

MÉTODO DE REGIONALIZACIÓN DE TEMPERATURAS BASADO EN ANÁLOGOS.

EXPLICACIÓN Y VALIDACIÓN

Santos Eduardo Petisco de Lara

Área de Evaluación y Modelización del Cambio Climático

AGENCIA ESTATAL DE METEOROLOGÍA



2008

Catálogo de publicaciones oficiales
<http://www.060.es>

*Nota Técnica 3B del Área de Evaluación y
Modelización del Cambio Climático (NT AEMCC-3B)*
Agencia Estatal de Meteorología

Edita: Centro de Publicaciones
Secretaría General Técnica
Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino ©

ISBN: 978-84-8320-477-1
NIPO: 770-08-142-9
Depósito Legal: M-52873-2008
Imprime: Imprenta de la Agencia Estatal de Meteorología

Índice

RESUMEN	v
1. INTRODUCCIÓN	1
2. DATOS UTILIZADOS	1
2.1. Datos de calibración y validación	1
2.1.1. Datos atmosféricos	2
2.1.2. Datos de temperaturas	2
2.2. Datos de aplicación de la metodología	3
3. METODOLOGÍA DE LA ESTIMACIÓN DE TEMPERATURAS	3
4. VALIDACIÓN DE LAS ESTIMACIONES DE TEMPERATURA MÁXIMA	4
4.1. Validación de las medias anuales	4
4.2. Validación de las medias mensuales	6
4.3. Validación de las estimaciones de temperatura máxima diaria	6
4.3.1. Comparación de percentiles	6
4.3.2. Índices de verificación. Errores	18
4.3.3. Índices de verificación. <i>Skill-scores</i>	21
5. VALIDACIÓN DE LAS ESTIMACIONES DE TEMPERATURA MÍNIMA	24
5.1. Validación de las medias anuales	24
5.2. Validación de las medias mensuales	24
5.3. Validación de las estimaciones de temperatura mínima diaria	24
5.3.1. Comparación de percentiles	24
5.3.2. Índices de verificación. Errores	37
5.3.3. Índices de verificación. <i>Skill-scores</i>	37
6. CONCLUSIONES	42
BIBLIOGRAFÍA	42

Resumen

En el presente trabajo se explica y se valida el método de regionalización estadística basado en análogos, que se ha utilizado por la AEMET en la primera fase de la generación de escenarios regionalizados de cambio climático para España.

Se trata de obtener estimaciones de temperaturas máximas y mínimas sobre una rejilla de alta resolución de 203 puntos que cubre la España Peninsular y Baleares, basándose en datos de baja resolución de reanálisis o modelos globales.

La regionalización se realiza obteniendo previamente un conjunto de análogos sinópticos al día de estudio, tomados en el período de referencia 1961-1990.

La estimación de temperaturas máximas o mínimas en cada punto se obtiene mediante una ecuación de regresión lineal obtenida por el método paso a paso con los datos correspondientes al conjunto de análogos seleccionados; los predictores posibles calculados para la zona de estima son:

- Espesor local 500/1000
- Insolación teórica del día
- Media ponderada de la temperatura media en los diez días anteriores
- Componentes u , v del viento geostrófico en 1000 y 500 hPa
- Vorticidad geostrófica en 1000 y 500 hPa

La validación se realiza mediante la comparación de los datos observados en un período, con los correspondientes estimados habiendo calibrado el método en un período distinto.

En primer lugar se evalúa el comportamiento de las medias anuales y mensuales. En segundo lugar se evalúa el comportamiento de las estimaciones diarias mediante la comparación de percentiles significativos y mediante el cálculo de errores medios de estimación. Además, se analizan, mediante *skill-scores*, las mejoras del método respecto de las estimaciones basadas en los valores climatológicos mensuales.

1. INTRODUCCIÓN

Existe una demanda creciente de proyecciones regionalizadas de cambio climático consecuencia de los distintos escenarios de emisión a la atmósfera de gases de efecto invernadero, para ser utilizadas como entradas en modelos de análisis de impactos en ecosistemas y sectores económicos y sociales sensibles a las condiciones climáticas.

Todas estas proyecciones se construyen a partir de la información suministrada por modelos climáticos globales que tratan de reproducir el comportamiento del sistema climático en función de las concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera, derivadas de diversos escenarios de emisión.

