Podemos definir este Atlas como un conjunto de mapas que permiten determinar el grado de adecuación a las condiciones climáticas y/o topográficas de las principales especies formadoras de bosques. Con estos mapas podemos saber, para cada 200 m sobre todo el territorio de la Península Ibérica, cuál es la idoneidad topo-climática definida entre cero (baja idoneidad) y 1 (máxima idoneidad). Además, estos valores se pueden consultar para el escenario climático actual (periodo 1950-1998) así como para las proyecciones de futuro utilizando los escenarios propuestos por el Hadley Center (proyecciones socio-económicas A1f1 y A2).”



Fuente: Presentación del proyecto MARBOCLIM en el Seminario Sectorial Adaptación al Cambio Climático en Bosques. Noviembre de 2011

Figura 4. Resultados del proyecto MARBOCLIM. En los gráficos se puede observar una reducción generalizada de la superficie de los hábitats potenciales de las formaciones boscosas.

El denominador común de estos proyectos es la obtención de mapas de la distribución potencial de las especies forestales arbóreas en el futuro como consecuencia de los cambios de temperatura y precipitación. Los resultados obtenidos en estos proyectos

coinciden en afirmar que la mayor parte de las especies forestales analizadas ven disminuida su área potencial de distribución por el cambio climático.

Ahora bien, no se dispone de ningún estudio cartográfico centrado en la evolución de las formaciones vegetales, independientemente de su composición específica, y desde el punto de vista de la protección del suelo por la vegetación, la distribución de especies en sí tiene menor influencia que el tipo de formación vegetal (densidad o grado de cobertura, distribución y continuidad horizontal y vertical, ...).

No obstante nos planteamos si se podría deducir de estos estudios algún patrón común de utilidad para *evaluar la evolución de la protección del suelo por la vegetación*, de acuerdo con estos patrones de cambio, como por ejemplo, englobar esas distribuciones potenciales de especies arbóreas y deducir la "variación del porcentaje de superficie potencialmente ocupada por bosques". Como hemos visto en la recopilación de evaluaciones esta hipótesis venía avalada por afirmaciones del tipo: "En casos extremos, áreas susceptibles de albergar sistemas arbolados pueden perder esta condición, pasando a soportar matorrales u otra vegetación de menor porte." (Proyecto ECCE, 2005).

En el cuadro de texto adjunto se desarrolla la hipótesis planteada, si bien hay que dejar constar que tras su evaluación, fue desestimada por considerarse que no tenía el suficiente rigor para obtener conclusiones fiables en cuanto a estimación de la erosión. Entre otras razones, porque estamos hablando de distribuciones potenciales y no reales. Por otro lado, la condición de bosque, sin que vaya acompañado al menos del dato de fracción de cabida cubierta, no es condición suficiente para presuponer una protección mayor del suelo que, por ejemplo, un matorral denso que sustituya a esa formación boscosa.

Hipótesis: Estimación de cambios en la protección del suelo por la vegetación como consecuencia de la predicción de las distribuciones de bosques en el futuro.

(1) capa integrada de zonas donde en el futuro existe potencialidad de una formación boscosa

(2) capa de forestal arbolado actual (distribución real, no la potencial actual)

(1) – (2) la diferencia serían las zonas en las que, por causa del cambio climático se pasaría de bosque a otra formación (en una serie natural de regresión a formaciones de matorral, más o menos degradado) y áreas en las que se pasaría de matorral a bosque (es de suponer que en la mayoría de los casos por elevación del límite altitudinal del bosque)

Es decir se obtendrían las categorías (inspiradas en MARBOCLIM)

Área mantenida *como formación de bosque*

Disminución de área (extinción) *como formación de bosque*

Área expandida (colonización) *como formación de bosque*

Suponiendo, como decimos, el cambio a formaciones de matorral se trataría de, utilizando tablas muy simplificadas del factor C asignar a esas tipologías valores medios de C.

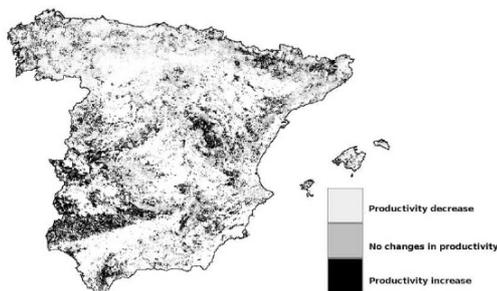
Se obtendría, de forma muy teórica y simplificada, una estimación de la evolución de la erosión debido a la variación en la distribución potencial de las formaciones boscosas.

- **Estudios de impacto del cambio climático sobre el funcionamiento de los ecosistemas forestales**

En general estos proyectos están enfocados a la modelización ecológica. Los proyectos analizados en esta línea son:

- *Uso de escenarios climáticos en modelización ecológica / Impactos del cambio climático sobre los ecosistemas forestales en España.*
 - *Fuente:*
 - *SUM-INIA Análisis multi-escala, modelización y prospectiva del efecto sumidero de los ecosistemas forestales arbolados en España ante un escenario de Cambio Global. (SUM2008-00004-C03-01/BOS).*
 - *INTERBOS. Interacciones ecológicas y Cambio Global en el bosque mediterráneo. Proyecto coordinado del Plan Nacional de I+D+i Ministerio de Ciencia e Innovación (CGL2008-04503-C03-01).*
 - Ejemplos de uso de estimación de propiedades emergentes de los ecosistemas: productividad, carbono acumulado, etc. Han trabajado en un mapa de Estimación de productividad primaria potencial neta (NPP) en el futuro.
- *Observatorio de la Sostenibilidad en España. Indicador: impacto del cambio climático sobre la productividad y distribución potencial de los bosques.*
http://www.sostenibilidad-es.org/sites/default/files/5.10_impacto_del_cambio_climatico_sobre_la_productividad_y_distribucion_potencial_de_los_bosques.pdf
 - *Fuente: En su informe “Sostenibilidad en España 2007”, el Observatorio de la Sostenibilidad en España incluyó el indicador: impacto del cambio climático sobre la productividad y distribución potencial de los bosques.*
 - Definición del indicador: Estimación de los cambios esperables entre 2020 y 2080, en la productividad primaria neta potencial (PPNP) de los ecosistemas forestales (g de materia seca m⁻² año⁻¹), en España y por CCAA. En el apartado de “Relevancia” de este indicador se indica: “La reducción de la PPNP se relaciona directamente con todos los bienes y servicios proporcionados por los bosques tales como la producción de madera, la producción agrícola, el secuestro de carbono y el riesgo de desertificación.”
- *Amenazas y oportunidades en los montes españoles ante el cambio global: El proyecto Consolider MONTES.*
<http://www.creaf.uab.es/montes/>
 - *Fuente: Programa de Seminarios Sectoriales del Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático: ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO EN BOSQUES. Valsaín (Segovia), 14-16 de noviembre de 2011*
 - Desarrollo de modelos de paisaje que integren cambio climático e incendios: desarrollo de modelos de paisaje espacialmente explícitos que integren mecanismo de cambio climático (episodios de sequía, temperatura estival) y cambio de usos especialmente relacionados con incendios.
- *ATEAM Advanced Terrestrial Ecosystem Analysis and Modelling. EVK2-2000-00739). EU Projects Framework V. Key action 2 Global Change, Climate and Biodiversity.*
 - Objetivo: ATEAM creará mapas de vulnerabilidad de los servicios de los ecosistemas considerados como más significativos por *stakeholders*, a escala europea. Con la ayuda de un cuadro de modelización comprensivo, ATEAM producirá simulaciones basadas en escenarios futuros de las tendencias de desarrollo socioeconómico. Estos mapas serán fundamentales en análisis del tipo “si... entonces”. Por ejemplo, bajo ciertos escenarios la Europa mediterránea podría convertirse en un emisor significativo de carbono. Tales informaciones son relevantes dados los compromisos europeos dentro del protocolo de Kioto. Mapas similares serán desarrollados para otros indicadores, como la productividad de madera y los recursos hídricos.

2. Ejemplos de uso. Estimación de NPP en el futuro



Changes in forest productivity between the present and A2 HadCM3 2080 conditions. Light grey indicates a decrease in productivity under global warming conditions and black indicates an increase in productivity for 2100, whereas grey represents areas where our model predicts no changes in productivity.

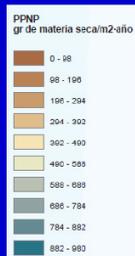
Climate change and forest potential productivity (Índice Rosenzweig):



Current
(climate 1971-2000)



Future ECHAM4
(climate 2011-2040)



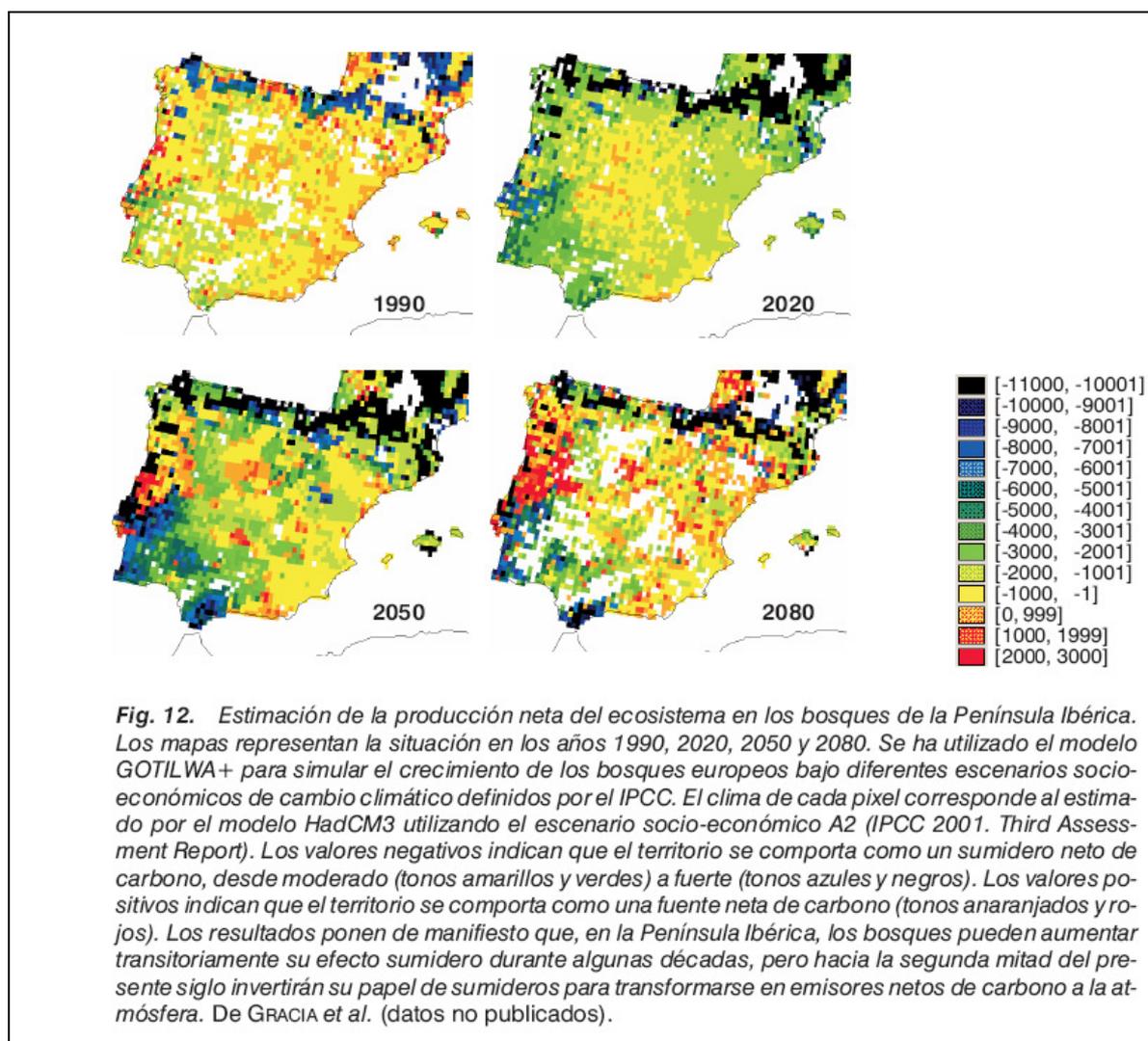
2007. OSE. Mundi-prensa. Ministerio de Medio Ambiente.

Proyectos relacionados con esta ponencia:

SUM-INIA Análisis multi-escala, modelización y prospectiva del efecto sumidero de los ecosistemas forestales arbolados en España ante un escenario de Cambio Global (SUM2008-00004-C03-01/BOS).

INTERBOS. Interacciones ecológicas y Cambio Global en el bosque mediterráneo. Proyecto coordinado del Plan Nacional de I+D+i Ministerio de Ciencia e Innovación (CGL2008-04503-C03-01)

Figura 5. Extractos de la ponencia "Uso de escenarios climáticos en modelización ecológica" en TALLER TÉCNICO SOBRE ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO Y REGIONALIZACIÓN Abril de 2011.



Fuente: figura y pie de figura extractadas de "Evaluación Preliminar de Impactos en España por Efecto del Cambio Climático" (Proyecto ECCE). 2005"

Figura 6. Algunos resultados del proyecto ATEAM. La producción primaria aumentará inicialmente, para disminuir conforme discorra el siglo. Existe un riesgo elevado de que muchos de nuestros ecosistemas forestales se conviertan en emisores netos de carbono durante la segunda mitad del presente siglo.

El interés de estos proyectos puede radicar en que estiman la evolución de determinadas propiedades de los ecosistemas, como son la productividad (Productividad Primaria Neta Potencial), el carbono acumulado o el déficit hídrico, y se planteó su posible utilización como variables a las que relacionar, de manera indirecta, la evolución del papel del ecosistema en la protección frente a la degradación del suelo. La afirmación (que justifica la relevancia del indicador incluido por el Observatorio de la Sostenibilidad en España OSE) de que "la reducción de la PPNP se relaciona directamente con todos los bienes y servicios proporcionados por los bosques tales como la producción de madera, la producción agrícola, el secuestro de carbono y el riesgo de desertificación" apoyaría esta idea.

En el cuadro de texto adjunto se desarrolla la hipótesis planteada, si bien hay que dejar constar que, como en el caso anterior, tras su evaluación, fue desestimada por considerarse que no tenía el suficiente rigor para obtener conclusiones fiables.

Hipótesis: Posible utilización de las estimaciones de la Productividad Primaria Neta Potencial (PPNP, biomasa máxima que puede producir un ecosistema, que depende directamente de la relación entre la temperatura y la disponibilidad hídrica) para relacionarla con la capa de factor C del cultivo de la USLE.

La hipótesis de partida sería suponer que si se estima un crecimiento (o decrecimiento) de estas propiedades la vegetación “protegerá” mejor (o peor). Y en consecuencia, “matizar” de alguna forma el factor C de protección del suelo con dichas variaciones.

Lo mismo podríamos pensar con el carbono acumulado, o con otros parámetros de los que estos proyectos estén proporcionando mapas futuros, previo análisis de los fundamentos teóricos en los que se basen esas estimaciones de futuro.

• **Proyectos de evaluación del impacto del cambio climático en la agricultura**

Los proyectos analizados por su relación forma más o menos directa con la evaluación del impacto del cambio climático en la agricultura han sido los siguientes:

- “El Cambio Climático y la agricultura: adaptación e incertidumbres”.
 - Fuente: Ponencia en el seminario “Implicaciones del Cambio Climático sobre el medio ambiente, el medio rural y el medio marino. 26 de Febrero de 2009
 - Objetivos:” Las investigaciones en curso se centran en las adaptaciones complejas, estudiando en qué condiciones varias adaptaciones sencillas pueden tener efecto acumulativo o sinérgico, en la cuantificación y minimización de las incertidumbres, realizando una cartografía y una jerarquización de la incertidumbre, y por último analizar cómo lo que denominamos escenarios de ruptura pueden generar cambios drásticos en los sistemas agrícolas (por ejemplo, desaparición, traslación en latitud o altitud). Las adaptaciones más complejas, denominadas adaptaciones a largo plazo (cambios en los sistemas de cultivo y agrícolas) deben ser planificadas junto con las Administraciones y los responsables políticos, si bien siempre interaccionando con las Asociaciones de Agricultores. La generación de herramientas que ayuden a la toma de decisiones políticas es uno de los objetivos de nuestro trabajo.”
- Proyecto ARCO. Vulnerabilidad, impactos y adaptación al cambio climático: estudio integrado sobre la agricultura, recursos hídricos y costas
 - Fuente: Ponencia “Necesidades para modelizar el impacto del cambio climático en la agricultura. Proyecto ARCO” en el TALLER TÉCNICO SOBRE ESCENARIOS CLIMÁTICOS Y REGIONALIZACIÓN de abril de 2011.

Hasta ahora no se han obtenido aproximaciones cartográficas sobre estimaciones de PPNP en los usos del suelo agrícolas, parecidas a las realizadas en ecosistemas forestales. No obstante se han analizado, en contacto con sus responsables, las posibilidades de los proyectos, concluyendo que, aún tratándose de interesantes aproximaciones, no ofrecían, por el momento, cartografía relacionada con los cambios de usos agrícolas integrables en nuestro ejercicio de evaluación del riesgo de desertificación.

3.4.4. Consideraciones sobre el factor K

De nuevo se recurre a la Evaluación Preliminar de los Impactos en España por efecto del Cambio Climático (Proyecto ECCE, 2005) para efectuar algunas consideraciones sobre la variación de la erosionabilidad del suelo en función del cambio climático (CC):

- Propiedades edáficas que pueden ser modificadas por el CC serían el contenido en OC, características de la biota edáfica, regímenes de humedad y térmico y procesos como la erosión, salinización o fertilidad física, química y biológica.
- Muchas propiedades de los suelos tienen bastante inercia frente a variaciones del clima y no son fáciles de detectar frente al fuerte impacto de los usos de suelos y sus cambios, más teniendo en cuenta la gran variabilidad espacial de los suelos. No es posible, por lo tanto, en el estado actual de los conocimientos, determinar las sensibilidades de los suelos españoles a las variaciones del clima actual de una forma precisa y cuantitativa.
- De acuerdo con la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo, ampliamente utilizada para la predicción de la erosión hídrica, el factor K es el parámetro que define la sensibilidad del suelo a este tipo de degradación. El factor K depende del contenido en OC, la textura y la estructura del suelo. Una disminución en el contenido en OC de los suelos como consecuencia del cambio climático, actuaría en el sentido de incrementar la erosionabilidad del suelo.

3.5. Incendios

En lo que se refiere a *incendios* las fuentes que se han revelado de mayor interés son:

- Evaluación Preliminar de Impactos en España por Efecto del Cambio Climático” (Proyecto ECCE). 2005. Capítulo 12. IMPACTOS SOBRE LOS RIESGOS NATURALES DE ORIGEN CLIMÁTICO. C. RIESGO DE INCENDIOS FORESTALES
- “*Forest fires under climate, social and economic changes in Europe, the Mediterranean and other fire-affected areas of the world*”. FUME 1013. Proyecto dentro del programa FP7 (Seven Framework Programme, 2010-2013) de la Comunidad Europea
- *Evaluación Preliminar de Impactos en España por Efecto del Cambio Climático” (Proyecto ECCE). 2005. Capítulo 12. IMPACTOS SOBRE LOS RIESGOS NATURALES DE ORIGEN CLIMÁTICO C. RIESGO DE INCENDIOS FORESTALES*

En relación con el régimen de incendios futuro y factores que pueden afectarlo, el proyecto ECCE establece que:

- Los escenarios que se dibujan cara a la ocurrencia de incendios forestales están caracterizados por un incremento generalizado de los índices de peligro, una mayor duración de la temporada de incendios y una mayor frecuencia de situaciones extremas y de más larga duración. A esto se une la tendencia hacia un cambio en la vegetación, con mayor abundancia de especies arbustivas, más sensibles al estrés hídrico. Consecuentemente, cabe esperar que los incendios sean más frecuentes, extensos e intensos.

En relación con los cambios en la vulnerabilidad frente a los incendios forestales de las distintas zonas españolas:

- Cabe suponer que el impacto de un régimen de incendios más extremo, acorde con la nueva climatología será proporcionalmente menos relevante en aquellas zonas de nuestra geografía donde este patrón ya está presente, como la mayor parte de las zonas de tipo mediterráneo. Dado que las zonas

áridas están sometidas ya a periodos prolongados de sequía no es probable que incrementos en ésta tengan, comparativamente, un gran impacto en la frecuencia o tamaño de los incendios.

- Por el contrario, en aquellas zonas cuyo patrón de ocurrencia de incendios actual sea muy distinto al que se prevé, como es en el noroeste y norte peninsular, cabe esperar que la capacidad de soportar un nuevo régimen de incendios sea menor. Esto es, en las áreas donde las sequías prologadas sean más raras es más probable que sean más sensibles a cambios en el régimen de incendios.
 - Por otro lado, aparecen como vulnerables también aquellas zonas en las que los incendios han sido relativamente poco frecuentes y que, en términos biogeográficos, son las zonas cuya vegetación potencial se corresponde con hayedos, parameras de *Juniperus* o pinares y abetales de alta montaña (*Pinus uncinata*, *Abies*). El incremento del peligro, unido en algunos casos (alta montaña) a la mayor presión sobre las zonas forestales, particularmente en verano, puede hacer que los incendios se den con frecuencia y magnitud no conocidas. La menor resiliencia al fuego de estos ecosistemas puede hacer que su regeneración se vea dificultada tras el fuego con el consiguiente cambio de vegetación y riesgo para la actual.
 - Por último, el resto de España, dominado ya por un régimen de incendios de tamaño medio o grande, con incendios más relacionados con negligencias o rayos, y definido por altas temperaturas y tiempo transcurrido desde la última lluvia, verá acrecentada esta tendencia. De nuevo, la mayor o menor disposición de estas zonas a desarrollar una vegetación continua en poco tiempo, que variará entre zonas según que su productividad actual esté más o menos limitada por la temperatura, puede hacer que estas situaciones se extiendan, haciéndose el patrón actual más acusado. Por tanto, la tendencia hacia incendios más intensos y extensos se acrecentará, así como la frecuencia debido a la mayor probabilidad de que una fuente negligente de calor desencadene un incendio.
- “*Forest fires under climate, social and economic changes in Europe, the Mediterranean and other fire-affected areas of the world*”. FUME 1013. Proyecto dentro del programa FP7 (Seven Framework Programme, 2010-2013) de la Comunidad Europea

Un total de 33 equipos de investigación, de 17 países y cuatro continentes distintos, participa en un macroproyecto (FUME) de cuatro años que pretende analizar cómo ha afectado el cambio climático, las transformaciones en el uso del suelo y los cambios socioeconómicos a la evolución del régimen actual de incendios y poder así predecir los escenarios de riesgo futuros.

El proyecto FUME generará, entre otros materiales, la primera cartografía histórica de incendios forestales de Europa e identificará los factores que inciden en este fenómeno, sobre todo en el caso de los incendios de grandes dimensiones, dado que las imágenes de satélite a partir de las que se elaborarán los mapas sólo permiten discriminar los grandes incendios.

La iniciativa está coordinada por la Universidad de Castilla-La Mancha y participan en ella centros de investigación, institutos y universidades de España, Italia, Francia, Alemania, Portugal, Grecia, Suecia, Finlandia, Bélgica, Argelia, Túnez, Marruecos, Turquía, Sudáfrica, Estados Unidos, Australia y Chile.

También se investigarán amenazas para la regeneración de los ecosistemas, en virtud de extremos climáticos como las sequías. Estas y las olas de calor son fenómenos

que, según los expertos, crecerán en los próximos años y décadas. Con los datos que se registren, los investigadores podrán elaborar modelos que proyecten los escenarios de futuro para las próximas décadas, de modo que el proyecto FUME servirá de base para establecer las consiguientes medidas preventivas y correctoras.

Un mapa de riesgos de incendio y el análisis de las amenazas para la regeneración de los ecosistemas afectados, en especial bajo condiciones climáticas extremas, completarán los resultados del proyecto.

Muchos de los productos previstos en el Proyecto FUME¹² pueden ser de gran utilidad para futuros desarrollos de esta línea de trabajo, entre otros: Escenarios de cambios de uso (de utilidad, además de como base para las proyecciones de riesgo de incendios, por su potencial utilidad para la estimación de la erosión) y mapas de futuro peligro de incendios.

3.6. Sobreexplotación de acuíferos

En el nivel nacional se ha considerado que la principal fuente para el estudio del factor de sobreexplotación de acuíferos es el estudio del CEDEX del 1^{er} PNACC “Evaluación del impacto del cambio climático en los recursos hídricos en régimen natural. CEDEX, diciembre de 2010”.

En este trabajo se utiliza el modelo SIMPA (Sistema Integrado para la simulación de procesos precipitación-aportación) para estimar variables hidrológicas en régimen natural en cualquier punto de la red hidrográfica. Entre estas variables hidrológicas se incluye la recarga subterránea.

El estudio que, recordemos, se hizo utilizando los escenarios regionalizados del tercer informe del IPCC, concluye que aunque la estimación de la recarga subterránea está sujeta a grandes incertidumbres, los valores medios estimados pronostican una disminución generalizada en España conforme se reduce la lluvia, siendo menos vulnerables las áreas silíceas que las calcáreas y detríticas.

Las proyecciones para el escenario A2 muestran unas desviaciones de los valores medios del -8% para 2011-2040, -15% para 2041-2070 y -27% para 2071-2100. En el escenario B2 las desviaciones son del -8%, -12% y -16% respectivamente.

No se considera factible la utilización de los mapas que el estudio ofrece sobre previsiones de la recarga, entre otras cosas porque la información que se utilizó en el mapa de riesgo de desertificación responde al concepto de “sobreexplotación”, es decir, los acuíferos en los que la extracción supera a la recarga, y no se ha encontrado información sobre previsiones de extracción.

3.7. Conclusiones

Plantear una cartografía del riesgo de desertificación inducido por el cambio climático resulta una tarea compleja por las incertidumbres existentes en la información sobre el clima, sobre los cambios de uso del suelo, el impacto de los incendios y el impacto del clima en el estado de los acuíferos. Además, al tratarse de una cartografía a escala nacional, hay unas evidentes limitaciones de información cartográfica (aplicable a toda España y a una escala razonable). Todos estos factores obligarán a realizar simplificaciones y generalizaciones que se deberán tener en cuenta a la hora de valorar a las estimaciones.

¹² Los resultados del proyecto FUME se hicieron públicos en 2014, una vez finalizado el presente estudio (principios de 2013). Se pueden consultar en: <http://fumeproject.uclm.es/>

De acuerdo con el planteamiento metodológico expuesto y tras el análisis realizado de la disponibilidad de la información sobre los distintos factores que integran el mapa de riesgo de desertificación del PAND, la generación de los mapas de riesgo de desertificación en función del cambio climático se basa en la obtención de los mapas de aridez y del índice de erosividad de la lluvia (R) de la situación actual y de las futuras, y su integración en el modelo de estimación del riesgo de desertificación, manteniendo constantes el resto de factores.

Los datos climáticos necesarios para generar esta cartografía procederán de la “Nueva colección de escenarios de cambio climático regionalizados del Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático (PNACC) 2012” (de forma abreviada, *Escenarios-PNACC-2012* o 2ª GER).

4. Generación de mapas de riesgo de desertificación en función del cambio climático.

Se recogen en este capítulo los resultados de la utilización de los datos procedentes de “Escenarios PNACC 2012” para el cálculo del índice de aridez y el factor R de erosividad de la lluvia y de su posterior integración en el modelo de estimación del riesgo de desertificación.

4.1. Datos de partida

Escenarios-PNACC 2012

Nueva colección de escenarios de cambio climático regionalizados del Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático (PNACC) 2012.

Variables de interés

Las variables necesarias para la elaboración de los mapas de aridez y de los mapas del índice R de erosividad de la lluvia, son las siguientes:

Variable	Código	Unidad	Agregación temporal	Tipo de agregación
Tª máxima	TXMM	°C	Mensual	Promedio
Tª mínima	TNMM	°C	Mensual	Promedio
Precipitación total acumulada	PRCPTOT	mm/mes	Mensual	Acumulado
Precipitación máxima en 24h	RX1day	mm	Mensual	Máximo

Formato de los datos

Se van a utilizar los *Productos en rejilla*. Los productos en rejilla ofrecidos en Escenarios-PNACC 2012 usan una cuadrícula común y homogénea de una resolución de 0,2º (aprox. 20km.), que cubre la España peninsular y Baleares. Esta rejilla (*Figura 1*) corresponde a la utilizada en el desarrollo de la base de datos denominada *Spain 02*¹³ (*Herrera et al. 2012*), proyecto que ha generado capas en rejillas de análisis de precipitación diaria y temperaturas máximas y mínimas diarias en dicha cuadrícula,

¹³ <http://www.meteo.unican.es/datasets/spain02>

partiendo de una densa red de unas 2.500 estaciones de la AEMET, que abarca el período comprendido entre 1950 y 2008. Para cada punto de rejilla se ha dispuesto de los datos agregados mensualmente de las variables anteriores.

Los datos facilitados para este trabajo no incluyen a Canarias, por lo que no se incluyen en el análisis.

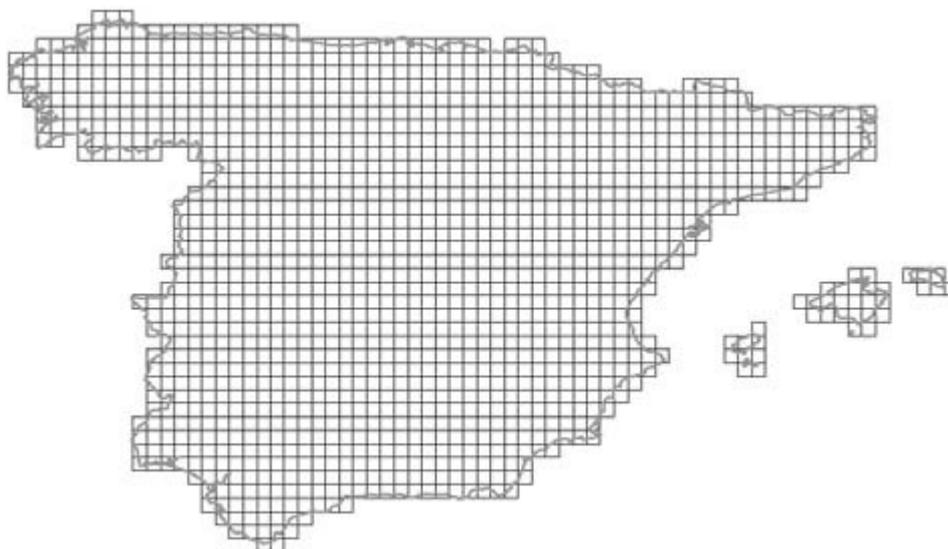


Figura 7. La rejilla regular de 0.2° (aproximadamente 20 km) utilizada para el proyecto Spain02

Selección de proyecciones

Los criterios que *a priori* han orientado la selección son:

- Intermedio de emisiones A1B, puesto que hay mayor disponibilidad de datos.
- Preferencia por las técnicas dinámicas, por su mayor “robustez” en condiciones de cambio climático, sobre todo en temperatura, con respecto a las estadísticas (Gutiérrez *et al.* 2013), y porque, según se puso de manifiesto en el taller de usuarios (abril 2011), parecía que podían reproducir mejor los eventos extremos de precipitación. No obstante, se utilizarán también proyectos de regionalización estadística.
- Evaluación a corto, medio y largo plazo, es decir proyectos con periodo 2001-2100. Pero, como hay menos proyectos dinámicos con el periodo disponible completo, se reforzará el análisis del corto plazo con algún proyecto de periodo disponible hasta 2050 (ver cuadro de texto).

Extracto del Borrador de la Guía de Usuario

Horizontes temporales: En función del proyecto de origen, **Escenarios-PNACC 2012** ofrece simulaciones del clima futuro que abarcan períodos diferentes, siendo este un aspecto a considerar en la elección de proyecciones a emplear en función de las necesidades e intereses del usuario. Así, se cuenta con proyecciones que abarcan la primera mitad del siglo XXI (2050), en particular en las modelizaciones dinámicas procedentes del proyecto ESCENA y algunas de ENSEMBLES. Los modelos dinámicos de AEMET y la mayoría de ENSEMBLES ofrecen proyecciones hasta final del siglo XXI, así como los modelos estadísticos de ESTCENA y AEMET.

Se solicitaron a AEMET los datos de las siguientes proyecciones:

	Escenario emisiones	Regionaliz.	Mod. Global	Proyecto	Mod. Regional	Periodo
1	A1B	Dinámica	HadCM3-Q3	ESCENA	UCL PROMES	1961-2050
2	A1B	Dinámica	ECHAM5	ENSEMBLES	KNMI	1961-2100
3	A1B	Estadística	CNRM-CM3	ESTCENA	FIC	1961-2100

Se van a utilizar los siguientes acrónimos y abreviaturas para las tres proyecciones estudiadas:

	Nombre Proyección	
1	ESCENA UCLM_PRO_HADCM3Q3	1-ESC
2	ENSEMBLES_ECHAM5_KNMI_A1B_r5	2-ENS
3	ESTCENA_FIC_CNCR3	3-EST

Periodos de trabajo

Periodo de control

Como parte de la colección Escenarios-PNACC 2012 se ofrece una base de datos de simulaciones del clima actual, resultado de aplicar los modelos regionales con forzamientos de gases de efecto invernadero (GEI) históricos. El objetivo es proporcionar información de base para generar una climatología de control, que permita realizar análisis comparativos del clima actual con las proyecciones climáticas de futuro sometidas a distintos forzamientos de GEI, y calcular y evaluar el cambio climático. Un período de control debe ser representativo del clima actual, tanto en promedio como en sus extremos.

Esta base de datos recibe el nombre de “20C3M”. El período cubierto por la simulación 20C3M abarca el período 1961-2000, de manera que el usuario puede ajustar sus períodos de control en función de sus necesidades. Típicamente la caracterización de los climas se realiza en períodos de 30 años, y por tanto los períodos de control suelen abarcar 3 decenios (p. ej. 1961-1990, 1971-2000).

Para este trabajo se utilizará el periodo 1971-2000 por ser el más reciente.

Periodos

Se van utilizar los siguientes periodos para las proyecciones:

- Corto plazo: 2011-2040
- Medio plazo: 2041-2070
- Largo plazo 2071-2100

Son los considerados habitualmente, y los mismos que se emplearon en varios proyectos de adaptación realizados con los datos de la 1ª Generación de escenarios climáticos regionalizados.

Datos observados

Los datos observados que se van a utilizar para realizar comparativas con los datos del periodo de control 20C3M son los mismos que los utilizados en el Sistema de Información Geográfico Agrario (SIGA) del MAGRAMA¹⁴. El SIGA incluye Mapas temáticos sobre variables agroclimáticas, entre otras: Temperatura media mensual,

¹⁴ <http://www.magrama.gob.es/es/agricultura/temas/sistema-de-informacion-geografica-de-datos-agrarios/>

Pluviometría media anual, ETP media anual (Thornthwaite) y Factor R (Erosividad de la lluvia) de la Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo (USLE). Esta información se elaboró a partir de las series de datos termométricos (1.803 estaciones) y pluviométricos (4.189 estaciones) facilitados por el Instituto Nacional de Meteorología (INM, actualmente Agencia Estatal de Meteorología AEMET). Dicha información fue procesada para todas las estaciones y después se modelizaron los diferentes parámetros mediante métodos geoestadísticos de interpolación (KRIGING)* para todo el territorio nacional.

Se utilizará el mismo periodo de datos que para el del periodo de control: 1971-2000.

4.2. Variables de partida

4.2.1. Contraste con datos observados

En el cuadro y gráficos adjuntos se incluyen los resultados de contrastar los datos observados medios para Península y Baleares de las variables de partida (temperatura mínima, media y máxima, precipitación total acumulada anual y precipitación máxima en 24h) con los datos del periodo de control 20C3M.

El dato anual para Península y Baleares es la media de los valores de todos los puntos de la rejilla (1.445 puntos). La serie de “Precipitación media de las máximas anuales en 24h” se calcula de la manera siguiente: El dato anual de P24 en cada punto de rejilla es el dato del mes en el que la P24 ha sido mayor.

Comparativa de los datos observados medios de las variables de partida con los datos del periodo de control

Nº	Nombre Proyección.	PERIODO	TMIN_MEDI A_ANUAL	TMED_MED IA_ANUAL	TMAX_MED IA_ANUAL	P_TOTAL_AN UAL_MEDIA	P24H_ MEDIA
		Observados 1971-2000	8,19	14,07	19,96	675,69	52,59
1	ESCENA_UCLM_PR O_HADCM3Q3	20C3M 1971-2000	6,29	10,64	14,98	1088,38	58,49
		<i>Variación control respecto datos observados</i>	-23,13%	-24,41%	-24,94%	61,08%	11,22 %
2	ENSEMBLES_ECHA M5_KNMI_A1B_r5	20C3M 1971-2000	8,46	12,82	17,19	834,35	45,53
		<i>Variación control respecto datos observados</i>	3,34%	-8,88%	-13,90%	23,48%	- 13,42 %
3	ESTCENA FIC_CNCM3	20C3M 1971-2000	7,92	13,61	19,31	626,40	34,35
		<i>Variación control respecto datos observados</i>	-3,30%	-3,27%	-3,26%	-7,29%	- 34,69 %

En todos los casos son apreciables las diferencias entre ambas series de datos, siendo los porcentajes de variación entre los datos de control y los datos observados mayores en el caso de las precipitaciones que en el de las temperaturas. Las diferencias son mucho más acusadas en unas proyecciones que en otras. En general la proyección 1-ESC es con la que se obtiene una mayor variación y la 3-EST es la que más se ajusta a los datos observados¹⁵.

Los valores medios en el periodo de las **temperaturas medias** simuladas para el periodo de control son inferiores a las observadas en los tres casos estudiados. En el

¹⁵ Este resultado era esperable puesto que los métodos estadísticos se entrenan con las observaciones que se toman de referencia.

caso de las medias, son inferiores en 3,4°C (un 24,4%) en 1-ESC, 1,25°C en 2-ENS y únicamente inferiores en 0,5°C, un 3,3% en 3-EST.

Las tendencias de cambio en la temperatura a lo largo del periodo son todas ascendentes, al igual que en los datos observados, si bien se advierte una pendiente inferior en el caso de 3-EST y 2-ENS, y muy parecida en el caso de 1-ESC.

Las **precipitaciones totales anuales** son muy superiores en 1-ESC, un 61,1%, y también son superiores en un 23,5% en 2-ENS. Por el contrario, en 3-EST la media de P anual es inferior, si bien la diferencia es bastante menor, de un 7,3%.

Las tendencias de los valores en el periodo no son uniformes, es descendente con pendiente fuerte en el caso de 1-ESC, ascendente con pendiente suave en 2-ENS y ligeramente ascendente en 3-EST, muy parecida a la tendencia muy ligeramente descendente de los datos observados.

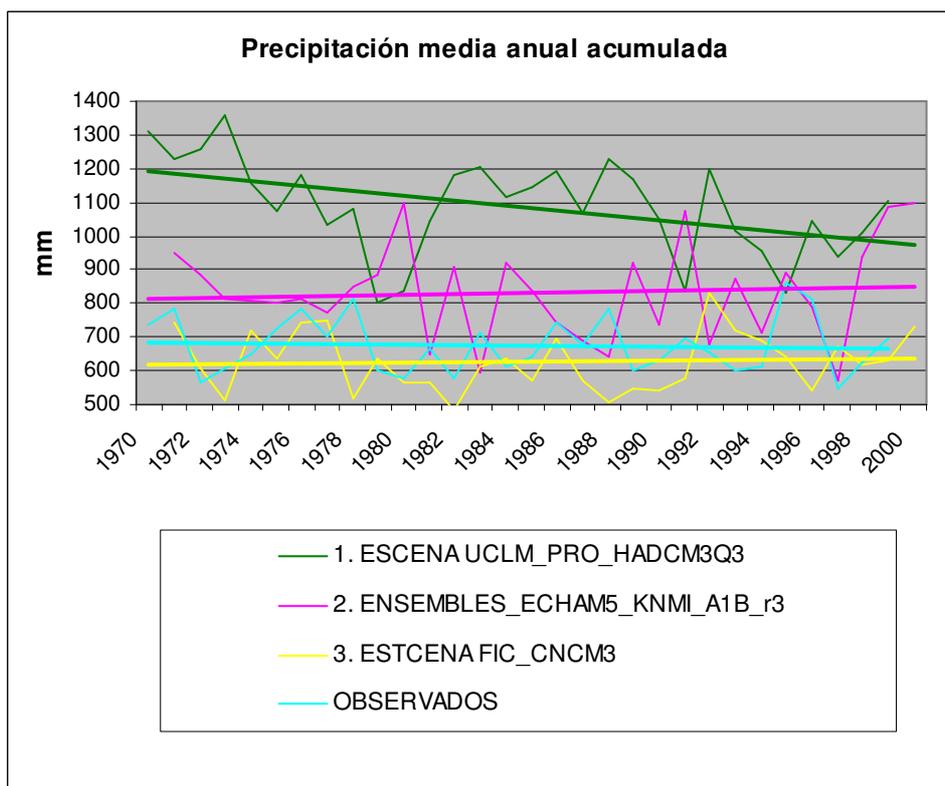
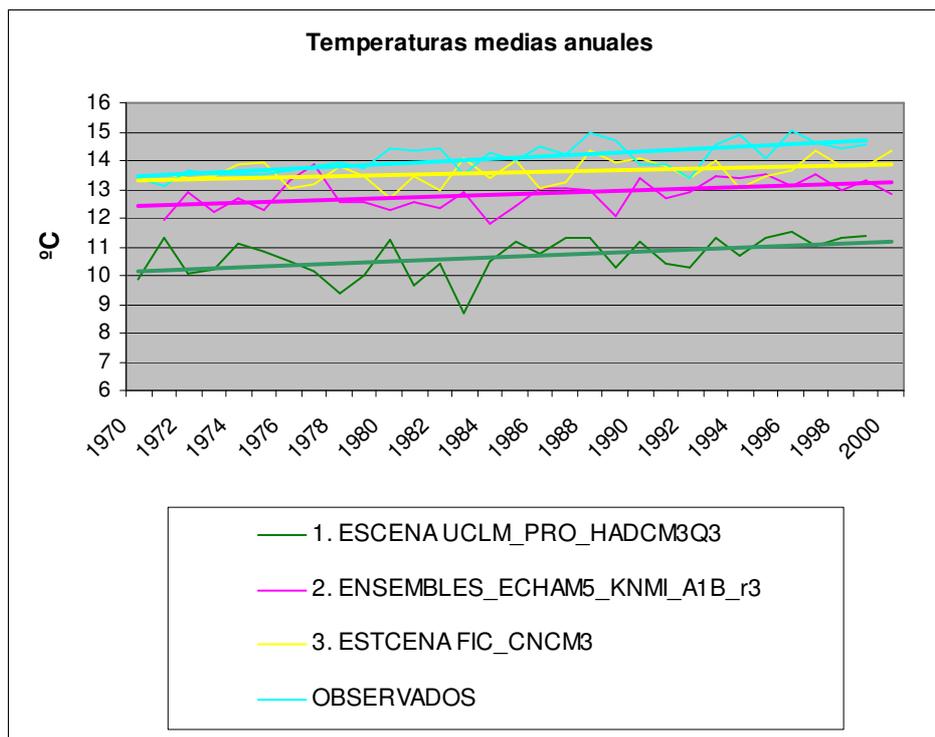
Las **precipitaciones máximas diarias** del escenario 1-ESC son superiores a las de los datos observados, lo que podía ser esperable dado que las precipitaciones totales también son muy superiores. Esta coincidencia de tendencia entre P y P24 no se produce en el caso proyectado por 2-ENS, pues son inferiores las P24 a pesar de ser mayor la P anual. El escenario 3-EST pronostica unas P24 bastante menores que los datos observados, inferiores en un 34,69%. Las tendencias de P24 durante este periodo no son demasiado significativas en ningún caso.