No obstante, hay que tener en cuenta que la actual resolución de los modelos climáticos no es suficientemente fina como para suministrar datos climáticos en alta resolución espacial o en puntos geográficos localizados, que en realidad son los que interesan en un análisis de impactos. Se hace, pues, necesario emplear técnicas o procedimientos que permitan inferir, en base a los datos de baja resolución mejor simulados por los modelos climáticos, información localizada de parámetros de interés para el analista de impactos. Esto se trata de conseguir mediante las técnicas de mejora de resolución o regionalización o *downscaling* según la nomenclatura inglesa.

Existen dos tipos básicos de *downscaling*: el *downscaling* estadístico y el *downscaling* dinámico. El primero se basa en encontrar relaciones empíricas y/o estadísticas entre las variables mejor simuladas (presión, geopotencial, temperatura o parámetros derivados) en baja resolución por los modelos climáticos, y las variables de interés en la zona de estudio. Estas relaciones se buscan en una base de datos de referencia observados y después se aplican a los datos simulados por los modelos obteniéndose así estimaciones de las variables climáticas en la zona de interés, siempre bajo la hipótesis de que las relaciones obtenidas siguen manteniéndose válidas. El *downscaling* dinámico se basa en el aumento de resolución de los modelos en el área donde se sitúan las zonas de estudio. Esto puede hacerse aumentando directamente la resolución en dicha área, o bien anidando en el modelo climático de baja resolución un modelo de área limitada de alta resolución. La aplicación conjunta de ambos procedimientos (dinámico y estadístico) en un *downscaling* dinámico-estadístico puede aprovechar las ventajas de los dos tipos de *downscaling*. En nuestro caso la obtención de escenarios ha sido llevada a cabo mediante procedimientos de *downscaling* estadístico.

La temperatura es una variable de gran interés para el estudio de impactos del posible cambio climático. Su distribución estadística tiende a aproximarse a la gaussiana o normal por lo que es bastante factible el *downscaling* basado en modelos de regresión para su estimación. En este trabajo, la posible relación lineal de la temperatura, máxima o mínima, con adecuados parámetros predictores, es mejorada mediante su obtención en una población de análogos sinópticos a la configuración sinóptica del día en el que se pretenden realizar las estimaciones.

2. DATOS UTILIZADOS

Como en toda regionalización basada en *downscaling* estadístico se utilizan dos tipos fundamentales de datos: 1) Datos de referencia y de calibración de la metodología, y 2) Datos de aplicación del método para la estimación de las correspondientes temperaturas. En lo que sigue se describen los datos e información utilizados en nuestro caso.

2.1. Datos de calibración y validación

Estos datos sirven como base de la metodología del *downscaling* que se va aplicar y para realizar su validación. Consta, a su vez, de una base de datos de geopotencial, y de su correspondiente base de datos de temperaturas máximas y mínimas.

2.1.1. Datos atmosféricos

Esta es la que denominaremos **base sinóptica de referencia** y está constituida por datos de geopotencial en 1000 y 500 hPa sobre rejilla latitud-longitud y resolución $2,5^\circ \times 2,5^\circ$, obtenidos a partir del reanálisis del NCAR (*National Center for Atmospheric Research*), (KALNAY, 1996). Se obtienen los campos de geopotencial medios diarios promediando los campos de 00h, 06h, 12h, 18h y 24h (00h del día siguiente), ponderando los datos extremos del día (00h y 24h) la mitad que los restantes. De esta rejilla de geopotencial medio se obtienen las componentes u y v del viento geostrofico con la misma resolución y para el área de trabajo que abarca de 30°N a 55°N y de $27,5^\circ\text{W}$ a 15°E y un período de 30 años entre el 1 de enero de 1961 y el 31 de diciembre de 1990 con un total de 198 puntos de rejilla. Esta rejilla la denominaremos de aquí en adelante rejilla sinóptica y puede verse en la figura 1 donde también se muestran las ponderaciones asociadas a cada punto de rejilla y que se utilizarán posteriormente para el cálculo de distancias sinópticas.

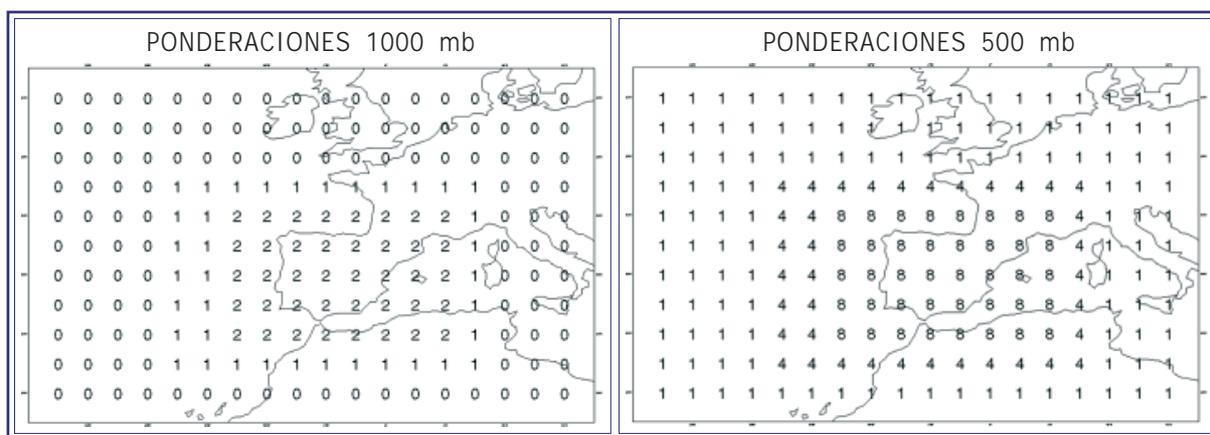


Figura 1. Rejilla sinóptica de baja resolución mostrando las ponderaciones asociadas a cada punto para el cálculo de distancias sinópticas.

2.1.2. Datos de temperaturas

Comprende los campos de temperaturas máximas y mínimas asociados a cada uno de los días de la base de datos atmosféricos anteriormente citados. Los datos se presentan en una rejilla de alta resolución con 203 puntos espaciados meridianamente y zonalmente aproximadamente 50 y 60 km respectivamente y distribuidos por el territorio de la España peninsular y Baleares (figura 2). Esta rejilla fue obtenida por BORÉN y RIBALAYGUA (1997) a partir del banco de datos del Instituto Nacional de Meteorología interpolando los datos diarios de los observatorios disponibles próximos a los puntos. Para el cálculo de las temperaturas en el punto se determinó la media ponderada de dichos datos de observatorios siendo las ponderaciones las inversas de las distancias observatorio-punto y tomando las distancias inferiores a 10km iguales a 10km en cualquier caso; de esta manera el dato de cada punto de la rejilla viene a ser una representación promedio de su área de influencia. Las series así obtenidas para cada punto constituyen una base de datos sin ninguna laguna.

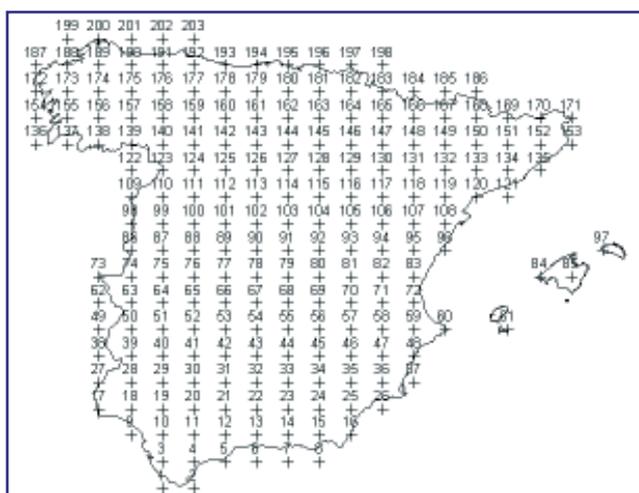


Figura 2. Rejilla de puntos de alta resolución donde se calculan las estimaciones de temperatura.

2.2. Datos de aplicación de la metodología

Se trata del conjunto de datos a los que se va aplicar la metodología de *downscaling*, desarrollada con el objeto de estimar las temperaturas correspondientes. Estos datos son los campos de geopotencial medio diario sobre la misma rejilla de los campos sinópticos de referencia, dados por los diversos modelos globales de los que se pretende obtener la información regionalizada.