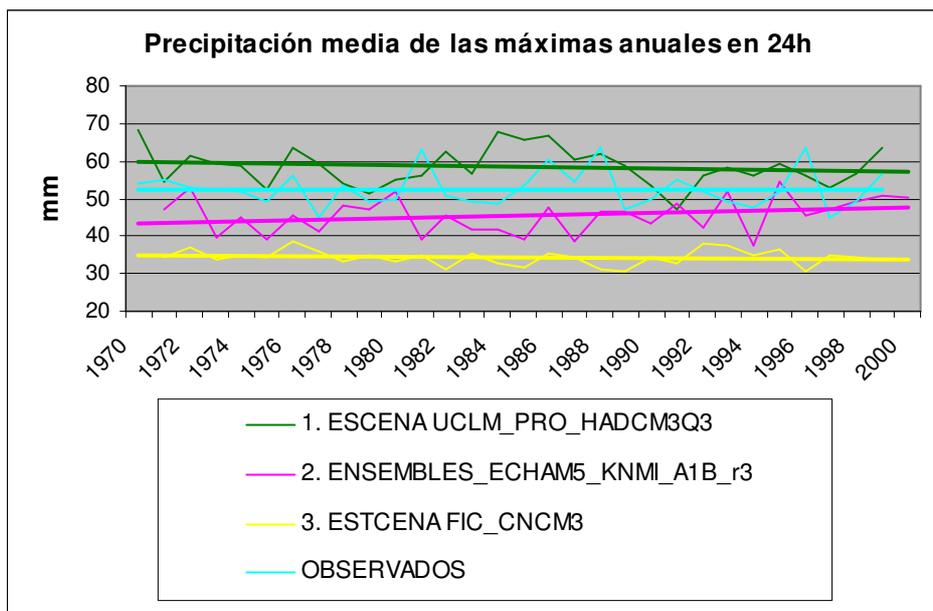
En el cuadro adjunto se sintetizan los resultados del contraste entre datos simulados y observados con signos de mayor o menor:

Nº	Nombre Escenario.	TMED_MEDIA_ANUAL	P_TOTAL_ANUAL_MEDIA	P24H_MEDIA
1-ESC	ESCENA_UCLM_PRO_H ADCM3Q3	<<<	>>>	>>
2-ENS	ENSEMBLES_ECHAM5_K NMI_A1B_r5	<<	>>	<<
3-EST	ESTCENA_FIC_CNCM3	<	<	<<<

<: Los datos simulados son menores que los datos observados

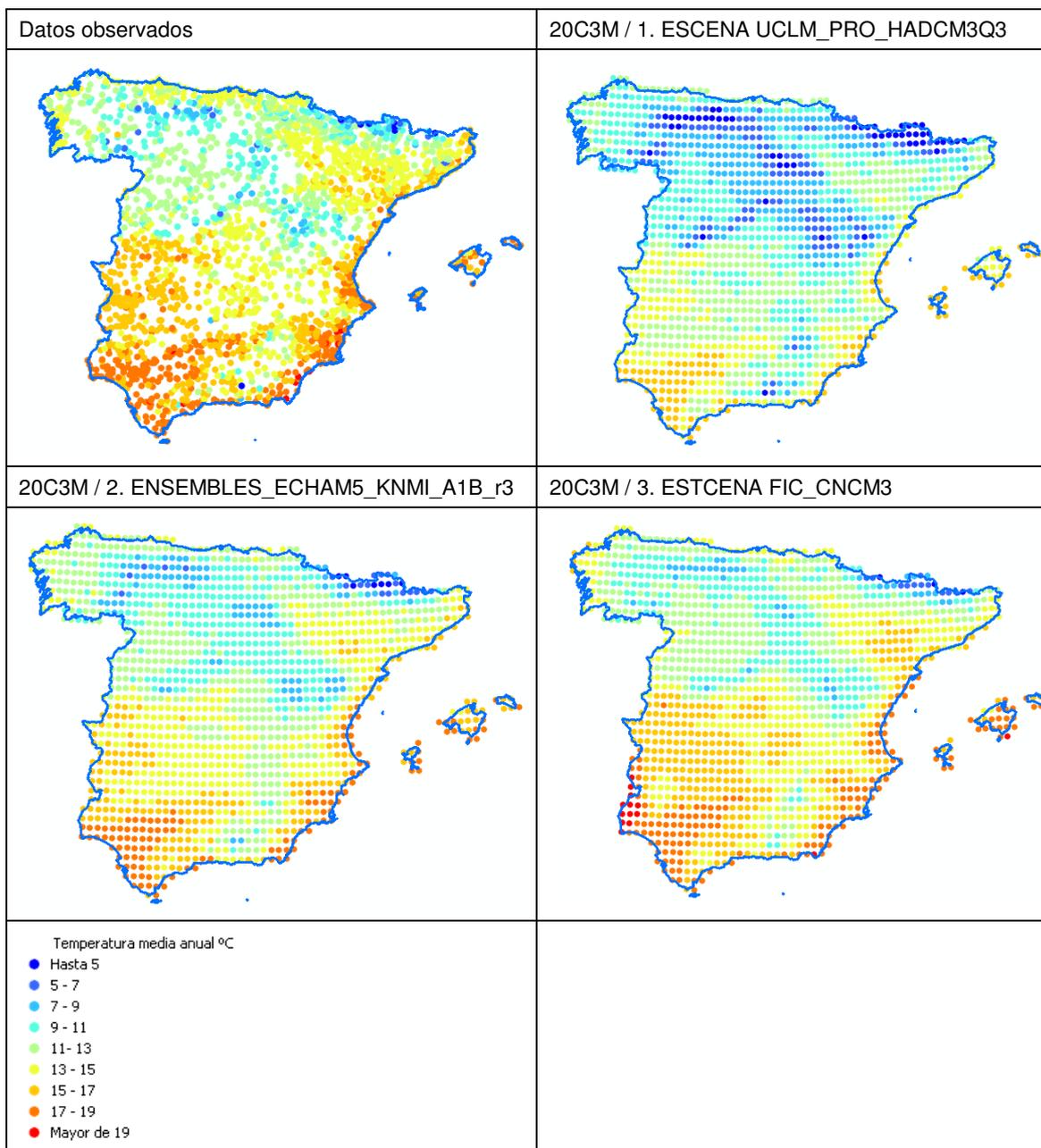
>: Los datos simulados son mayores que los datos observados



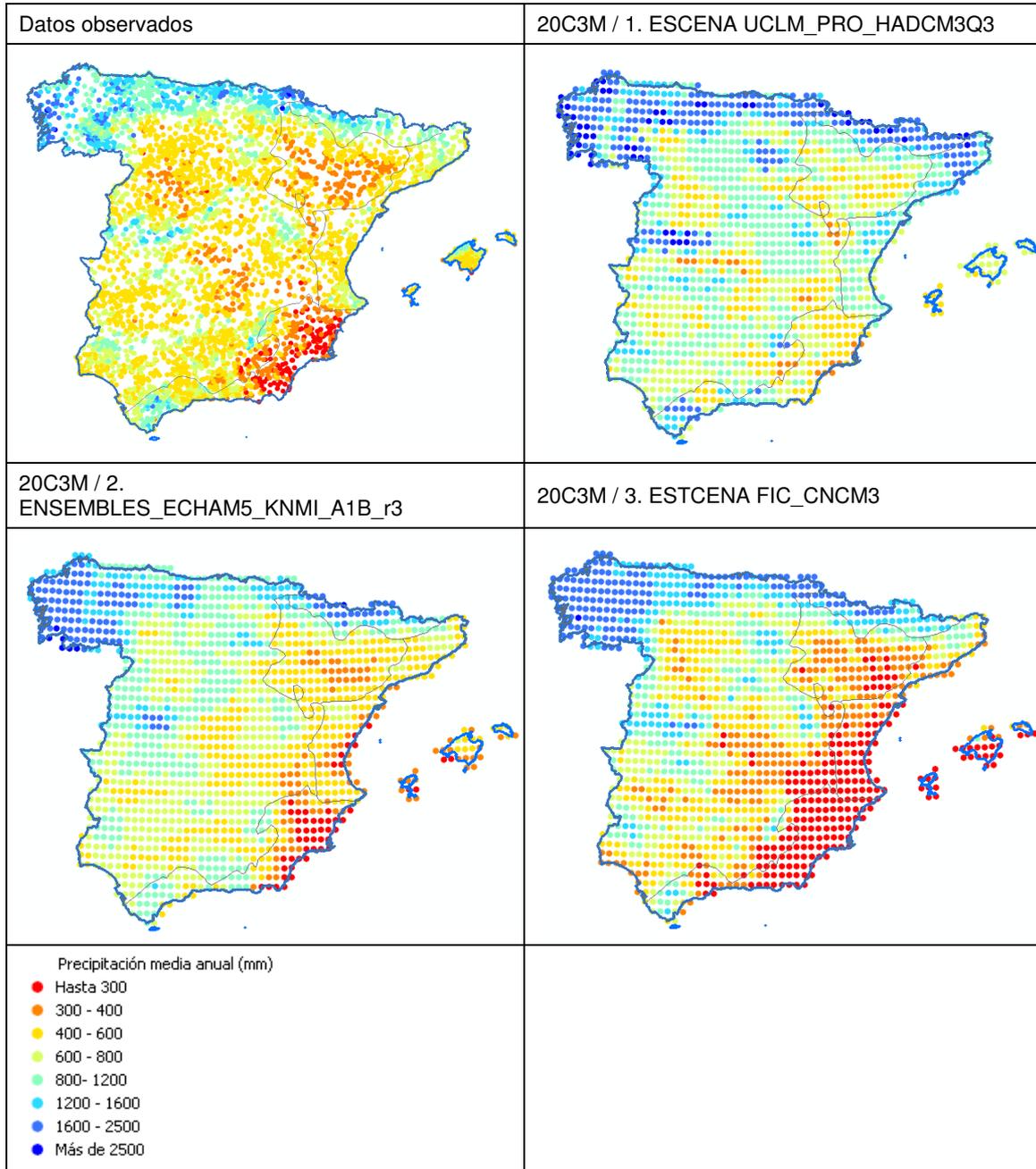


Los mapas adjuntos permiten realizar una comparativa entre los valores medios de los datos observados en el periodo 1971-2000 y los valores medios obtenidos en los puntos de la rejilla *Spain02* con los modelos para el periodo de control 20C3M. En el caso de las precipitaciones máximas diarias, se representa en los mapas el valor de la P24 para el periodo de retorno de 10 años.

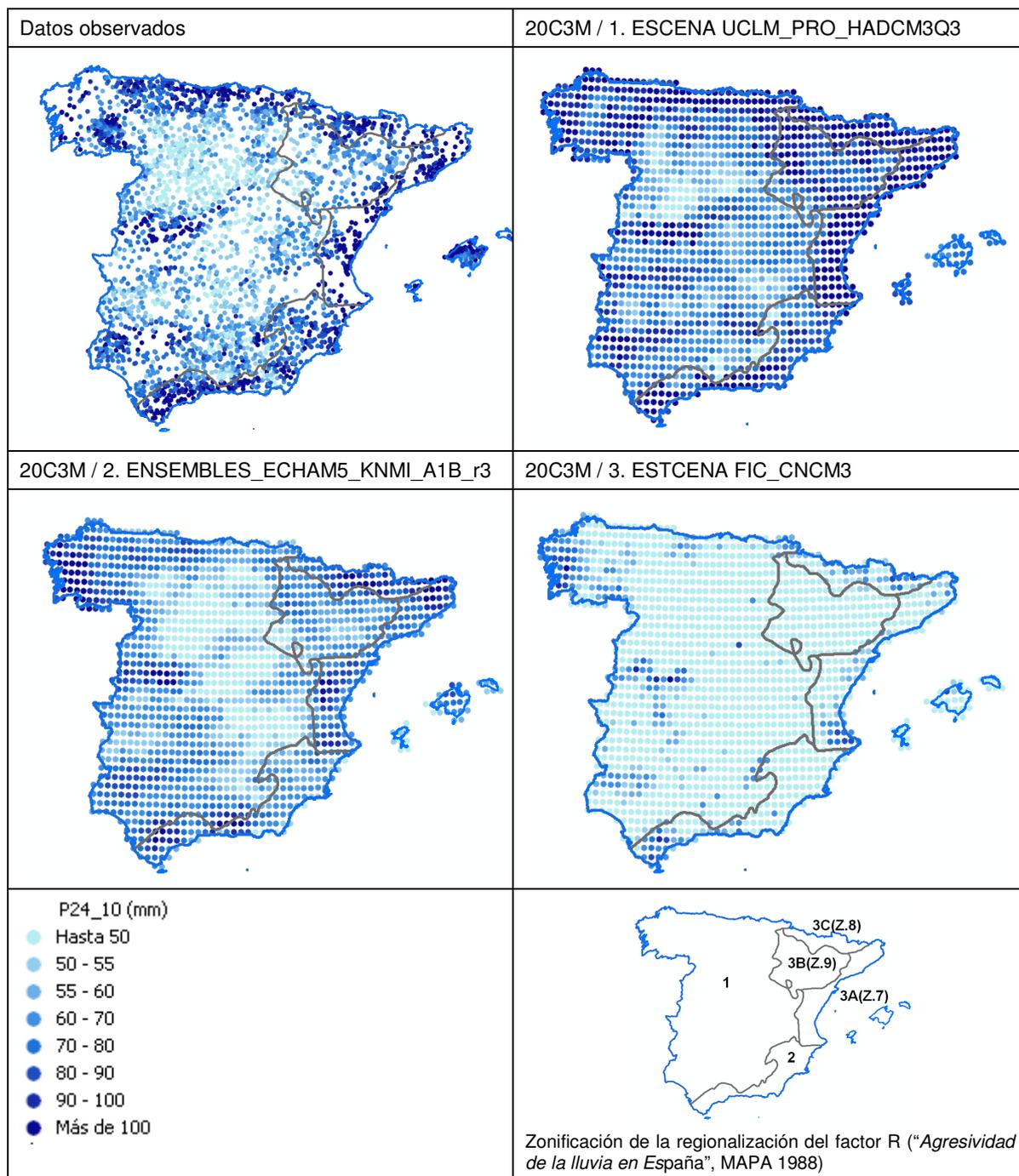
Temperatura media anual



Precipitación media acumulada anual



Precipitación máxima en 24 h para el periodo de retorno de 10 años



4.2.2. Evolución de las variables de partida: T, P y P24

Se analiza la evolución a lo largo de todo el periodo, tanto actual como futuro, de las variables de partida: T^a media, Precipitación total acumulada y Precipitación máxima en 24h.

Los gráficos representan la evolución de la media anual del valor medio para la Península y Baleares. Se incluyen también los valores de la serie de datos observados (SIGA 1971-2000).

Las tablas recogen los valores medios de los 30 años en cada periodo. Recordemos que los periodos que manejamos son:

- Actual: 20C3M: 1971-2000 (en adelante “periodo de control”)
- Corto plazo: 2011-2040
- Medio plazo: 2041-2070
- Largo plazo 2071-2100

Se incluye también en la tabla el porcentaje de variación del valor medio resultante en cada periodo respecto al periodo de control y la diferencia del valor respecto al periodo de control. Se ha representado también en formato de gráfico la evolución de los valores medios de los periodos para cada escenario.

Todas las proyecciones analizadas pronostican un aumento sostenido de las **temperaturas**, siendo los porcentajes de variación respecto al periodo de control muy similares en el caso de los escenarios 2-ENS y 3-EST.

La proyección 1-ESC, del que solo se dispone de datos para el primer periodo (2011-2040) pronostica un aumento de la temperatura de 1,35°C, muy superior en porcentaje al de los otros dos escenarios para este mismo periodo 2011-2040, un 12,7% frente al 6,8% y 8,3% (media de 7,6%).

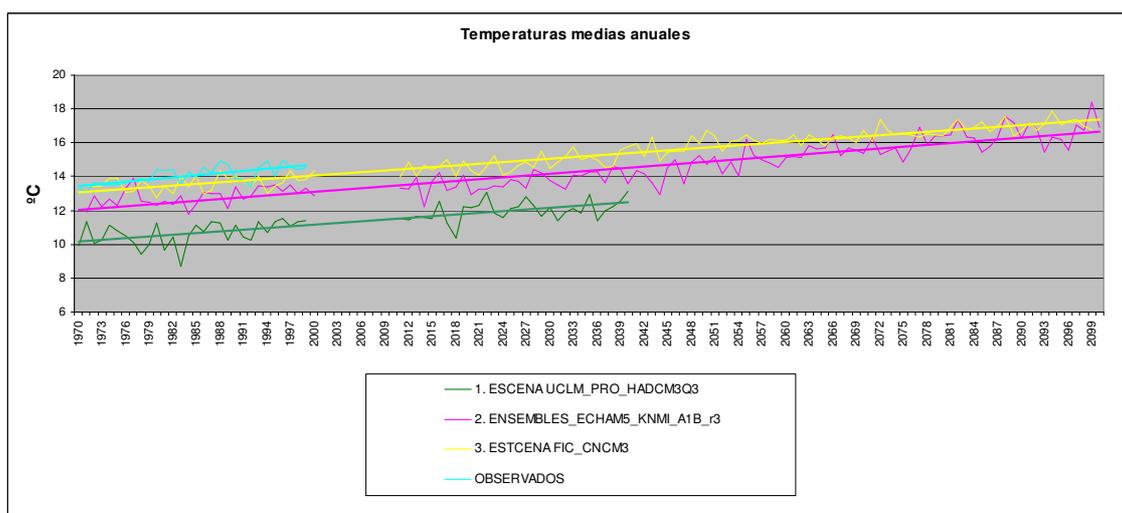
Considerando la media de los escenarios 2-ENS y 3-EST, el aumento de temperatura esperado es de 2,3°C durante el periodo 2041-2070 (un 17,2%) y de 3,4°C durante el periodo 2071-2100 (un 25,7% de aumento). En ambos escenarios los incrementos esperados son mayores en las temperaturas máximas que en las mínimas.

Las proyecciones muestran una reducción de la **precipitación media acumulada anual**, con porcentajes de variación muy distintos según la proyección.

Al contrario que en temperaturas, la proyección 1-ESC muestra una reducción menor que los demás de la precipitación en el periodo 2011-2040, únicamente de un 1,9%. En este periodo los otros dos escenarios muestran distintos porcentajes de variación, un 6,8% de reducción en el caso de 2-ENS y un 2,8% en el caso de 3-EST.

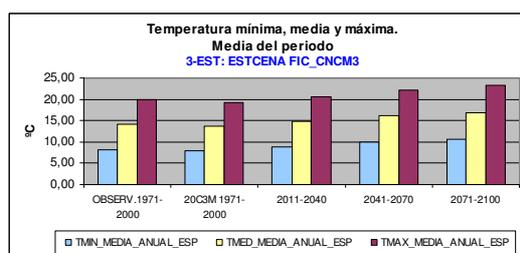
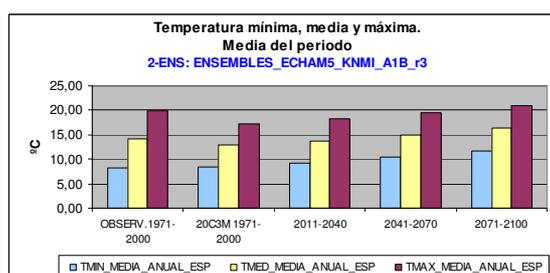
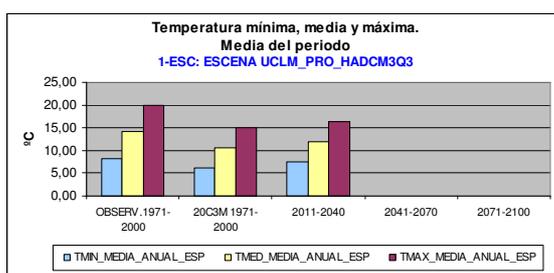
Durante el periodo 2041-2070 la reducción esperada es muy similar en 2-ENS y un 3-EST, un 9,1% de media. Sin embargo el porcentaje de variación de la precipitación del periodo 2070-2100 respecto al periodo de control, es del 20,6% en el caso de 2-ENS y del 12,6% en 3-EST. Como media supone un 17,2% de reducción, en torno a 125 mm menos de precipitación media acumulada anual al final del siglo XXI.

Temperaturas

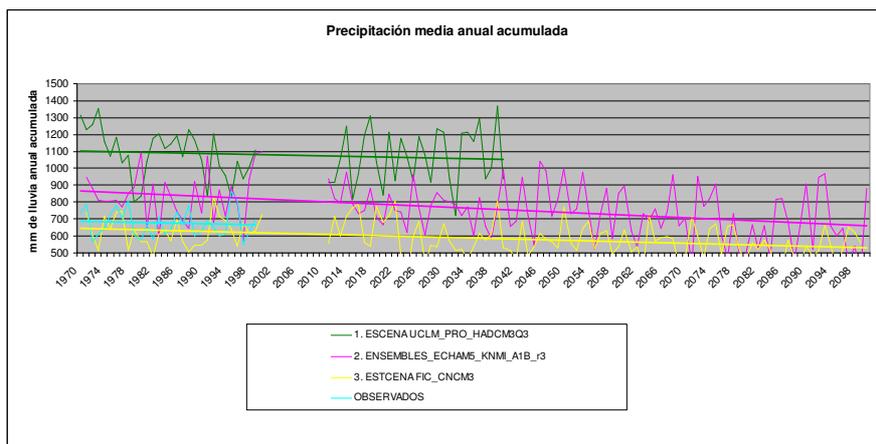


Datos de Temperatura media anual (°C) periodo de control y proyectados

	1	2	3	Media 2 y 3
PERIODO	ESCENA UCLM_PRO_HADCM3Q3	ENSEMBLES_ECHAM5_KNMI_A1B_r3	ESTCENA FIC_CNCM3	
20C3M 1971-2000	10,64	12,82	13,61	13,22
2011-2040	11,99	13,69	14,75	14,22
2041-2070		14,94	16,06	15,50
2071-2100		16,35	16,87	16,61
% Variación respecto a periodo de control				
2011-2040	12,73%	6,77%	8,35%	7,58%
2041-2070		16,48%	17,97%	17,25%
2071-2100		27,48%	23,95%	25,66%
Diferencia respecto a periodo de control				
2011-2040	1,35	0,87	1,14	1,00
2041-2070		2,11	2,45	2,28
2071-2100		3,52	3,26	3,39

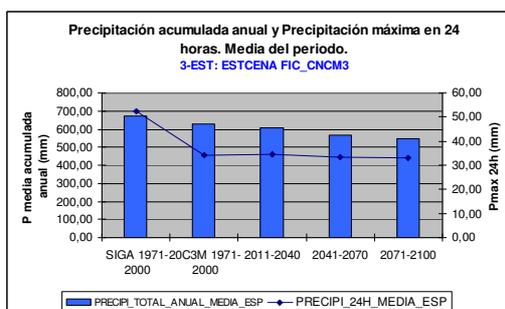
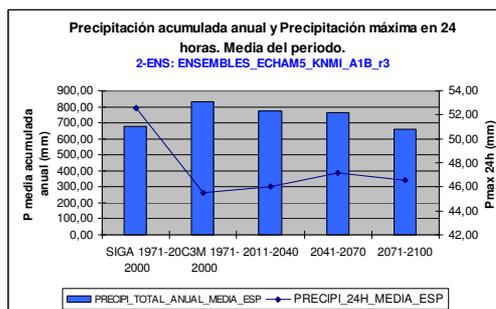
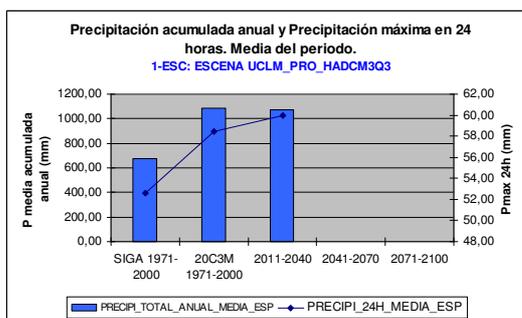


Precipitación media acumulada anual

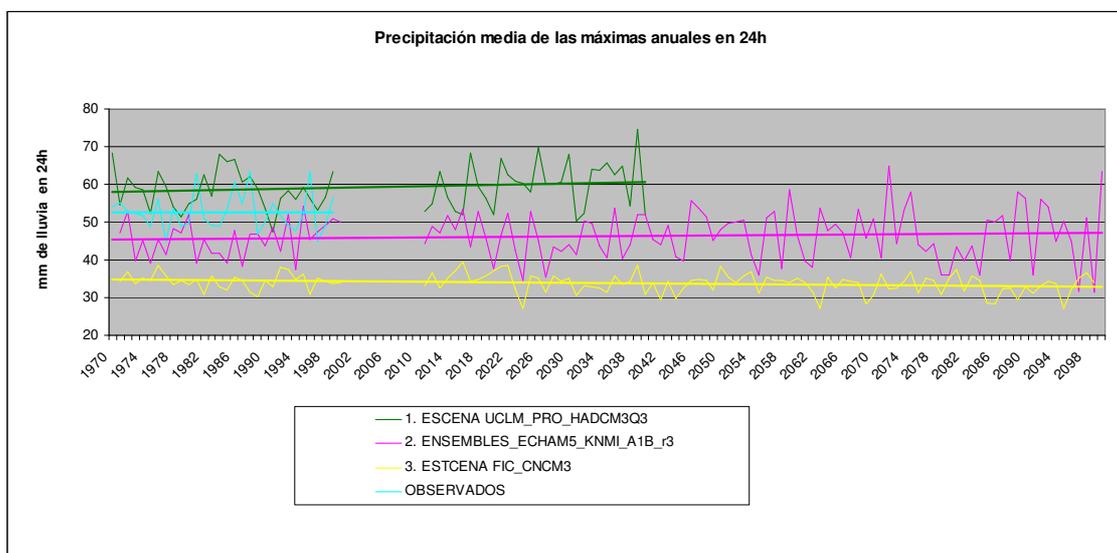


Datos de Precipitación media acumulada anual (mm) periodo de control y proyectados

PERIODO	1 ESCENA UCLM_PRO_HADCM3Q3	2 ENSEMBLES_ECHAM5_KN MI_A1B_r3	3 ESTCENA FIC_CNCM3	Media 2 y 3
20C3M 1971-2000	1088,38	834,35	626,40	730,38
2011-2040	1067,77	777,26	608,91	693,08
2041-2070		761,74	566,68	664,21
2071-2100		662,75	547,42	605,08
% Variación respecto a periodo de control				
2011-2040	-1,89%	-6,84%	-2,79%	-5,11%
2041-2070		-8,70%	-9,53%	-9,06%
2071-2100		-20,57%	-12,61%	-17,16%
Diferencia respecto a periodo de control				
2011-2040	-20,60	-57,10	-17,50	-37,30
2041-2070		-72,61	-59,72	-66,17
2071-2100		-171,61	-78,99	-125,30

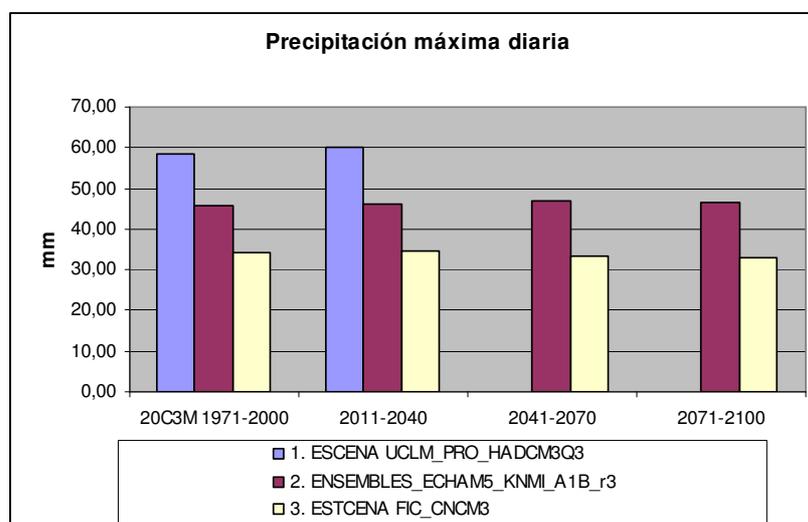


Precipitación máxima diaria



Datos de Precipitación máxima diaria (mm) periodo de control y proyectados

	1	2	3	Media 2 y 3
PERIODO	ESCENA UCLM_PRO_HADCM3Q3	ENSEMBLES_ECHAM5_KNMI_A1B_r3	ESTCENA FIC_CNCM3	
20C3M 1971-2000	58,49	45,53	34,35	39,94
2011-2040	59,98	45,99	34,43	40,21
2041-2070		47,13	33,46	40,29
2071-2100		46,54	33,10	39,82
% Variación respecto a periodo de control				
2011-2040	2,55%	1,01%	0,24%	0,68%
2041-2070		3,51%	-2,58%	0,89%
2071-2100		2,23%	-3,63%	-0,29%
Diferencia respecto a periodo de control				
2011-2040	1,49	0,46	0,08	0,27
2041-2070		1,60	-0,89	0,36
2071-2100		1,01	-1,25	-0,12



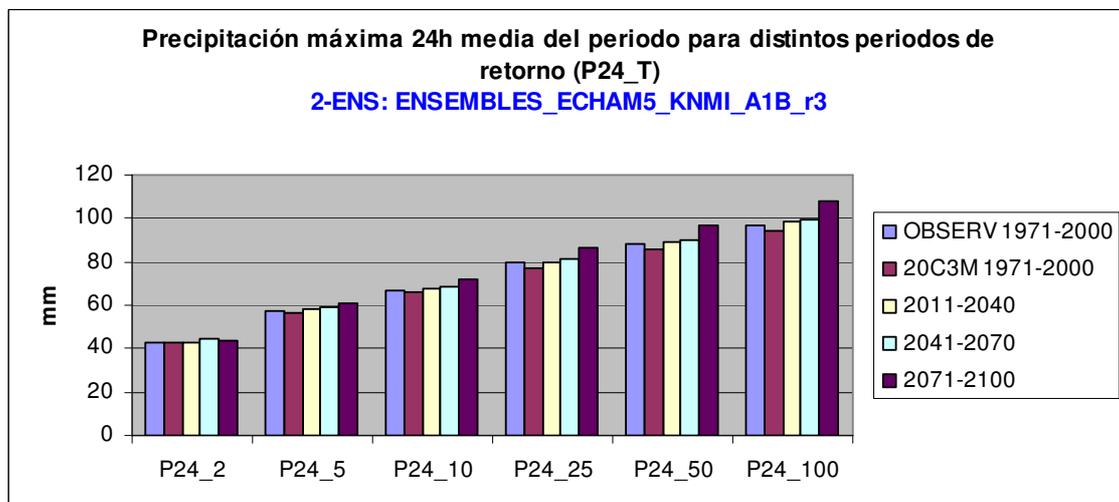
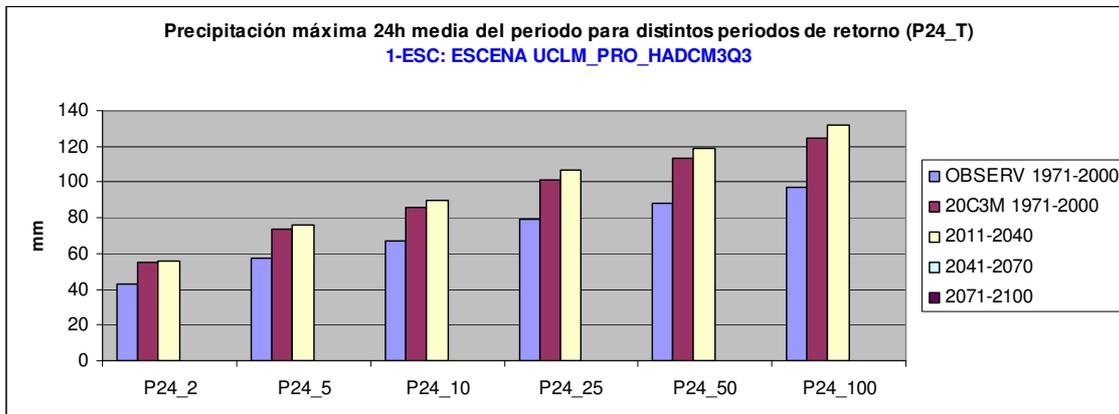
Las proyecciones analizadas no muestran tendencias significativas en las **precipitaciones máximas diarias (P24)**. En los escenarios 1-ESC y 2-ENS la tendencia es ligeramente ascendente y en 3-EST es ligeramente descendente, pero en todos los casos los porcentajes de variación son muy reducidos.

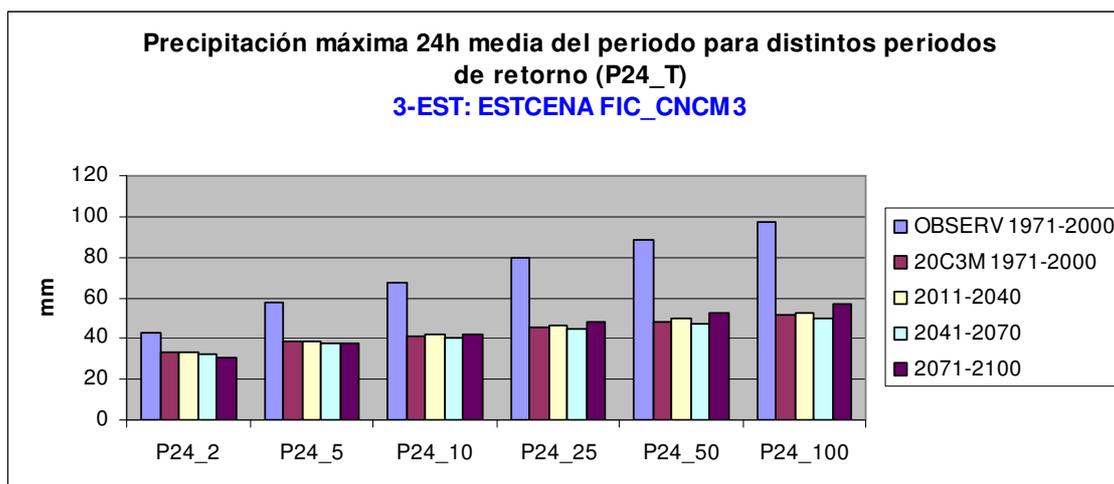
En el primer periodo 2011-2040 los tres escenarios experimentan un incremento de la P24, del 2,55%, 1% y 0,24%, respectivamente, que en valores absolutos supone entre 1,5 y 0,1 mm de aumento.

En el segundo periodo la previsión es de un aumento del 3,5% en 2-ENS y de disminución en un 2,6% en 3-EST. En el periodo 2071-2100 la tendencia de P24 es de disminución en ambos casos.

En definitiva, en valores absolutos la diferencia en la precipitación máxima diaria entre el periodo 1971-2000 y el periodo 2071-2100 es de entre 1 mm de aumento y 1,25 mm de disminución, cifras ciertamente insignificantes desde el punto de vista de su influencia en el análisis de la erosividad de la lluvia en los futuros escenarios de cambio climático.

Se han analizado también las **P24 para distintos periodos de retorno** en cada periodo y en cada escenario. Se recoge este análisis en los gráficos adjuntos, en los que se aprecia que la tendencia del incremento de las P24 conforme aumenta el periodo de retorno es similar a los datos observados únicamente en el caso de los escenarios 1-ESC y 2-ENS. Por el contrario, en el caso de la proyección 3-EST esta tendencia se suaviza de forma ostensible.





En el cuadro adjunto se sintetizan los porcentajes de variación de los valores de las variables de partida entre el periodo de control y los sucesivos periodos:

% Variación de los valores de las variables de partida respecto a periodo de control

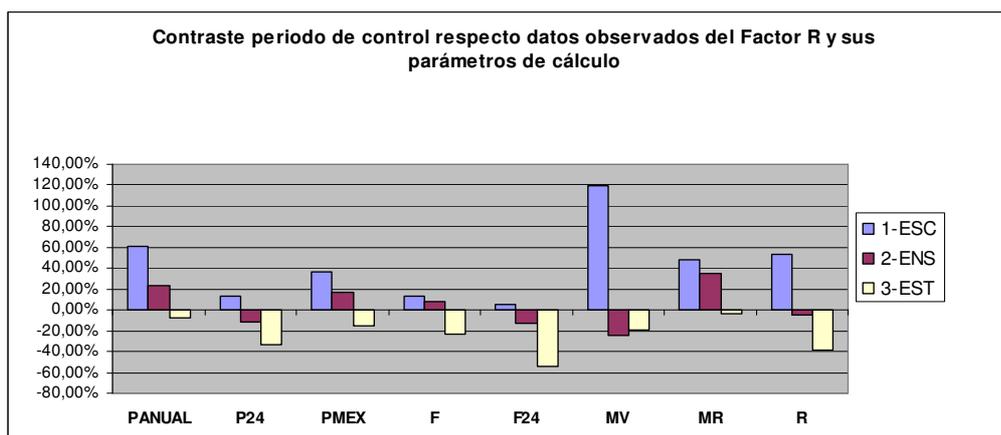
	1 ESCENA UCLM_PRO_HADCM3Q3	2 ENSEMBLES_ECHAM5_KN MI_A1B_r3	3 ESTCENA FIC_CNCM3	Media 2 y 3
<i>Temperatura media anual</i>				
2011-2040	12,73%	6,77%	8,35%	7,58%
2041-2070		16,48%	17,97%	17,25%
2071-2100		27,48%	23,95%	25,66%
<i>Precipitación media acumulada anual</i>				
2011-2040	-1,89%	-6,84%	-2,79%	-5,11%
2041-2070		-8,70%	-9,53%	-9,06%
2071-2100		-20,57%	-12,61%	-17,16%
<i>Precipitación máxima diaria</i>				
2011-2040	2,55%	1,01%	0,24%	0,68%
2041-2070		3,51%	-2,58%	0,89%
2071-2100		2,23%	-3,63%	-0,29%

Como se puede apreciar, el orden de magnitud de las variaciones es muy distinto en las variables de temperatura media y precipitación anual en relación con la variable de precipitación máxima diaria.

Tras el análisis de los datos de las variables de partida se consideró adecuado descartar del análisis los datos de la proyección nº 1, ESCENA_UCLM_PRO_HADCM3Q3, por las siguientes razones:

- Las diferencias entre los valores obtenidos con el modelo en el periodo de control y los datos observados son excesivamente elevadas, en particular en las precipitaciones.

Inciso: Se realizó también el ejercicio de ver cómo se comportaban estos datos de 1-ESC en los cálculos para el factor R, obteniéndose también unas diferencias mucho mayores que en los otros dos escenarios, como se puede apreciar en el gráfico adjunto



- A pesar de que ESCENA pronostica un aumento apreciable de las precipitaciones máximas diarias el hecho de contar únicamente con datos hasta 2050 no permite la confirmación de la tendencia de cambio en las P24 en los periodos posteriores, particularmente importante, como se verá, en el caso del cálculo del factor R. Téngase en cuenta que en los otros dos escenarios los cambios pronosticados son de menor magnitud y no muestran una tendencia clara.

Los resultados obtenidos en este trabajo con los escenarios analizados corroboran lo reflejado en el capítulo 3 en cuanto a las incertidumbres de los modelos en cuanto a la estimación de las precipitaciones máximas, puesto que las variaciones de cambio en las precipitaciones máximas diarias no reflejan tendencias significativas ni de disminución ni de aumento de las precipitaciones máximas.

4.3. Índice de aridez

El índice de aridez utilizado (PNUMA) es el cociente entre la precipitación anual (P) y la evapotranspiración potencial (ETP):

$$\text{Índice de aridez} = P/ETP$$

Para cada punto de la rejilla se dispone de las variables:

- precipitación media mensual,
- temperatura media de las máximas mensuales,
- temperatura media de las mínimas mensuales

Con esos datos se calcula la ETP mensual en cada punto de rejilla por el método de Thornthwaite. Para la elección del método de cálculo de la ETP se ha tenido en cuenta la disponibilidad de datos de los escenarios climáticos, que a priori lleva a considerar preferentemente los métodos basados en parámetros térmicos, Thornthwaite o Hargreaves & Samani, por ejemplo. El método de Hargreaves utiliza además de la temperatura la radiación solar, variable no disponible entre los productos de ESCNARIOS PNACC-2012, pero que generalmente se obtiene a partir de tablas en función de la latitud. Se podría haber utilizado dicho método si bien, dado que de lo que se trata es de realizar un análisis de la variación entre los distintos horizontes temporales, no parece que pueda aportar mucho. Por otro lado, el método de Thornthwaite es el utilizado por el Sistema de Información Geográfico Agrario (SIGA) del MAGRAMA, por lo que se considera de interés utilizar la misma metodología para el cálculo del mapa de aridez en función de los escenarios climáticos.

4.3.1. Contraste con datos observados

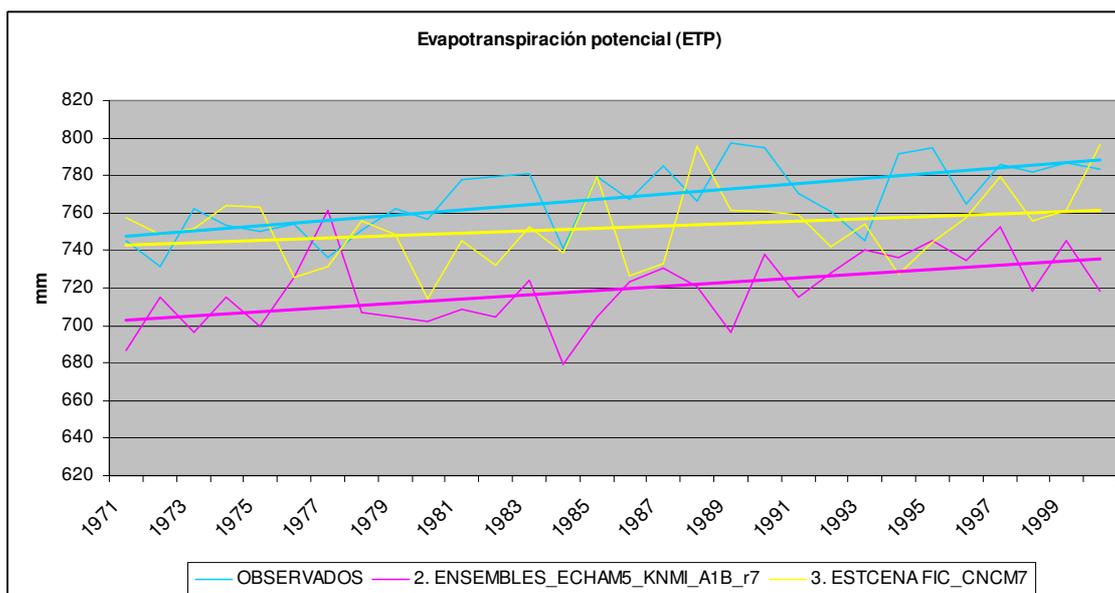
En el cuadro y gráficos adjuntos se incluyen los resultados de contrastar los datos observados medios para Península y Baleares de la ETP y el índice de aridez (IA) con los datos del periodo de control 20C3M. Se ha añadido el dato de las variables de partida que intervienen en el cálculo, la temperatura y la precipitación media acumulada anual.

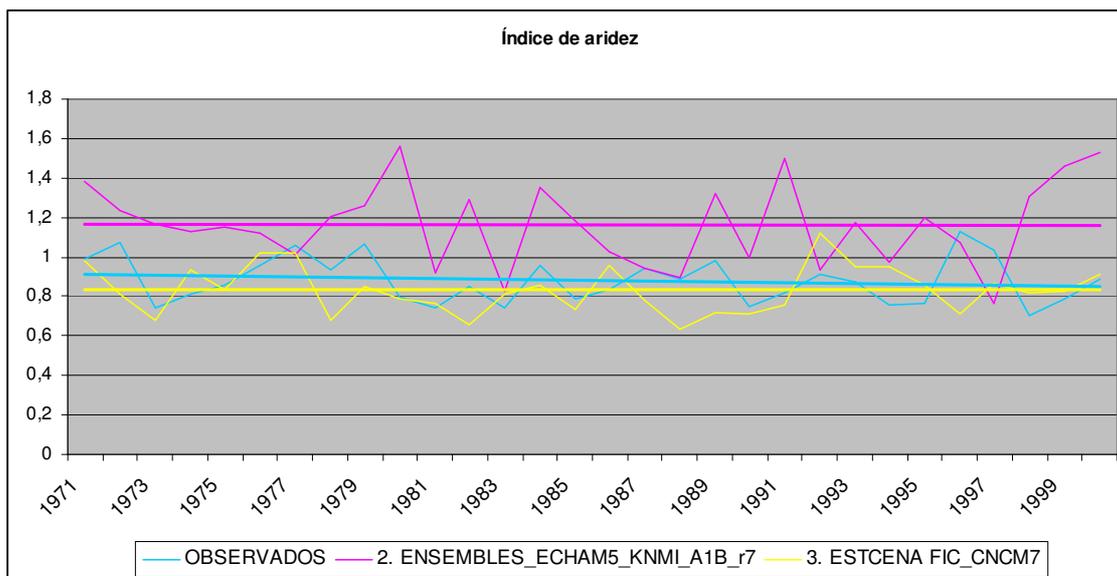
Comparativa de los datos observados medios de la ETP y el índice de aridez con los datos del periodo de control

Nº	Nombre Escenario.	PERIODO	TMIN_MEDIA_ANUAL	P_TOTAL_ANUAL_MEDIA	ETP_MEDIA_ANUAL	IA_MEDIA_ANUAL
		Observados 1971-2000	14,07	675,69	767,84	0,88
2	ENSEMBLES_ECHAM5_KNMI_A1B_r3	20C3M 1971-2000	12,82	834,35	719,24	1,16
		Variación control respecto observados	-8,88%	23,48%	-6,33%	31,92%
3	ESTCENA FIC_CNCM3	20C3M 1971-2000	13,61	626,40	752,05	0,83
		Variación control respecto observados	-3,27%	-7,29%	-2,06%	-5,38%

La variación de los valores obtenidos de ETP e IA con los escenarios respecto a los datos observados responde a las variaciones que ya se analizaron en las variables de partida. Así, se observa que en el caso de la proyección 2-ESC, las mayores diferencias en P y T explican que también se produzcan unos porcentajes de variación mayores, tanto en el caso de ETP como en el de IA. De igual modo, los valores de IA en la proyección 3-EST resultan muy similares, dado que las diferencias entre los valores obtenidos son de orden mucho menor.

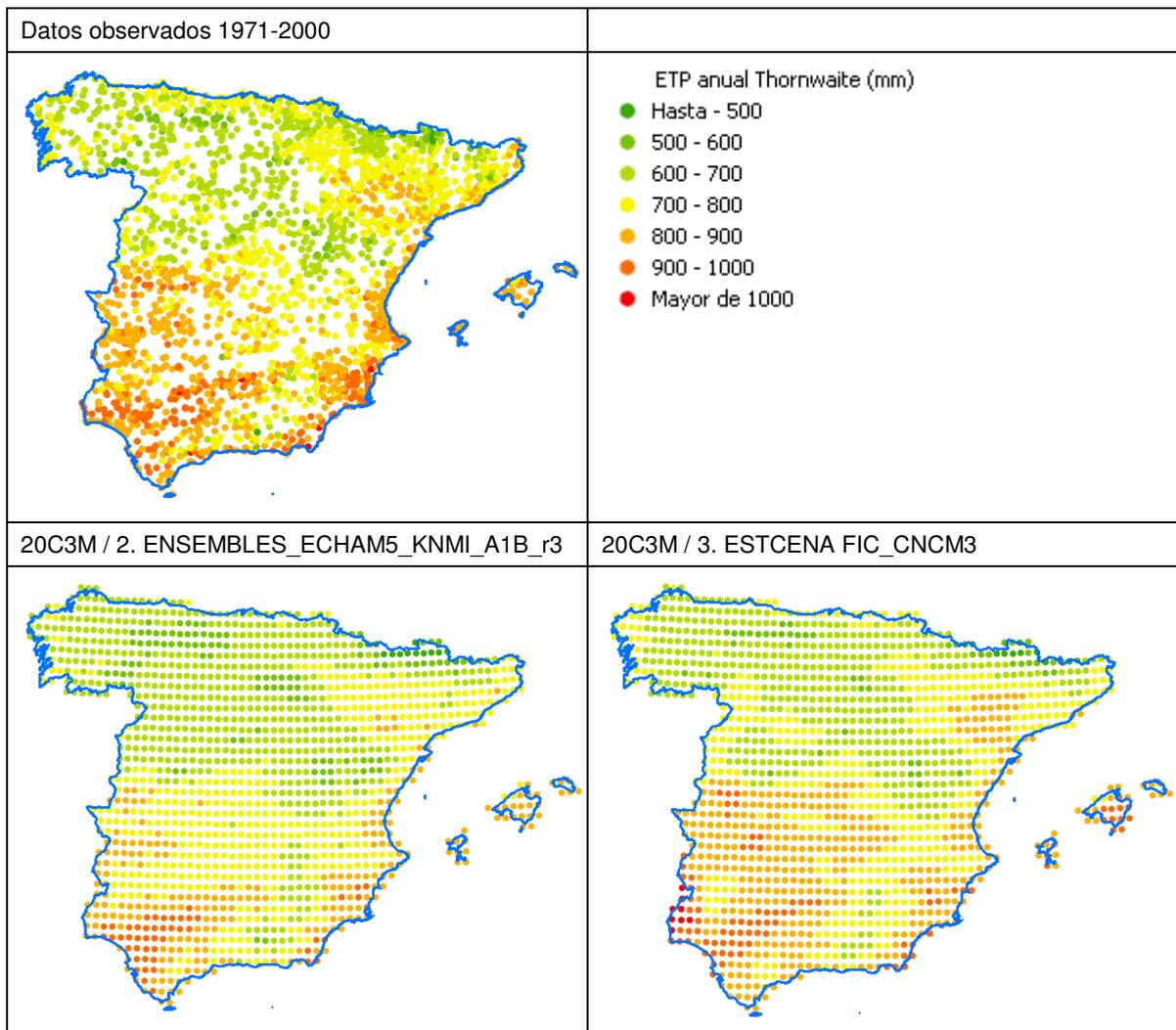
Las tendencias en el periodo de los datos obtenidos de los escenarios coinciden con las de los datos observados, ascendentes en el caso de la ETP y sin definir, es decir ni ascendente ni descendente, en el caso del índice de aridez.



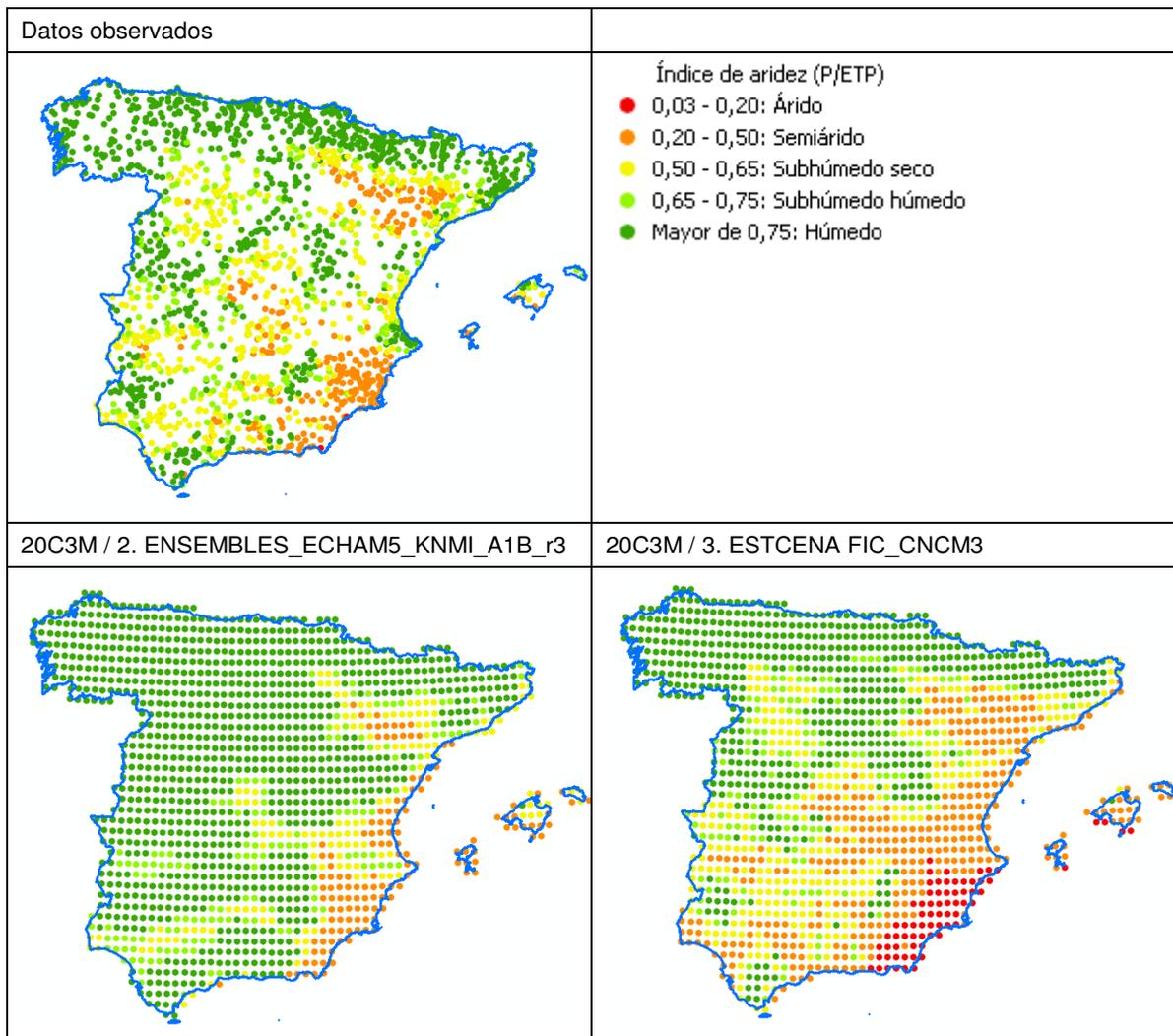


Los mapas adjuntos permiten realizar una comparativa de los valores medios de ETP e IA calculados con los datos observados en el periodo 1971-2000 y los valores medios obtenidos en los puntos de la rejilla *Spain02* con los modelos para el periodo de control 20C3M.

Evapotranspiración potencial anual



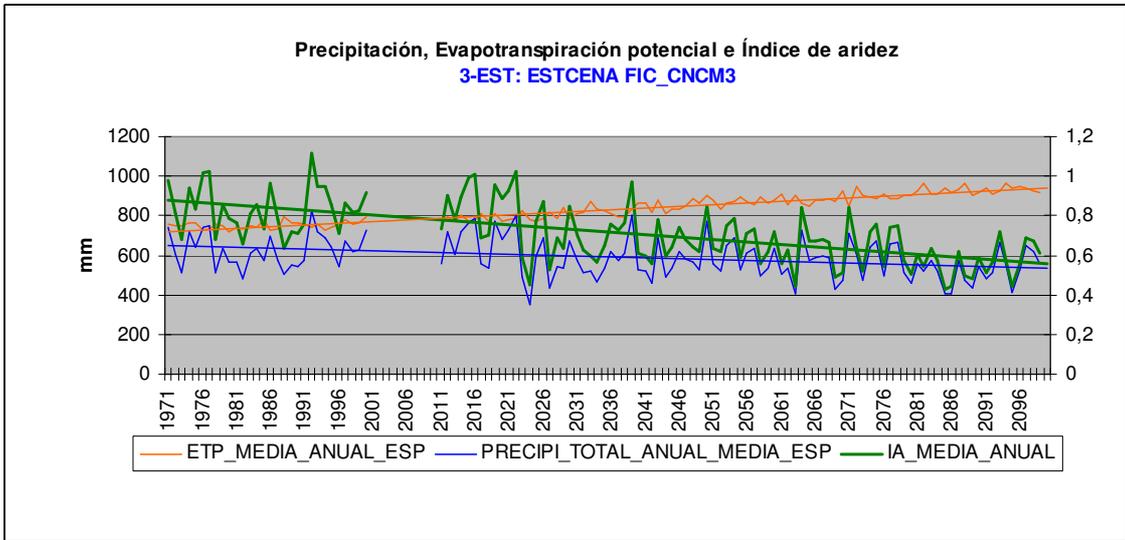
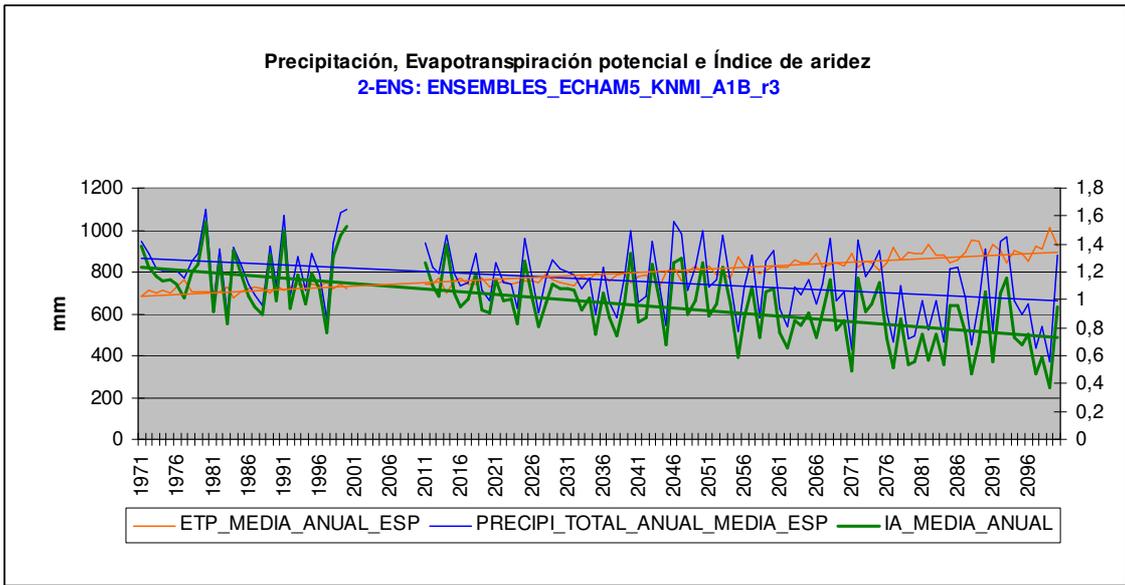
Índice de aridez



4.3.2. Evolución de los valores anuales de ETP e índice de aridez

Se representa a continuación la evolución a lo largo de todo el periodo analizado de los valores medios anuales para Península y Baleares de la precipitación acumulada anual (P), la evapotranspiración potencial (ETP) y el índice de aridez (IA) para los dos escenarios analizados.

Las tablas recogen los valores medios en cada periodo, el porcentaje de variación respecto al periodo de control y la diferencia de valores respecto al periodo de control. Se ha representado también en formato de gráfico la evolución de los valores medios de la ETP y el índice de aridez de los periodos para cada escenario.

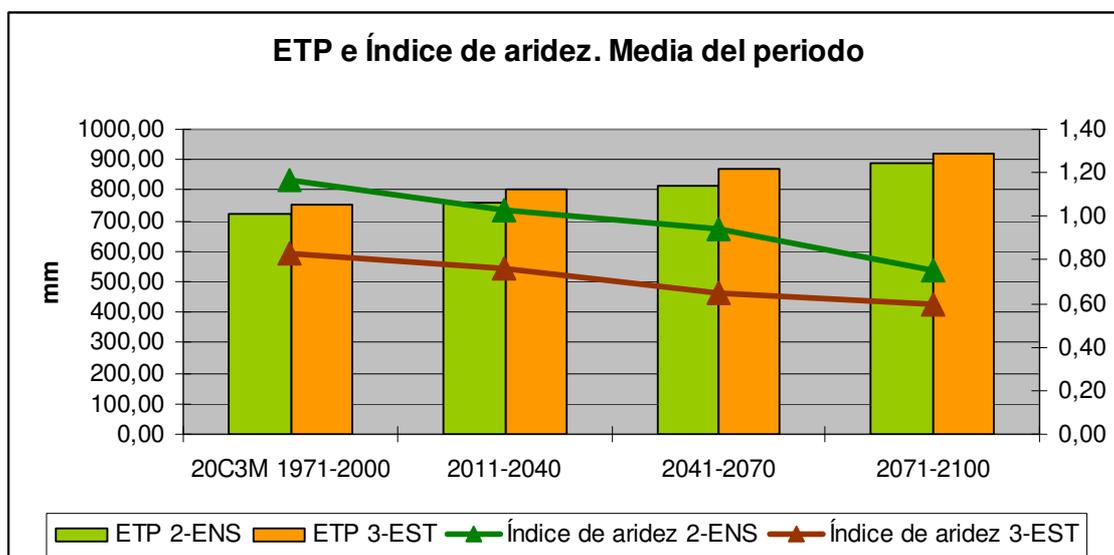


Datos de ETP (mm) periodo de control y proyectados

	2	3	Media 2 y 3
PERIODO	ENSEMBLES_ECHAM5_KNMI_A1B_r3	ESTCENA FIC_CNCM3	
20C3M 1971-2000	719,24	752,05	735,65
2011-2040	757,19	801,98	779,59
2041-2070	812,24	869,24	840,74
2071-2100	887,21	919,12	903,16
% Variación respecto a periodo de control			
2011-2040	5,28%	6,64%	5,96%
2041-2070	12,93%	15,58%	14,26%
2071-2100	23,35%	22,21%	22,78%
Diferencia respecto a periodo de control			
2011-2040	37,95	49,93	43,94
2041-2070	93,00	117,19	105,09
2071-2100	167,97	167,06	167,51

Datos de Índice de aridez periodo de control y proyectados

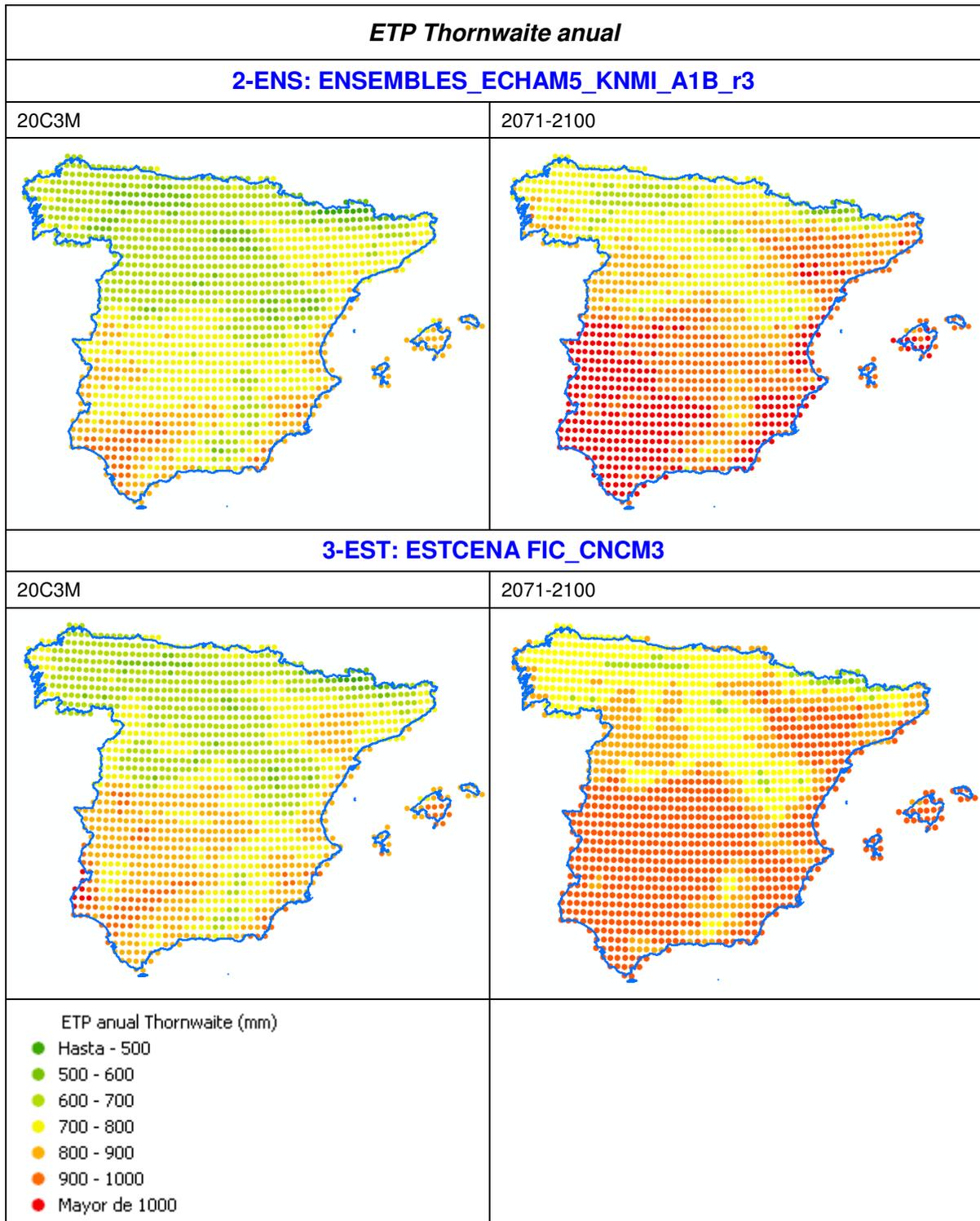
	2	3	Media 2 y 3
PERIODO	ENSEMBLES_ECHAM5_KNMI_A1B_r3	ESTCENA FIC_CNCM3	
20C3M 1971-2000	1,16	0,83	1,00
2011-2040	1,03	0,76	0,90
2041-2070	0,94	0,65	0,80
2071-2100	0,75	0,60	0,68
% Variación respecto a periodo de control			
2011-2040	-11,50%	-8,66%	-10,08%
2041-2070	-19,00%	-21,77%	-20,38%
2071-2100	-35,06%	-28,38%	-31,72%
Diferencia respecto a periodo de control			
2011-2040	-0,13	-0,07	-0,10
2041-2070	-0,22	-0,18	-0,20
2071-2100	-0,41	-0,24	-0,32

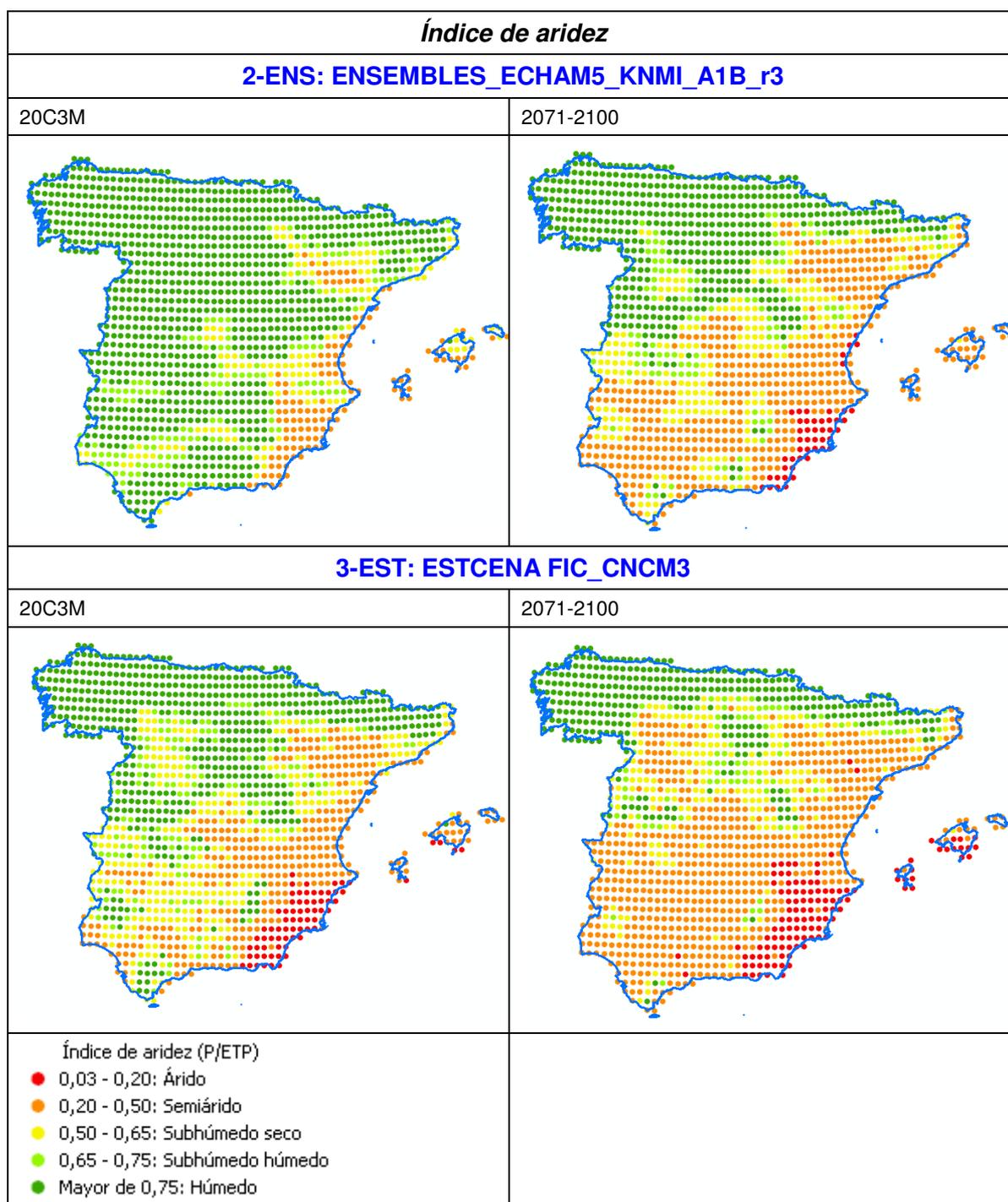


Como se puede apreciar en ambos casos la ETP aumenta a lo largo del siglo, aumento asociado al de la temperatura media. Los porcentajes de variación respecto al periodo de control de la ETP son muy similares en los dos escenarios, resultando como media un descenso de la ETP del 22,8% en cada periodo al final del siglo XXI.

El índice de aridez experimenta un acusado descenso en los dos escenarios, siendo mayor el porcentaje de variación del periodo final respecto al periodo de control en el caso de 2-ENS, de un 35,1%, que en el caso del 3-EST, que es del 28,4%.

Los mapas adjuntos permiten observar la evolución de los valores medios de ETP e IA entre el periodo de control y el periodo 2071-2100 ~~en los periodos~~ para cada uno de los escenarios. El incremento de la temperatura, y por tanto de la evapotranspiración, y el descenso de las precipitaciones se aúnan para que se produzca un incremento generalizado en todo el territorio de la aridez.

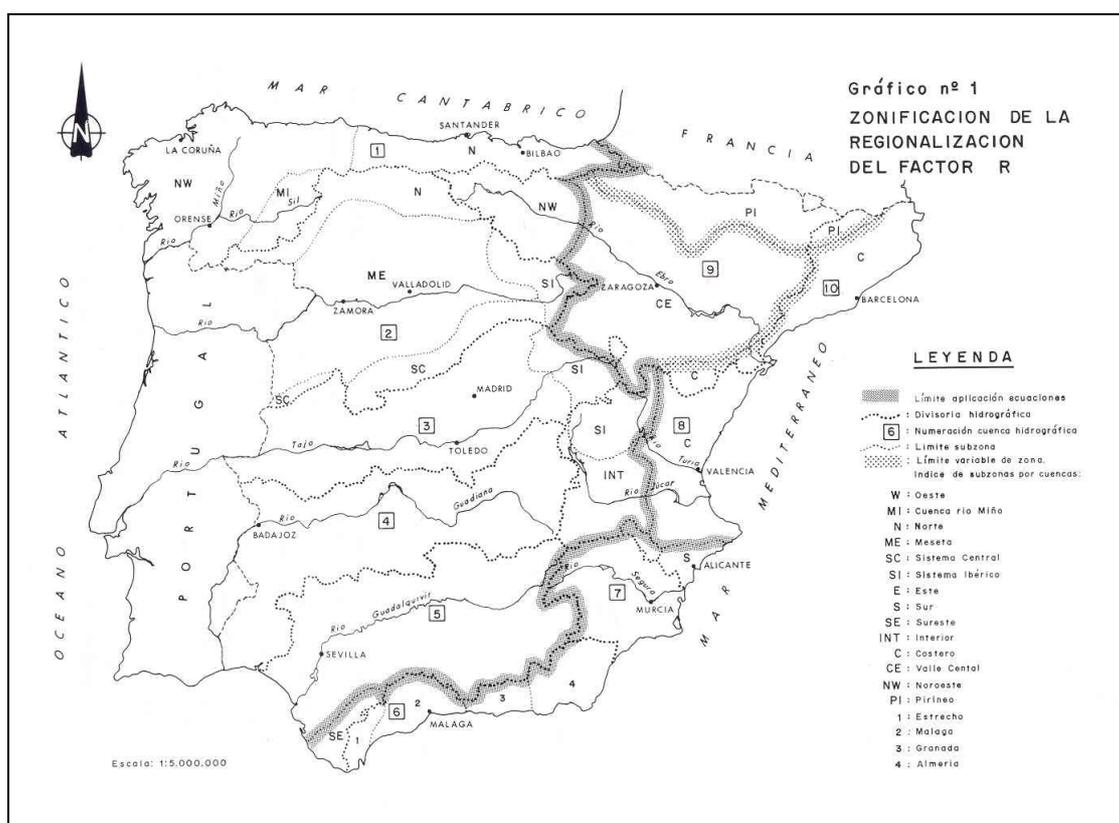




4.4. Índice de erosividad de la lluvia (Factor R de la USLE)

Para su cálculo se utiliza el procedimiento empleado en el Mapa de Estados Erosivos (MEE) y en el Inventario Nacional de Erosión de Suelos (INES), tanto para los datos actuales para toda España como para los datos procedentes de las predicciones.

El cálculo de R se basa en el estudio “Agresividad de la lluvia en España” (1988) publicado por el Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Este trabajo, a través de la formación de un banco de datos y el tratamiento de la información pluviográfica y pluviométrica recopilada, logró obtener el factor R mediante ecuaciones de regresión utilizando variables pluviométricas y la zonificación de la distribución mensual del factor R.



Las tres ecuaciones de regresión utilizadas son las siguientes:

- Zona 1: Cuencas del Norte de España, Duero, Ebro noroeste, Tajo, Levante Interior y en el Sistema Ibérico, Guadiana y Guadalquivir excepto el sureste.

$$R = e^{-0.834} (PMEX)^{1.297} (MR)^{-0.388} (F24)^{0.563}$$

- Zona 2: Guadalquivir sureste, Sur, Segura, Levante sur y Canarias.

$$R = e^{-1.235} (PMEX)^{1.297} (MR)^{-0.511} (MV)^{0.366} (F24)^{0.414}$$

- Zona 3: Subdividida en tres subzonas a efectos de aplicación de coeficientes en la ecuación de regresión:

- (A) Levante costera, Ebro costero, Pirineo Oriental costero y Baleares. (Zona Z.7 en la publicación de “Agresividad de la lluvia en España”)

- (B) Ebro central (Zona Z.9)
- (C) Una tercera zona en la que no se aplica ninguno de los dos últimos coeficientes de la ecuación: zona pirenaica de las cuencas del Ebro y Pirineo Oriental. (Zona Z.8)

$$R = e^{0.754} (T2)^{1.031} (T10)^{-0.828} (F)^{-0.482} (PMEX)^{1.628} (MR)^{-1.22} (MV)^{0.536} (F24)^{0.800} e^{0.211(A)} e^{-0.157(B)}$$

Es decir, el valor de los multiplicandos de la ecuación de regresión de la zona 3 será:

- $e^{0.211}$ para los puntos de la zona (A)
- $e^{-0.157}$ para los puntos de la zona (B)
- 1 para los puntos de la zona (C)

Para el cálculo de las ecuaciones se necesita:

- $PMEX$ = Valor medio de las series anuales de lluvias mensuales máximas (mm).
- MR = Precipitación media del periodo octubre-mayo (mm).
- MV = Precipitación media del periodo junio-septiembre (mm).
- F = Factor de Fournier, o índice de agresividad de la lluvia de Fournier: Valor medio de de una serie de años del coeficiente p^2/P , en el que p es la precipitación mensual del mes más lluvioso del año y P es la precipitación anual del año correspondiente (mm).
- $F24$ = Factor de concentración de la máxima lluvia diaria: División de la máxima lluvia en 24 h del año, elevada al cuadrado, por la suma de las máximas en 24 h de todos los meses de ese mismo año (mm).
- $T2$ y $T10$ = Lluvias máximas en 24 h con periodo de retorno de 2 y 10 años respectivamente. Estos valores se calculan mediante ajustes de la ley de distribución de frecuencias de Gumbel.

Todos estos parámetros se obtienen a partir de los datos de:

- Precipitación total mensual
- Precipitación máxima en 24 horas mensual

Al igual que en el cálculo de la ETP y el índice de aridez, se van a utilizar los datos en rejilla ofrecidos en Escenarios-PNACC 2012 (*Spain 02*, cuadrícula común y homogénea de una resolución de 0,2º (aprox. 20 km.), que cubre la España peninsular y Baleares. Con esos datos se calcula el factor R en cada punto de rejilla.

Es necesario tener en cuenta que la elaboración de estas ecuaciones se basa en bandas de pluviógrafo y en una distribución mensual de la lluvia para unos años concretos (los disponibles cuando se elaboró la publicación de 1988, que abarcan el periodo 1950-1985) hipótesis que se están trasladando al futuro. En caso de que, tal y como apuntan muchas estimaciones y pronósticos expertos (a pesar de que como se ha dicho los modelos no lo están reflejando con suficiente fiabilidad) se produjera una mayor irregularidad de la distribución en las precipitaciones y un incremento de la torrencialidad, es decir de la intensidad máxima de la lluvia, estas regresiones serían diferentes.

4.4.1. Contraste con datos observados

En el cuadro y gráfico adjuntos se incluyen los resultados de contrastar el cálculo realizado del factor R con los datos observados medios para Península y Baleares con el cálculo realizado con los datos del periodo de control 20C3M.

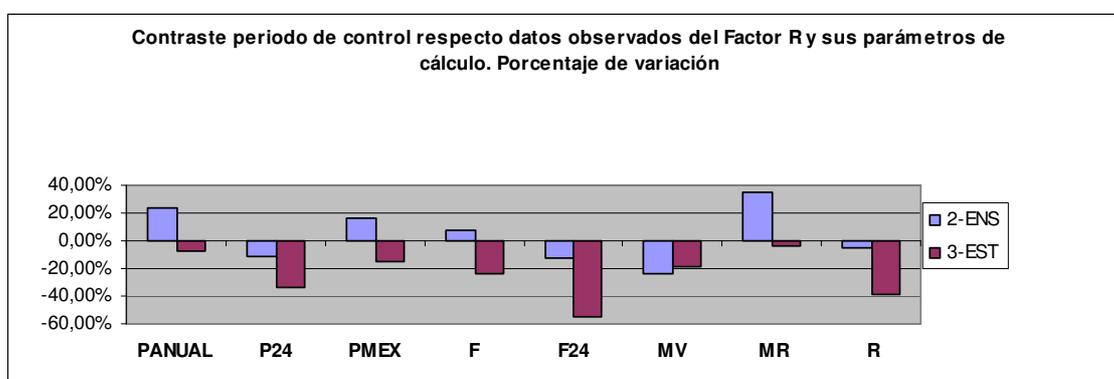
Se recogen en el cuadro los valores de los parámetros que intervienen en las ecuaciones de regresión utilizadas en cada zona. Se ha añadido también el valor de precipitación media anual acumulada (P).

Contraste datos observados media para Península y Baleares

Nombre Esc.	PERIODO	Panual	PMEX	P24MEX ¹⁶	F	F24	MV	MR	R
	Observados 1971-2000	675,69	162,41	51,62	42,87	12,61	129,09	544,27	129,75
2-ENS	20C3M 1971-2000	834,35	189,11	45,53	46,34	10,99	97,98	736,37	123,37
	Variación control respecto observados	23,48%	16,44%	-11,79%	8,09%	-12,88%	-24,10%	35,30%	-4,91%
3-EST	20C3M 1971-2000	626,40	137,67	34,35	32,89	5,71	104,95	521,46	80,07
	Variación control respecto observados	-7,29%	-15,23%	-33,46%	-23,27%	-54,74%	-18,70%	-4,19%	-38,29%

2-ENS: ENSEMBLES_ECHAM5_KNMI_A1B_r5

3-EST: ESTCENA FIC_CNCM3



En la proyección 2-ENS el valor de R es muy similar al observado, siendo los distintos parámetros de cálculo unas veces superiores y otras inferiores si bien con variaciones no muy elevadas. Se pronostica un descenso de las precipitaciones de verano de un 24,1% y un aumento de las precipitaciones de octubre-mayo de un 35,3%.

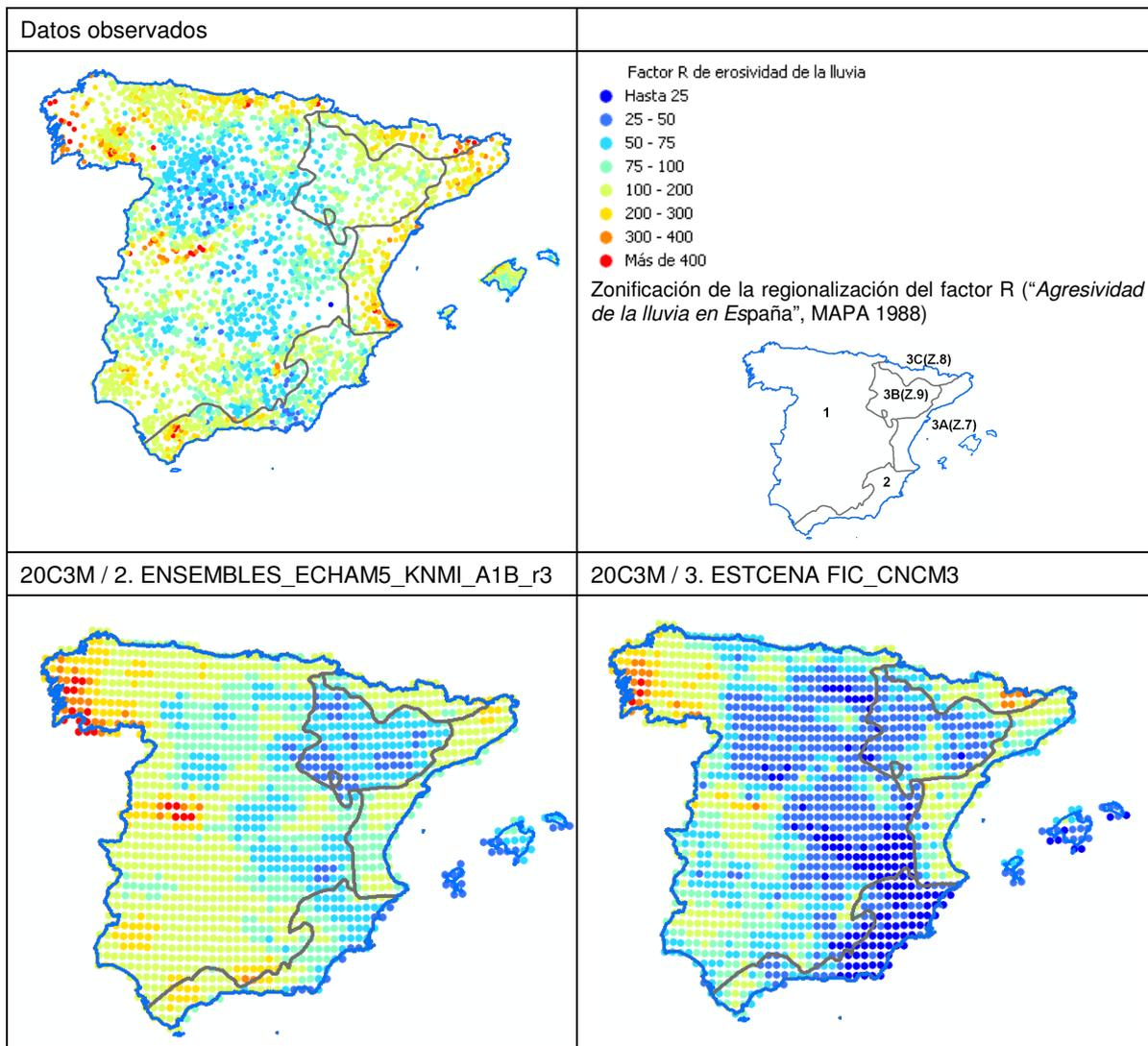
La proyección 3-ESC obtiene valores de los parámetros de cálculo algo inferiores a los observados. Destaca el valor del Factor de concentración de la máxima lluvia diaria (F), inferior en un 54,7%, y el valor de R, inferior en un 38,3%.

Estas diferencias en el comportamiento de los escenarios en los distintos factores que intervienen en el cálculo del factor R, suman incertidumbre a la que ya se tiene de origen respecto a las predicciones de las precipitaciones intensas.

Los mapas adjuntos permiten realizar una comparativa de los valores medios de R calculados con los datos observados en el periodo 1971-2000 y los valores medios obtenidos en los puntos de la rejilla *Spain 02* con los modelos para el periodo de control 20C3M.

¹⁶ El valor de la precipitación máxima diaria media P24MEX de datos observados difiere ligeramente del valor reflejado en el epígrafe de contraste de datos observados (52,59 mm frente a 51,62 mm). La razón es que para el cálculo de R se calcula primero la media de P24 en cada punto de la rejilla del periodo 1971-2000 y posteriormente se hace la media para Península y Baleares. Sin embargo el valor utilizado en datos observados procede de calcular primero la media del valor de todos los puntos de la rejilla cada año y después se obtiene la media de la serie de medias anuales.

Factor R erosividad de la lluvia



En ambos casos se observa que los escenarios no recogen alguna de las zonas en las que los valores observados de R son elevados, en particular, las zonas del levante mediterráneo.

4.4.2. Evolución de los valores del factor R

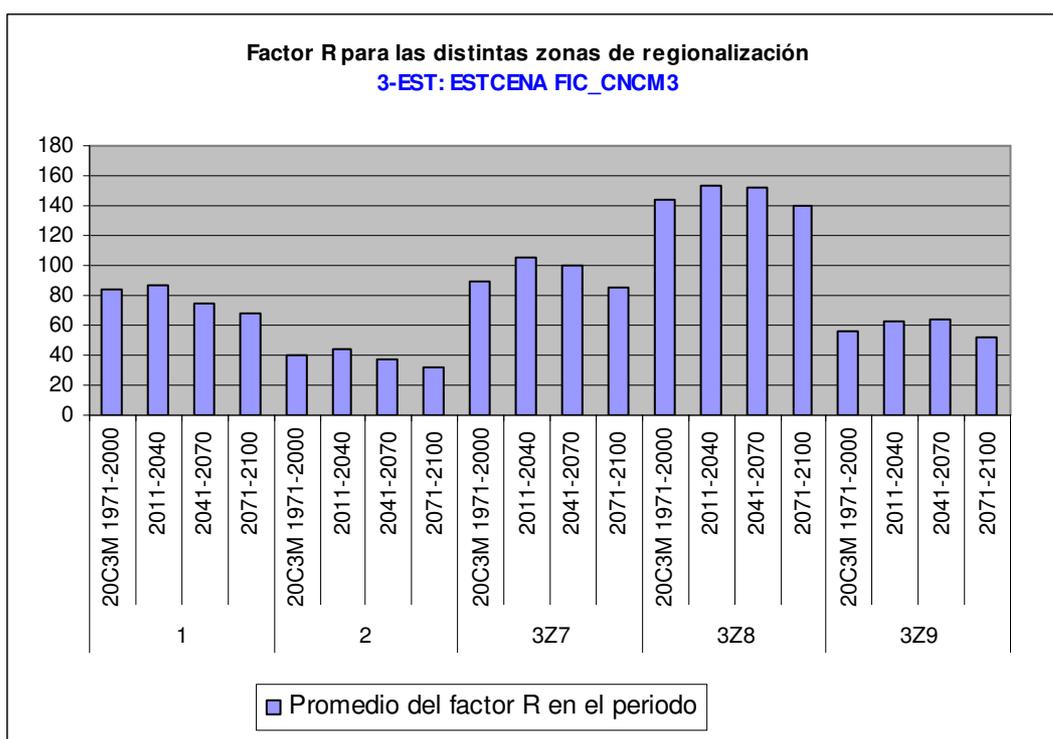
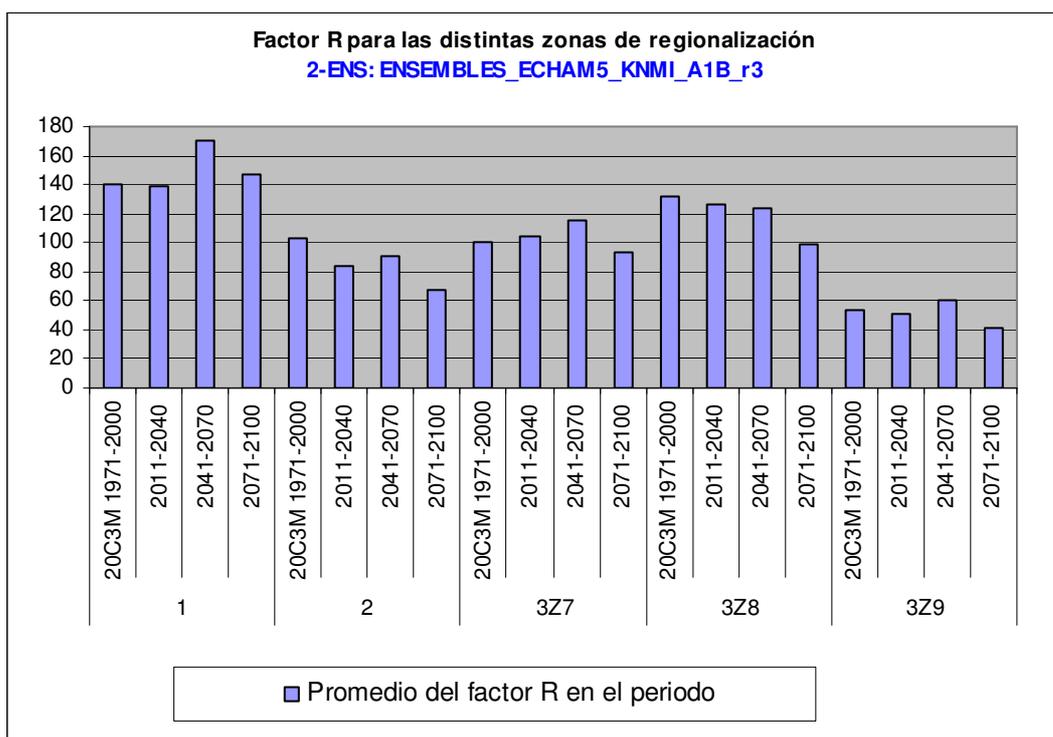
Las tablas adjuntas recogen los valores medios para Península y Baleares de los parámetros empleados en el cálculo del factor R.

	2-ENS: ENSEMBLES_ECHAM5_KNMI_A1B_r3							
	Panual	PMEX	P24MEX	F	F24	MV	MR	R
20C3M 1971-2000	834,35	189,11	45,53	46,34	10,99	97,98	736,37	123,37
2011-2040	777,26	184,77	45,99	47,01	11,37	86,92	690,34	121,12
2041-2070	761,74	202,57	47,13	59,40	12,33	77,12	684,62	145,07
2071-2100	662,75	169,95	46,54	47,49	13,34	53,95	608,79	121,50
	3-EST: ESTCENA_FIC_CNCM3							
	Panual	PMEX	P24MEX	F	F24	MV	MR	R
20C3M 1971-2000	626,40	137,67	34,35	32,89	5,71	104,95	521,46	80,07
2011-2040	608,91	139,74	34,43	35,33	5,77	110,42	498,49	85,30
2041-2070	566,68	124,59	33,46	29,78	5,56	107,50	459,18	76,26
2071-2100	547,42	115,72	31,99	27,65	5,29	104,49	424,68	68,21

Se han calculado también los valores del factor R en las distintas zonas de aplicación de las ecuaciones de regresión. Se recogen en el cuadro y gráficos adjuntos los valores medios de R por periodos en cada zona.

Datos de Factor R de periodo de control y proyectados. Valores medios en cada zona de aplicación y porcentaje de variación respecto a periodo de control

ZONA	PERIODO	Valores medios			% Variación respecto a periodo de control		
		2-ENS	3-EST	Media 2 y 3	2-ENS	3-EST	Media 2 y 3
1	20C3M 1970-1999	140	84	112			
	2011-2040	139	87	113	-0,5%	3,6%	1,0%
	2041-2070	171	75	123	22,4%	-10,5%	10,1%
	2071-2100	146	68	107	4,9%	-18,4%	-3,8%
2	20C3M 1970-1999	103	39	71			
	2011-2040	84	44	64	-18,5%	12,7%	-9,9%
	2041-2070	90	37	64	-12,3%	-6,2%	-10,6%
	2071-2100	67	31	49	-35,0%	-20,4%	-30,9%
3Z7	20C3M 1970-1999	100	89	94			
	2011-2040	104	105	105	4,6%	18,5%	11,1%
	2041-2070	116	100	108	15,9%	13,0%	14,5%
	2071-2100	94	85	90	-6,1%	-3,7%	-5,0%
3Z8	20C3M 1970-1999	132	145	138			
	2011-2040	126	154	140	-4,8%	6,5%	1,1%
	2041-2070	124	152	138	-6,7%	5,4%	-0,4%
	2071-2100	99	140	119	-25,5%	-3,0%	-13,7%
3Z9	20C3M 1970-1999	54	56	55			
	2011-2040	51	63	57	-5,4%	11,7%	3,3%
	2041-2070	60	63	62	11,7%	13,5%	12,6%
	2071-2100	42	52	47	-23,0%	-6,6%	-14,7%
Península y Baleares	20C3M 1970-1999	123	80	102			
	2011-2040	121	85	103	-1,8%	6,5%	1,5%
	2041-2070	145	76	111	17,6%	-4,8%	8,8%
	2071-2100	122	68	95	-1,5%	-14,8%	-6,7%



En el primer periodo 2011-2040 la pauta de comportamiento del factor R en la proyección 2 no tiene una tendencia uniforme, aumentando o disminuyendo según las zonas. En la proyección 3 aumenta en todas las zonas.

En el segundo periodo 2041-2070 en la proyección 2 el factor R aumenta respecto al periodo anterior en la mayoría de las zonas, mientras que en la proyección 3 tiene a disminuir respecto al anterior en todas las zonas.

En el tercer periodo 2071-2100 la tendencia coincide en ambos escenarios y en todas las zonas, el factor R disminuye respecto al periodo anterior. Salvo excepciones (zona

1, periodo 2011-2040, 2-ENS), el valor medio del factor R en el último periodo del siglo XXI es inferior al valor medio en el periodo de control.