3. METODOLOGÍA DE LA ESTIMACIÓN DE TEMPERATURAS

El método de estimación de temperaturas máximas y mínimas se basa en una modificación del método desarrollado por BORÉN y otros (1997).

El primer paso es la obtención de un conjunto de análogos sinópticos al día en el que queremos realizar estimaciones (día problema). Para ello se calculan las distancias euclídeas entre los campos de componentes de viento geostrófico tipificadas y con las ponderaciones mencionadas en el apartado 2.1.1 (figura 1). La tipificación se realiza, en cada punto de rejilla, restando la media correspondiente y dividiendo por la desviación tipo. La distancia euclídea entre los campos tipificados de cada componente c , donde c representa una componente cualquiera ($u_{1000}, v_{1000}, u_{500}, v_{500}$) del viento geostrófico, vendría dada por la expresión [1] que representa la distancia entre la situación sinóptica del día problema y una situación sinóptica de la base de referencia:

$$d_c = \sqrt{\frac{\sum_1^n w_i (c_{ii} - c_p)^2}{\sum w_i}} \quad [1]$$

en donde:

c_i representa el valor de la componente c tipificada de viento geostrófico en el punto de rejilla i para una situación sinóptica cualquiera de la base de referencia;

c_{ii} representa igualmente el valor de la componente c tipificada de viento geostrófico en el punto de rejilla i pero, en este caso, para el día problema t ;

w_i es la ponderación correspondiente al punto de rejilla i ;

$n=198$ es el número total de puntos de rejilla del campo.

Calculadas las cuatro distancias d_c correspondientes a cada uno de los cuatro campos de componentes de viento geostrófico consideradas, se toma la media de ellas como distancia D_s entre el día problema y el elemento considerado. Hecho esto para todos los elementos de la base de referencia sinóptica tomamos los 150 elementos más análogos, es decir, los 150 de menor distancia D_s , que constituirían el grupo de análogos asociado al día problema.

A continuación, un proceso de regresión paso a paso conduce a la obtención de una ecuación de regresión basada en los datos del conjunto de análogos siendo el predictando la temperatura máxima (mínima) en el punto de estima. En lo que a los predictores se refiere, se consideran variables muy relacionadas con la temperatura, como el espesor, la insolación y la temperatura de los días previos al día de estima. Junto a ellas, se han considerado también variables sinópticas calculadas para la zona del punto de estima y que por su relación con los flujos y el carácter de la circulación en esa zona, mejoran las estimaciones, especialmente en el caso de las temperaturas mínimas, las cuales, resultaban ligeramente peor estimadas utilizando sólo los predictores relacionados más directamente con la temperatura. En definitiva los predictores posibles son:

- La media ponderada de las temperaturas medias de los diez días anteriores en el punto de estima. La ponderación va siendo menor a medida que nos alejamos del día de estima.

- El espesor local 500/1000hPa sobre el punto, calculado por interpolación de los espesores de la rejilla sinóptica.
- La insolación potencial diaria en día despejado, que se introduce como una función sinusoidal del día del año, con máximo en el solsticio de verano y mínimo en el de invierno.
- Los valores de las componentes del viento geostrófico en 1000 y 500hPa, sobre el punto de la rejilla sinóptica más próximo al punto de estima.
- La vorticidad geostrófica en 1000 y 500hPa, sobre el punto de la rejilla sinóptica más próximo al punto de estima.

El modelo de regresión selecciona los predictores que resulten significativos y la ecuación de regresión obtenida permite estimar las temperaturas en el punto en cuestión asociadas al campo sinóptico simulado del día problema, sustituyendo los valores correspondientes de los predictores en el día problema.

4. VALIDACIÓN DE LAS ESTIMACIONES DE TEMPERATURA MÁXIMA

Para estudiar posibles cambios climáticos es importante analizar la evolución de la medias anuales y mensuales calculadas en períodos de varios años (30 ó 31 normalmente). Por otra parte, el método seguido proporciona estimaciones diarias que sirven de dato base para muchos modelos de impactos que requieren dato diario. Por todo ello, se validará el comportamiento de los valores medios estimados respecto a los valores observados y además se analizarán los errores y los *skill-score* (WILKS, 1995) de las estimaciones diarias y las diferencias entre las distribuciones de los valores diarios observados y estimados.