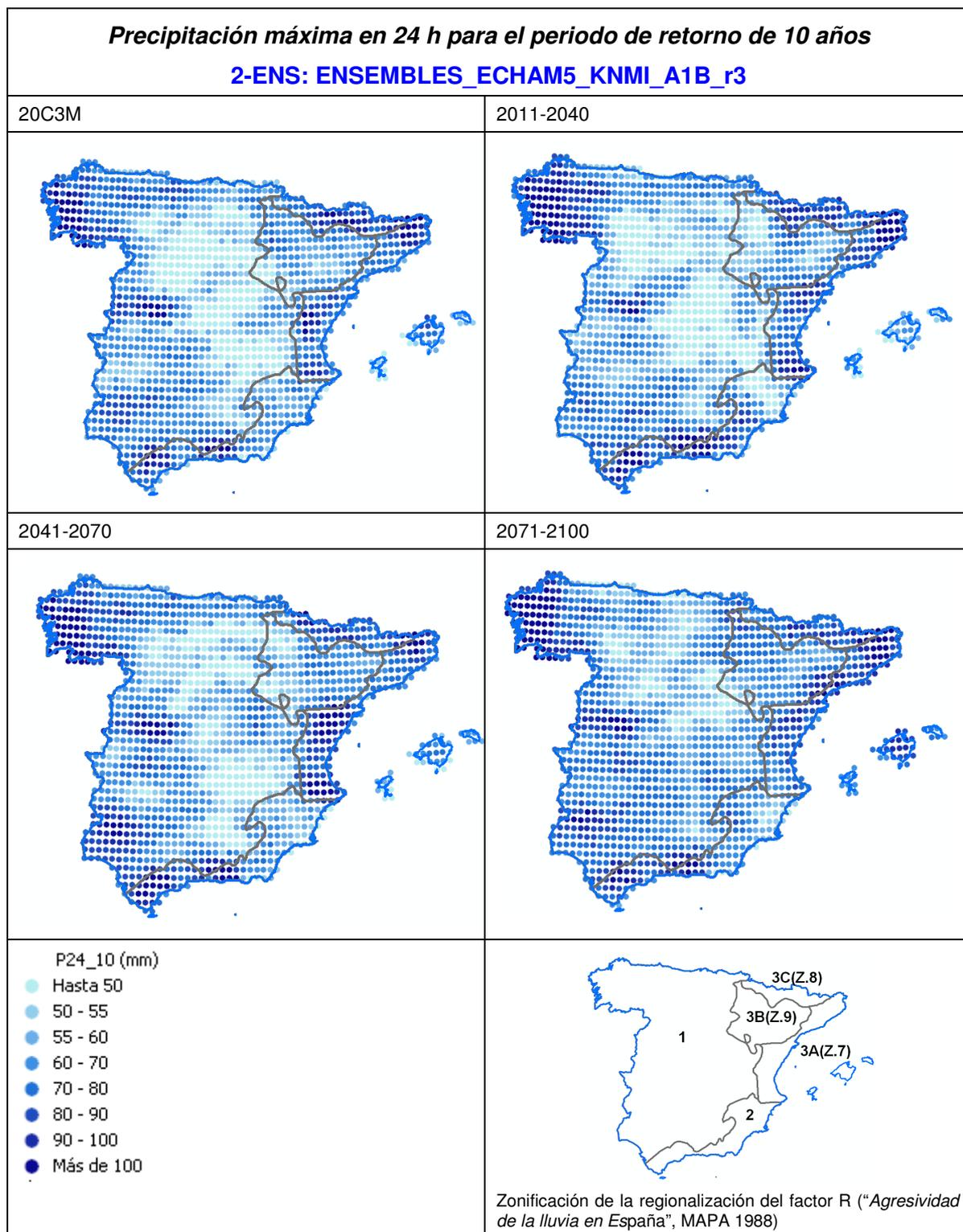
En general se puede decir que la pauta de comportamiento del factor R a lo largo del siglo es de un ligero aumento bien durante el segundo o tercer periodo de siglo seguido de una disminución al final del periodo. Esta pauta, salvo alguna excepción, es similar en las distintas zonas analizadas.

Si nos centramos en el comportamiento de los índices más relacionados con la capacidad erosiva de la lluvia, es decir, *F* Índice de agresividad de la lluvia de Fournier y, se puede ver que la evolución de los valores medios para Península y Baleares es la siguiente:

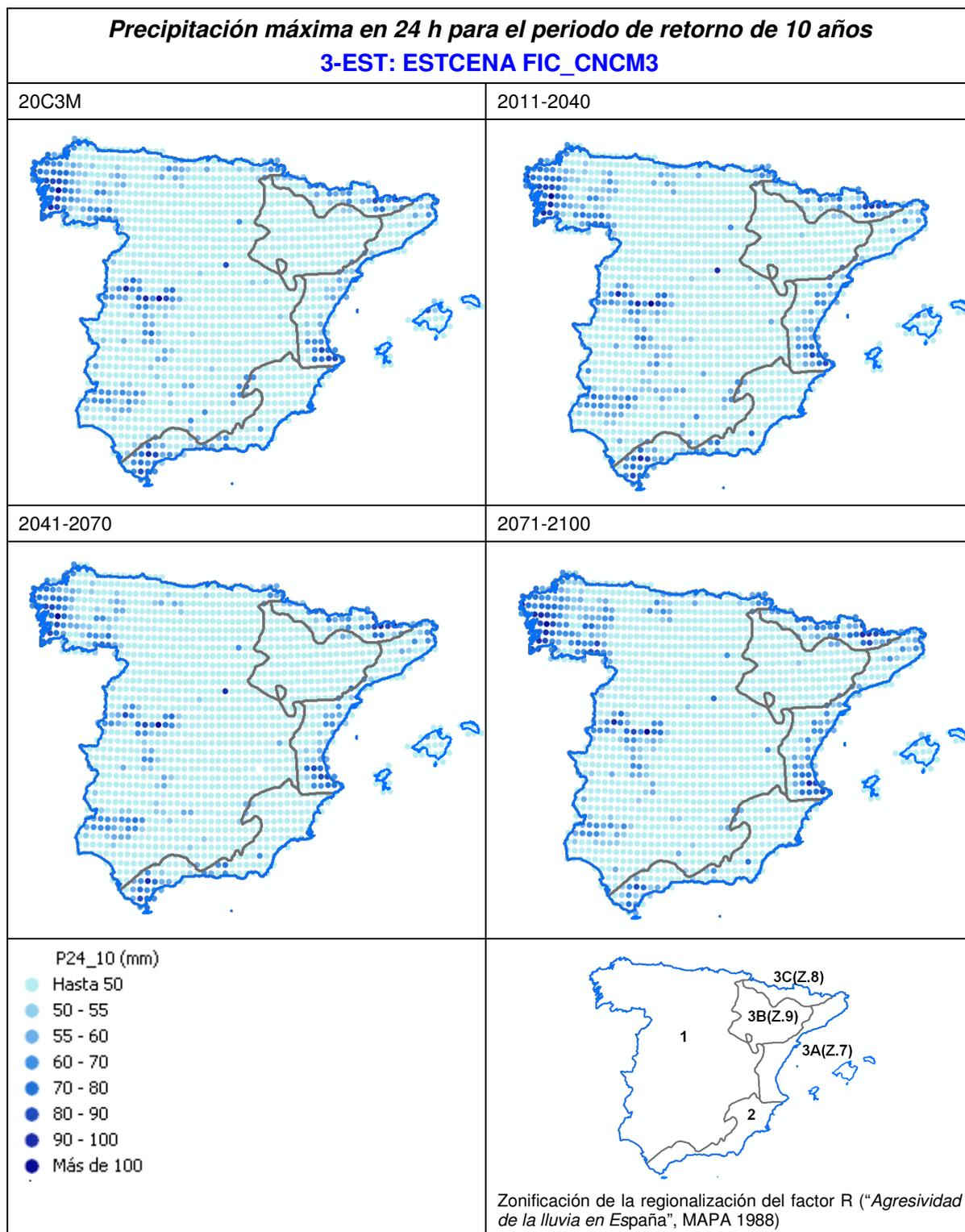
- El valor de *F* Índice de Fournier sigue la pauta del factor R, experimentado primero un crecimiento y terminando el siglo con un valor similar o inferior al del periodo 1971-2000.
- El valor del *F24* Factor de concentración de la máxima lluvia diaria se incrementa de forma constante en la proyección 2-ENS, pero en la proyección 3-EST crece ligeramente al principio, para descender después aunque de forma también muy ligera.

En conclusión, la estimación de la erosividad de la lluvia en función del cambio climático está muy condicionada por la menor precisión de los modelos climáticos en cuando a la predicción del comportamiento de las precipitaciones, y en particular por la reconocidamente elevada incertidumbre en la evolución de las futuras pautas de las eventos de precipitaciones intensas.

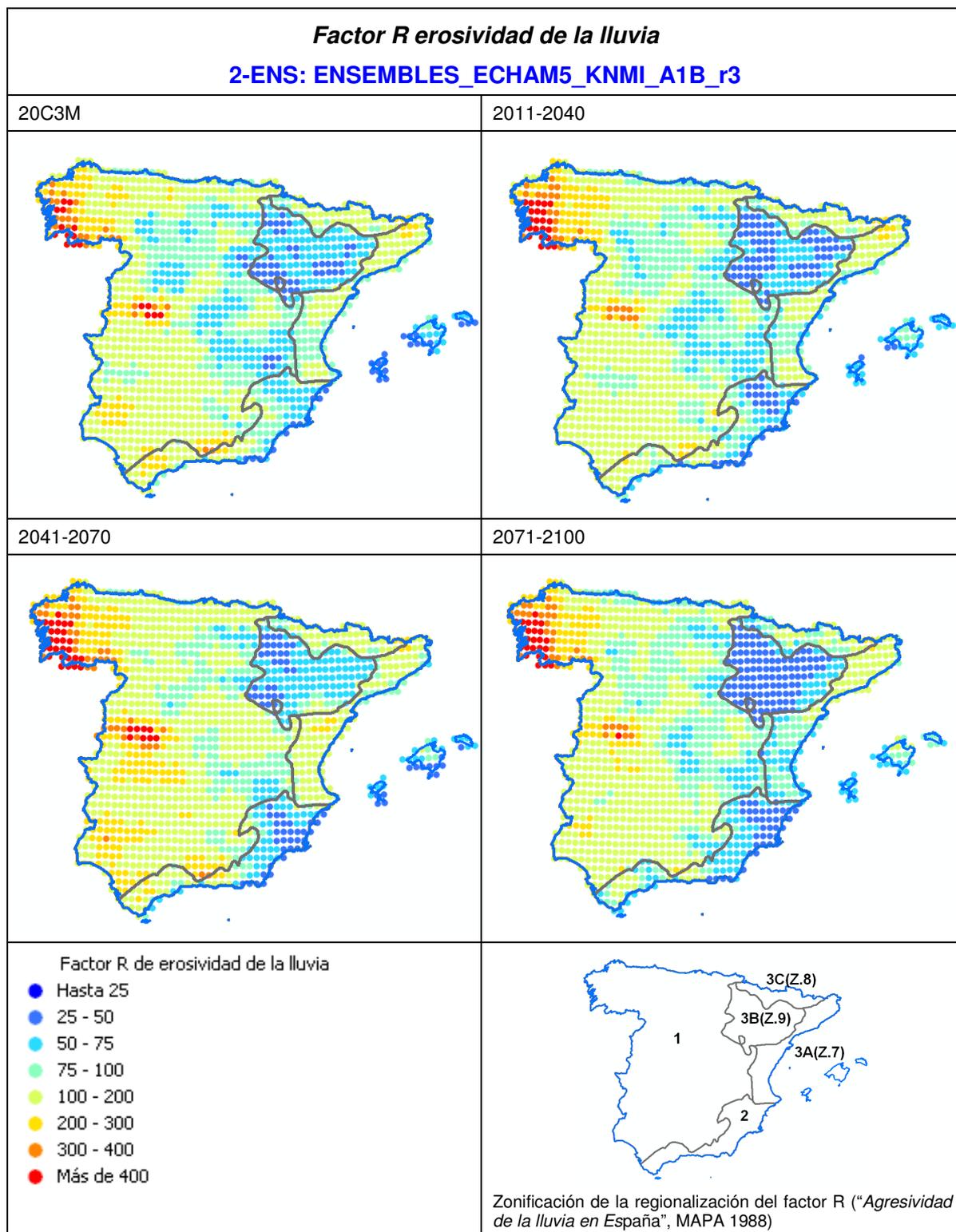
Los mapas adjuntos permiten observar, para cada uno de los escenarios, la evolución de los valores medios de P24 para el periodo de retorno de 10 años y del factor R a lo largo de los cuatro periodos considerados. En este caso, y a diferencia de lo que ocurría con la ETP y el índice de aridez, la tendencia no es uniforme a lo largo del siglo XXI.



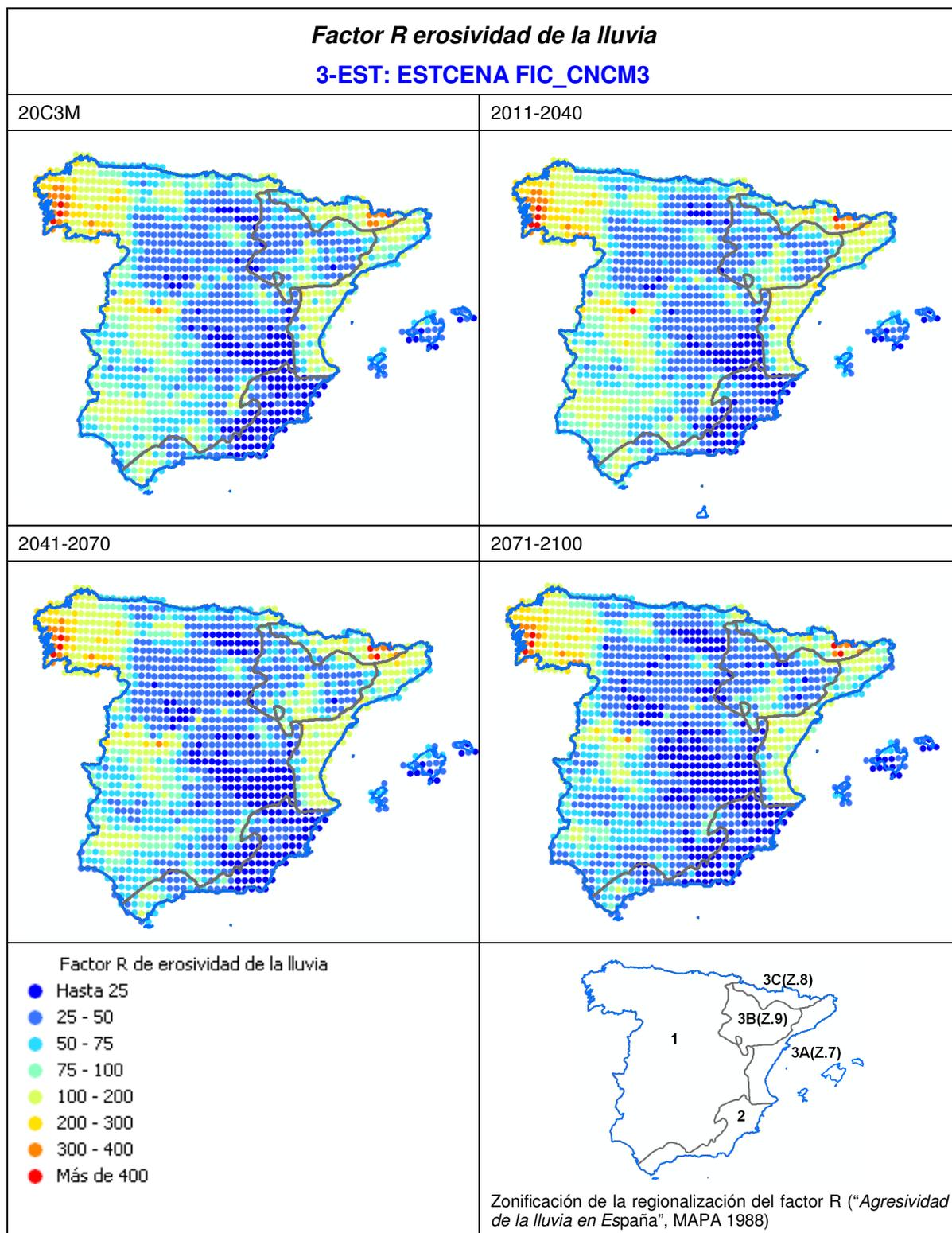
En la zona del levante valenciano se observa un ligero incremento de las P24 en el periodo 2041-2010, seguida de una disminución en el periodo 2071-2100. En la zona costera catalana la pauta parece ser de aumento-disminución-aumento.



No se aprecian tendencias claras de cambio salvo subidas y bajadas de P24 puntuales en la región del levante valenciano.



Excepto en la zona NO de la Península, se observa una disminución generalizada de R en los periodos 2011-2040 y 2071-2100, y un aumento de R en el periodo 2041-2070.



Se observa cierto incremento en las zonas del levante catalán y valenciano, en los periodos 2011-2040 y 2041-2070, seguido de un descenso en el periodo 2071-2100.

4.5. Comparativa de escenarios

La tabla adjunta recoge los resultados obtenidos y la comparativa entre los escenarios.

Variable		2-ENS	3-EST	Observaciones
Temperatura	Variación control respecto datos observados	-8,88%	-3,27%	Incremento muy similar de la temperatura
	% Variación respecto a periodo de control			
	2011-2040	6,77%	8,35%	
	2041-2070	16,48%	17,97%	
	2071-2100	27,48%	23,95%	
	Diferencia 2071-2100 respecto a periodo de control (°C)	3,52	3,26	
Precipitación acumulada anual	Variación control respecto datos observados	23,48%	-7,29%	Descenso mucho mayor de la P anual en 2-ENS que en 3-EST, que pudiera estar influido por la sobrevaloración de los valores de Panual en el periodo de control respecto a los datos observados.
	% Variación respecto a periodo de control			
	2011-2040	-6,84%	-2,79%	
	2041-2070	-8,70%	-9,53%	
	2071-2100	-20,57%	-12,61%	
	Diferencia 2071-2100 respecto a periodo de control (mm)	-171,61	-78,99	
Precipitación máxima en 24 h	Variación control respecto datos observados	-13,42%	-34,69%	Aunque de signo contrario, las diferencias entre unos periodos y otros en ambos casos son muy pequeñas. En valor absoluto la diferencia entre el valor de P24 de 2071-2100 y el de 1971-2000 es muy parecida.
	% Variación respecto a periodo de control			
	2011-2040	1,01%	0,24%	
	2041-2070	3,51%	-2,58%	
	2071-2100	2,23%	-3,63%	
	Diferencia 2071-2100 respecto a periodo de control (mm)	1,01	-1,25	
Evapotranspiración potencial	Variación control respecto datos observados	-6,33%	-2,06%	Incremento muy similar de la ETP, consistente con el incremento de la temperatura
	% Variación respecto a periodo de control			
	2011-2040	5,28%	6,64%	
	2041-2070	12,93%	15,58%	
	2071-2100	23,35%	22,21%	
	Diferencia 2071-2100 respecto a periodo de control (mm)	167,97	167,06	
Índice de aridez	Variación control respecto datos observados	31,92%	-5,38%	En 2-ENS como consecuencia de la sobrevaloración de los valores de Panual en el periodo de control respecto a los datos observados, el índice de aridez tiene un valor también muy superior al de los datos observados. El descenso del índice de aridez es también superior en 2-ENS que en 3-ESC, en consonancia con el superior descenso en la Panual.
	% Variación respecto a periodo de control			
	2011-2040	-11,50%	-8,66%	
	2041-2070	-19,00%	-21,77%	
	2071-2100	-35,06%	-28,38%	
	Diferencia 2071-2100 respecto a periodo de control	-0,41	-0,24	

Variable		2-ENS	3-EST	Observaciones	
Factor R erosividad de la lluvia	Variación control respecto datos observados	-4,91%	-38,29%	En los dos casos R aumenta y luego disminuye aunque en distintos periodos de tiempo. Al final descienden los dos, pero en el caso de 2-ENS el descenso es mucho menor. Esta diferencia en el porcentaje de descenso del factor R, pudiera deberse a una combinación de factores como puede ser una P mas elevada en 2-ENS junto con un R infravalorado respecto a los datos observados en el caso de 3-EST.	
	% Variación respecto a periodo de control				
	2011-2040	-1,82%	6,53%		
	2041-2070	17,59%	-4,75%		
	2071-2100	-1,51%	-14,81%		
Diferencia 2071-2100 respecto a periodo de control	-1,00	-12,00			

A la vista de las observaciones se propone utilizar la proyección ESTCENA FIC_CNCM3 para el siguiente paso, que es la interpolación de los mapas de aridez y del factor R para realizar una estimación de:

- Los cambios en el mapa de riesgo de desertificación como consecuencia del incremento de aridez.
- Los cambios en la erosión como consecuencia de las variaciones del factor R
- Los cambios en el mapa de riesgo de desertificación como consecuencia del incremento de aridez y de los cambios en la erosión.

4.6. Interpolación de los mapas de aridez y factor R

La interpolación trata de obtener mapas o coberturas en continuo a partir de datos discretos localizados en puntos, mediante métodos geoestadísticos, en concreto *Kriging ordinario*. Este método se basa en calcular valores de la variable distribuida espacialmente basándose en que dichos valores tienen una cierta dependencia espacial.

Mediante un análisis estructural de los datos localizados se estima y modela la función que describe la dependencia o correlación espacial, que podrá aplicarse posteriormente a puntos no muestreados y por tanto de forma continua a toda la superficie de estudio.

En el método *Kriging* la función de estimación o de predicción de un valor cualquiera en un punto no muestreado depende de los valores reales o muestreados de n vecinos, ponderados según unos coeficientes llamados pesos. Los valores de los pesos se establecen en función de las distancias entre los puntos muestreados y el punto a calcular. La función de predicción es el resultado de analizar cómo se distribuyen espacialmente los valores conocidos mediante un diagrama de varianzas o *variograma experimental* y ajustarlo a un modelo teórico conocido, es decir a una expresión matemática que generalice lo observado en el *variograma experimental*.

Se ofrecen a continuación los resultados obtenidos de la interpolación de los mapas de aridez y del factor R en cuanto a la variación en el tiempo de la distribución de la superficie en cada rango de aridez y de erosividad de la lluvia.

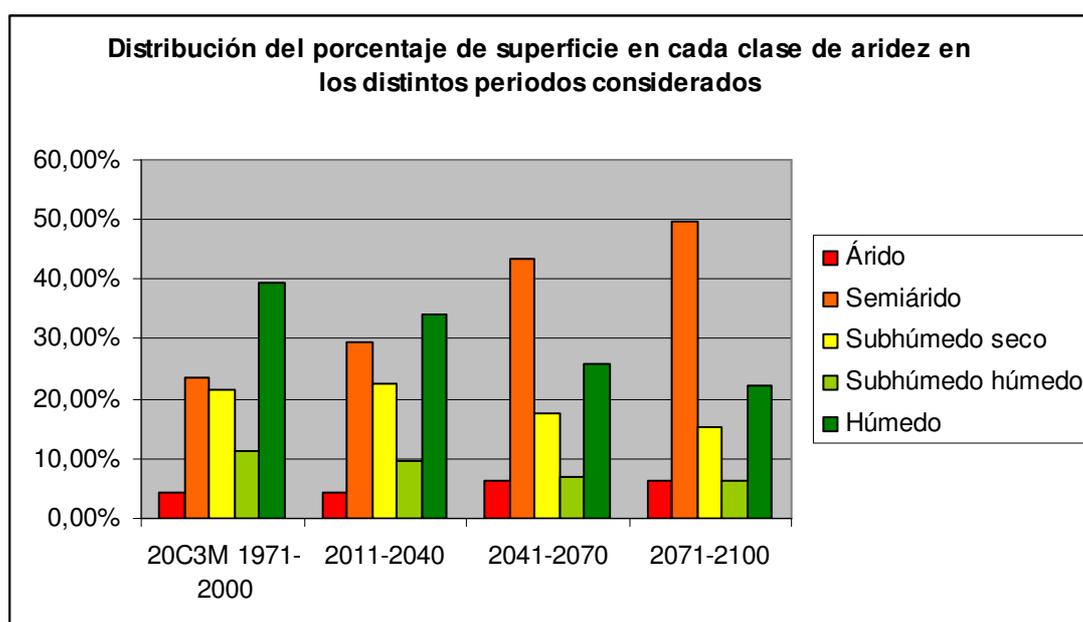
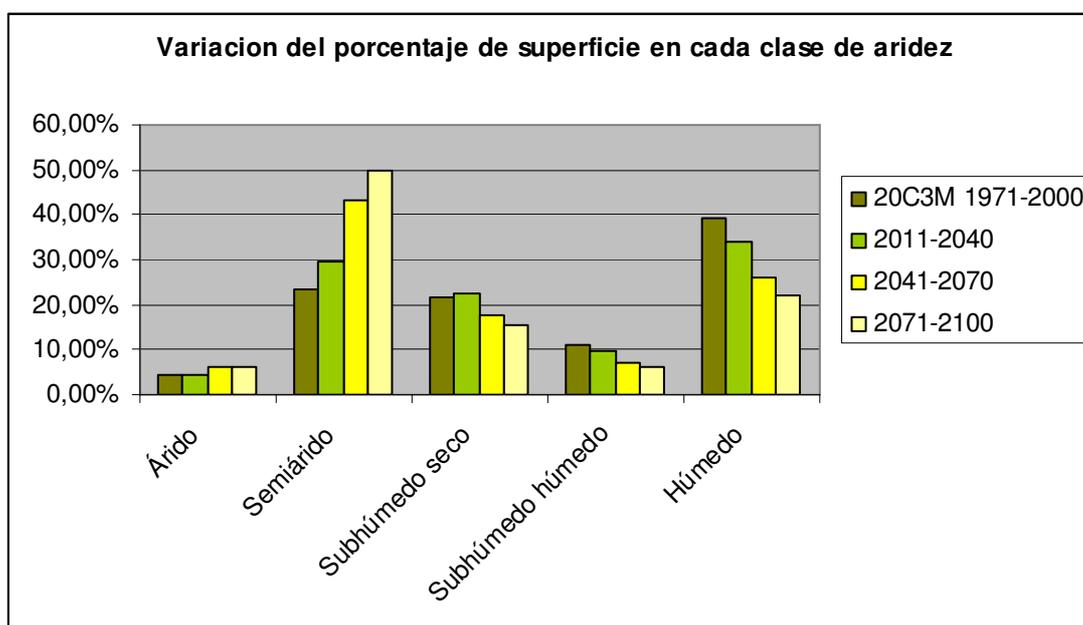
Índice de aridez

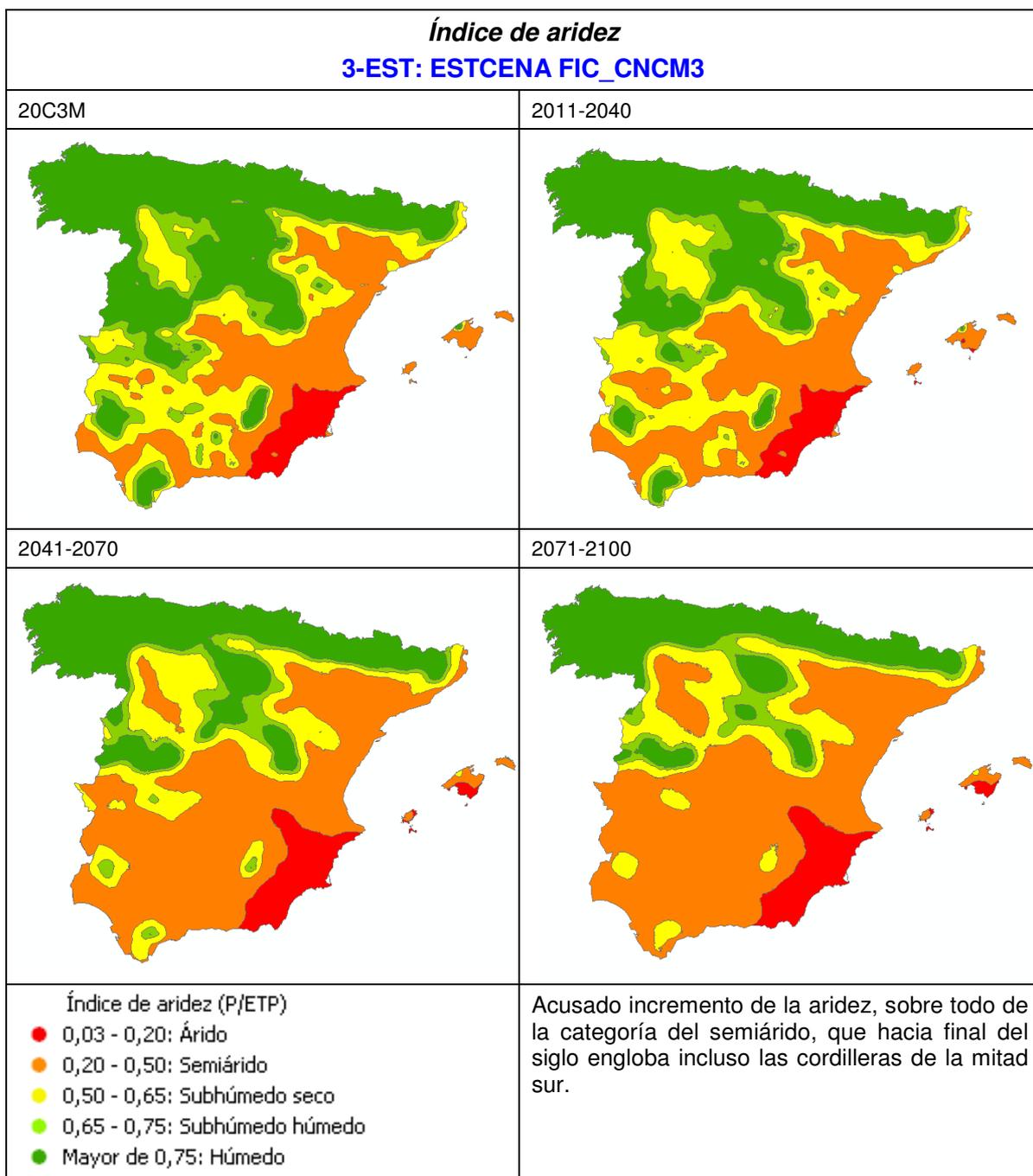
En la tabla y gráfico de variación del porcentaje de superficie en cada clase de aridez se puede observar el incremento de la superficie en las categorías de mayor aridez, muy poco acusado en la categoría más árida y muy acusado en la categoría del semiárido, sobre todo a partir del segundo periodo considerado, 2041-2070.

Variación del porcentaje de superficie en cada clase de aridez

Índice de aridez	20C3M 1971-2000	2011-2040	2041-2070	2071-2100
Árido	4,40%	4,39%	6,17%	6,38%
Semiárido	23,43%	29,53%	43,30%	49,81%
Subhúmedo seco	21,53%	22,56%	17,46%	15,36%
Subhúmedo húmedo	11,22%	9,52%	7,07%	6,25%
Húmedo	39,41%	34,01%	26,00%	22,20%

Comparando las distribuciones de superficie en cada clase de aridez entre el periodo de control y el periodo de fin de siglo XXI, se observa la importancia del incremento de aridez pronosticado.





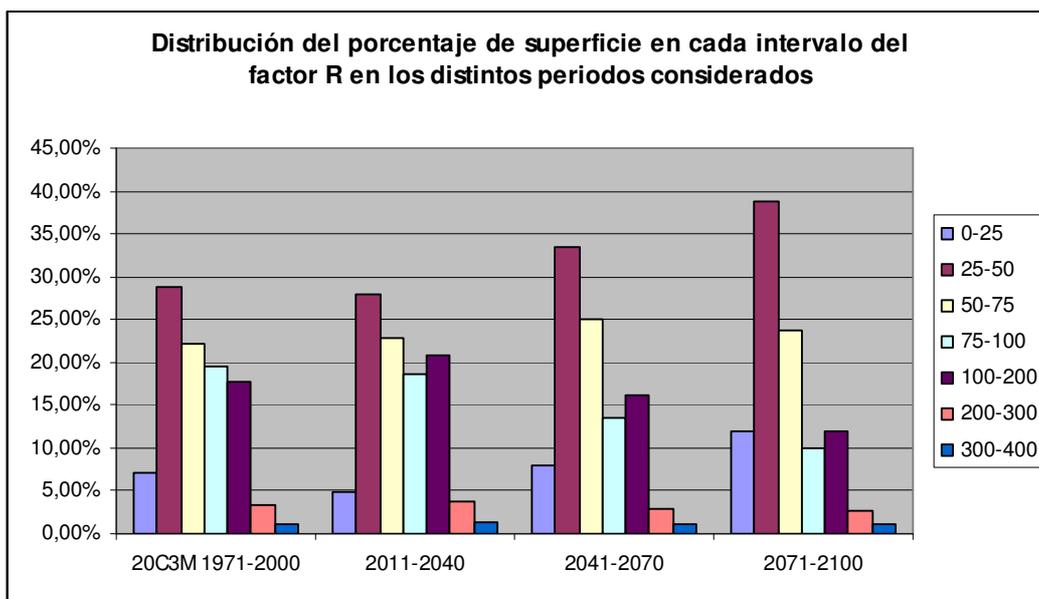
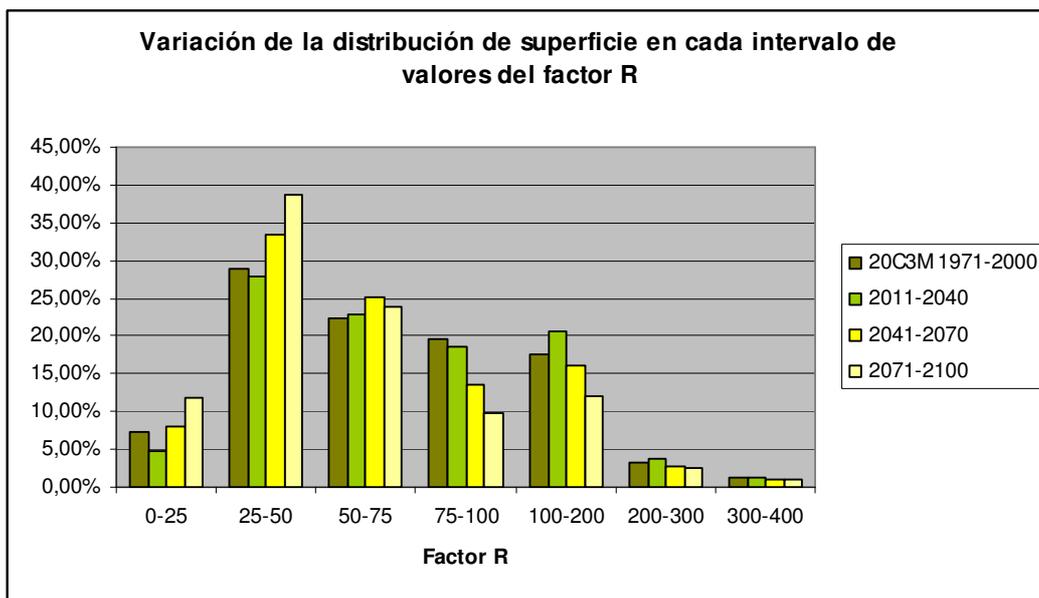
Factor R

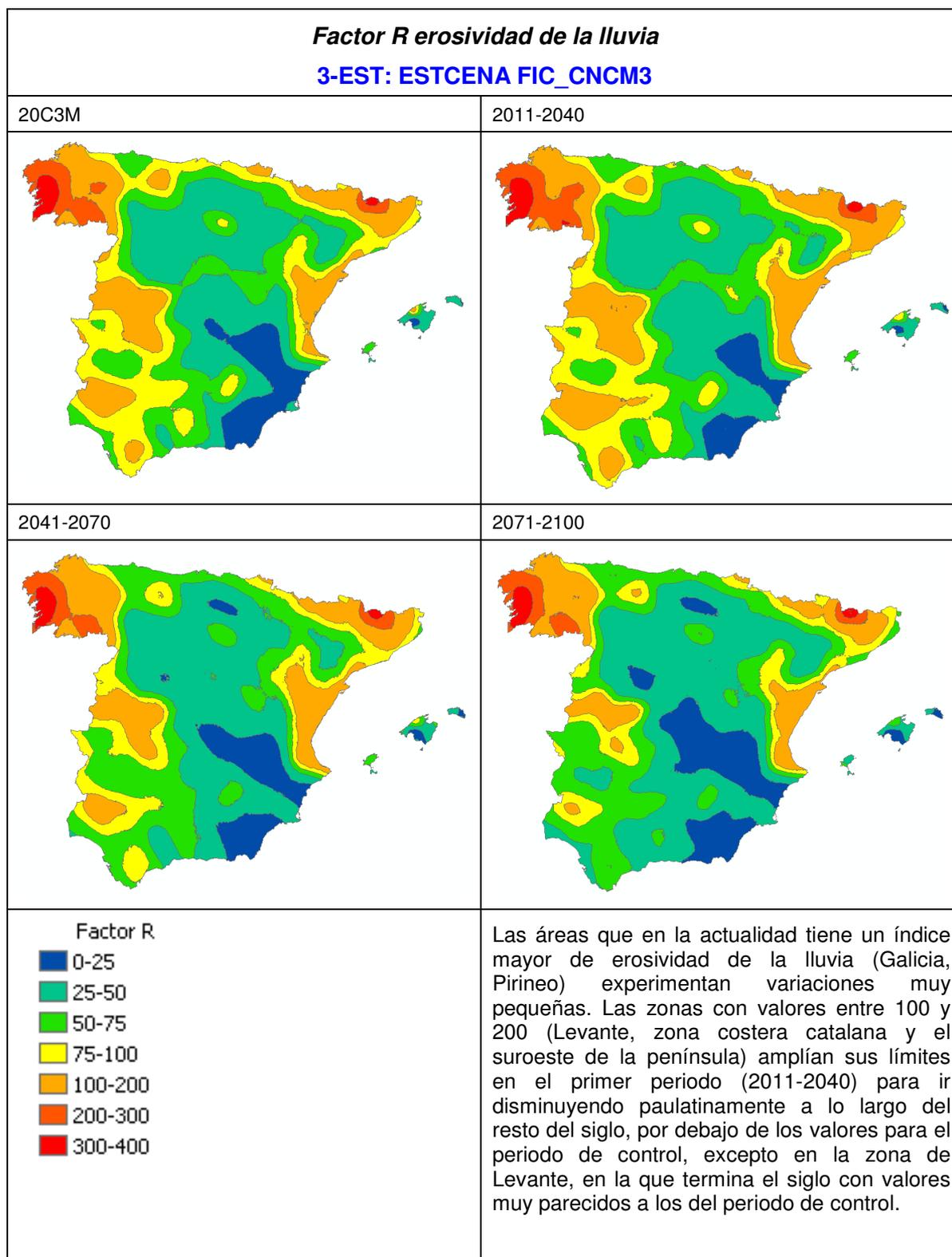
En la tabla y gráfico de variación del porcentaje de superficie en cada intervalo de valores del factor R se puede observar el incremento de la superficie en las categorías de menor agresividad de la lluvia, por debajo de 50, en el tercer y cuarto periodos del siglo XXI y el descenso de superficie con índices de agresividad medios y altos. Es muy poco acusado el descenso en las áreas de mayor agresividad. Sin embargo la tendencia en el periodo 2011-2040 es la contraria, reflejando un ligero incremento del factor R en todo el territorio nacional.

Variación del porcentaje de superficie en cada intervalo de valores del factor R

Factor R	20C3M 1971-2000	2011-2040	2041-2070	2071-2100
0-25	7,17%	4,83%	7,95%	11,88%
25-50	28,85%	27,94%	33,56%	38,78%
50-75	22,26%	22,84%	25,02%	23,76%
75-100	19,60%	18,53%	13,51%	9,88%
100-200	17,72%	20,74%	16,17%	12,06%
200-300	3,25%	3,79%	2,78%	2,61%
300-400	1,16%	1,33%	1,01%	1,03%

Comparando las distribuciones de superficie en cada intervalo de valores del factor R entre el periodo de control y el periodo de fin de siglo XXI, se observa el desplazamiento generalizado hacia valores más bajos del índice de agresividad de la lluvia.





4.7. Cambios en el mapa de riesgo de desertificación como consecuencia del incremento de aridez

Se ofrecen a continuación los resultados obtenidos de sustituir en el mapa de riesgo de desertificación del PAND la capa del mapa de aridez original por la generada para cada periodo considerado por la proyección ESTCENA FIC_CNCM3.

Antes de analizar los cambios, es necesario advertir la gran diferencia entre el mapa original del PAND y el resultante de generarlo con la capa de aridez del periodo de control, evidentemente causada por la diferencia existente entre ambos mapas de aridez (ver cuadro). La principal diferencia estriba en que en el mapa de aridez resultante del periodo actual del proyecto ESTCENA la superficie clasificada dentro del ámbito de la definición de la CNULD ¹⁷, es decir, la superficie total de zonas áridas, semiáridas y subhúmedas secas es mucho menor. Por el contrario, en la categoría de zona árida el porcentaje de superficie es mayor que en el mapa original.

Desertificación: Degradación de las tierras de zonas áridas, semiáridas y subhúmedas secas resultante de diversos factores, tales como las variaciones climáticas y las actividades humanas.

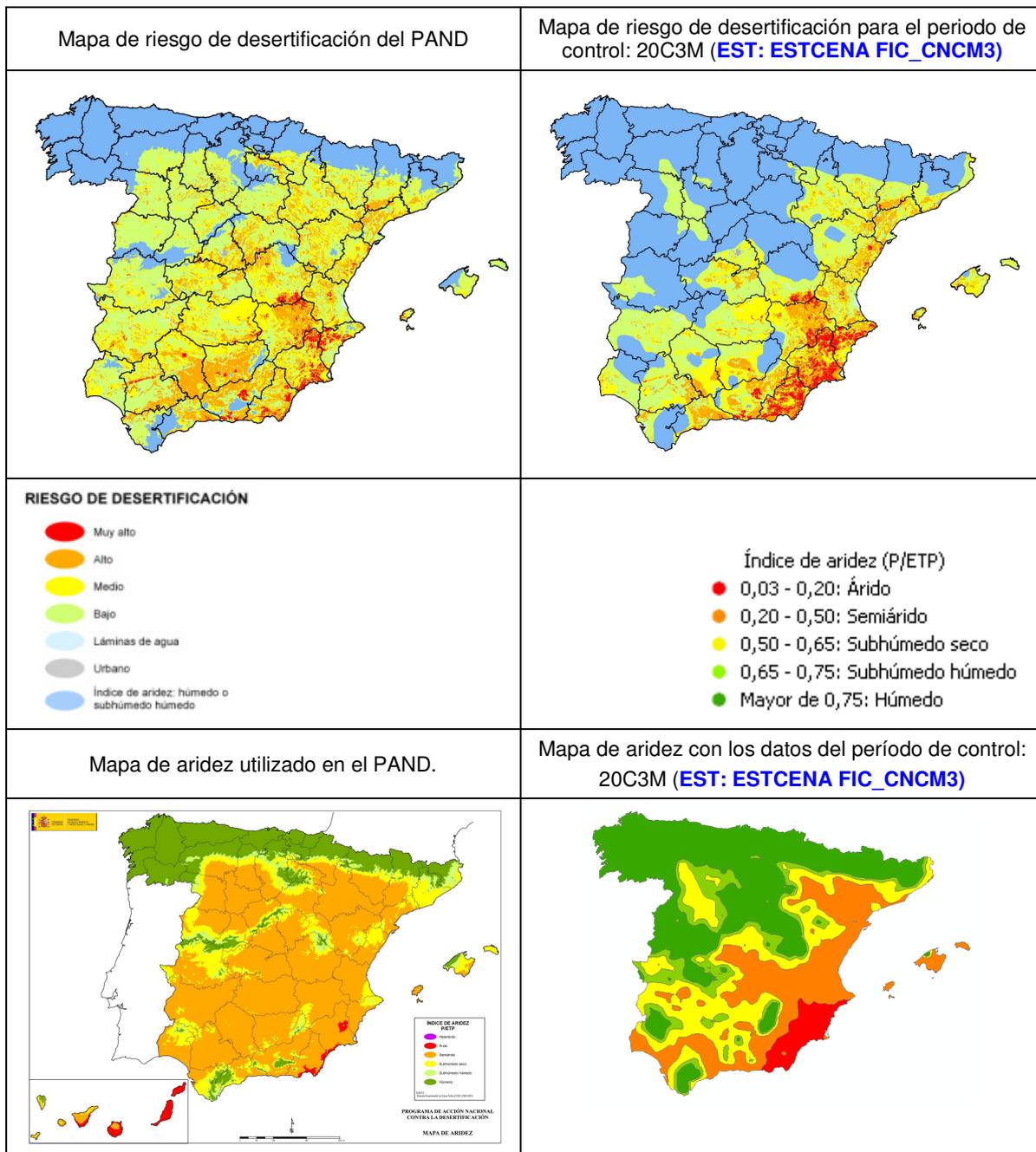
Comparativa de los porcentajes de distribución de la superficie según el riesgo de desertificación entre el mapa original del PAND y el generado para el periodo de control

Clase de riesgo de desertificación	Mapa PAND	20C3M 1971-2000
Superficie con riesgo Muy alto	1,64%	2,64%
Superficie con riesgo Alto	15,48%	8,65%
Superficie con riesgo Medio	19,46%	13,65%
Superficie con riesgo Bajo	37,65%	24,15%
<i>Total Zonas áridas, semiáridas y subhúmedas secas</i>	<i>74,24%</i>	<i>49,09%</i>
Superficie de zonas húmedas y subhúmedas húmedas	25,76%	50,91%

Nota: porcentaje calculado respecto al total de superficie de España excepto Canarias eliminando láminas de agua y urba

Pero recordemos que, si bien esto debe tenerse en cuenta, lo que se pretende es analizar las diferencias entre la situación actual y las futuras con base en la evolución de los datos de precipitación y temperatura pronosticada por las proyecciones, trascendiendo de la comparación entre ambas situaciones de partida.

¹⁷ Desertificación: Degradación de las tierras de zonas áridas, semiáridas y subhúmedas secas resultante de diversos factores, tales como las variaciones climáticas y las actividades humanas. (Artículo 1 del Texto de la CNULD)



El cuadro adjunto recoge la evolución del porcentaje (respecto al total de superficie de España excepto Canarias eliminando láminas de agua y urbano) de superficie en cada clase de riesgo de desertificación como consecuencia de los cambios pronosticados en la aridez.

La metodología aplicada en el PAND segregaba y calificaba como “fuera de programa” a las zonas húmedas y subhúmedas húmedas. Al incrementarse el valor de índice de aridez en buena parte de estas zonas, lo que antes era calificado como “sin riesgo”, ahora pasa a estar dentro de las clases de riesgo. En consecuencia, todas las clases de riesgo sufren incrementos importantes, a costa naturalmente de la categoría de “fuera de programa”.

En definitiva, la principal conclusión es que, como consecuencia de los cambios previstos en la aridez, el riesgo de desertificación aumenta en todas las zonas y buena parte del territorio (22%) que antes se consideraba fuera de la definición de desertificación por cuestiones climáticas, pasaría a formar parte de las *Zonas áridas, semiáridas y subhúmedas secas*.

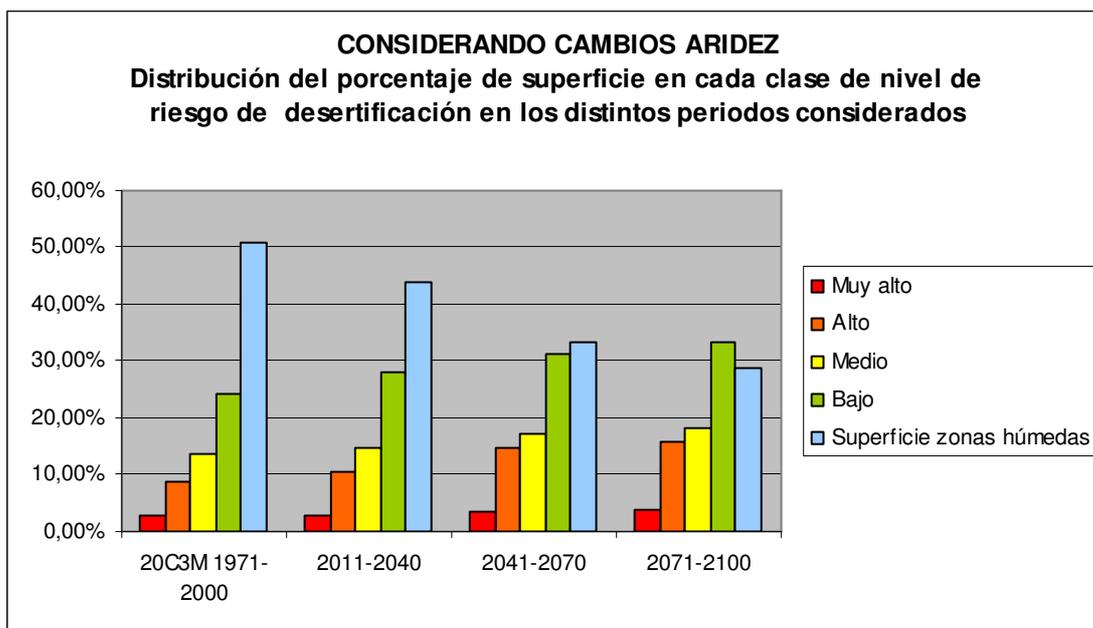
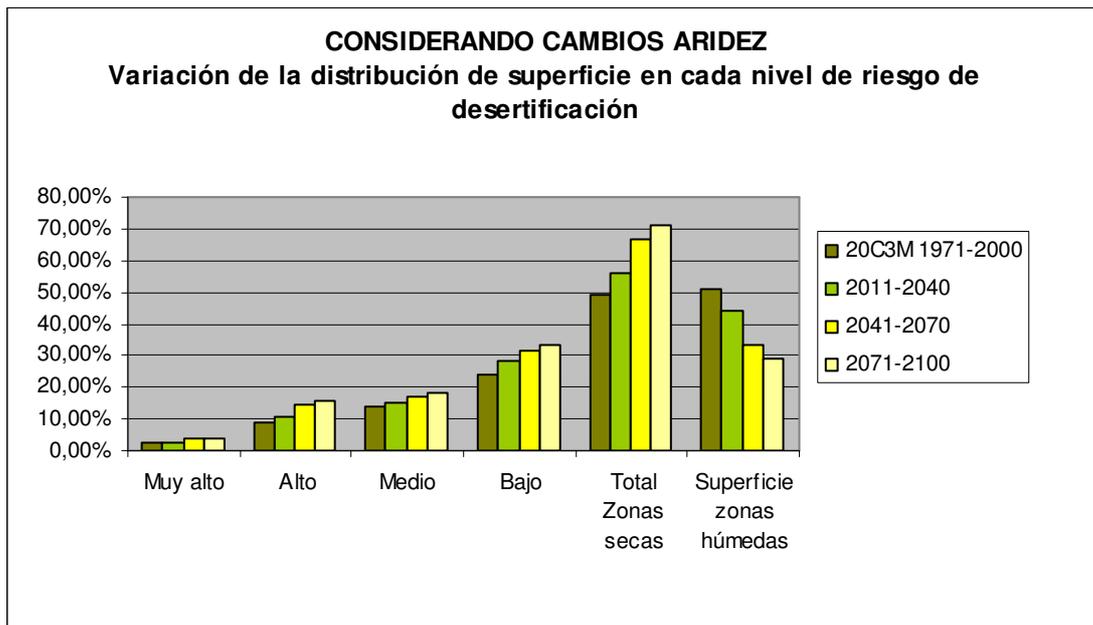
Analizando la variación del porcentaje de superficie en cada clase entre los periodos 2071-2100 y el periodo 1971-2000, se observa que los mayores incrementos relativos se dan en las categorías de riesgo Muy alto y Alto, incrementándose en un 45,5 y 82,4 % respectivamente.

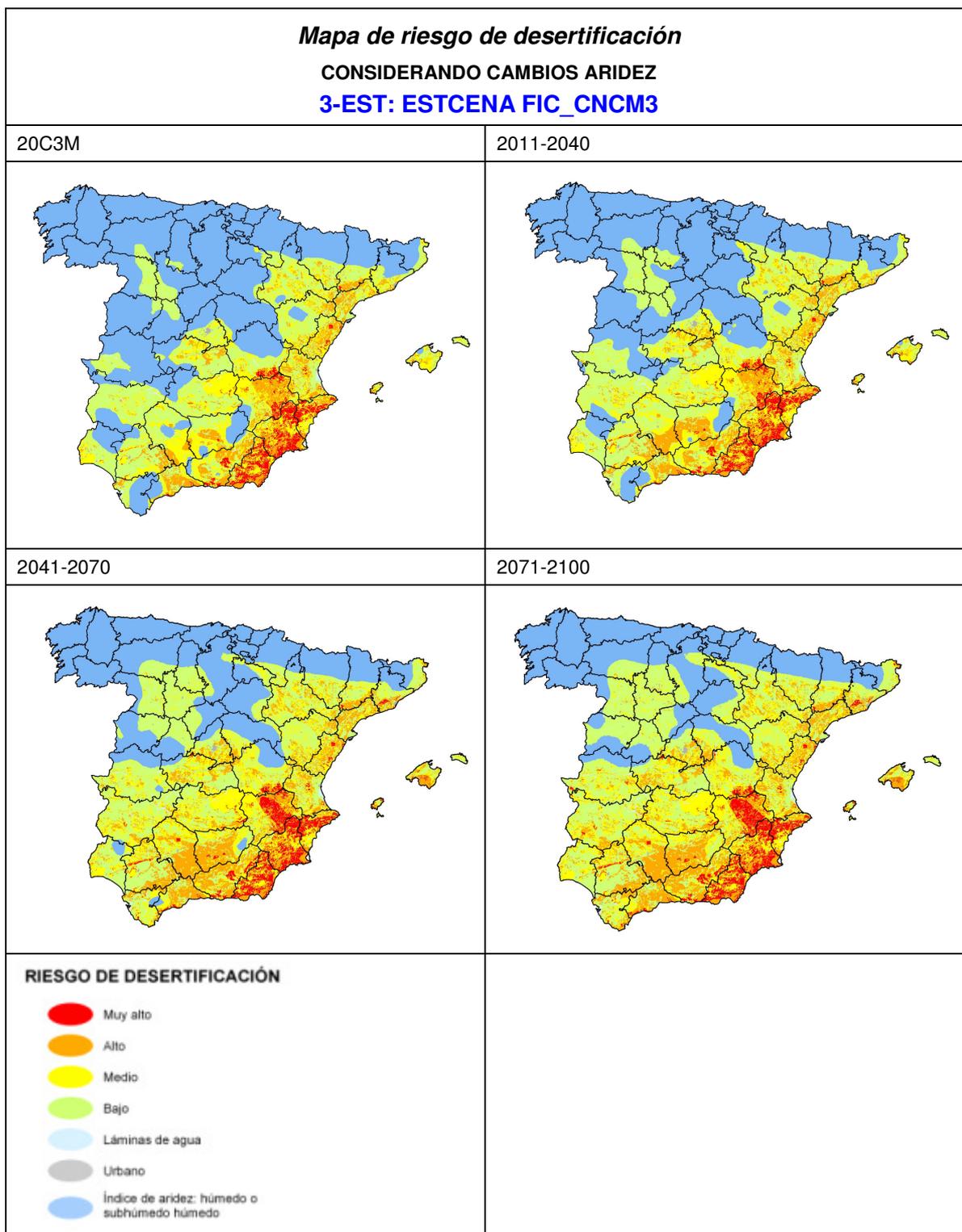
Evolución del porcentaje de superficie en cada clase de riesgo de desertificación como consecuencia de los cambios pronosticados en la aridez.

Clase de riesgo de desertificación	20C3M 1971-2000	2011-2040	2041-2070	2071-2100
Muy alto	2,64%	2,70%	3,67%	3,85%
Alto	8,65%	10,47%	14,57%	15,77%
Medio	13,65%	14,81%	17,07%	18,28%
Bajo	24,15%	28,18%	31,32%	33,38%
<i>Total Zonas áridas, semiáridas y subhúmedas secas</i>	<i>49,09%</i>	<i>56,15%</i>	<i>66,63%</i>	<i>71,27%</i>
Superficie de zonas húmedas y subhúmedas húmedas	50,91%	43,85%	33,37%	28,73%

Nota: porcentaje calculado respecto al total de superficie de España excepto Canarias eliminando láminas de agua y urbano

Clase de riesgo de desertificación	Variación del porcentaje entre 2071-2100 y periodo de control
Muy alto	45,50%
Alto	82,36%
Medio	33,95%
Bajo	38,22%
Superficie de zonas húmedas y subhúmedas húmedas	-43,58%





4.8. Los cambios en la erosión como consecuencia de las variaciones del factor R

Como se expuso en el epígrafe de planteamiento metodológico, el ejercicio ha consistido en considerar únicamente los cambios del factor R en la ecuación universal de pérdidas de suelo (USLE), manteniendo constantes el resto de factores.

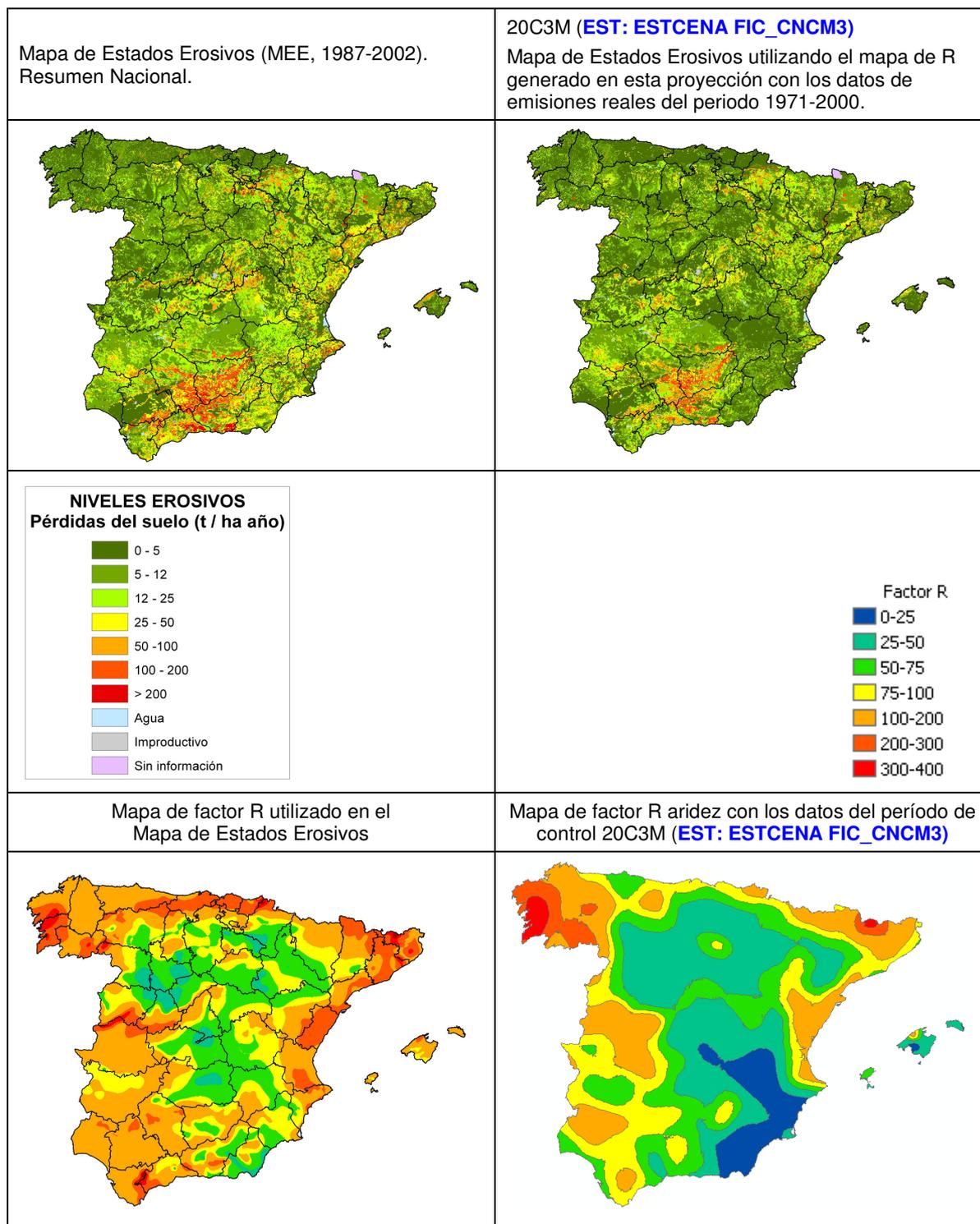
Se ha utilizado para ello el Mapa de Estados Erosivos (MEE, 1987-2002) por estar completo para todo el territorio nacional. Es preciso tener en cuenta que no se dispone de cartografía digital de las coberturas independientes de los distintos factores de la USLE que luego se superponen ente sí para calcular las pérdidas de suelo. Ahora bien, como los datos correspondientes al factor R se obtuvieron de la publicación del ICONA “Agresividad de la lluvia en España” (1988) publicado por el Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, se ha procedido a digitalizar los planos de isolinéas del factor R de dicha publicación generando una cobertura digital en formato raster de 1 km² de resolución. Esta cobertura se ha superpuesto a la del Resumen Nacional de Estados Erosivos, obteniendo un mapa de “USLE sin R” al que se le han superpuesto los mapas de R en función del cambio climático ya analizados en anteriores epígrafes.

Se ofrecen a continuación los resultados obtenidos. Como en anteriores ocasiones, se ofrecen las imágenes de los mapas de la situación de partida, es decir de los “datos observados” con los datos de una hipotética situación de partida considerando las emisiones de gases históricas del periodo 1971-2000, que es la situación que luego se utiliza para evaluar los cambios como consecuencia del cambio climático pronosticado por el modelo utilizado. En este caso, las diferencias entre ambas situaciones no son tan acusadas como otras veces. Se parte de una situación en la que las pérdidas de suelo son algo inferiores a las del mapa original, pero con una distribución geográfica muy similar.

Comparativa de los porcentajes de distribución de la superficie en niveles erosivos según el riesgo de desertificación entre el Mapa de Estados Erosivos original y el generado para el periodo de control

Niveles erosivos (t/ha-año)	Mapa Estados Erosivos (MEE, 1987-2002)	20C3M 1971-2000
0 - 5	33,57%	44,50%
5-12	24,26%	26,89%
12-25	20,22%	14,40%
25-50	10,27%	7,37%
50-100	6,64%	4,68%
100-200	3,83%	2,09%
> 200	1,21%	0,09%

Nota: porcentaje calculado respecto al total de superficie de España excepto Canarias eliminando láminas de agua y urbano



Como ya ocurrió con la comparativa realizada en el epígrafe 4.4.1. *Contraste con datos observados* (recordemos que en dicho epígrafe se comparó el mapa del factor R con los datos observados medios para Península y Baleares utilizando las estaciones meteorológicas para el periodo 1971-2000) se observa que en general los valores de R obtenidos con la proyección seleccionada son inferiores a los obtenidos con los valores con los que se calculó el mapa de la publicación del ICONA “Agresividad de la lluvia en España”. Los datos de pluviometría utilizados en dicha publicación correspondían en líneas generales al periodo 1950-1985.

El cuadro adjunto recoge la evolución del porcentaje (respecto al total de superficie de España excepto Canarias eliminando láminas de agua y urbano) de superficie en cada nivel erosivo o intervalos de pérdidas de suelo como consecuencia de los cambios pronosticados en el factor R.

Niveles erosivos (t/ha·año)	20C3M 1971-2000	2011-2040	2041-2070	2071-2100
0 - 5	44,50%	42,32%	47,70%	51,51%
5-12	26,89%	26,26%	25,05%	24,89%
12-25	14,40%	16,14%	13,89%	11,99%
25-50	7,37%	7,58%	6,79%	6,58%
50-100	4,68%	5,06%	5,18%	4,38%
100-200	2,09%	2,52%	1,35%	0,63%
> 200	0,09%	0,12%	0,04%	0,02%

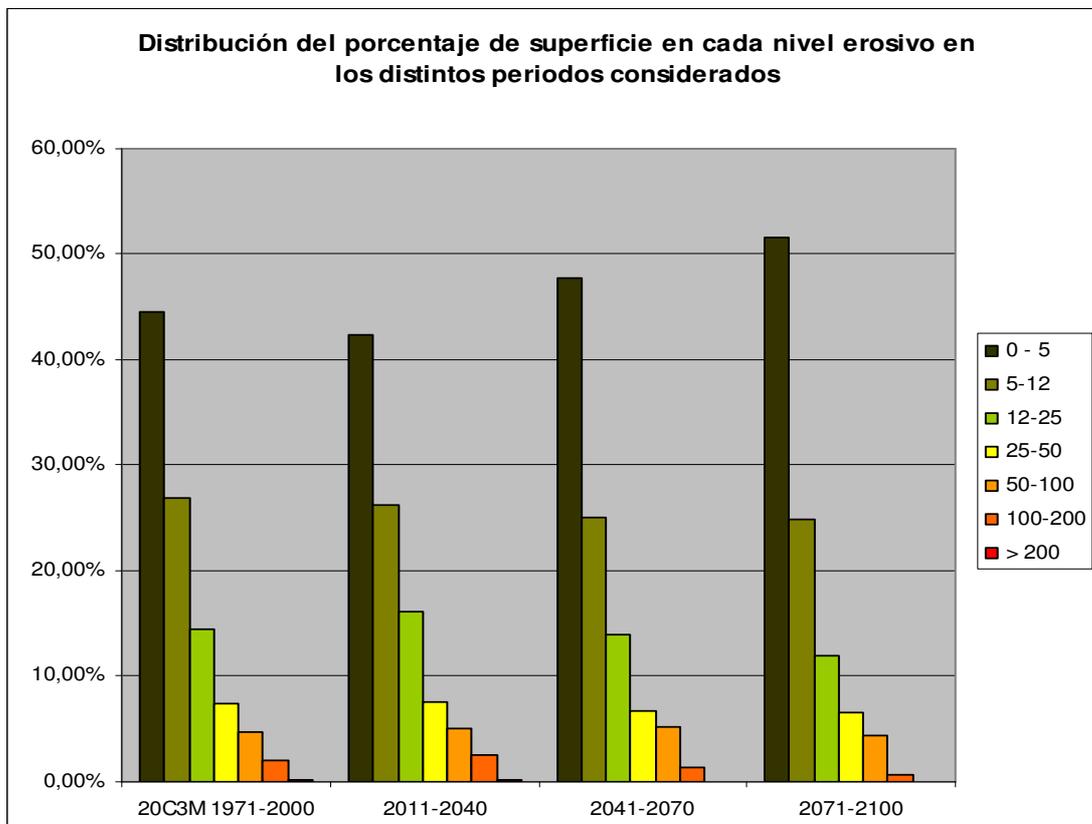
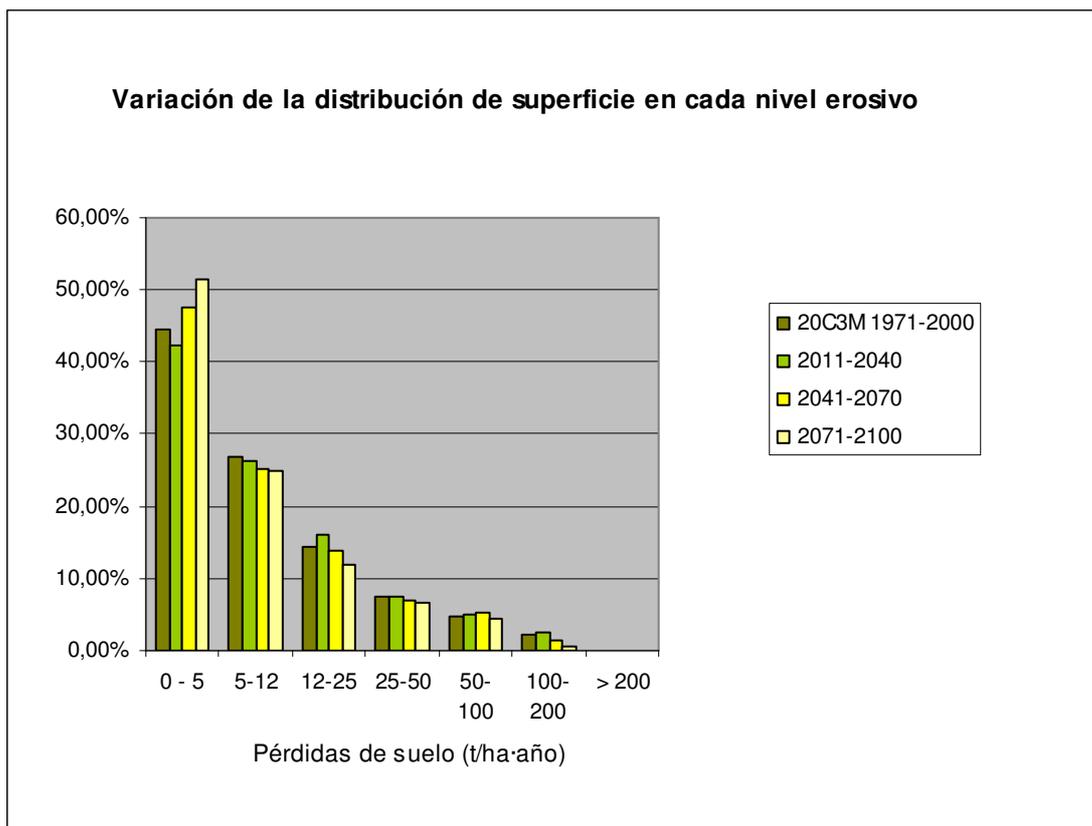
Nota: porcentaje calculado respecto al total de superficie de España excepto Canarias eliminando láminas de agua y urbano

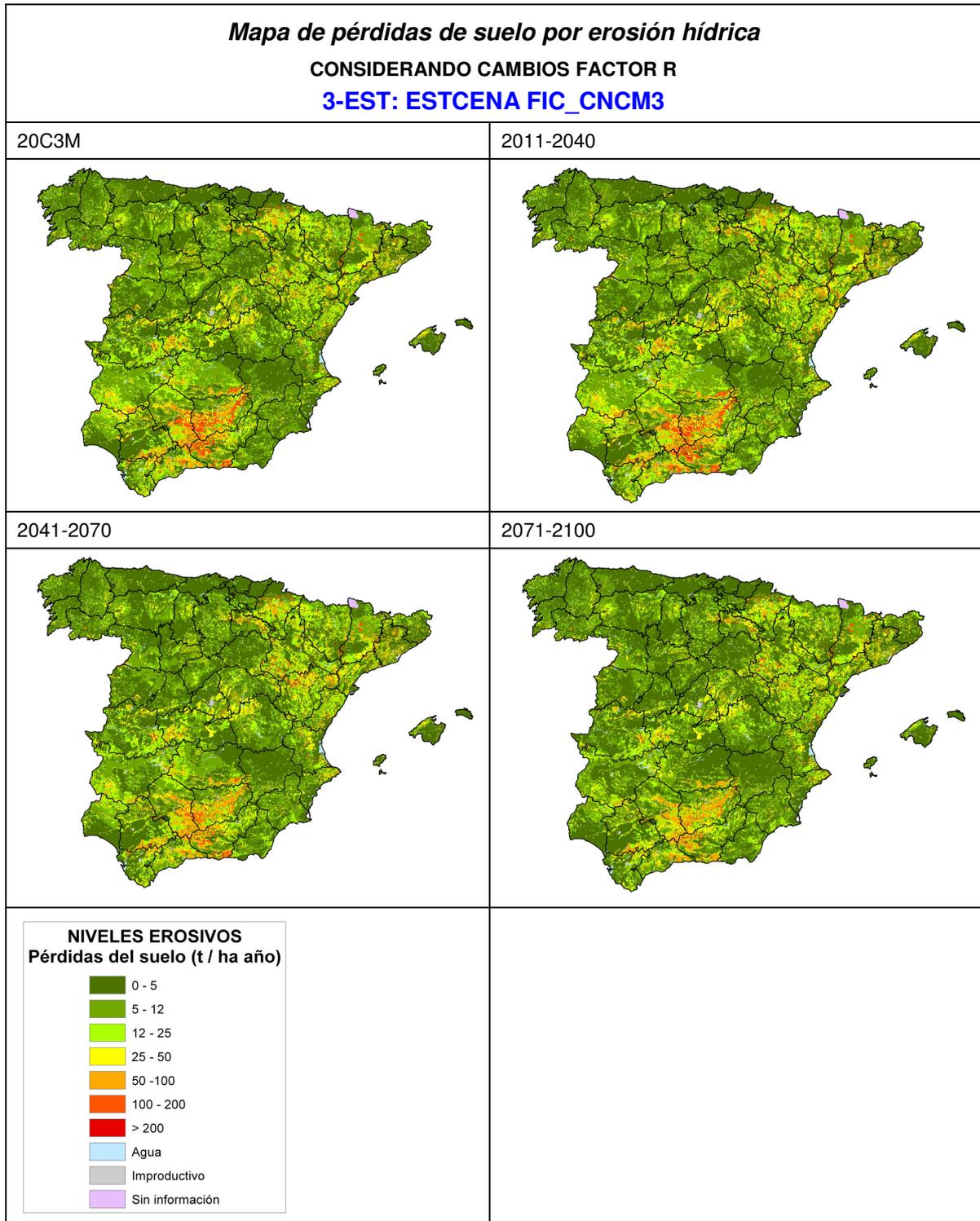
Los resultados obtenidos están en lógica consonancia con el análisis de la evolución de la erosividad de la lluvia: el porcentaje de superficie en el intervalo de pérdidas más bajo (entre 0 y 5 t/ha·año) se incrementa en el largo plazo, tras un descenso a corto plazo (horizonte temporal de 2011 a 2040). Todas las demás clases sufren decrecimientos a largo plazo, aunque muy ligeros. En el corto plazo, los porcentajes de superficie en los niveles erosivos por encima de 12 t/ha·año experimentan ligeros crecimientos.

Analizando la variación del porcentaje de superficie en cada clase entre los periodos 2071-2100 y el periodo 1971-2000, se observa el descenso generalizado. En términos relativos, la disminución de los porcentajes en las clases más altas de pérdidas, por encima de 100 t/ha·año, es mayor que en las clases intermedias. Se puede interpretar como otra consecuencia de la escasa sensibilidad de las proyecciones en la detección de los eventos extremos.

Niveles erosivos (t/ha·año)	Variación del porcentaje de superficie en cada clase entre los periodos 2071-2100 y el periodo 1971-2000
0 - 5	15,77%
5-12	-7,44%
12-25	-16,68%
25-50	-10,74%
50-100	-6,38%
100-200	-69,84%
> 200	-77,20%

En definitiva, la estimación mediante el modelo USLE de las pérdidas de suelo por erosión hídrica como consecuencia del cambio climático apunta a un ligero incremento a corto plazo y a la disminución generalizada de las pérdidas a largo plazo. Resultado que era lógico esperar dado que se pronostica una disminución de la precipitación media y a que los modelos muestran una ligera reducción de las precipitaciones máximas diarias, lo que conlleva que estimen una disminución de la capacidad erosiva de la lluvia.





4.9. Los cambios en el mapa de riesgo de desertificación como consecuencia del incremento de aridez y de los cambios en la erosividad de la lluvia (factor R).

Se ofrecen a continuación los resultados obtenidos de sustituir en el mapa de riesgo de desertificación del PAND:

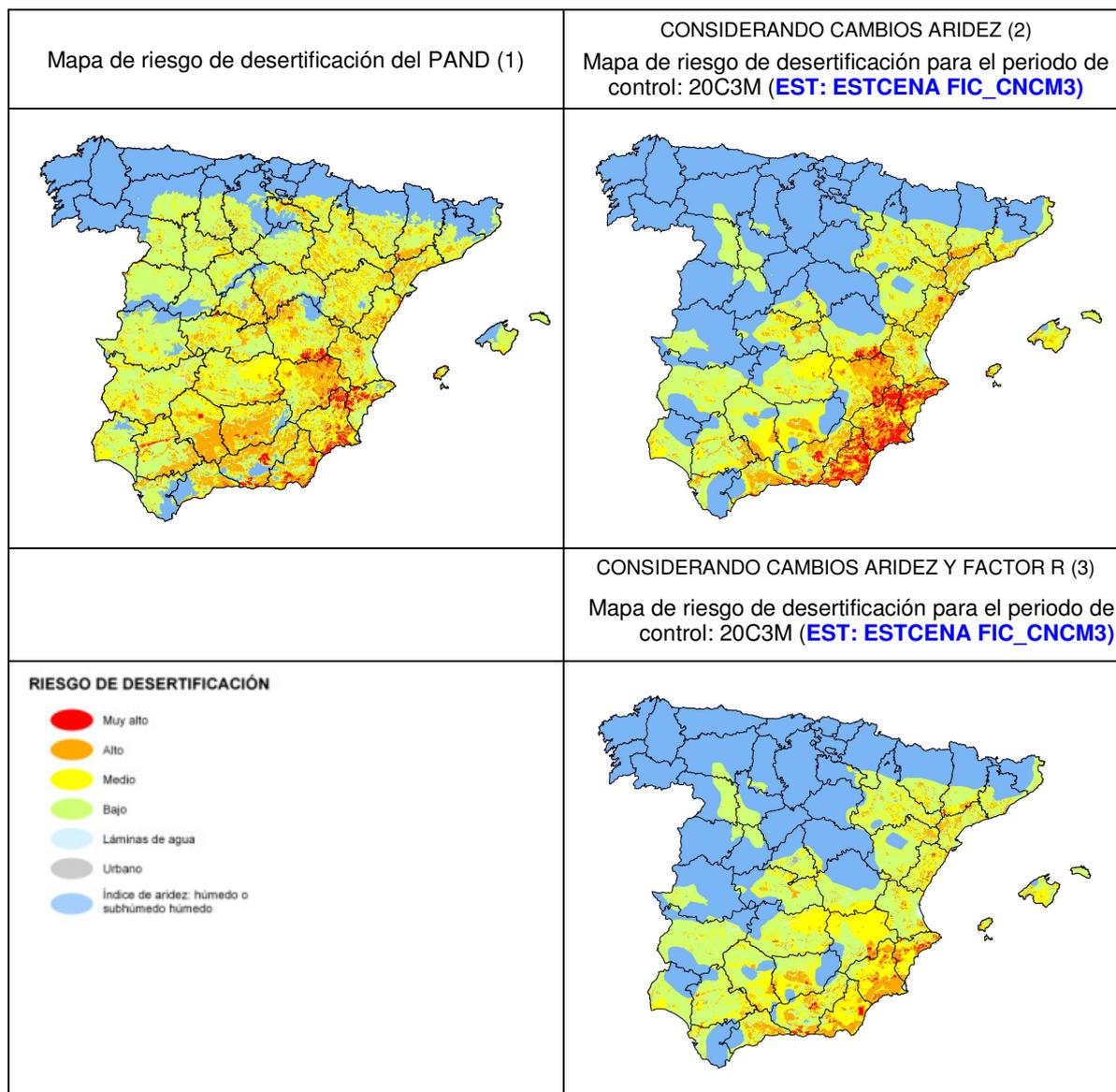
- la capa del mapa de aridez original por la generada para cada periodo considerado por la proyección ESTCENA FIC_CNCM3,
- la capa de pérdidas de suelo por erosión hídrica original del Mapa de Estados Erosivos por la capa de pérdidas de suelo por erosión hídrica generada para cada periodo utilizando los mapas de R obtenidos con los datos de la proyección ESTCENA FIC_CNCM3.

Antes de analizar los cambios entre la situación actual y las futuras con esta nueva hipótesis, advertimos de nuevo de las diferencias existentes entre el mapa original del PAND (columna y mapa 1), y el resultante de generarlo con las capas de aridez y de erosión obtenidas para el periodo de control (columnas y mapas 2 y 3). Como se ve, al haber sustituido la erosión original por la capa nueva, en la que las pérdidas de suelo son algo inferiores a las del mapa original, resulta que se produce un desplazamiento de superficie de las clases de riesgo más altas hacia las capas más bajas. En definitiva, se parte de una situación de partida teórica en la que el riesgo de desertificación es más bajo.

Comparativa del % de superficie según el riesgo de desertificación entre el mapa original del PAND y los mapas resultantes de las simulaciones

Clase de riesgo de desertificación	Mapa PAND (1)	20C3M 1971-2000 Aridez (2)	20C3M 1971-2000 Aridez y factor R (3)
Superficie con riesgo Muy alto	1,64%	2,64%	0,54%
Superficie con riesgo Alto	15,48%	8,65%	5,09%
Superficie con riesgo Medio	19,46%	13,65%	14,54%
Superficie con riesgo Bajo	37,65%	24,15%	28,89%
<i>Total Zonas áridas, semiáridas y subhúmedas secas</i>	<i>74,24%</i>	<i>49,09%</i>	<i>49,09%</i>
Superficie de zonas húmedas y subhúmedas húmedas	25,76%	50,91%	50,91%

Nota: porcentaje calculado respecto al total de superficie de España excepto Canarias eliminando láminas de agua y urbano.



El cuadro adjunto recoge la evolución del porcentaje (respecto al total de superficie de España excepto Canarias eliminando láminas de agua y urbano) de superficie en cada clases de riesgo de desertificación como consecuencia de los cambios pronosticados en la aridez y en la erosividad de la lluvia (factor R).

Los resultados obtenidos en el epígrafe anterior en el sentido de una ligera disminución de la erosión como consecuencia de las variaciones previstas del factor R, ya hacían pensar que este ejercicio de integración de la influencia de ambos factores (si por un lado el incremento de aridez aumenta el riesgo de desertificación, la disminución en la erosividad de la lluvia lo disminuye) resultaría en lo que se observa claramente en el cuadro: todas las clases de riesgo sufren incrementos, pero son de bastante menor cuantía que en el primer ejercicio de integración teniendo únicamente en cuenta los cambios en la aridez. Es decir, las diferencias entre los porcentajes de fin de siglo y periodo de control (ver tabla adjunta) son menores en la hipótesis de “cambio aridez y erosión” que en la hipótesis “cambio aridez”.

Téngase presente que el algoritmo por el que se estimó en el PAND el riesgo de desertificación es simplemente eso, un algoritmo, un modelo muy simplificado cuyo

objetivo es únicamente una aproximación cualitativa del riesgo, nunca cuantitativa¹⁸. Y en este contexto es como deben interpretarse los resultados obtenidos, pues no se trata de determinar “quién gana”, si el incremento de aridez o la disminución de erosión, máxime teniendo en cuenta la elevada incertidumbre de las proyecciones en el pronóstico de los eventos extremos causantes de los episodios erosivos más graves.

Lo que sí parece incuestionable es un incremento generalizado de la aridez, con todas las consecuencias (que los expertos analizan de forma continua como se ha intentado reflejar a lo largo de este documento) en “el sistema bioproductivo terrestre que comprende el suelo, la vegetación, otros componentes de la biota y los procesos geológicos e hidrológicos que se desarrollan dentro del sistema”, es decir, en la “tierra”, tal como es entendida en el texto de la Convención en su artículo 1.

En definitiva, aún cuando no se produjeran incrementos cuantitativamente importantes de las pérdidas de suelo, este incremento previsto de la aridez apunta a un aumento del riesgo de desertificación. Es evidente que los ecosistemas más frágiles, con menos capacidad para adaptarse a los cambios previstos en la temperatura y la precipitación serán los más vulnerables frente a la degradación.

Evolución de la distribución de superficie según el riesgo de desertificación

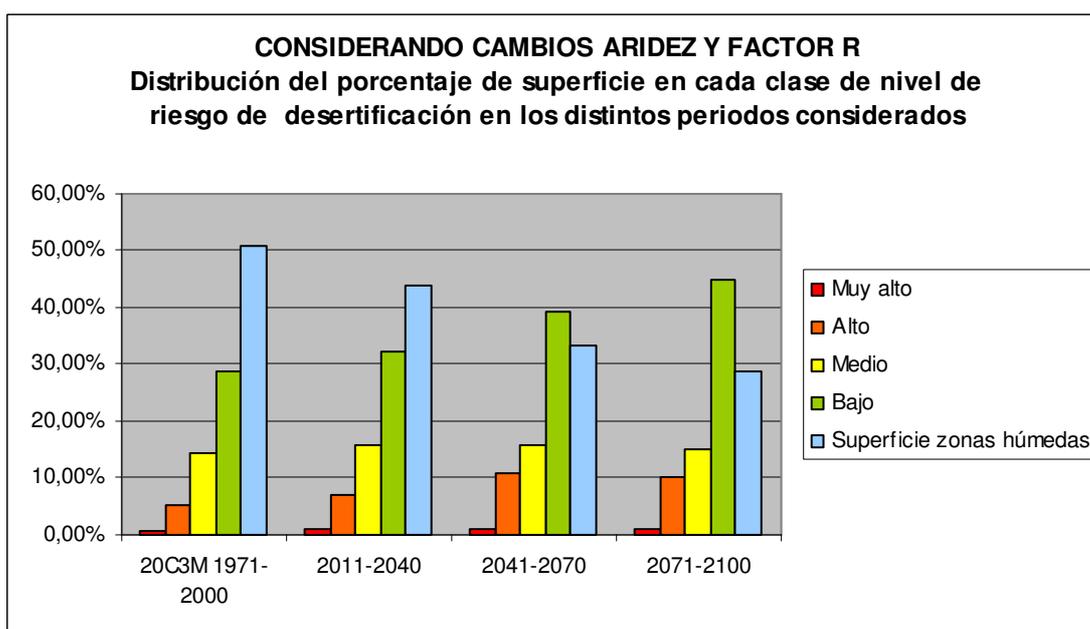
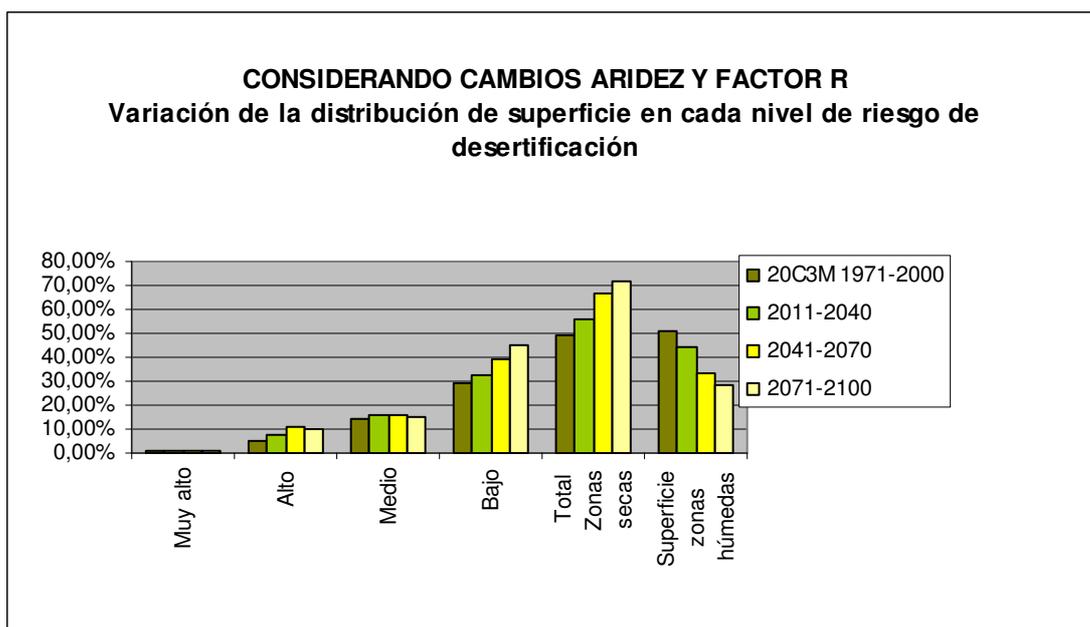
CONSIDERANDO CAMBIOS ARIDEZ				
Clase de riesgo de desertificación	20C3M 1971-2000	2011-2040	2041-2070	2071-2100
Muy alto	2,64%	2,70%	3,67%	3,85%
Alto	8,65%	10,47%	14,57%	15,77%
Medio	13,65%	14,81%	17,07%	18,28%
Bajo	24,15%	28,18%	31,32%	33,38%
<i>Total Zonas áridas, semiáridas y subhúmedas secas</i>	<i>49,09%</i>	<i>56,15%</i>	<i>66,63%</i>	<i>71,27%</i>
Superficie de zonas húmedas y subhúmedas húmedas	50,91%	43,85%	33,37%	28,73%
CONSIDERANDO CAMBIOS ARIDEZ Y FACTOR R				
Clase de riesgo de desertificación	20C3M 1971-2000	2011-2040	2041-2070	2071-2100
Muy alto	0,54%	0,88%	0,94%	0,95%
Alto	5,09%	7,17%	10,77%	10,34%
Medio	14,54%	15,64%	15,77%	15,20%
Bajo	28,92%	32,46%	39,15%	44,78%
<i>Total Zonas áridas, semiáridas y subhúmedas secas</i>	<i>49,09%</i>	<i>56,15%</i>	<i>66,63%</i>	<i>71,27%</i>
Superficie de zonas húmedas y subhúmedas húmedas	50,91%	43,85%	33,37%	28,73%

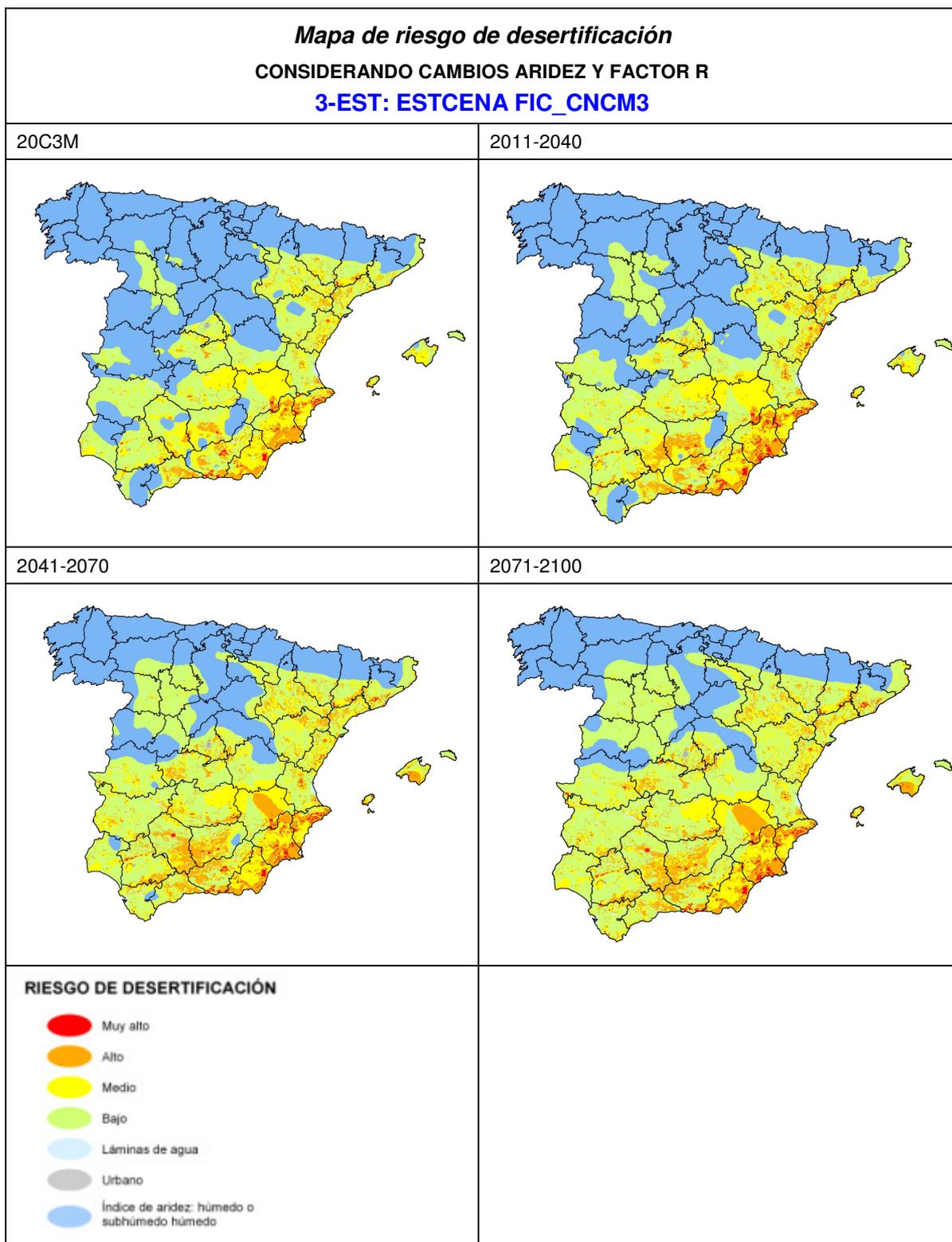
Nota: porcentajes calculados respecto al total de superficie de España excepto Canarias eliminando láminas de agua y urbano

¹⁸ En el epígrafe 3.1. se ha incluido la tabla de asignación de valores y pesos relativos a los factores utilizada en el PAND para definir las clases de riesgo de desertificación.