4.1. Validación de las medias anuales

Se comparan las medias anuales de temperatura máxima estimada en el período 1981-1990, con las correspondientes medias anuales observadas. La temperatura máxima estimada en el período 1981-1990 se ha determinado utilizando análogos sinópticos buscados en el período 1961-1980 con el fin de independizar completamente el período de validación del período de datos base; además se ha evitado utilizar análogos que caigan dentro de un entorno temporal de 10 días respecto del día de estima para evitar también posibles influencias favorables en el resultado.

En la figura 3 se presentan los valores de la temperatura media anual observada y estimada, así como la variación en °C de esta última respecto al valor observado correspondiente, para el período 1981-1990. Como puede comprobarse, la distribución geográfica de la temperatura máxima estimada es muy similar a la observada. Las variaciones son muy pequeñas en la mayoría de la zona de estudio siendo, como máximo, del orden de 0,5°C y con un ligero predominio de la sobreestima.

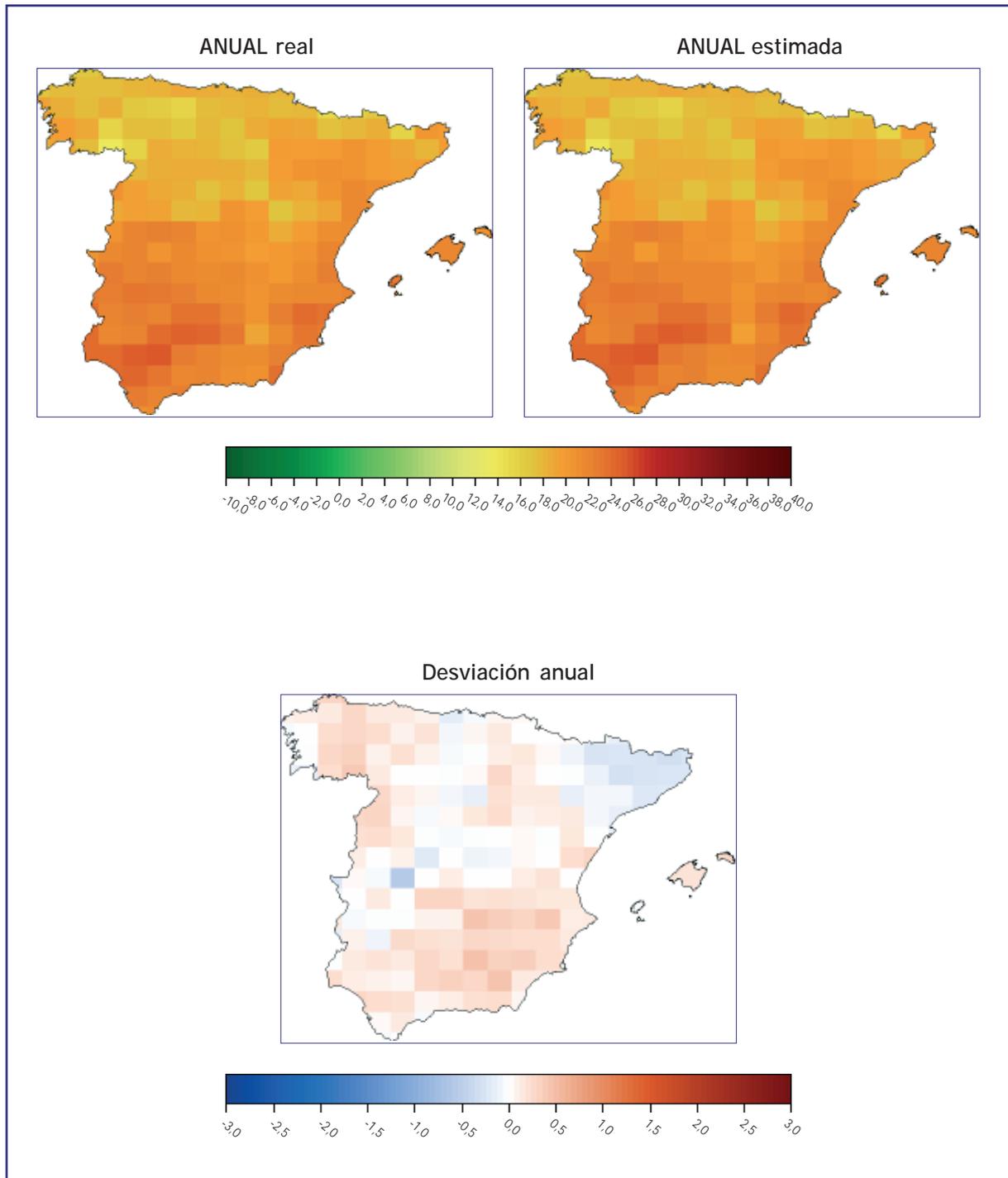


Figura 3. En la parte superior, temperatura máxima media anual observada y estimada para período 1981-1990. En la parte inferior, desviación en °C de la temperatura máxima estimada respecto de la observada.

4.2. Validación de las medias mensuales

Se han calculado las medias mensuales de temperatura máxima en el período 1961-1990 tanto para la observada como para la estimada; en este último caso las estimaciones de cada mes se han realizado buscando análogos fuera de los meses cuya media se está calculando para así independizar los datos utilizados en la estimación de los datos que van a ser validados; asimismo, no se buscan análogos en un entorno de 10 días del día problema para evitar también influencias que puedan sesgar el resultado. En las figuras 4-7 se muestran los mapas donde se representan los valores mensuales medios de temperatura máxima observada y estimada para los meses de todas las estaciones del año; igualmente, en la figura 8 se representan las variaciones en °C de las medias mensuales de temperatura máxima estimada respecto al valor observado correspondiente.

Puede observarse que la correspondencia entre las medias mensuales de las temperaturas máximas estimadas y observadas es bastante buena aunque con algunas diferencias en más o en menos que se manifiestan en los distintos meses. Así hay una clara tendencia al predominio de la sobreestima desde noviembre a enero, mientras que predomina la subestima desde febrero a abril; de mayo a julio vuelve a parecer una tendencia al predominio de la sobreestima, aunque