Variación del porcentaje de superficie en cada clase entre los periodos 2071-2100 y el periodo 1971-2000

Clase de riesgo de desertificación	CONSIDERANDO CAMBIOS ARIDEZ	CONSIDERANDO CAMBIOS ARIDEZ Y FACTOR R
Muy alto	1,20%	0,41%
Alto	7,12%	5,25%
Medio	4,63%	0,66%
Bajo	9,23%	15,88%
Superficie de zonas húmedas y subhúmedas húmedas	-22,19%	-22,19%





5. Resumen y conclusiones

Planteamiento metodológico

- El planteamiento metodológico para la generación de mapas de riesgo de desertificación inducido por el cambio climático y su comparación con la situación actual, ha tenido como base de partida la metodología para generar dicho mapa expuesta en el Programa de Acción Nacional contra la Desertificación (PAND, 2008). En el PAND se aplicó un modelo basado en la caracterización de la superficie de acuerdo a la intensidad en que se presentan determinados factores y procesos de desertificación: Índice de aridez, erosión (pérdidas de suelo), incendios (porcentaje de superficie acumulada recorrida por el fuego durante 10 años) y sobreexplotación de acuíferos.
- De entre los factores y/o parámetros que intervienen en el mapa de riesgo de desertificación, se considera que los que están más directamente implicados con las variables climáticas, y por tanto, son susceptibles de realizar previsiones de futuro en función del cambio climático, son el índice de aridez y la erosión del suelo (en concreto el factor R de erosividad de la lluvia, o índice de erosión pluvial).
- El esquema inicial planteaba incertidumbres relacionadas principalmente con las predicciones de eventos extremos y con la existencia de aproximaciones cartográficas de generación de escenarios de cambio climático en la cobertura vegetal del suelo (factor C USLE) y en el resto de factores del mapa de riesgo no directamente dependientes del clima: frecuencia de incendios y sobreexplotación de acuíferos.

Análisis de los factores y procesos de desertificación en función del cambio climático y de las posibilidades de adaptación de la información para su integración en el mapa de desertificación del PAND

- Se ha realizado una recopilación de estudios y trabajos, más o menos recientes, de evaluaciones del impacto del cambio climático sobre los factores considerados en el mapa de riesgo del PAND (aridez, erosión, incendios, acuíferos), con objeto de analizar las posibilidades de utilizar estos estudios, bien en el marco del planteamiento metodológico expuesto, bien para recopilar conclusiones de estos estudios que permitan de una forma cualitativa evaluar la influencia que los cambios previstos por la comunidad científica tienen en los procesos de desertificación en España.
- El cuadro adjunto resume resultados obtenidos por la comunidad científica en la "Evaluación Preliminar de Impactos en España por Efecto del Cambio Climático" (Proyecto ECCE, 2005) en relación con el impacto del cambio climático en los factores y procesos de desertificación.

Impacto del cambio climático en los factores y procesos de desertificación

“Evaluación Preliminar de Impactos en España por Efecto del Cambio Climático” (Proyecto ECCE, 2005)

Impactos en los recursos edáficos

- Extensas zonas de España están actualmente amenazadas por procesos de desertificación; especialmente como consecuencia de los incendios forestales y de pérdida de fertilidad en suelos de regadío por salinización y erosión. El cambio climático incrementará este problema, especialmente en regiones áridas y semiáridas de la cuenca mediterránea.
- La erosión hídrica en condiciones mediterráneas es altamente episódica en la actualidad. Evidentemente, los cambios predichos sobre un aumento de los eventos climáticos extremos en España (Millán et al 2004, en prensa) redundarían en un agravamiento del riesgo de erosión.
- Las zonas más vulnerables son las que se ven más afectadas por los procesos de desertificación, que se prevé se acentuarán en los supuestos de una mayor aridización del clima.
- Se espera una disminución generalizada del carbono orgánico (OC) en el suelo como consecuencia del incremento de temperatura y del aumento de la sequía. Las zonas donde cabe esperar pérdidas mayores serían las más húmedas (Norte de España) y para los usos de suelos que comportan contenidos en OC más elevados (prados y bosques). En el otro extremo, donde el contenido de OC es menor, pequeñas pérdidas de C pueden significar la superación de un umbral crítico para el mantenimiento de la funcionalidad del suelo.
- Los impactos del cambio climático en el suelo interaccionan de forma muy significativa con el uso y manejo del suelo. Dichas interacciones y la evolución de los factores socioeconómicos que regularán los tipos de uso y las prácticas de manejo constituyen importantes incertidumbres.

Impactos en agricultura

- Los impactos serán amplios y muy diversos, ya que este medio se encuentra muy vinculado a los ecosistemas que lo rodean.
- Los efectos en la agricultura serán contrapuestos y no uniformes en las regiones españolas. Los agrosistemas identificados como más vulnerables son: cultivos extensivos de secano en zonas áridas y semiáridas, olivares, regadíos y cultivos forzados bajo plásticos

Impactos en bosques

- La reserva de agua en el suelo disminuirá conforme aumente la temperatura y la demanda evaporativa de la atmósfera. Esto supondrá un importante factor de estrés para el arbolado. En las zonas con déficit hídrico esto puede ocasionar cambios en la densidad del arbolado o de especies. En casos extremos, áreas susceptibles de albergar sistemas arbolados pueden perder esta condición, pasando a soportar matorrales u otra vegetación de menor porte.
- El retorno al suelo de materia orgánica en forma de hojarasca y raíces finas aumentará, al tiempo que disminuirá la producción de madera. La cantidad de carbono devuelta a la atmósfera aumentará sensiblemente con el paso del tiempo.
- La producción primaria aumentará inicialmente, para disminuir conforme discurre el siglo. Existe un riesgo elevado de que muchos de nuestros ecosistemas forestales se conviertan en emisores netos de carbono durante la segunda mitad del presente siglo.
- Aumentará el riesgo de incendios forestales, y de plagas y enfermedades en bosques.
- Las áreas y taxones identificados como más vulnerables son: poblaciones de *Abies pinsapo*, poblaciones aisladas meridionales de *Pinus sylvestris*, *P. nigra* y *P. uncinata*, bosques riparios en corrientes de fuerte estacionalidad, bosques mediterráneos de ambientes xéricos.

Impacto del cambio climático en los factores y procesos de desertificación (cont.)

“Evaluación Preliminar de Impactos en España por Efecto del Cambio Climático” (Proyecto ECCE, 2005)

Impactos en la biodiversidad

- Los impactos directos del cambio climático sobre la diversidad vegetal se producirán a través de dos efectos antagónicos: el calentamiento y la reducción de las disponibilidades hídricas. Se proyectan cambios en la distribución de los pisos bioclimáticos, con riesgo de extinción de algunas especies y pérdida de biodiversidad
- Las migraciones altitudinales / latitudinales de formaciones vegetales se intensificarán. La «mediterraneización» del norte peninsular y la «aridización» del sur son algunas de las tendencias más significativas.
- La vegetación de alta montaña, los bosques y arbustadas caducifolios sensibles a la sequía estival, los bosques esclerófilos y lauroides del sur y suroeste peninsular y la vegetación litoral se cuentan entre los tipos más vulnerables.
- La simplificación estructural de la vegetación y el predominio de las extinciones locales sobre las recolonizaciones son tendencias recurrentes de los distintos impactos

Riesgo de crecidas fluviales

- En las cuencas mediterráneas y del interior la mayor irregularidad del régimen de precipitaciones ocasionará un aumento en la irregularidad del régimen de crecidas y de crecidas relámpago.
- Es necesario el desarrollo de modelos regionales acoplados clima-hidrología que permitan obtener escenarios fiables para los extremos hidrológicos teniendo en cuenta las particularidades de las cuencas atlánticas y mediterráneas.

Riesgo de inestabilidad de laderas

- A la espera de confirmación por modelos climáticos más afinados, el aumento de la torrencialidad conllevará un mayor número de deslizamientos superficiales y corrientes de derrubios, cuyos efectos pueden verse exacerbados por los cambios de uso del suelo y un menor recubrimiento vegetal
- Como consecuencia de ello, se espera un aumento de la erosión en las laderas y la pérdida de calidad de las aguas superficiales, por el aumento de la turbidez, y un mayor ritmo de colmatación de los embalses.

Riesgo de incendios forestales

- Las temperaturas y la falta de agua en el suelo aumentarán, lo que inducirá a una mayor y más duradera desecación de los combustibles. Por lo tanto, la inflamabilidad de los combustibles aumentará.
- Los índices medios de peligro aumentarán y, en particular, la frecuencia de situaciones extremas. La duración media de la temporada de peligro aumentará.
- Las igniciones causadas por rayos aumentarán, así como las causadas por negligencias. La frecuencia, intensidad y magnitud de los incendios aumentará.
- Los planes de conservación de la biodiversidad o de lucha contra la desertificación deben incorporar los nuevos escenarios de peligro creciente

- No se han encontrado antecedentes a escala nacional del estudio de la evolución del **índice de aridez**, pero sí de sus parámetros es decir de la precipitación y de la evapotranspiración potencial. Los resultados de estudios del Primer Programa de Trabajo del PNACC, realizados a partir de la 1ª Generación de Escenarios Regionalizados coinciden con los realizados en este estudio con datos de la “Segunda colección de escenarios de cambio climático regionalizados del PNACC” (Escenarios PNACC-2012):
 - . Importantes diferencias en la comparación de las proyecciones y los datos observados en el período de control, especialmente en el caso de la precipitación.
 - . Reducción generalizada de la precipitación conforme avanza el siglo XXI.
 - . Aumento de temperatura y, por tanto, de evaporación y transpiración por las plantas (evapotranspiración).
- En función de la información recopilada las estimaciones sobre el efecto del cambio climático en las tasas de **erosión** resultan todavía bastante imprecisas. Las referencias bibliográficas consultadas no permiten extraer resultados muy concluyentes, existiendo cierto consenso en la dificultad de evaluar el impacto del cambio climático en la erosión debido fundamentalmente a las incertidumbres sobre la magnitud del propio cambio y a las interacciones (a veces contrapuestas) que se establecen entre los agentes que influyen directa o indirectamente en el proceso (precipitación, temperaturas, crecimiento vegetal, etc...).
- Algunas estimaciones del impacto del cambio climático en la erosión relacionadas con el territorio nacional (estimación previsión del riesgo de erosión en 2050 de UNEP-EEA 2000, evaluación del riesgo de erosión en Andalucía con el modelo Raizal -MicroLEIS DSS- o la estimación con USLE en la Comunidad Valenciana: modificando el factor R) pronostican incrementos de la erosión en mayor o menor cuantía. Si bien se realizan bajo hipótesis muy diferentes entre sí, en general se basan en la premisa de una previsible disminución de la precipitación media, pero añadiéndole en todos los casos la premisa de un aumento de la frecuencia de los eventos extremos, estimada de distintas formas.
- Dado que el cálculo del **Índice de erosividad de la lluvia (Factor R de la USLE)** se basa precisamente en las precipitaciones máximas, se consideró necesario profundizar en la cuestión del **tratamiento de las incertidumbres en cuanto a eventos extremos**, analizando los resultados de informes y trabajos tanto nacionales como internacionales. La coincidencia de conclusiones resulta abrumadora, en el sentido de que el impacto del cambio climático sobre la frecuencia e intensidad de los eventos extremos de precipitación constituye una de las principales incertidumbres de todos los informes realizados hasta el momento por los organismos internacionales. La cuestión radica en que a pesar de que los expertos indican como probable el aumento de la frecuencia e intensidad de los episodios de precipitación, las proyecciones obtenidos con la aplicación de los distintos modelos climáticos no muestran evidencias de un aumento generalizado de precipitación máxima diaria conforme avanza el s. XXI.
- Las conclusiones de los estudios realizados por el CEDEX destacan la gran incertidumbre del comportamiento de los modelos de la 1ª GER en cuanto a las precipitaciones, en la media anual y en los máximos y mínimos de precipitación, tanto en lo que se refiere a la distribución estacional, como en lo que se refiere a las precipitaciones máximas diarias, sobre todo en estas últimas, factores de gran importancia para el cálculo de la erosividad de la lluvia.

- En lo que se refiere a los escenarios manejados en la segunda generación de escenarios regionalizados, es decir, en la colección de Escenarios PNACC-2012, todavía no se puede afirmar con seguridad que las predicciones en cuanto a los valores extremos de precipitación tengan una menor incertidumbre que en la 1ª GER. Estudios realizados en el marco del proyecto ENSEMBLES, concluyen que en lo que respecta a las precipitaciones máximas diarias se aprecia, para finales de siglo (2071-2100), una leve disminución pero con mucha incertidumbre en toda la península. Es decir, en la mayor parte de la Península el porcentaje de modelos que coinciden en el signo del cambio está entorno al 50-60%. Por otro lado, en lo que respecta a la precipitación total existe un mayor consenso (>90%) por parte de los modelos en su disminución en todo el territorio peninsular y las Islas Baleares.
- Los resultados obtenidos en este trabajo con los escenarios analizados corroboran las apreciaciones preliminares obtenidas en los proyectos esTcena, ESCENA y ENSEMBLES: las variaciones de cambio en las precipitaciones máximas diarias no reflejan tendencias significativas ni de disminución ni de aumento.
- El informe de 2012 del IPCC sobre los eventos extremos señala que para la región del sur de Europa y el Mediterráneo las predicciones en cuanto a las precipitaciones fuertes tiene un bajo nivel de confianza, dependiendo de la región y de la estación del año. Se pronostica un cambio, si bien lo califican como “inconsistente”, en la intensidad de las precipitaciones fuertes, pero mientras que en algunas regiones se prevé un aumento de la intensidad en todas las estaciones excepto en el verano, en otras regiones, como en la Península Ibérica, se prevé una disminución hacia el fin del siglo XXI.
- En definitiva, y como se pone de manifiesto en el resumen del informe del IPCC: “los modelos climáticos simulan los cambios observados en las temperaturas extremas relativamente bien, pero la frecuencia, distribución e intensidad de las precipitaciones se simula bastante peor. Asimismo, las proyecciones en los distintos modelos climáticos de los cambios en las temperaturas extremas tienden a ser más consistente (en términos de tendencia) que para los extremos de precipitación (húmedos y secos)”.
- A pesar de todas estas inconsistencias, el informe pone de manifiesto que: “Son muchos los factores que intervienen en el nivel de confianza de los resultados sobre los cambios en los extremos, pero sin embargo, un bajo nivel de confianza en los cambios observados y proyectados en un evento extremo determinado, no implica ni excluye la posibilidad de cambios en ese extremo.”
- En la revisión de estudios y trabajos de evaluación del impacto del CC sobre la **cubierta vegetal y los usos del suelo**, la cuestión planteada ha sido si de dichos estudios se podía derivar una cobertura cartográfica en el nivel nacional que estimara los cambios en la capacidad de protección del suelo por parte de la vegetación. En definitiva, obtener un hipotético cambio del **factor C** para su introducción en el modelo **USLE**. Si bien este objetivo no se ha podido materializar, la revisión ha permitido una evaluación cualitativa sobre los cambios previstos.
- En cuanto a los **cambios en los usos del suelo**, en el proyecto ECCE 2005 se puso de manifiesto que, a corto plazo, los cambios de uso del territorio obedecen sobre todo a factores culturales, políticos y socioeconómicos, más que al impacto directo del clima, y que los efectos de estos cambios sobre el suelo pueden ser tanto o más importantes que los del mismo cambio climático. En el último medio siglo, España, como gran parte de Europa, ha sufrido grandes transformaciones del territorio, transformaciones que continúan manifestándose e interaccionarán de forma compleja con los efectos del cambio climático en los suelos. De ahí la dificultad inherente de estimar qué consecuencias puede haber sobre el incremento del riesgo de desertificación.

- En relación con la **vegetación forestal** los principales efectos del cambio climático sobre diferentes aspectos relacionados con la estructura y el funcionamiento de los ecosistemas son los cambios fenológicos, el decaimiento forestal, la pérdida de especies, los cambios en la estructura y diversidad de las comunidades y los cambios en la disponibilidad de nutrientes en el suelo. Los cambios previstos o esperables derivan fundamentalmente del hecho de que la reserva de agua en el suelo disminuirá conforme aumente la temperatura y la demanda evaporativa de la atmósfera. Esto, unido a la previsible disminución de las precipitaciones supondrá, un importante factor de estrés para el arbolado.
- En los lugares con déficit hídrico, que son frecuentes entre los ecosistemas forestales de España, se pueden esperar cambios importantes que van desde la reducción de la densidad de árboles hasta cambios en la distribución de las especies. En casos extremos, áreas actualmente ocupadas por bosques pueden ser sustituidas por matorrales o pastizales y áreas actualmente ocupadas por matorral pueden quedar expuestas a importantes impactos erosivos. Consecuencia de lo anterior, se reduciría el papel de los bosques como creadores de suelo y reguladores del ciclo hidrológico.
- Se han considerado dos principales líneas de trabajo en los estudios de los efectos del CC en los ecosistemas forestales, los centrados en los impactos sobre la biodiversidad y los que estiman el impacto sobre el funcionamiento de los ecosistemas forestales.
- El denominador común de los *estudios del impacto sobre la biodiversidad* es la obtención de mapas de la distribución potencial de las principales especies forestales arbóreas españolas en el futuro como consecuencia de los cambios de temperatura y precipitación. Los resultados obtenidos en estos proyectos coinciden en afirmar que la mayor parte de las especies forestales analizadas ven disminuida su área potencial de distribución por el cambio climático.
- Desde el punto de vista de la protección del suelo por la vegetación, la distribución de especies en sí tiene menor influencia que el tipo de formación vegetal (densidad o grado de cobertura, distribución y continuidad horizontal y vertical, ...), no habiéndose encontrado ningún estudio que ofrezca resultados cartográficos de la evolución de las formaciones vegetales, independientemente de su composición específica.
- En el presente trabajo se planteó si se podría deducir de estos estudios algún patrón común de utilidad para evaluar la evolución de la protección del suelo por la vegetación, como por ejemplo, englobar esas distribuciones potenciales de especies arbóreas y deducir la “variación del porcentaje de superficie potencialmente ocupada por bosques”. Se desestimó el desarrollo de esta hipótesis por considerar que no tenía el suficiente rigor para obtener conclusiones fiables en cuanto a estimación de la erosión. Entre otras razones, porque estamos hablando de distribuciones potenciales y no reales y porque la condición de bosque, sin que vaya acompañado al menos del dato de fracción de cabida cubierta, no es condición suficiente para presuponer una protección mayor del suelo que la que puede ofrecer, por ejemplo, un matorral denso que sustituya a esa formación boscosa.
- Los *estudios de impacto del cambio climático sobre el funcionamiento de los ecosistemas forestales* están enfocados, en general, a la modelización ecológica, El interés de estos proyectos puede radicar en que estiman la evolución de determinadas propiedades de los ecosistemas, como son la productividad (Productividad Primaria Neta Potencial, PPNP), el carbono acumulado o el déficit hídrico, y se planteó su posible utilización como variables a las que relacionar, de manera indirecta, la evolución del papel del ecosistema en la protección frente a la

degradación del suelo. Afirmaciones como que “la reducción de la PPNP se relaciona directamente con todos los bienes y servicios proporcionados por los bosques tales como la producción de madera, la producción agrícola, el secuestro de carbono y el riesgo de desertificación”, incluida en un informe de indicadores del Observatorio de la Sostenibilidad en España OSE, apoyarían esta idea. Como en el caso anterior, tras su evaluación, esta hipótesis fue desestimada por considerarse que no tenía el suficiente rigor para obtener conclusiones fiables sin estudios complementarios ajenos al objeto y alcance de este trabajo.

- Hasta ahora no se han obtenido aproximaciones cartográficas sobre estimaciones de PPNP en los **usos del suelo agrícolas**, parecidas a las realizadas en ecosistemas forestales. No obstante se han analizado, en contacto con sus responsables, las posibilidades de los proyectos, concluyendo que, aún tratándose de interesantes aproximaciones, no ofrecían, por el momento, cartografía relacionada con los cambios de usos agrícolas integrables en el ejercicio de evaluación del riesgo de desertificación.
- Sobre la variación de la **erosionabilidad del suelo (factor K de la USLE)**, el proyecto ECCE incluyó algunas consideraciones, en el sentido de que no es posible, en el estado actual de los conocimientos, determinar las sensibilidades de los suelos españoles a las variaciones del clima de una forma precisa y cuantitativa; muchas propiedades de los suelos tienen bastante inercia frente a variaciones del clima y no son fáciles de detectar frente al fuerte impacto de los usos de suelos y sus cambios, más teniendo en cuenta la gran variabilidad espacial de los suelos. Lo que sí puede resultar predecible es que dado que el factor K depende del contenido en carbono orgánico (CO) del suelo, de la textura y de la estructura del suelo, una disminución en el contenido en CO de los suelos como consecuencia del cambio climático, actuaría en el sentido de incrementar la erosionabilidad del suelo.
- En relación con el **régimen de incendios futuro** y factores que pueden afectarlo, el proyecto ECCE establece que los escenarios que se dibujan cara a la ocurrencia de incendios forestales están caracterizados por un incremento generalizado de los índices de peligro, una mayor duración de la temporada de incendios y una mayor frecuencia de situaciones extremas y de más larga duración. A esto se une la tendencia hacia un cambio en la vegetación, con mayor abundancia de especies arbustivas, más sensibles al estrés hídrico. Consecuentemente, cabe esperar que los incendios sean más frecuentes, extensos e intensos. Las áreas donde las sequías prologadas sean más raras es más probable que sean más sensibles a cambios en el régimen de incendios.
- Coincidiendo en el tiempo con la realización del presente trabajo, un total de 33 equipos de investigación, de 17 países y cuatro continentes distintos, participa en un macroproyecto (FUME: “*Forest fires under climate, social and economic changes in Europe, the Mediterranean and other fire-affected areas of the world*”) que pretende analizar cómo ha afectado el cambio climático, las transformaciones en el uso del suelo y los cambios socioeconómicos a la evolución del régimen actual de incendios y poder así predecir los escenarios de riesgo futuros. El proyecto FUME coordinado por la Universidad de Castilla-La Mancha, investiga, entre otras cosas, las amenazas para la regeneración de los ecosistemas, en virtud de extremos climáticos como las sequías. Estas y las olas de calor son fenómenos que, según los expertos, crecerán en los próximos años y décadas. Con los datos que se registren, los investigadores podrán elaborar modelos que proyecten los escenarios de futuro para las próximas décadas, de modo que el proyecto FUME servirá de base para establecer las consiguientes medidas preventivas y correctoras. Un mapa de riesgos de incendio y el análisis de las amenazas para la regeneración de los ecosistemas afectados, en especial bajo

condiciones climáticas extremas, completarán los resultados del proyecto. Muchos de los productos previstos en el Proyecto FUME¹⁹ pueden ser de gran utilidad para futuros desarrollos de esta línea de trabajo, entre otros: Escenarios de cambios de uso (de utilidad, además de como base para las proyecciones de riesgo de incendios, por su potencial utilidad para la estimación de la erosión) y mapas de futuro peligro de incendios.

- En el nivel nacional únicamente se ha encontrado como fuente válida para el estudio del factor de **sobreexplotación de acuíferos** el estudio del CEDEX del 1^{er} PNACC “Evaluación del impacto del cambio climático en los recursos hídricos en régimen natural. CEDEX, 2010”. No se considera factible la utilización de los mapas que el estudio ofrece sobre previsiones de la recarga subterránea, entre otras cosas porque la información que se utilizó en el mapa de riesgo de desertificación responde al concepto de “sobreexplotación”, es decir, los acuíferos en los que la extracción supera a la recarga, y no se ha encontrado información sobre previsiones de extracción.

Generación de mapas de riesgo de desertificación en función de los escenarios de cambio climático

- El análisis realizado (que ha incluido la consulta a expertos investigadores sobre diferentes propuestas para obtener coberturas cartográficas) no ha permitido materializar el propósito inicial de contar con coberturas cartográficas que estimen con un mínimo de rigor los cambios en la cubierta vegetal y los usos del suelo desde el punto de vista de la protección del suelo, o en el riesgo de incendios y el estado de los acuíferos. Por lo tanto, la generación de mapas de riesgo de desertificación en función de los escenarios de cambio climático se basa en la obtención de los mapas de aridez y del índice de erosividad de la lluvia (R) de la situación actual y de las futuras, y su integración en el modelo de estimación del riesgo de desertificación, manteniendo constantes el resto de factores.
- La generación de los mapas de aridez y del índice de erosividad de la lluvia (R) ha utilizado como base de partida la “Segunda colección de escenarios de cambio climático regionalizados del PNACC” (Escenarios PNACC-2012), una colección completa de proyecciones obtenida como resultado de los proyectos de investigación en curso ESCENA, ESTCENA y AEMET, junto con el proyecto ENSEMBLES. Ello garantiza la coherencia y la eficacia en el uso de recursos públicos, y favorece la coordinación y cooperación entre todos los usuarios de la comunidad de impactos y adaptación en España a distintas escalas.
- El ejercicio realizado es uno de los primeros en la utilización en España de los Escenarios PNACC-2012, en concreto como “Usuario tipo B”, es decir, un usuario sectorial, con perfil técnico y capacidad de procesamiento y manejo de datos con un nivel medio de agregación.
- Las **variables de partida** utilizadas han sido: T^a máxima, T^a mínima, Precipitación total acumulada y Precipitación máxima en 24h (P24). Se han utilizado los productos en formato rejilla (*Spain 02*), cuadrícula común y homogénea de una resolución de 0,2^o (aprox. 20 km.), que cubre la España peninsular y Baleares. Para cada punto de rejilla se ha dispuesto de los datos agregados mensualmente de las variables anteriores. Los datos facilitados para este trabajo no incluyen a Canarias, por lo que no se incluyen en el análisis.

¹⁹ Los resultados del proyecto FUME se hicieron públicos en 2014, una vez finalizado el presente estudio (principios de 2013). Se pueden consultar en: <http://fumeproject.uclm.es/>

- Se han seleccionado tres **proyecciones** incluyendo proyectos de regionalización con técnicas dinámicas y estadísticas del escenario intermedio de emisiones A1B. Todos los cálculos y generación de mapas se han hecho para cuatro periodos:
 - . Periodo de control 20C3M (1971-2000): simulaciones del clima actual resultado de aplicar los modelos regionales con forzamientos de gases de efecto invernadero (GEI) históricos. Los datos de este periodo se utilizan para realizar análisis comparativos del clima actual con las proyecciones climáticas de futuro sometidas a distintos forzamientos de GEI, y calcular y evaluar el cambio climático.
 - . Corto plazo: 2011-2040
 - . Medio plazo: 2041-2070
 - . Largo plazo: 2071-2100

Los datos observados utilizados para realizar comparativas con los datos del periodo de control 20C3M son los mismos que los utilizados en el Sistema de Información Geográfico Agrario (SIGA) del MAGRAMA.

- Del *contraste entre los datos del periodo de control y los datos observados* en el caso de las variables de partida se obtienen las siguientes conclusiones:
 - . Son apreciables las diferencias entre ambas series de datos, siendo los porcentajes de variación entre los datos de control y los datos observados mayores en el caso de las precipitaciones que en el de las temperaturas. Las diferencias, que son tanto de signo negativo como positivo, son mucho más acusadas en unas proyecciones que en otras.
 - . Las tendencias de cambio en la temperatura a lo largo del periodo son todas ascendentes, al igual que en los datos observados. Las tendencias de los valores de precipitaciones totales anuales no son uniformes, variando entre descendente con pendiente fuerte o ascendente con pendiente suave y ligeramente ascendente, muy parecida a la tendencia muy ligeramente descendente de los datos observados. Las tendencias de P24 durante este periodo no son demasiado significativas en ningún caso.
- La *evolución de las variables de partida*: T, P y P24 es la siguiente en las proyecciones analizadas.
 - . Todas las proyecciones analizadas pronostican un aumento sostenido de las temperaturas.
 - . Las proyecciones muestran una reducción de la precipitación media acumulada anual, con porcentajes de variación muy distintos según la proyección.
 - . Las proyecciones analizadas no muestran tendencias significativas en las precipitaciones máximas diarias. En dos de las proyecciones la tendencia es ligeramente ascendente y en la otra es ligeramente descendente, pero en todos los casos los porcentajes de variación son muy reducidos. De hecho, en valores absolutos la diferencia en la precipitación máxima diaria entre el periodo 1971-2000 y el periodo 2071-2100 es de entre 1 mm de aumento y 1,25 mm de disminución, cifras ciertamente insignificantes desde el punto de vista de su influencia en el análisis de la erosividad de la lluvia en los futuros escenarios de cambio climático.

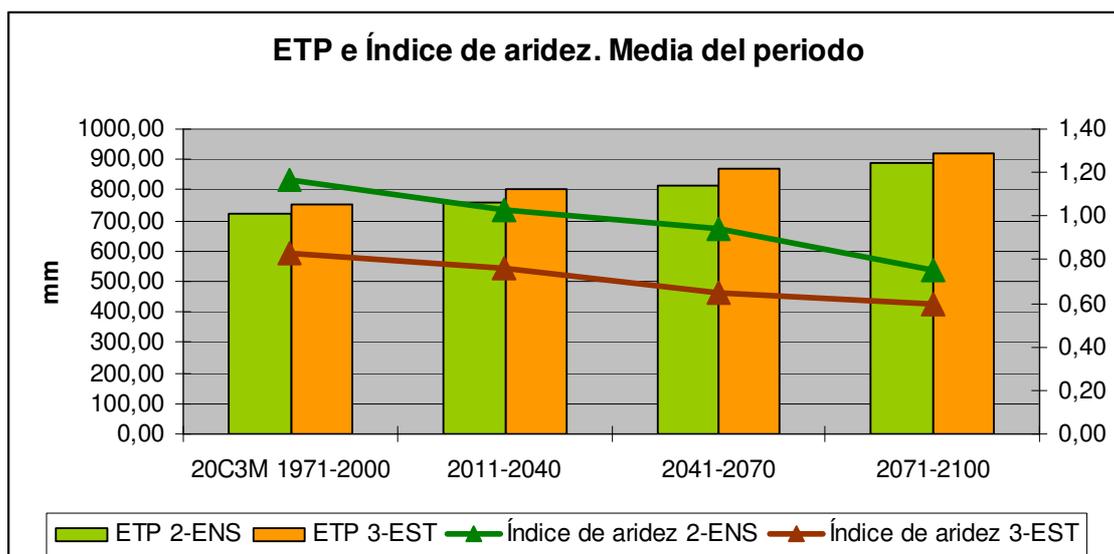
En el cuadro adjunto se sintetizan los porcentajes de variación de los valores de las variables de partida entre el periodo de control y los sucesivos periodos. Como se puede apreciar, el orden de magnitud de las variaciones es muy

distinto en las variables de temperatura media y precipitación anual en relación con la variable de precipitación máxima diaria.

% Variación respecto a periodo de control

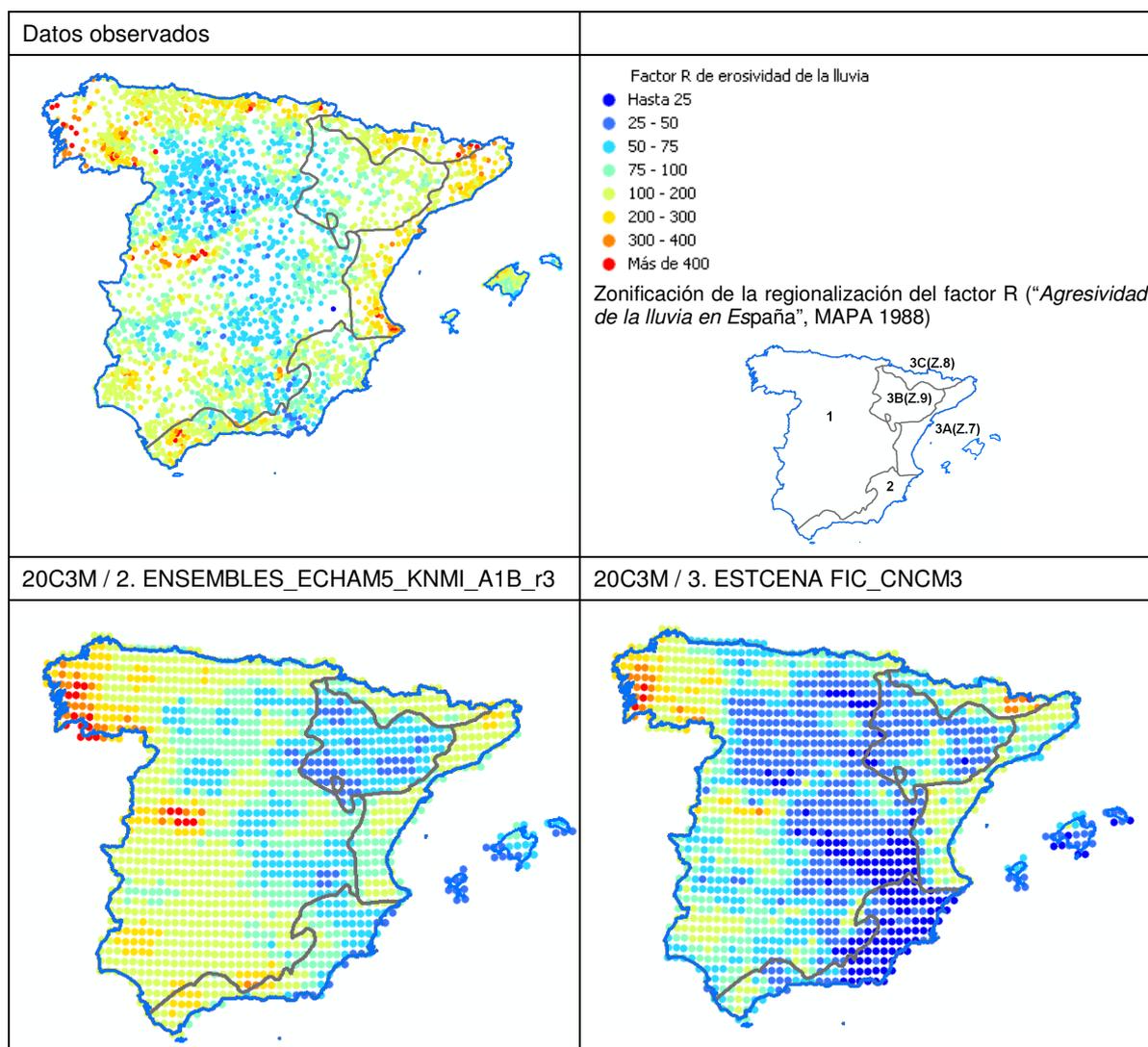
	1	2	3	Media 2 y 3
PERIODO	ESCENA UCLM_ PRO_HADCM3Q3	ENSEMBLES_ECHAM5_ KNMI_A1B_r3	ESTCENA FIC_CNCM3	
<i>Temperatura media anual</i>				
2011-2040	12,73%	6,77%	8,35%	7,58%
2041-2070		16,48%	17,97%	17,25%
2071-2100		27,48%	23,95%	25,66%
<i>Precipitación media acumulada anual</i>				
2011-2040	-1,89%	-6,84%	-2,79%	-5,11%
2041-2070		-8,70%	-9,53%	-9,06%
2071-2100		-20,57%	-12,61%	-17,16%
<i>Precipitación máxima diaria</i>				
2011-2040	2,55%	1,01%	0,24%	0,68%
2041-2070		3,51%	-2,58%	0,89%
2071-2100		2,23%	-3,63%	-0,29%

- Tras el análisis de los datos de las variables de partida se descartó para los siguientes análisis los datos de la proyección ESCENA_UCLM_PRO_HADCM3Q3, porque, además de no contar con datos más allá de 2050, las diferencias entre los valores obtenidos con el modelo en el periodo de control y los datos observados son excesivamente elevadas, en particular en las precipitaciones.
- La **evolución de los valores anuales de ETP e índice de aridez (P/ETP)** es la siguiente en las proyecciones analizadas:
 - En ambos casos la ETP aumenta a lo largo del siglo, aumento asociado al de la temperatura media. Los porcentajes de variación respecto al periodo de control de la ETP son muy similares en los dos escenarios, resultando como media un descenso de la ETP del 22,8% en cada periodo al final del siglo XXI.
 - El incremento de la temperatura, y por tanto de la evapotranspiración, y el descenso de las precipitaciones se aúnan para que se produzca un incremento generalizado en todo el territorio de los valores del índice de aridez. Así, el índice de aridez experimenta un acusado descenso en los dos escenarios, como media de un 31,8%.



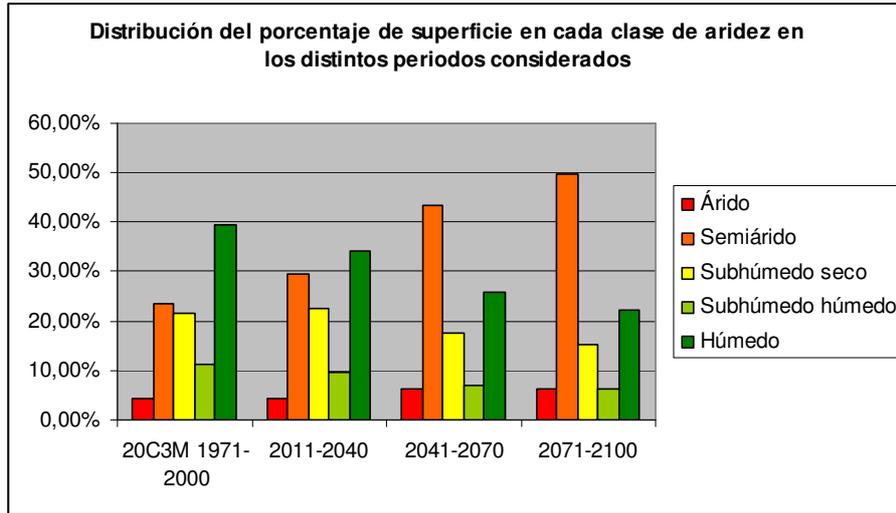
- El **cálculo del factor R** se basa en el estudio “Agresividad de la lluvia en España” (1988) publicado por el Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Este trabajo, a través de la formación de un banco de datos y el tratamiento de la información pluviográfica y pluviométrica recopilada, logró obtener el factor R mediante ecuaciones de regresión utilizando variables pluviométricas y la zonificación de la distribución mensual del factor R. Es el procedimiento empleado en el Mapa de Estados Erosivos (MEE) y en el Inventario Nacional de Erosión de Suelos (INES). Es necesario tener en cuenta que la elaboración de estas ecuaciones se basa en bandas de pluviógrafo y en una distribución mensual de la lluvia para unos años concretos (los disponibles cuando se elaboró la publicación de 1988, que abarcan el periodo 1950-1985) hipótesis que se están trasladando al futuro. En caso de que, tal y como apuntan muchas estimaciones y pronósticos expertos (a pesar de que como se ha dicho los modelos no lo están reflejando con suficiente fiabilidad) se produjera una mayor irregularidad de la distribución en las precipitaciones y un incremento de la torrencialidad, es decir de la intensidad máxima de la lluvia, estas regresiones serían diferentes.
- El contraste entre periodo de control y datos observados en el caso de los valores de los parámetros que intervienen en el cálculo del factor R ofrece importantes diferencias de comportamiento de ambos modelos, lo que añade más incertidumbre a la que ya se tiene de origen respecto a las predicciones de las precipitaciones intensas. En cuanto a la distribución territorial, en ambos casos se observa que los escenarios no recogen alguna de las zonas en las que los valores observados de R son elevados, en particular, las zonas del levante mediterráneo.

Factor R erosividad de la lluvia: contraste con datos observados

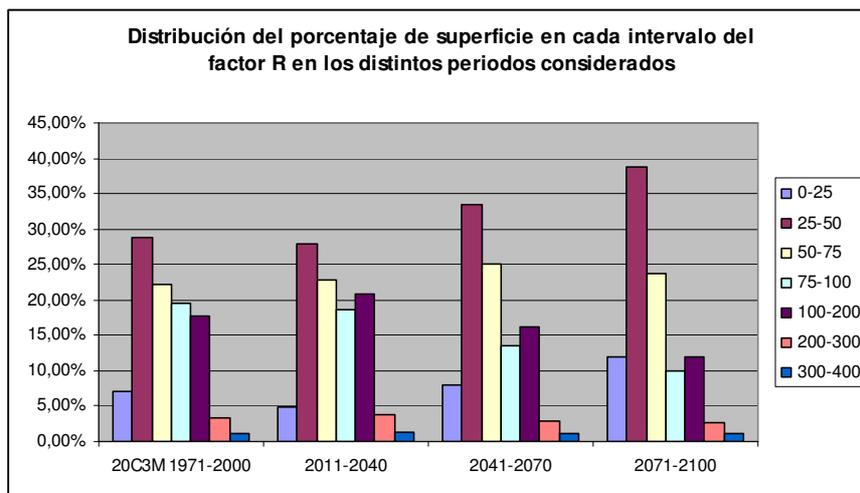


- En cuanto a la **evolución de los valores medios para Península y Baleares del factor R**, en general se puede decir que la pauta de comportamiento del factor R a lo largo del siglo es de un ligero aumento bien durante el segundo o tercer periodo de siglo seguido de una disminución al final del periodo. Esta pauta, salvo alguna excepción, es similar en las distintas zonas analizadas.
- La estimación de la erosividad de la lluvia en función del cambio climático está muy condicionada por la menor precisión de los modelos climáticos en cuando a la predicción del comportamiento de las precipitaciones, y en particular por la elevada incertidumbre, reconocida de forma generalizada, en la evolución de las futuras pautas de los eventos de precipitaciones intensas.
- Tras realizar una comparativa del comportamiento de las proyecciones analizada se ha decidido utilizar la **proyección ESTCENA FIC_CNCM3** para el siguiente paso, que es la interpolación de los mapas de aridez y del factor R para realizar una estimación de:
 - Los cambios en el mapa de riesgo de desertificación como consecuencia del incremento de aridez.
 - Los cambios en la erosión como consecuencia de las variaciones del factor R

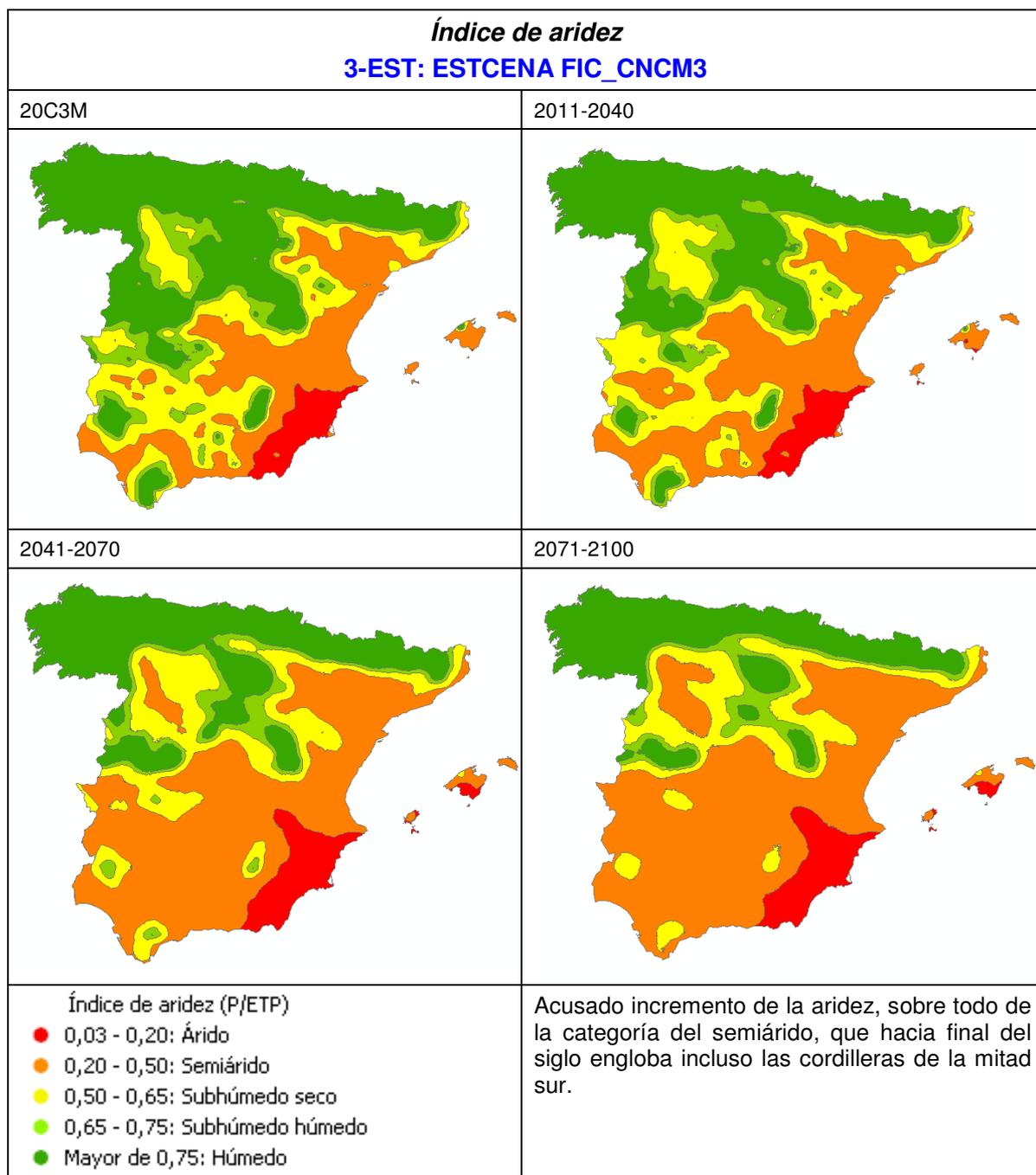
- Los cambios en el mapa de riesgo de desertificación como consecuencia del incremento de aridez y de los cambios en la erosión.
- La **interpolación de los mapas de aridez y del factor R** permite analizar la variación en el tiempo de la distribución de la superficie en cada rango de aridez y de erosividad de la lluvia²⁰:
 - Incremento de la superficie en las categorías de mayor aridez, muy poco acusado en la categoría más árida y muy acusado en la categoría del semiárido, sobre todo a partir del segundo periodo considerado, 2041-2070.

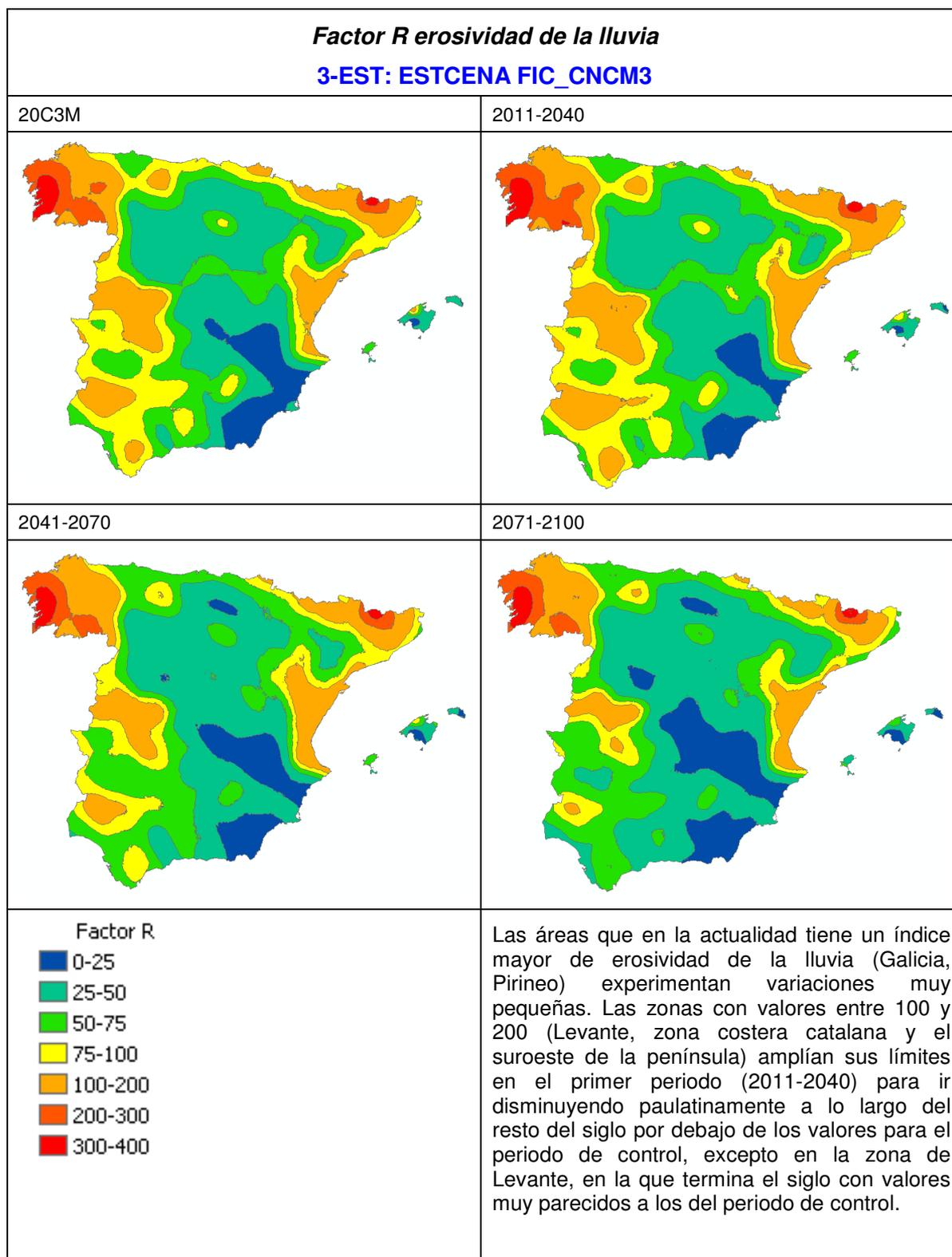


- Incremento de la superficie en las categorías de menor agresividad de la lluvia, por debajo de 50, en el tercer y cuarto periodos del siglo XXI y el descenso de superficie con índices de agresividad medios y altos. Es muy poco acusado el descenso en las áreas de mayor agresividad. Sin embargo la tendencia en el periodo 2011-2040 es la contraria, reflejando un ligero incremento del factor R en todo el territorio nacional. Comparando las distribuciones de superficie en cada intervalo de valores del factor R entre el periodo de control y el periodo de fin de siglo XXI, se observa el desplazamiento generalizado hacia valores más bajos del índice de agresividad de la lluvia.



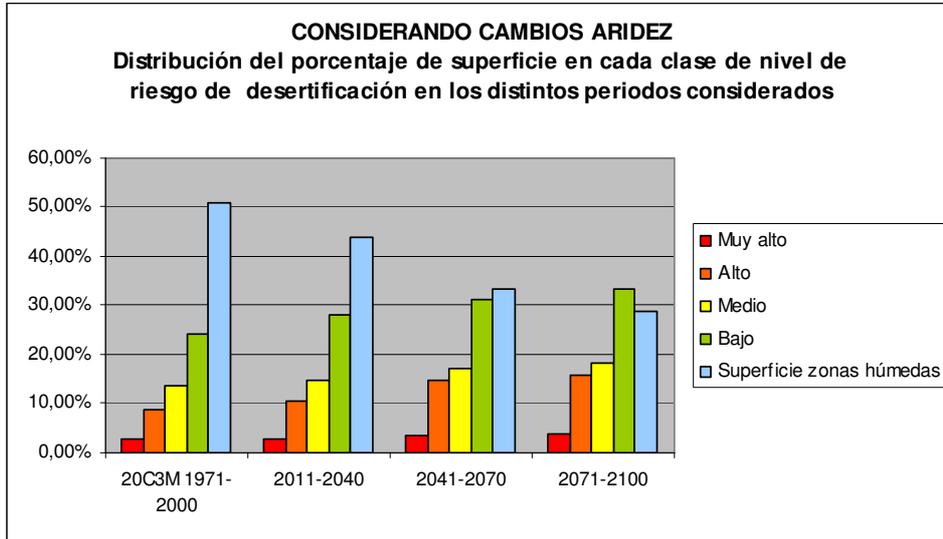
²⁰ Todos los gráficos y mapas a partir de este punto se refieren a la proyección ESTCENA FIC_CNCM3



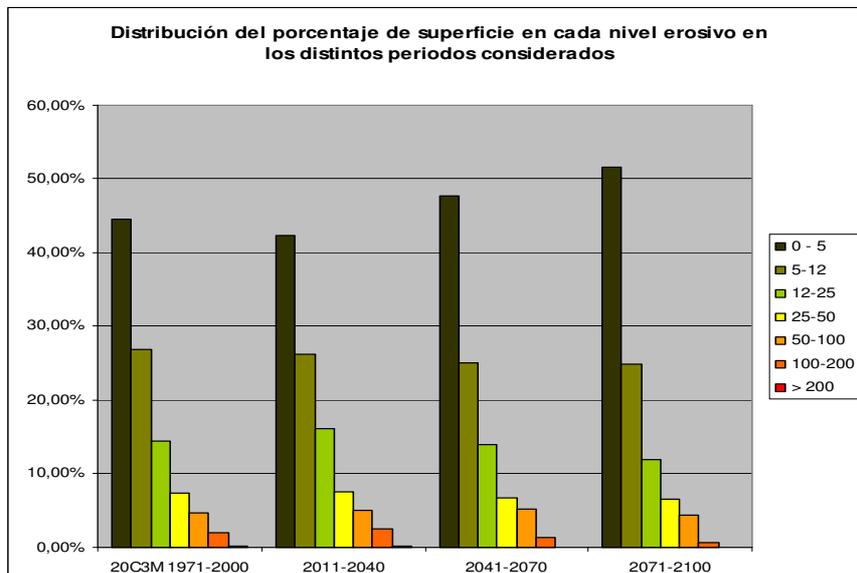


- Los **cambios en el mapa de riesgo de desertificación como consecuencia del incremento de aridez**, que se obtienen de sustituir en el mapa de riesgo de desertificación del PAND la capa del mapa de aridez original por la generada para cada periodo considerado por la proyección ESTCENA FIC_CNCM3, son:

- El riesgo de desertificación aumenta en todas las zonas y buena parte del territorio (22%) que antes se consideraba fuera de la definición de desertificación por cuestiones climáticas, pasaría a formar parte de las Zonas áridas, semiáridas y subhúmedas secas.
- Los mayores incrementos relativos del porcentaje de superficie en cada clase entre los periodos 2071-2100 y el periodo 1971-200 se dan en las categorías de riesgo Muy alto y Alto, incrementándose en un 45,5 y 82,4 % respectivamente.



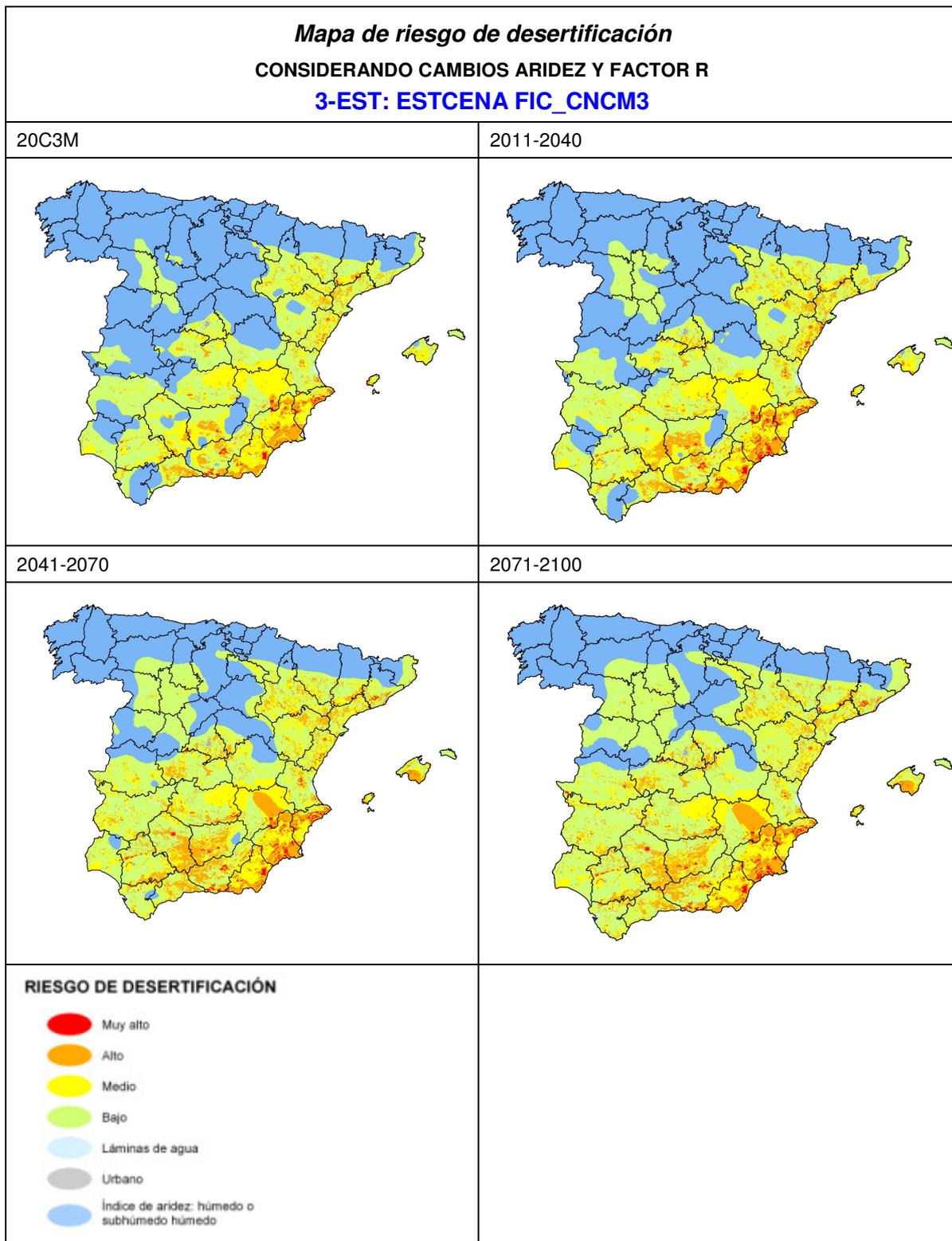
- Los **cambios en la erosión como consecuencia de las variaciones del factor R**, que se obtienen de considerar los cambios del factor R en la ecuación universal de pérdidas de suelo (USLE), manteniendo constantes el resto de factores, apuntan a un ligero incremento a corto plazo de las pérdidas de suelo por erosión hídrica y a la disminución generalizada de las pérdidas a largo plazo. Resultado que era lógico esperar dado que se pronostica una disminución de la precipitación media y a que los modelos muestran una ligera reducción de las precipitaciones máximas diarias, lo que conlleva que prevean una disminución de la capacidad erosiva de la lluvia.



- Los **cambios en el mapa de riesgo de desertificación como consecuencia del incremento de aridez y de los cambios en la erosión**, que se obtienen de sustituir en el mapa de riesgo de desertificación del PAND las capas del mapa de aridez y del Mapa de Estados Erosivos originales por las generadas para cada periodo considerado por la proyección ESTCENA FIC_CNCM3, son:
 - . Todas las clases de riesgo sufren incrementos, pero son de bastante menor cuantía que en el primer ejercicio de integración teniendo únicamente en cuenta los cambios en la aridez. Es decir, las diferencias entre los porcentajes de fin de siglo y periodo de control (ver tabla adjunta) son menores en la hipótesis de “cambio aridez y erosión” que en la hipótesis “cambio aridez”.

Clase de riesgo de desertificación	Diferencia entre porcentaje fin de siglo y periodo de control	
	CONSIDERANDO CAMBIOS ARIDEZ	CONSIDERANDO CAMBIOS ARIDEZ Y FACTOR R
Muy alto	1,20%	0,41%
Alto	7,12%	5,25%
Medio	4,63%	0,66%
Bajo	9,23%	15,88%
Superficie de zonas húmedas y subhúmedas húmedas	-22,19%	-22,19%

- El algoritmo por el que se estimó en el PAND el riesgo de desertificación es un modelo muy simplificado cuyo objetivo es únicamente una aproximación cualitativa del riesgo, nunca cuantitativa. Y en este contexto es como deben interpretarse los resultados obtenidos, que no pueden ni deben pretender determinar qué influencia adquiere más relevancia, el incremento de aridez o la disminución de erosión, máxime teniendo en cuenta la elevada incertidumbre de las proyecciones en el pronóstico de los eventos extremos causantes de los episodios erosivos más graves.



Como *conclusiones finales del trabajo realizado para analizar los procesos de desertificación en España en función de los distintos escenarios climáticos*, se pueden señalar las siguientes:

- Una evaluación integral del efecto del cambio climático en la desertificación requeriría la generación de escenarios de cobertura vegetal del suelo / uso y manejo del suelo, frecuencias de incendios, sobreexplotación de acuíferos y escenarios socioeconómicos. Estas simulaciones resultan complejas y presentan notables carencias de información.
- Para estimar con más seguridad la evaluación de las tasas de erosión será necesario mejorar la incertidumbre asociada a las proyecciones de precipitación máxima.
- Los efectos del cambio climático implicarán una disminución del contenido en materia orgánica del suelo en los ecosistemas lo cual afectará al valor factor K. Para considerar estos cambios sería necesario incorporar la información de modelos específicos de dinámica del Carbono en el suelo.
- La vegetación adquiere un papel decisivo en el control de los procesos erosivos. Pese a las incertidumbres que pueda haber sobre cambios de usos de suelo, como mínimo habría que considerar el efecto del cambio climático en la vegetación forestal actual (especialmente en el grado de cobertura del suelo). Esta aproximación podría realizarse estableciendo alguna relación entre los cambios en la evapotranspiración, o en la productividad potencial primaria neta, y la fracción de cabida cubierta para, de este modo, modificar el factor C, pero sería necesario calibrar si la generación de una cartografía de estimación del factor C a partir de esta aproximación tendría suficiente rigor.
- Lo que parece incuestionable es un incremento generalizado de la aridez, con todas las consecuencias (que los expertos analizan de forma continua como se ha intentado reflejar a lo largo de este documento) en “el sistema bioproductivo terrestre que comprende el suelo, la vegetación, otros componentes de la biota y los procesos geológicos e hidrológicos que se desarrollan dentro del sistema”, es decir, en la “tierra”, tal como es entendida en el texto de la Convención en su artículo 1.
- En definitiva, aun cuando no se produjeran incrementos cuantitativamente importantes de las pérdidas de suelo, el incremento previsto de la aridez apunta a un aumento del riesgo de desertificación. Es evidente que los ecosistemas más frágiles, con menos capacidad para adaptarse a los cambios previstos en la temperatura y la precipitación serán los más vulnerables frente a la degradación.

BIBLIOGRAFÍA

- De la Rosa D., Crompvoets J., Mayol F. y Moreno J.A. 1996. Land Vulnerability Evaluation and Climate Change Impacts in Andalusia, Spain. *International Agrophysics Journal* 10: 225-238.
- De la Rosa D., Mayol F., Diaz-Pereira E., Fernández M. y De la Rosa D. Jr. 2004. A Land Evaluation Decision Support System (MicroLEIS DSS) for Agricultural Soil Protection. *Environmental Modelling y Software*: 19, 929-942. <http://www.microleis.com>.
- De Luis M, Gonzalez-Hidalgo J.C., Longares I. A., 2010. Is rainfall erosivity increasing in the mediterranea n Iberian Peninsula?. *Land Degrad. Develop.* 21: 139–144 (2010) . DOI: 10.1002/ldr.918
- Diodato N., Bellocchi G., 2009. ENVIRONMENTAL IMPLICATIONS OF EROSIIVE RAINFALL ACROSS THE MEDITERRANEAN. In: *Environmental Impact Assessments*. George T. Halley and Yeram T. Fridian (Ed.). ISBN 978-1-60692-667-3. pp 225-255.
- EEA, 1999a. Environment in the European Union at the Turn of the Century. European Environment Agency. <http://www.eea.europa.eu/publications/92-9157-202-0/page306.html>
- European Commission, 1999 (forthcoming). "Economic Assessment of Priorities for a European Environmental Policy Plan (working title)". Report prepared by RIVM, EFTEC, NTUA and IIASA for Directorate General XI (Environment, Nuclear Safety and Civil Protection).
- Gracia, C.A., Sabaté, S. y Sánchez, A. 2002. El cambio climático y la reducción de la reserva de agua en el bosque mediterráneo. *Ecosistemas* 2002/2 (URL: <http://www.aeet.org/ecosistemas/022/investigacion4.htm>)
- Gutiérrez, J.M., San-Martín, D., Brands, S., Manzanar, R., Herrera, S. Reassessing statistical downscaling techniques for their robust application under climate change conditions, *Journal of climate*, 2013, 26, 171—188. D.O.I: 10.1175/JCLI-D-11-00687.1
- Herrera S, Gutiérrez J, Ancell R, Pons M, Frás M, Fernández J (2012) Development and Analysis of a 50 year high-resolution daily gridded precipitation dataset over Spain (Spain02). *International Journal of Climatology*, DOI 10.1002/joc.2256
- ICONA-Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, 1988. Agresividad de la lluvia en España. Valores del factor R de la ecuación universal de pérdidas de suelo.
- IPCC, 2007. IPCC Fourth Assessment Report: Climate Change 2007 (AR4). IPCC Synthesis Report, 2007. http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr_sp.pdf
- IPCC, 2012: Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Field, C.B., V. Barros, T.F. Stocker, D. Qin, D.J. Dokken, K.L. Ebi, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, G.-K. Plattner, S.K. Allen, M. Tignor, and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA, 582 pp.
- MAGRAMA, Inventario Nacional de Erosión de Suelos (INES) <http://www.magrama.gob.es/es/biodiversidad/temas/inventarios-nacionales/inventario-nacional-de-erosion-de-suelos/default.aspx>

- MAGRAMA, Mapa de Estados Erosivos (MEE)
http://www.magrama.gob.es/es/biodiversidad/servicios/banco-datos-naturaleza/informacion-disponible/mapas_estados_erosivos.aspx
- MAGRAMA, 2008. Programa de Acción Nacional contra la Desertificación (PAND).
http://www.magrama.gob.es/es/desarrollo-rural/temas/politica-forestal/desertificacion-restauracion-forestal/lucha-contra-la-desertificacion/lch_pand.aspx
- MMA-UCLM, 2005. Evaluación Preliminar de los Impactos en España por Efecto del Cambio Climático. Proyecto ECCE - INFORME FINAL
- Moreno J.M., 2009. Impactos en el riesgo potencial de incendios debidos al cambio climático. In: Convivir con los incendios forestales. Lo que nos revela la ciencia. Una aportación al diálogo Político-Científico. EFI Discusión Paper 15. Yves Birot (ed). pp. 77-80
- Nunes J. P., Seixas J., Keizer1 j. and Ferreira A. J. D. 2009 Sensitivity of runoff and soil erosion to climate change in two Mediterranean watersheds. Part II: assessing impacts from changes in storm rainfall, soil moisture and vegetation cover . In: Hydrol. Process. 23, 1212–1220 (2009)
- Nunes J. P., Seixas J., Ricardo Pacheco N. 2008. Vulnerability of water resources, vegetation productivity and soil erosion to climate change in Mediterranean watersheds. Hydrol. Process. 22, 3115–3134 (2008), DOI: 10.1002/hyp.6897.
- OSE, 2011. Sostenibilidad en España 2011. CAPÍTULO ESPECIAL. LOS BOSQUES EN ESPAÑA (2011 AÑO INTERNACIONAL DE LOS BOSQUES. Impactos del cambio global sobre los ecosistemas forestales españoles.
- Pardo F, Santfeliu T, Jordán M, 2009. Modelización de la degradación del suelo ante un cambio climático en un monte en proceso de mediterrización. In: Control de la degradación de los suelos y cambio global. Libro de actas, IV simposio sobre control de la degradación de los suelos y cambio global. Sánchez Díaz J. & Asins Velis (Ed). pp 45-47.
- Pedro Fernández, 2006. Cambio climático e ingeniería territorial: riesgos y oportunidades. In Ingeniería y Territorio, Nº 74, pp 44-51
- RIVM report 481505018. Technical Report on Soil Degradation in Europe: an integrated economic and environmental assessment. G.J. van den Born, B.J. de Haan, D.W. Pearce, A. Howarth. May 2000.
<http://www.rivm.nl/bibliotheek/rapporten/481505018.pdf>
- Rodríguez Surián, Manuel; Moreira Madueño, José Manuel; Quijada Muñoz, Javier; Corzo Toscano, Mariano y Gil Jiménez, Yolanda (2008): Evaluación y seguimiento multitemporal de la desertificación a través del Sistema de Información Geográfica Ambiental de Andalucía. En: Hernández, L. y Parreño, J. M. (Eds.), Tecnologías de la Información Geográfica para el Desarrollo Territorial. Servicio de Publicaciones y Difusión Científica de la ULPGC. Las Palmas de Gran Canaria. Pp. 737-751. ISBN: 978-84-96971-53-0.
- Sabaté, S., C. A. Gracia, E. Pla, A. Sánchez, J. Vayreda. 2004. Aplicación del modelo gotilwa+ para el análisis de los efectos del cambio climático y la gestión forestal en el balance de carbono y agua en los bosques. Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales. In press.
- UNEP-EEA. 2000. Down to Earth: Soil Degradation and Sustainable Development in Europe. Environmental Issue Series No. 16. European Environmental Agency Pub. Copenhagen.

- Vallejo V.R., Díaz Fierros F. y de la Rosa D., 2005. Impactos sobre los recursos edáficos. In: Evaluación preliminar de los Impactos en España por Efecto del Cambio Climático. Proyecto ECCE - INFORME FINAL.
- WWF, 2012. Modelos de dinámica forestal como fuente de información para la adaptación de los bosques al cambio climático Informe de conclusiones Taller WW. Septiembre 2012.

Análisis de los procesos de desertificación en España en función de los distintos escenarios climáticos

ANEJO

Generación de mapas de riesgo de desertificación en función del cambio climático:

Mapas

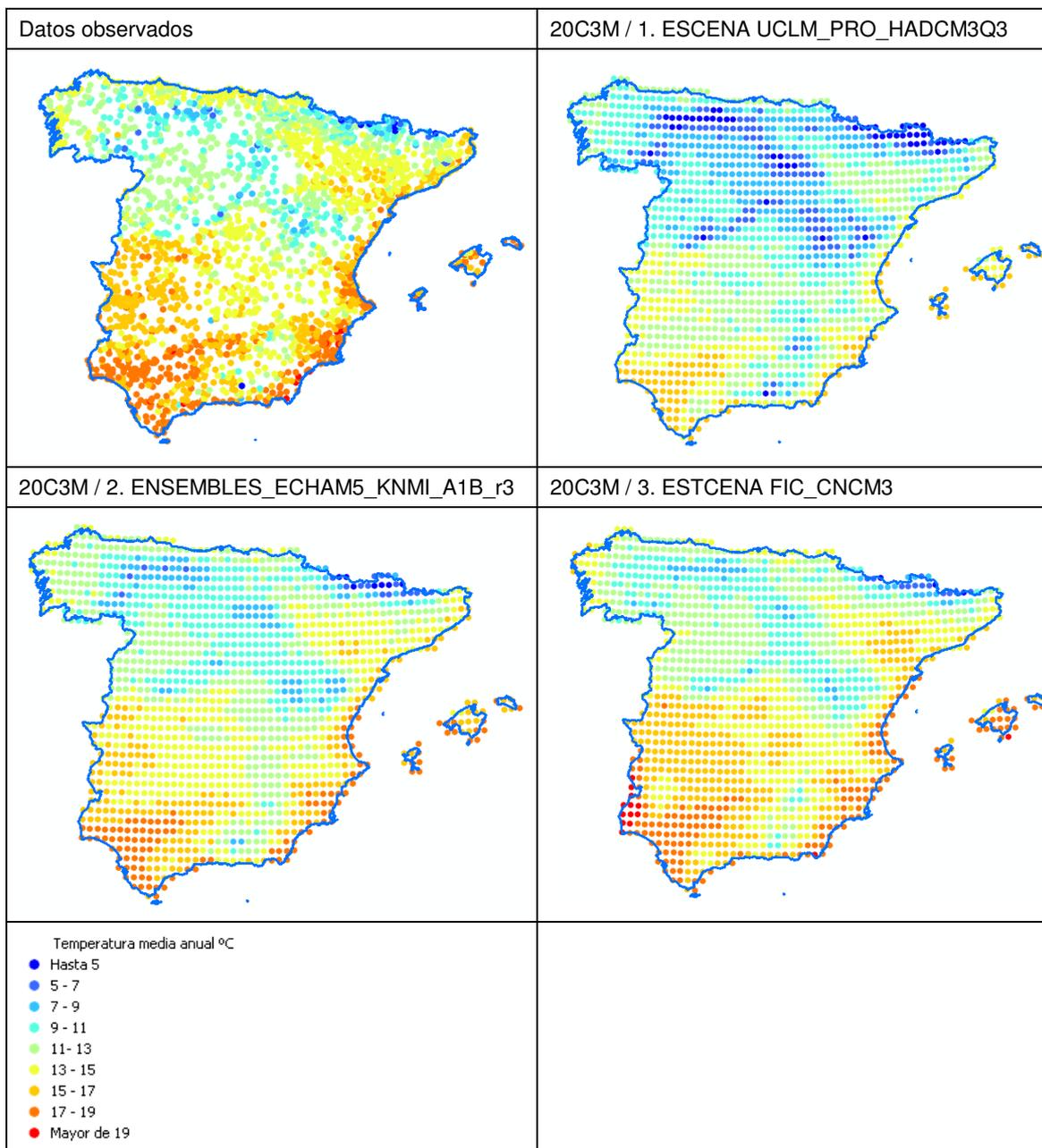
ÍNDICE

1.	Variables de partida.....	1
1.1.	Contraste con datos observados.....	1
1.1.1.	Temperatura media anual	1
1.1.2.	Precipitación media acumulada anual.....	2
1.1.3.	Precipitación máxima en 24 h para el periodo de retorno de 10 años.....	3
2.	Evapotranspiración potencial anual e índice de aridez	4
2.1.	Contraste con datos observados.....	4
2.1.1.	Evapotranspiración potencial anual	4
2.1.2.	Índice de aridez	5
2.2.	Evolución de los valores anuales de ETP e índice de aridez	6
2.3.	Interpolación de los mapas de aridez.....	8
3.	Índice de erosividad de la lluvia (Factor R de la USLE)	9
3.1.	Contraste con datos observados.....	9
3.2.	Evolución de los valores de la P24 y del factor R	10
3.3.	Interpolación de los mapas del factor R.....	14
4.	Cambios en el mapa de riesgo de desertificación como consecuencia del incremento de aridez.....	15
4.1.	Comparación situaciones de partida	15
4.2.	Evolución mapa de riesgo de desertificación como consecuencia del incremento de aridez	16
5.	Cambios en la erosión como consecuencia de las variaciones del factor R	17
5.1.	Comparación situaciones de partida	17
5.2.	Evolución mapa de erosión como consecuencia de las variaciones del factor R	18
6.	Cambios en el mapa de riesgo de desertificación como consecuencia del incremento de aridez y de los cambios en la erosividad de la lluvia (factor R)	19

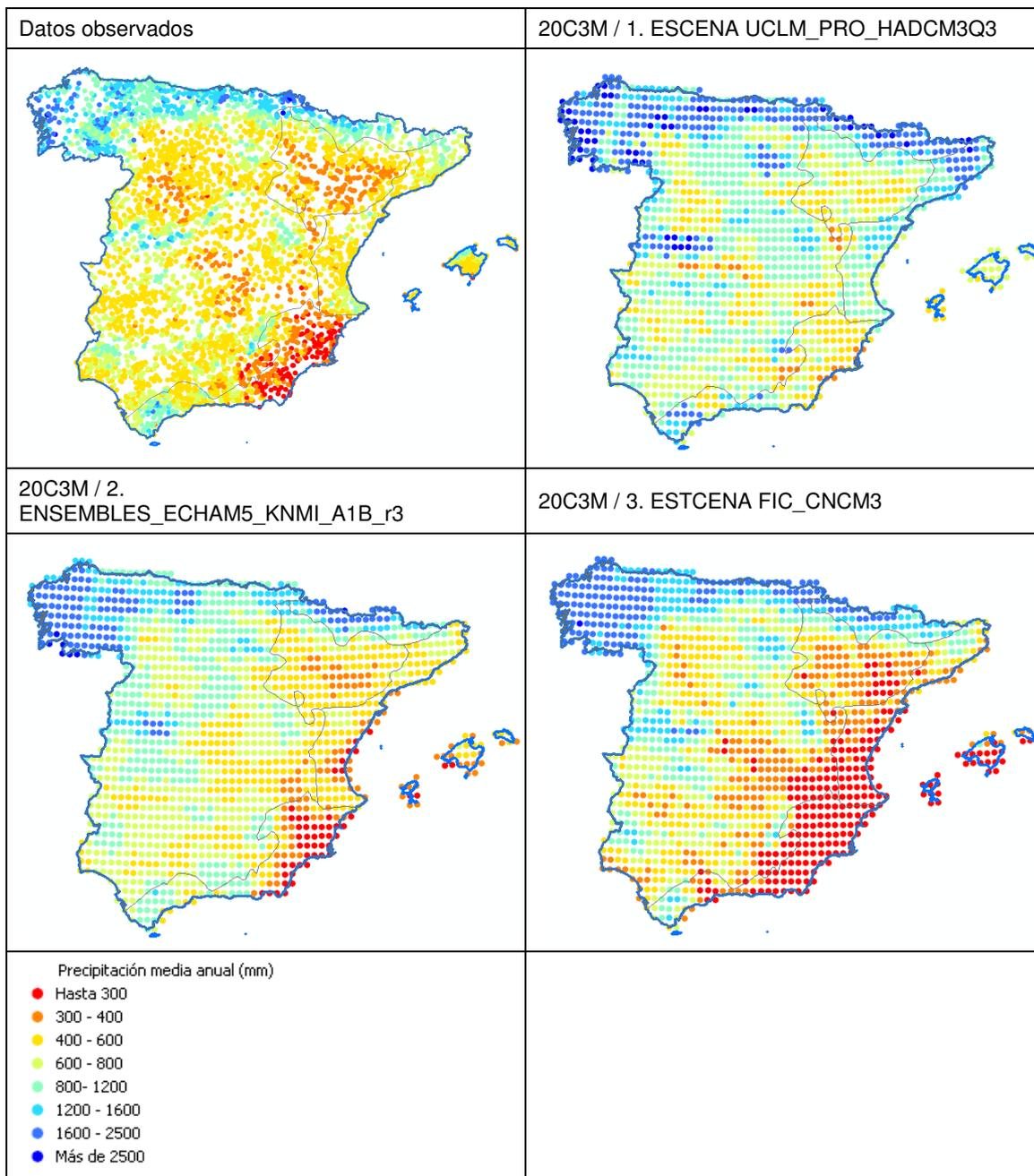
1. Variables de partida

1.1. Contraste con datos observados

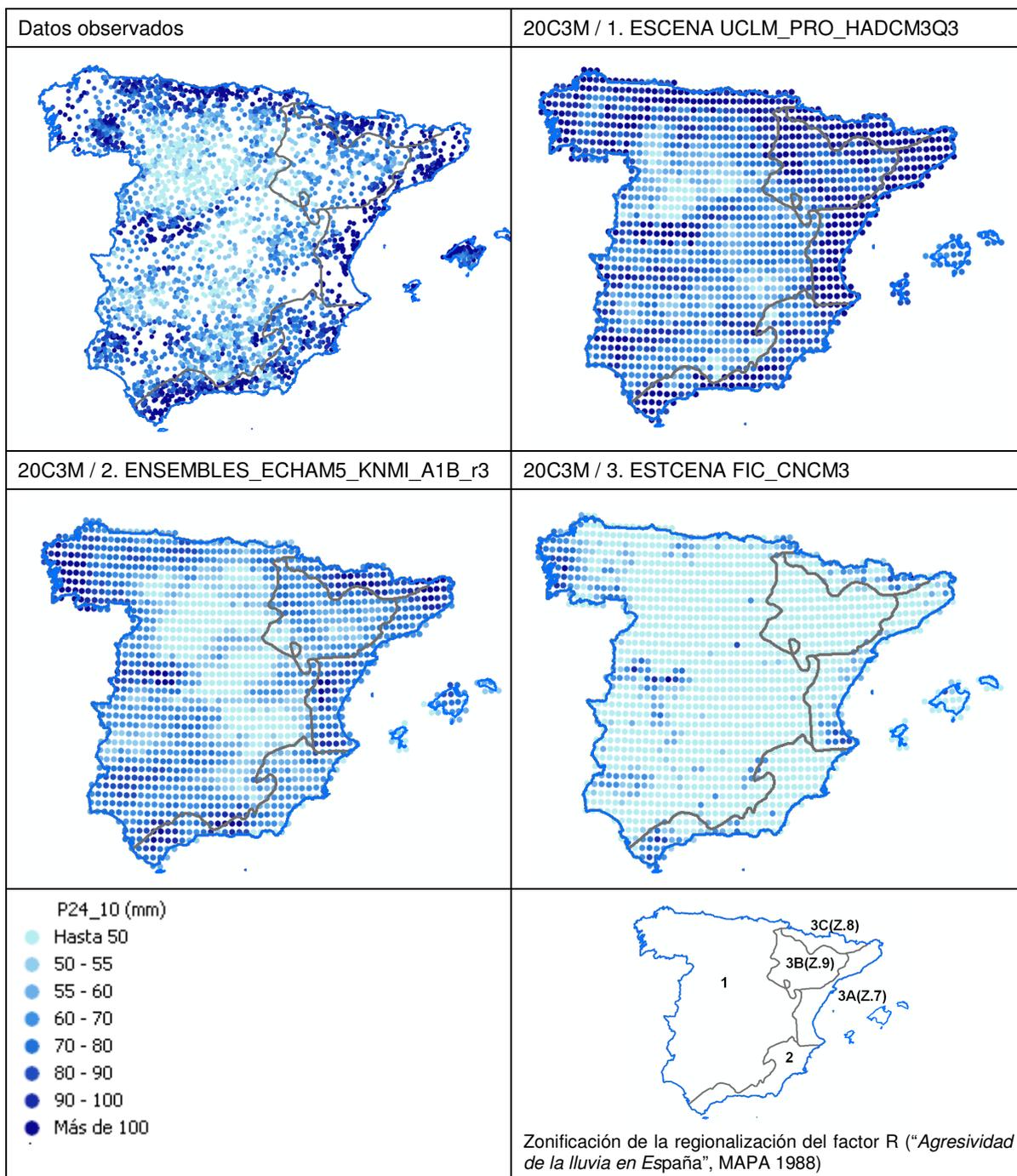
1.1.1. Temperatura media anual



1.1.2. Precipitación media acumulada anual



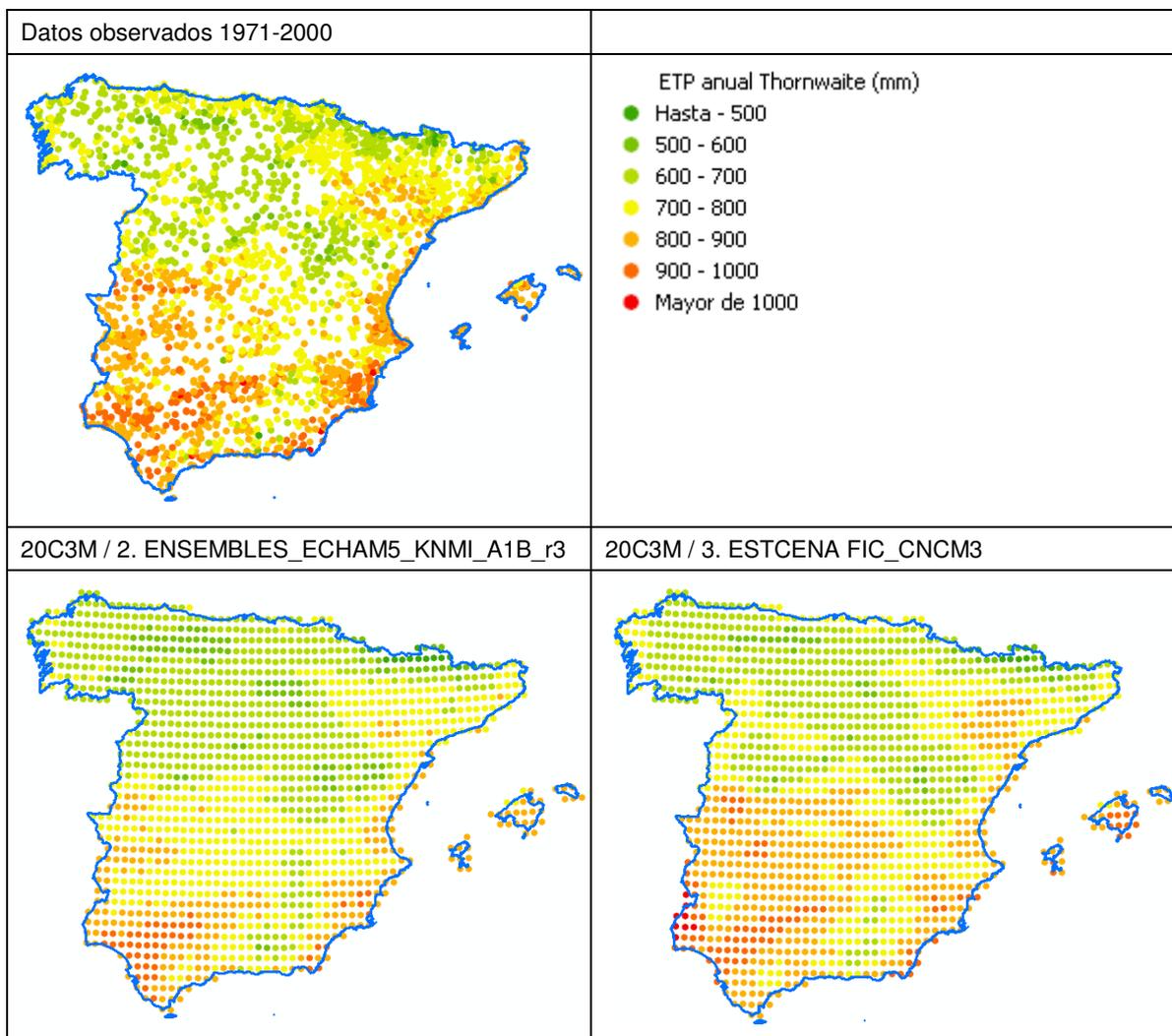
1.1.3. Precipitación máxima en 24 h para el periodo de retorno de 10 años



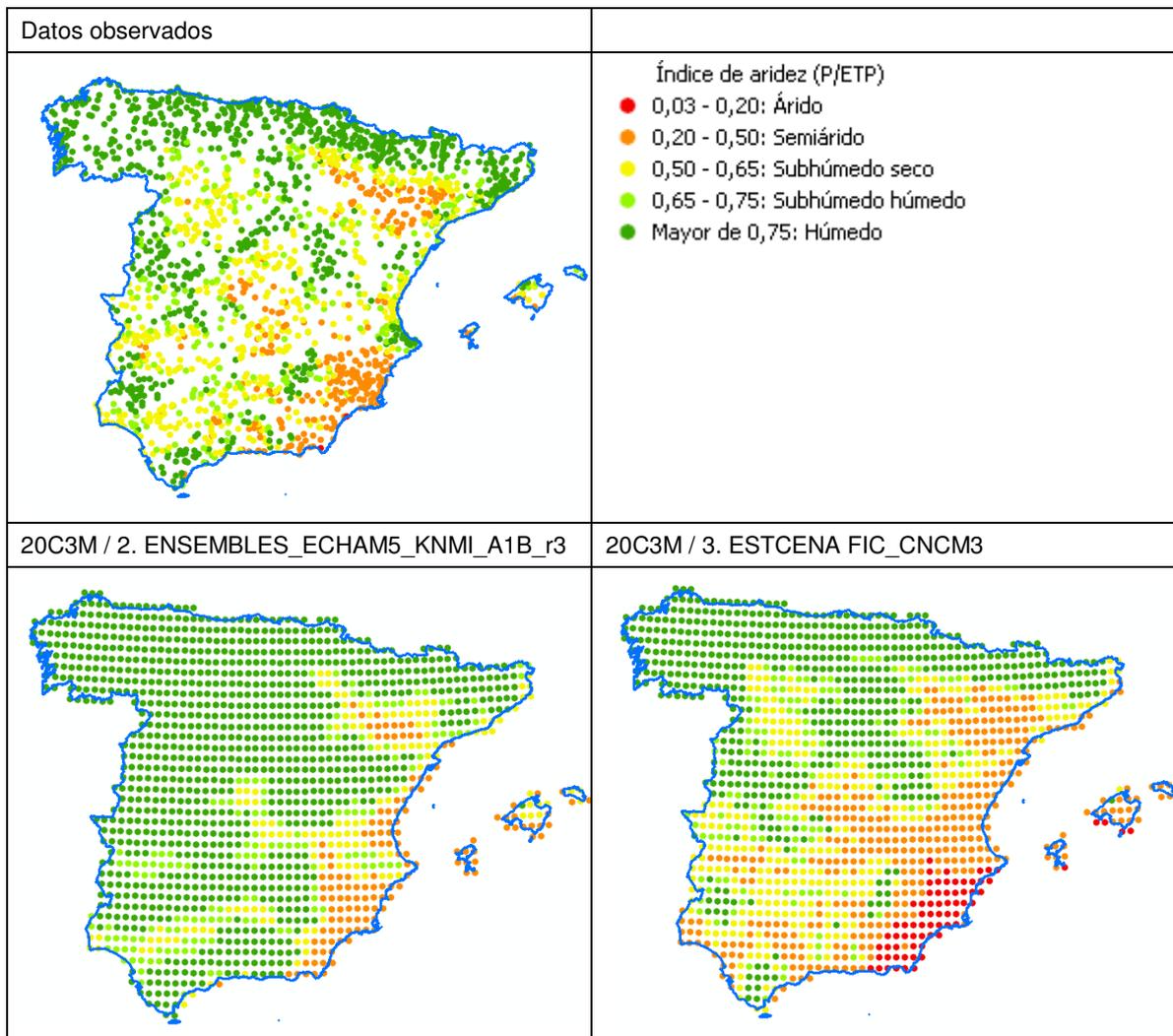
2. Evapotranspiración potencial anual e índice de aridez

2.1. Contraste con datos observados

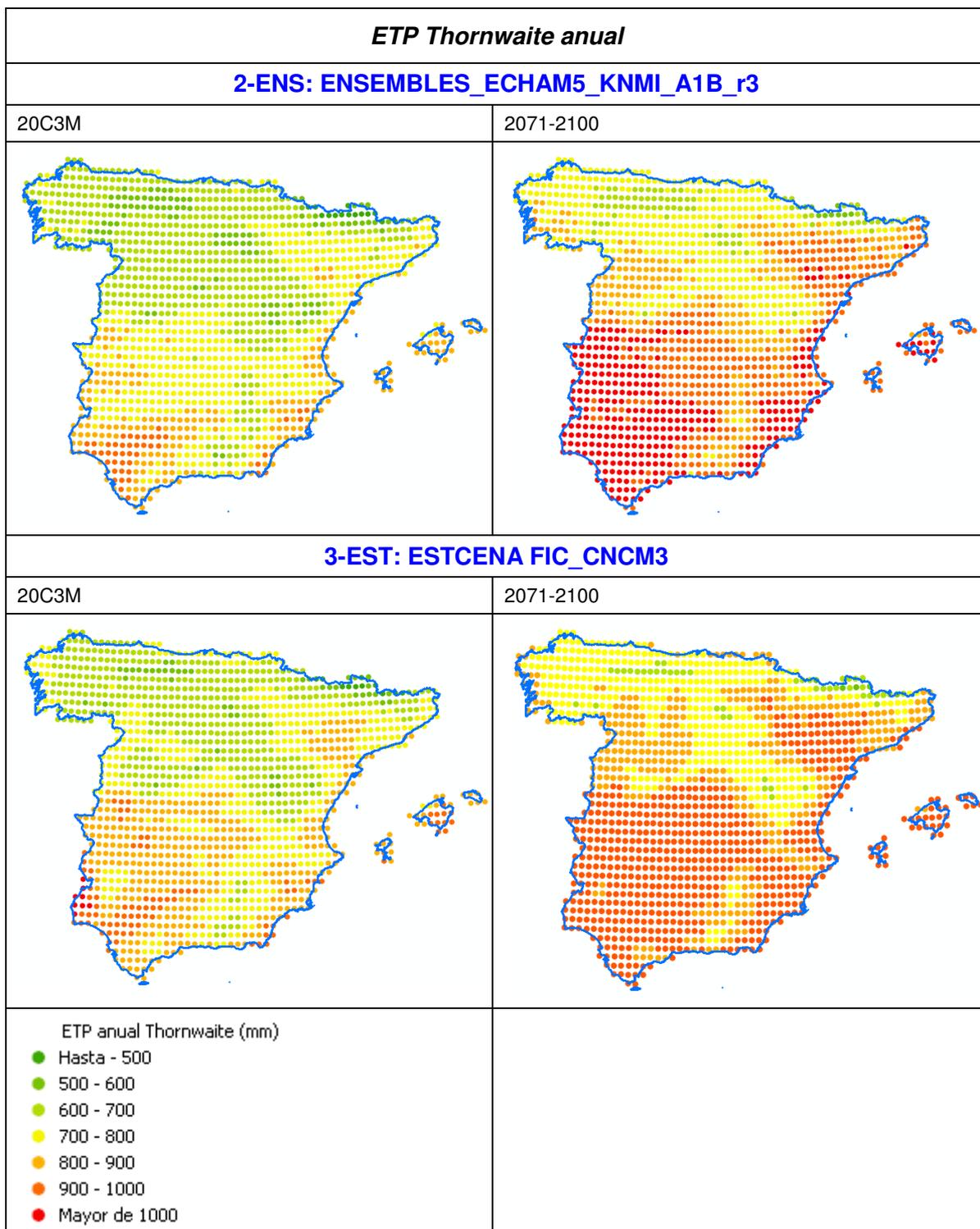
2.1.1. Evapotranspiración potencial anual