menos marcada, y de agosto a octubre se manifiesta de nuevo tendencia hacia el predominio de la subestima igualmente menos marcada. Las desviaciones de las medias estimadas respecto a las observadas generalmente no superan el valor de un grado salvo en diciembre (sobreestimas) y en marzo (subestimas), donde hay unos cuantos puntos en que las desviaciones superan $\pm 1^{\circ}\text{C}$ aunque sin llegar a $\pm 2^{\circ}\text{C}$.

4.3. Validación de las estimaciones de temperatura máxima diaria

El método de *downscaling* utilizado proporciona estimaciones con resolución temporal diaria; por otra parte, en muchos casos, los modelos de impactos requieren datos con resolución diaria, por lo que es conveniente validar las estimaciones diarias realizadas por el método. Esta validación se realizará, por un lado, comparando percentiles significativos de la distribución de la temperatura máxima diaria estimada, con los correspondientes de la distribución de la temperatura máxima observada, y por otro lado, analizando los errores y los *skill-score* de los valores diarios estimados.

4.3.1. Comparación de percentiles

Se comparan las distribuciones de los valores de la temperatura máxima diaria observada y estimada en el período 1981-1990 analizando los valores de los percentiles más representativos. Las estimaciones en este caso se hacen en el período 1981-1990 utilizando análogos del período 1961-1980 para así separar el período de estima del período de datos utilizados para la misma; igualmente, no se utilizan análogos en un entorno de 10 días del día de estima para evitar sesgos favorables en los resultados.

En las figuras 9-14 se representan las distribuciones geográficas de los valores de los percentiles más representativos de la temperatura máxima diaria observada y estimada así como la diferencia entre los mismos. Parece que, como pauta más general, los valores de los percentiles más bajos tienden a estar sobreestimados mientras que lo contrario tiende a ocurrir con los percentiles más altos, no obstante, puede observarse también la presencia de algunos puntos en que ocurre lo contrario. De ello se deduciría que las temperaturas máximas más bajas tenderían, en general, a estar sobreestimadas mientras que las más altas tenderían, en general, a ser subestimadas, principalmente las más extremas (percentil 99). Los valores de las desviaciones pueden llegar a sobrepasar ligeramente el valor de $\pm 1^{\circ}\text{C}$ en algunos casos, fundamentalmente en el percentil 10 (sobreestimas) y en el percentil 99 (subestimas) donde también se pueden encontrar unos pocos puntos en que la subestima llega o supera ligeramente los 2°C .

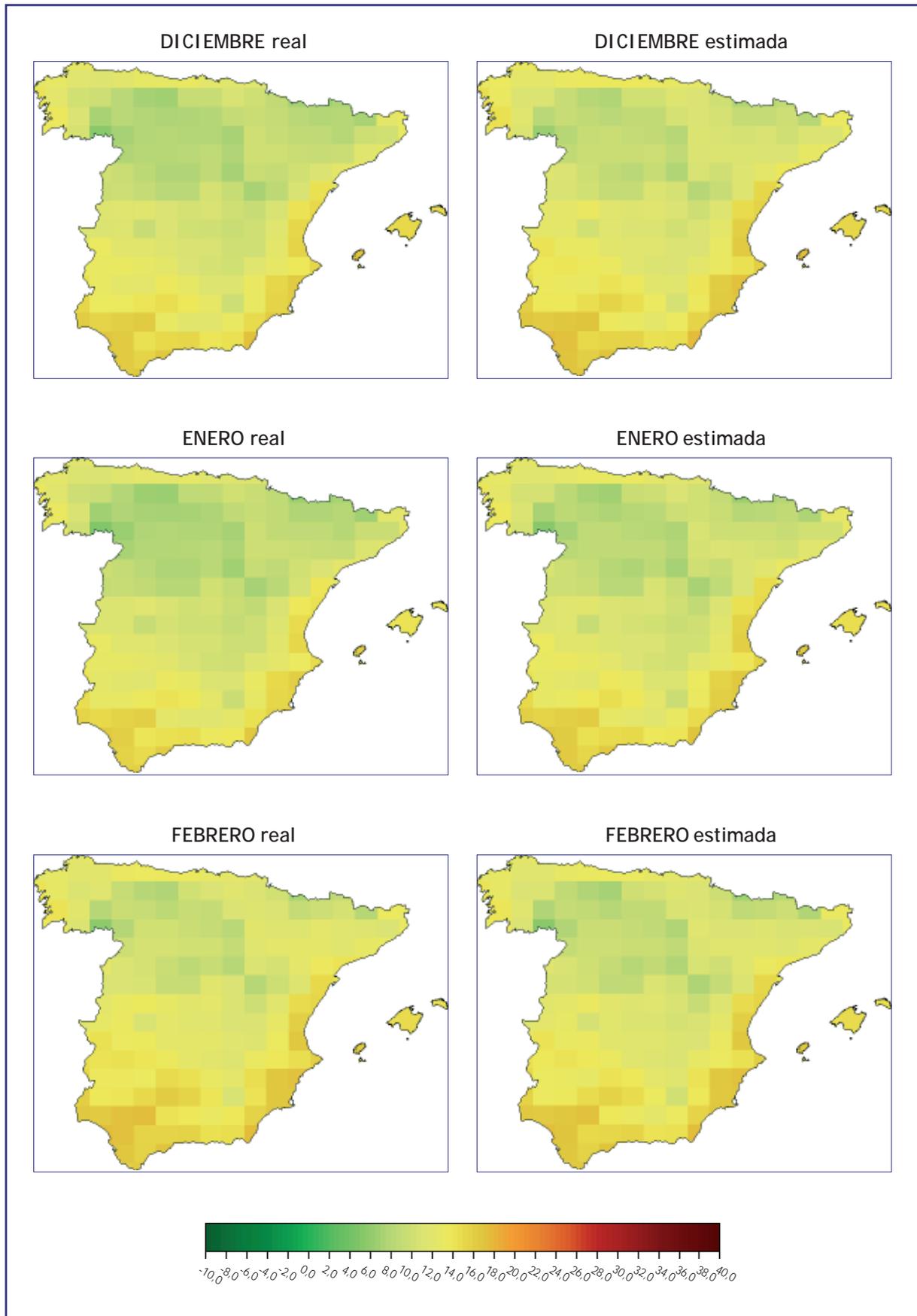


Figura 4. Temperatura máxima media observada (izda.) y estimada (dcha.) para los meses de invierno del período 1961-1990.