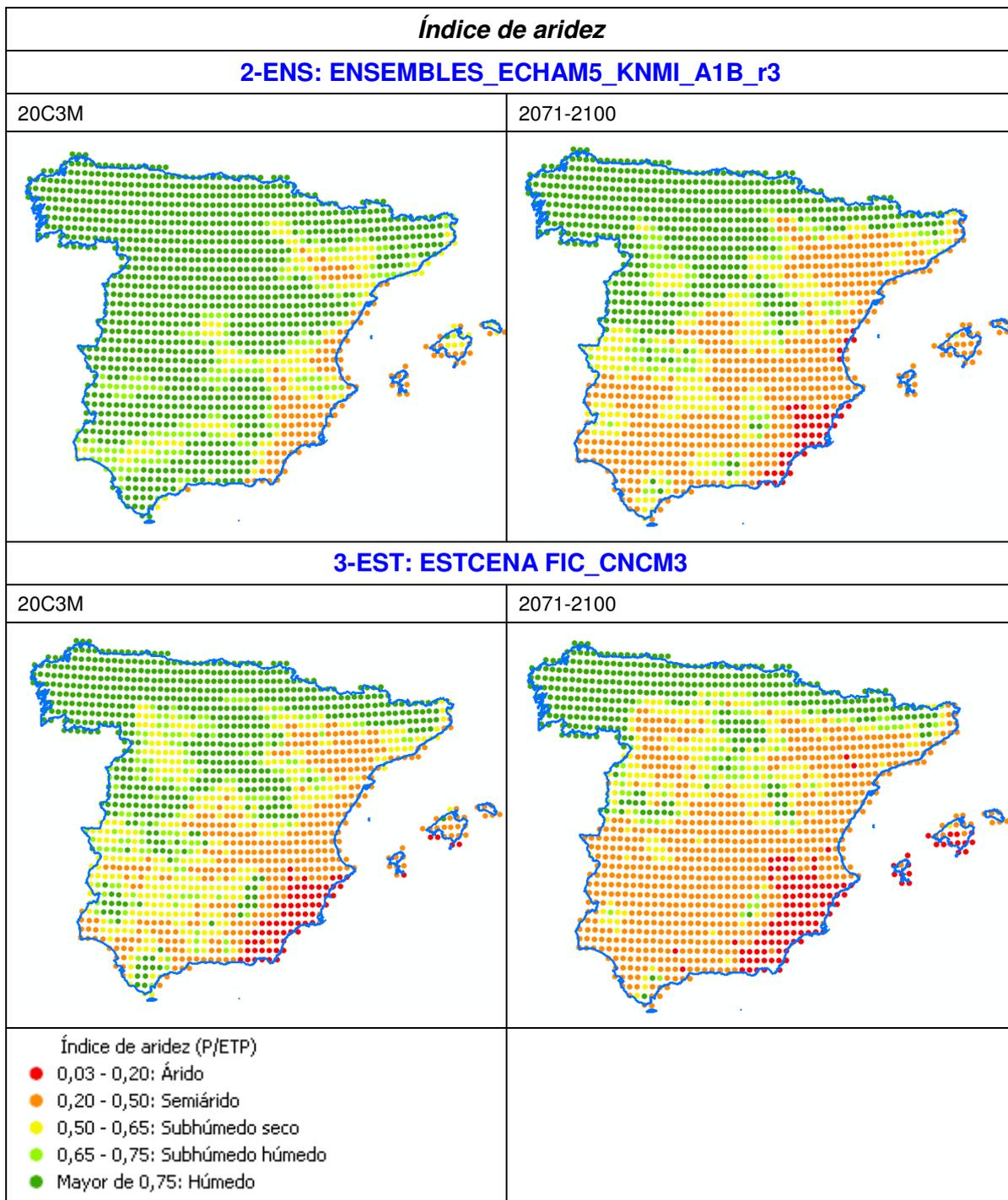


2.1.2. Índice de aridez

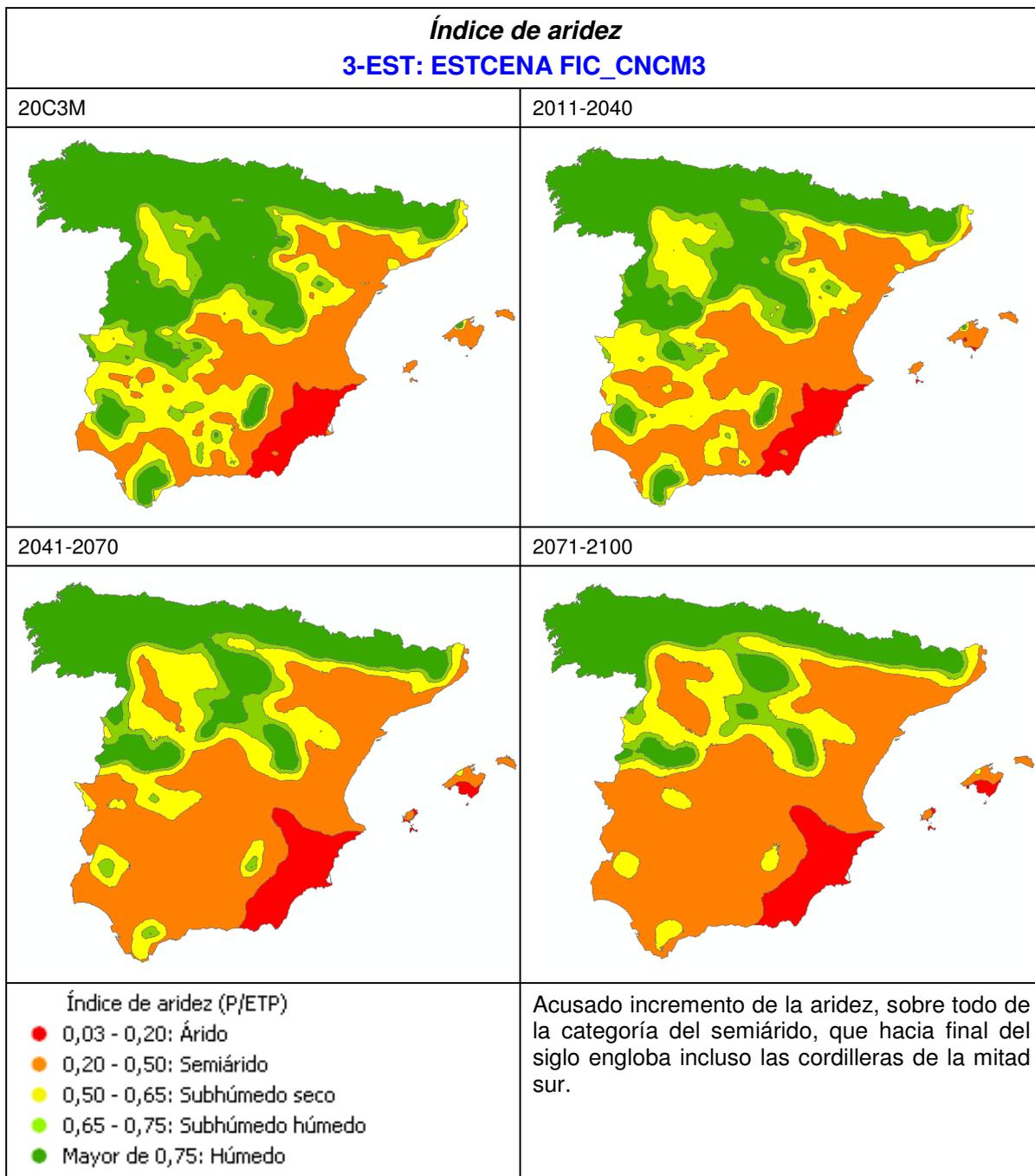


2.2. Evolución de los valores anuales de ETP e índice de aridez



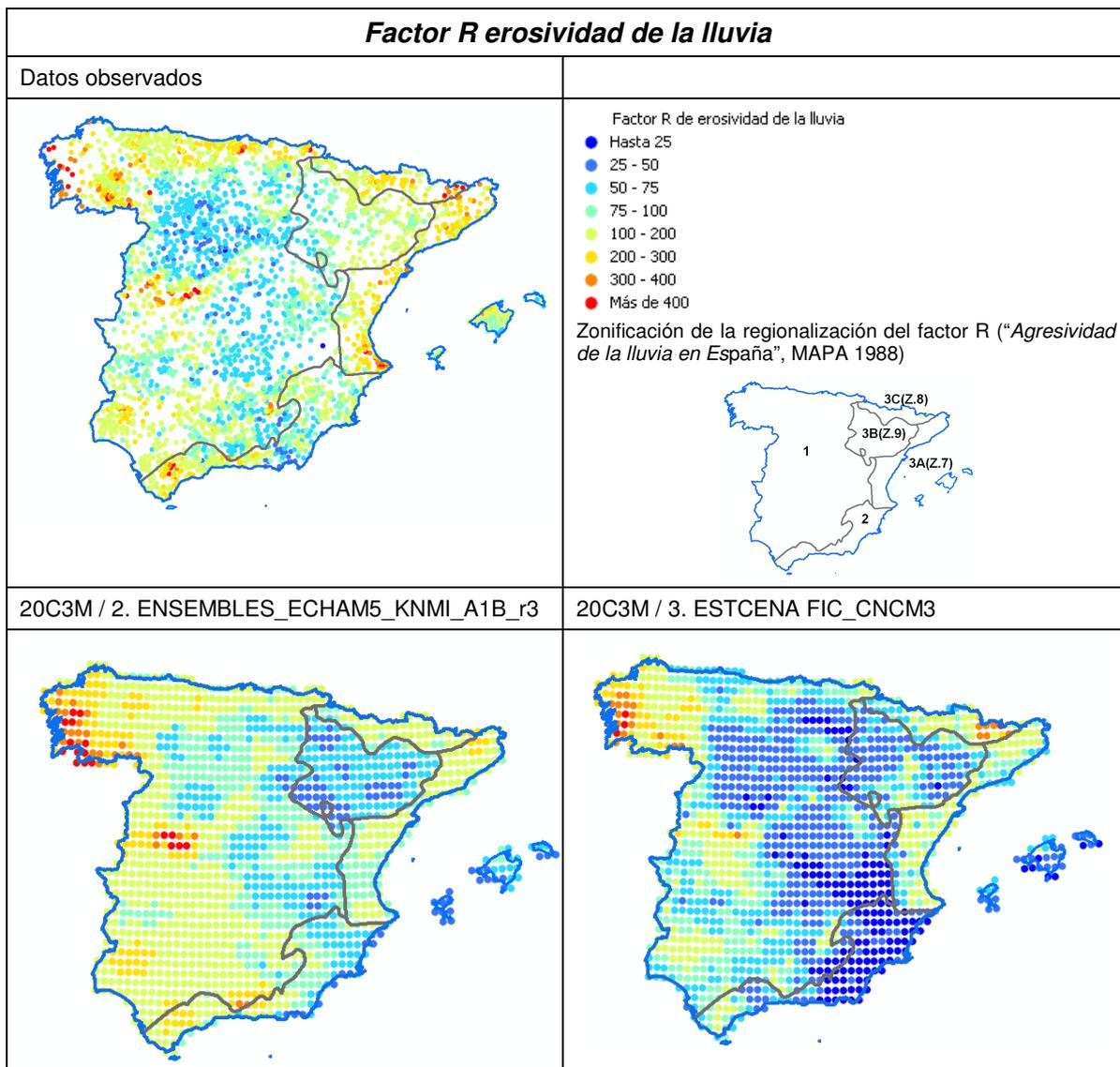


2.3. Interpolación de los mapas de aridez

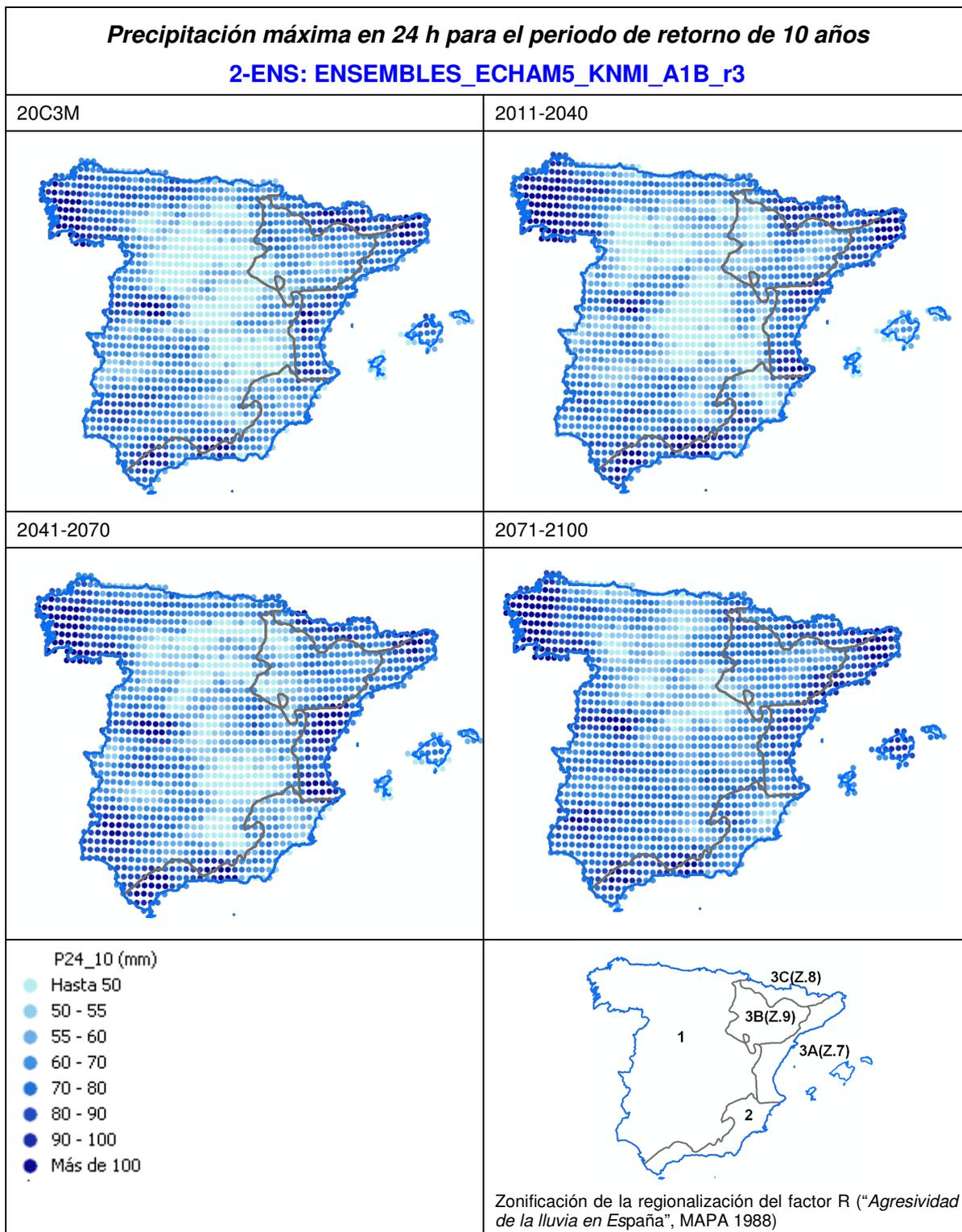


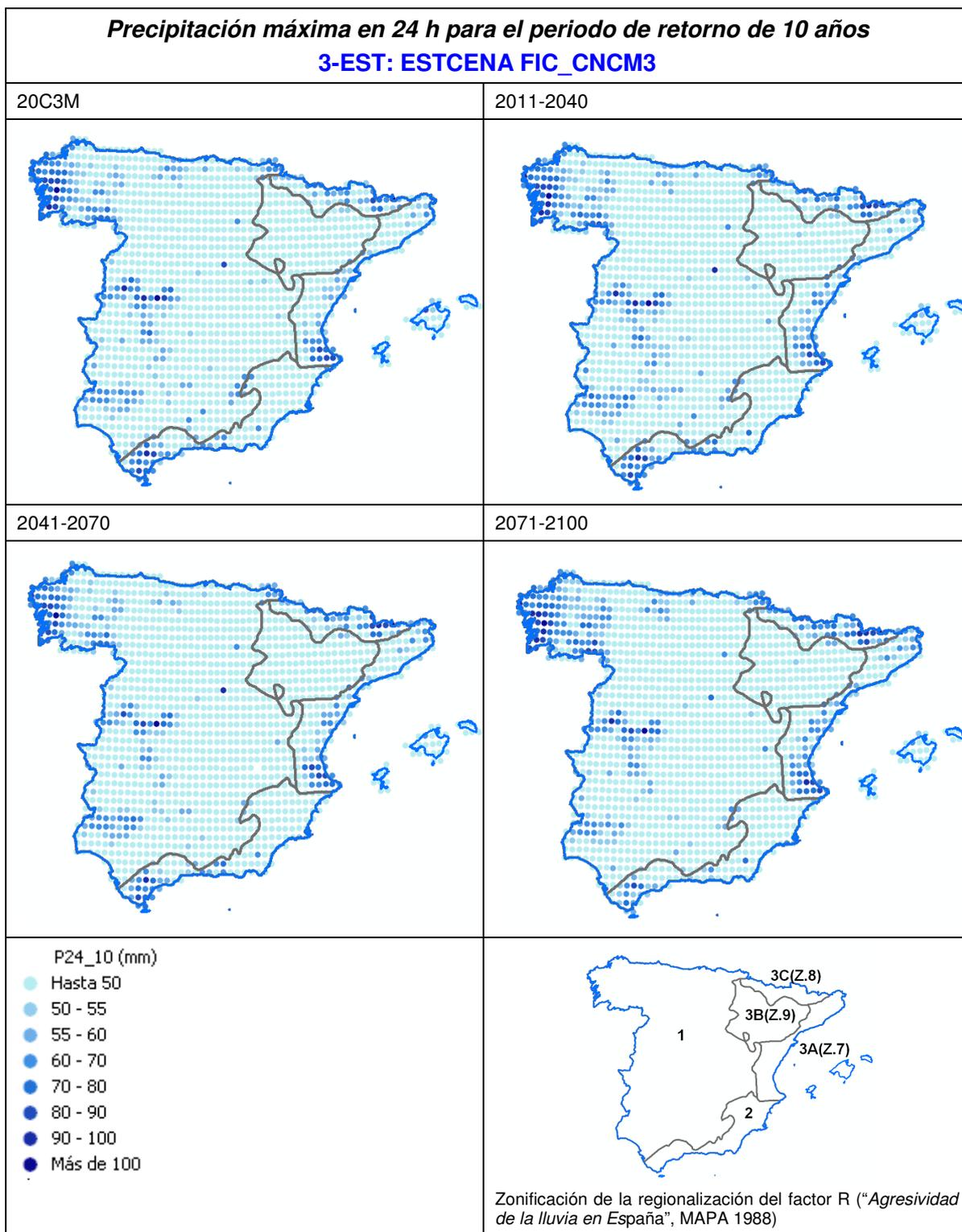
3. Índice de erosividad de la lluvia (Factor R de la USLE)

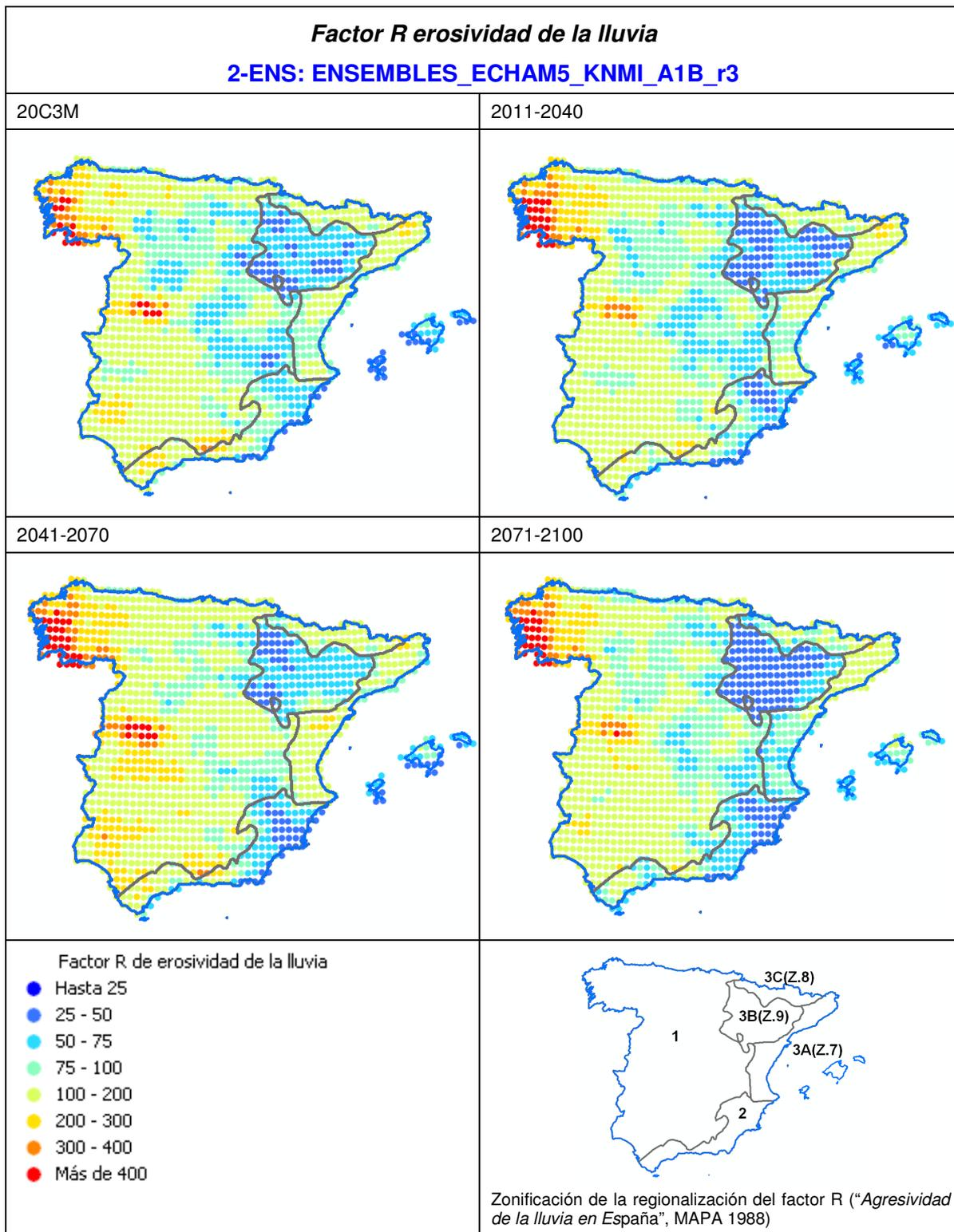
3.1. Contraste con datos observados

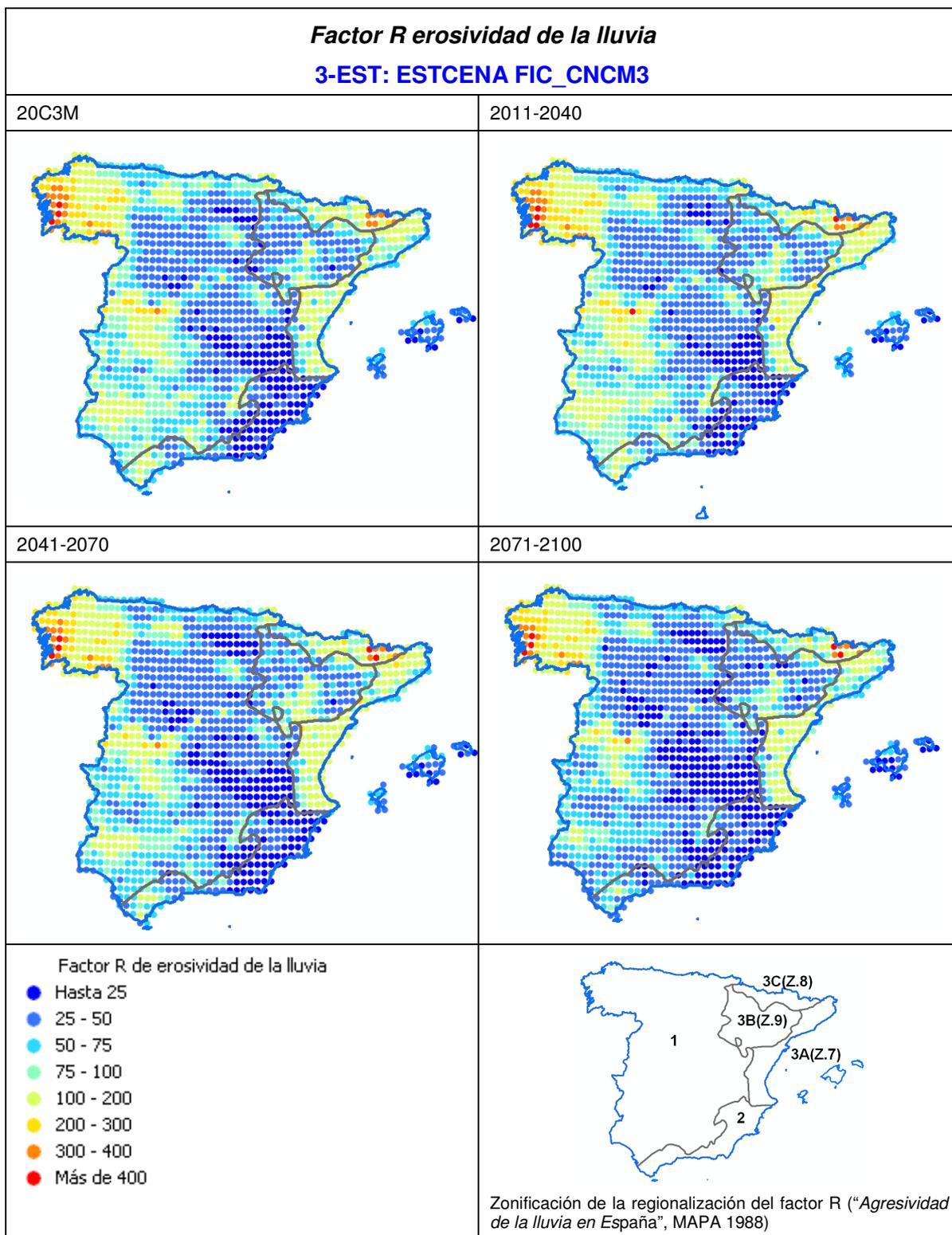


3.2. Evolución de los valores de la P24 y del factor R

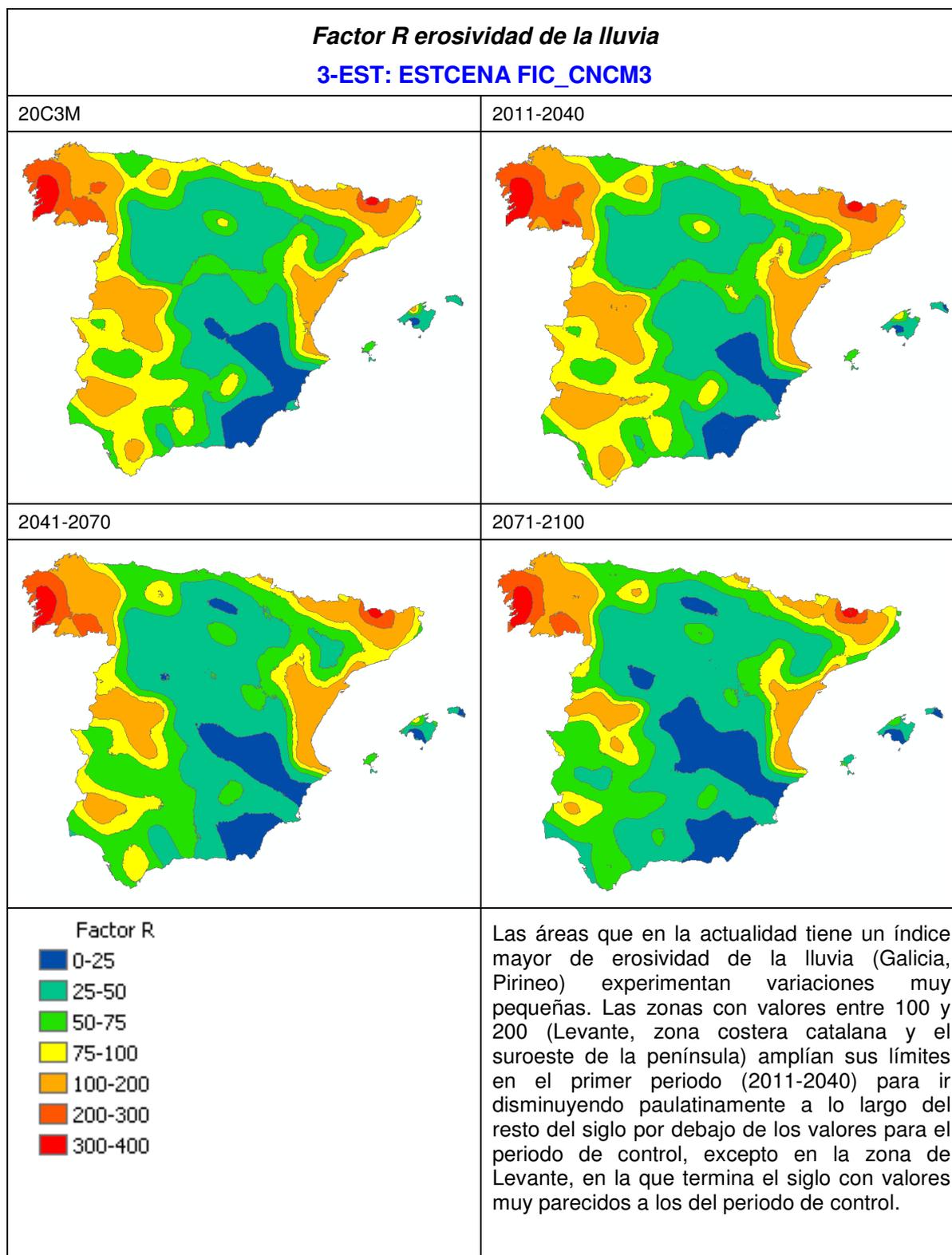






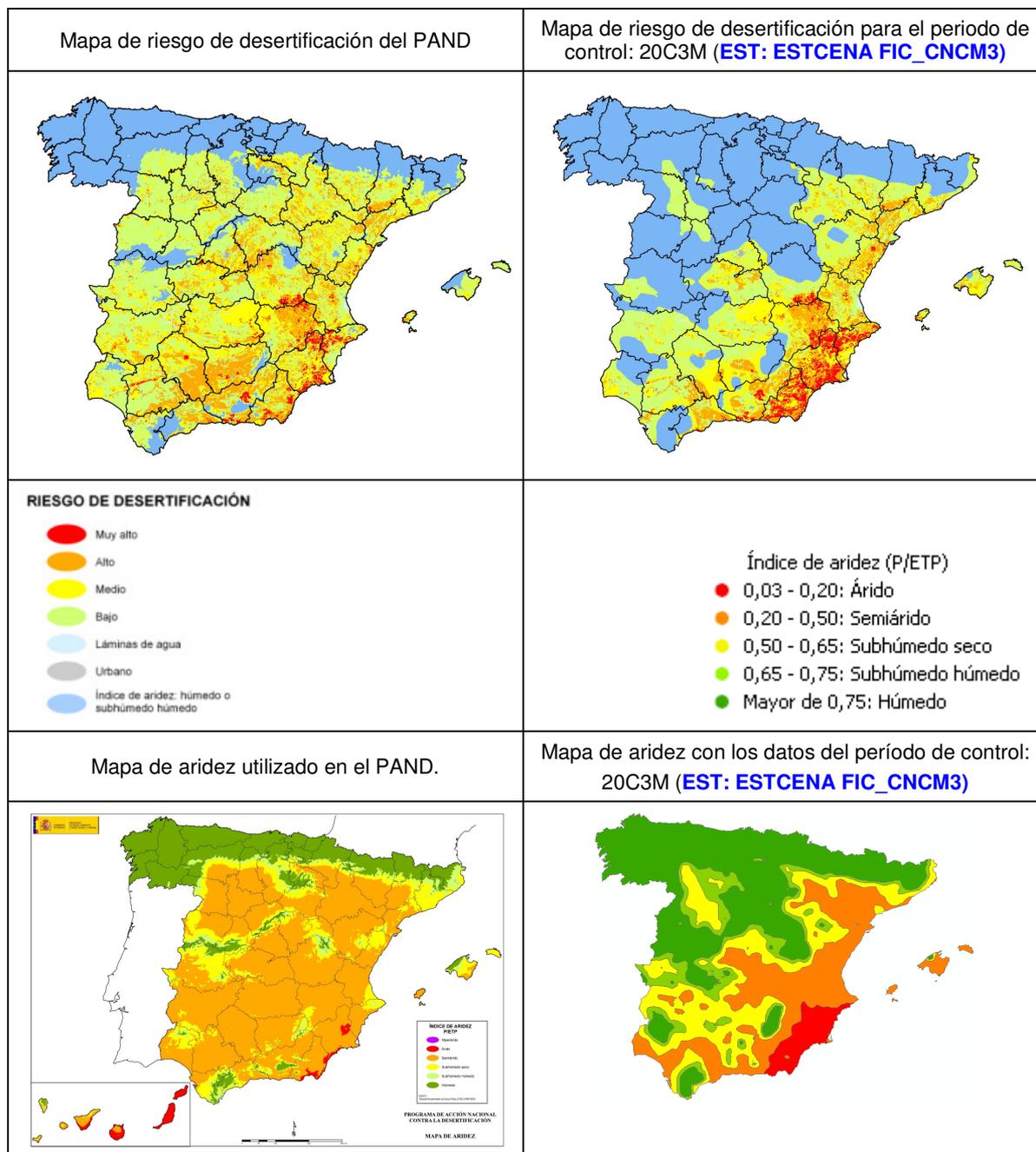


3.3. Interpolación de los mapas del factor R

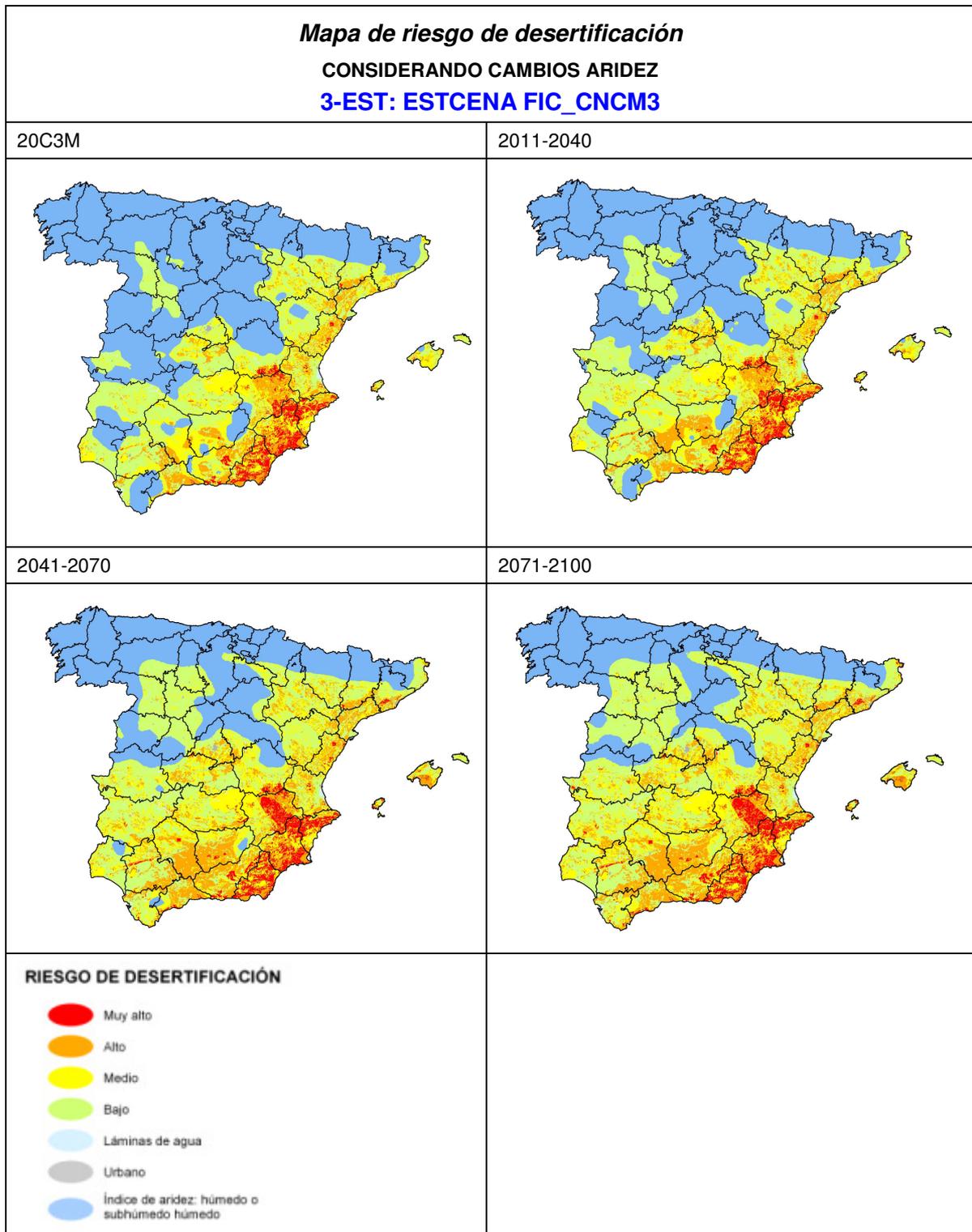


4. Cambios en el mapa de riesgo de desertificación como consecuencia del incremento de aridez

4.1. Comparación situaciones de partida

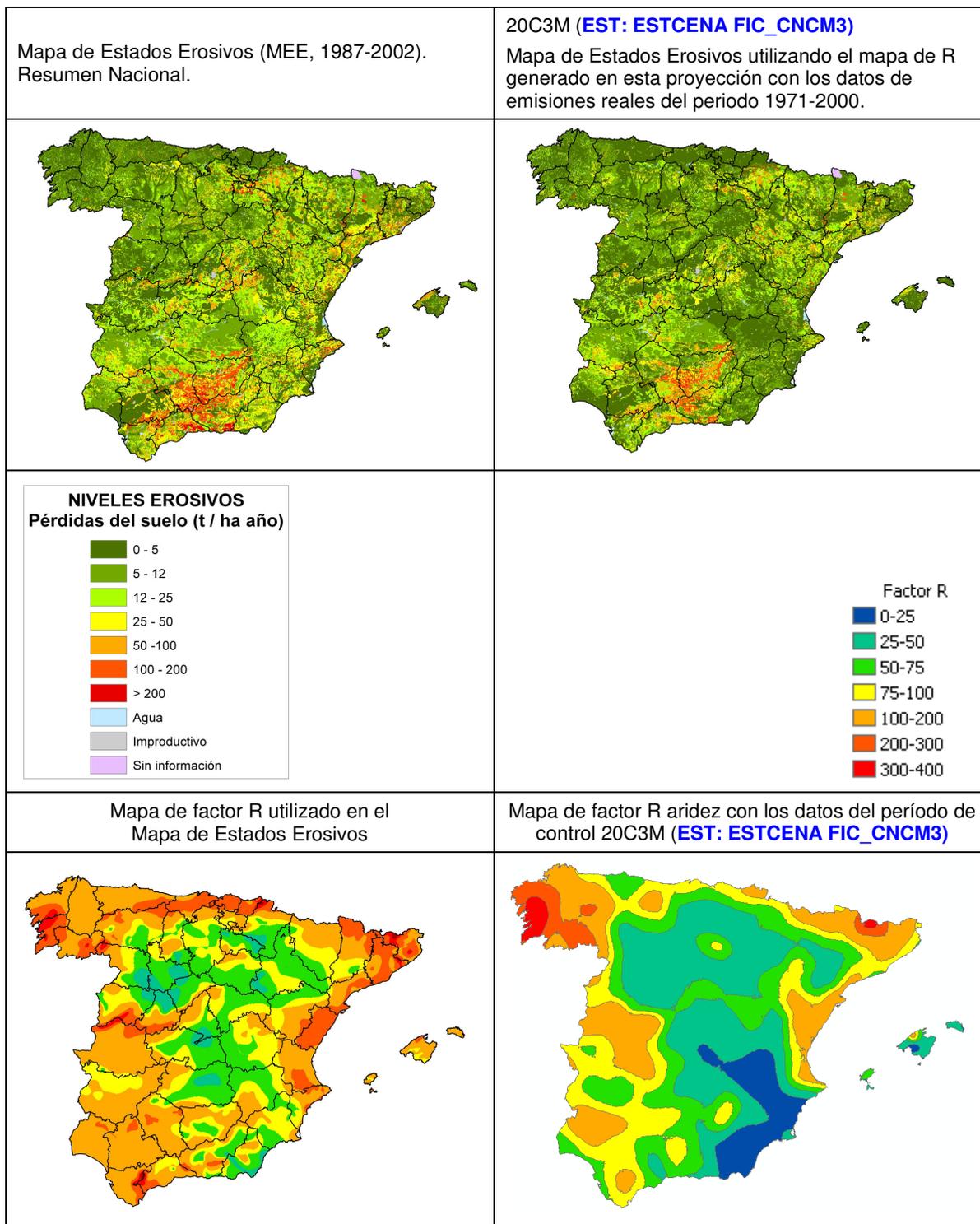


4.2. Evolución mapa de riesgo de desertificación como consecuencia del incremento de aridez

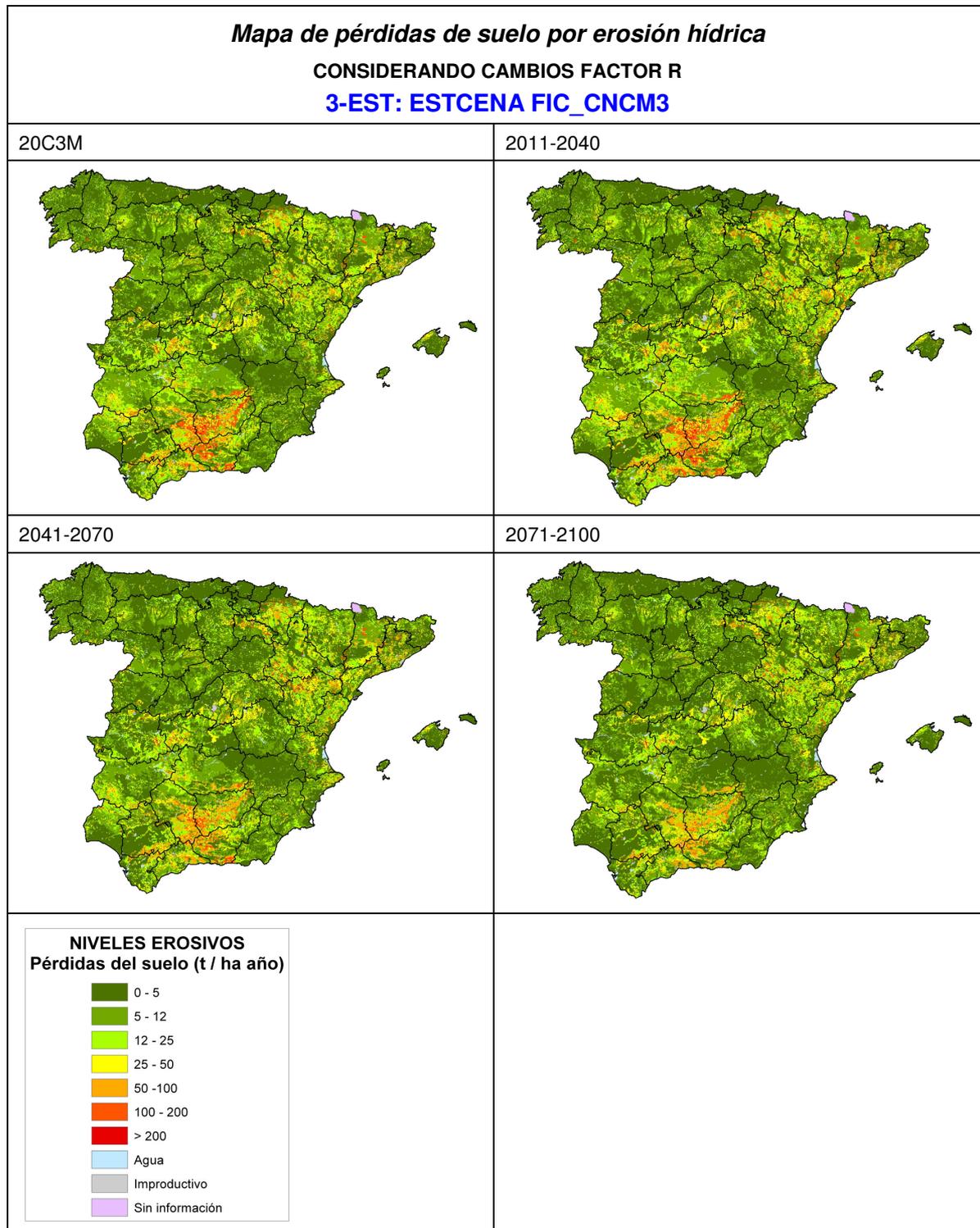


5. Cambios en la erosión como consecuencia de las variaciones del factor R

5.1. Comparación situaciones de partida



5.2. Evolución mapa de erosión como consecuencia de las variaciones del factor R



6. Cambios en el mapa de riesgo de desertificación como consecuencia del incremento de aridez y de los cambios en la erosividad de la lluvia (factor R)