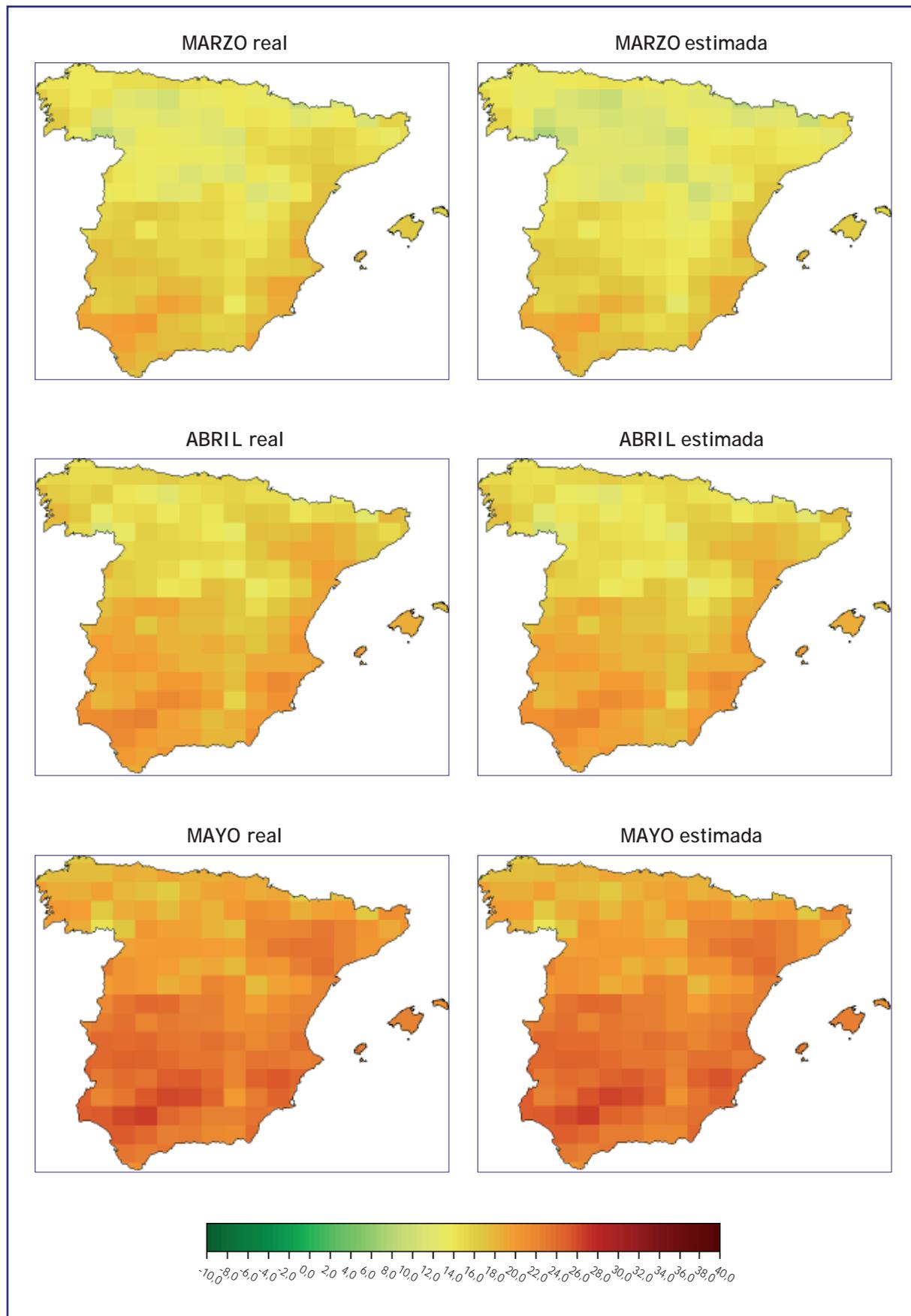


Figura 5. Temperatura máxima media observada (izda.) y estimada (dcha.) para los meses de primavera del período 1961-1990.

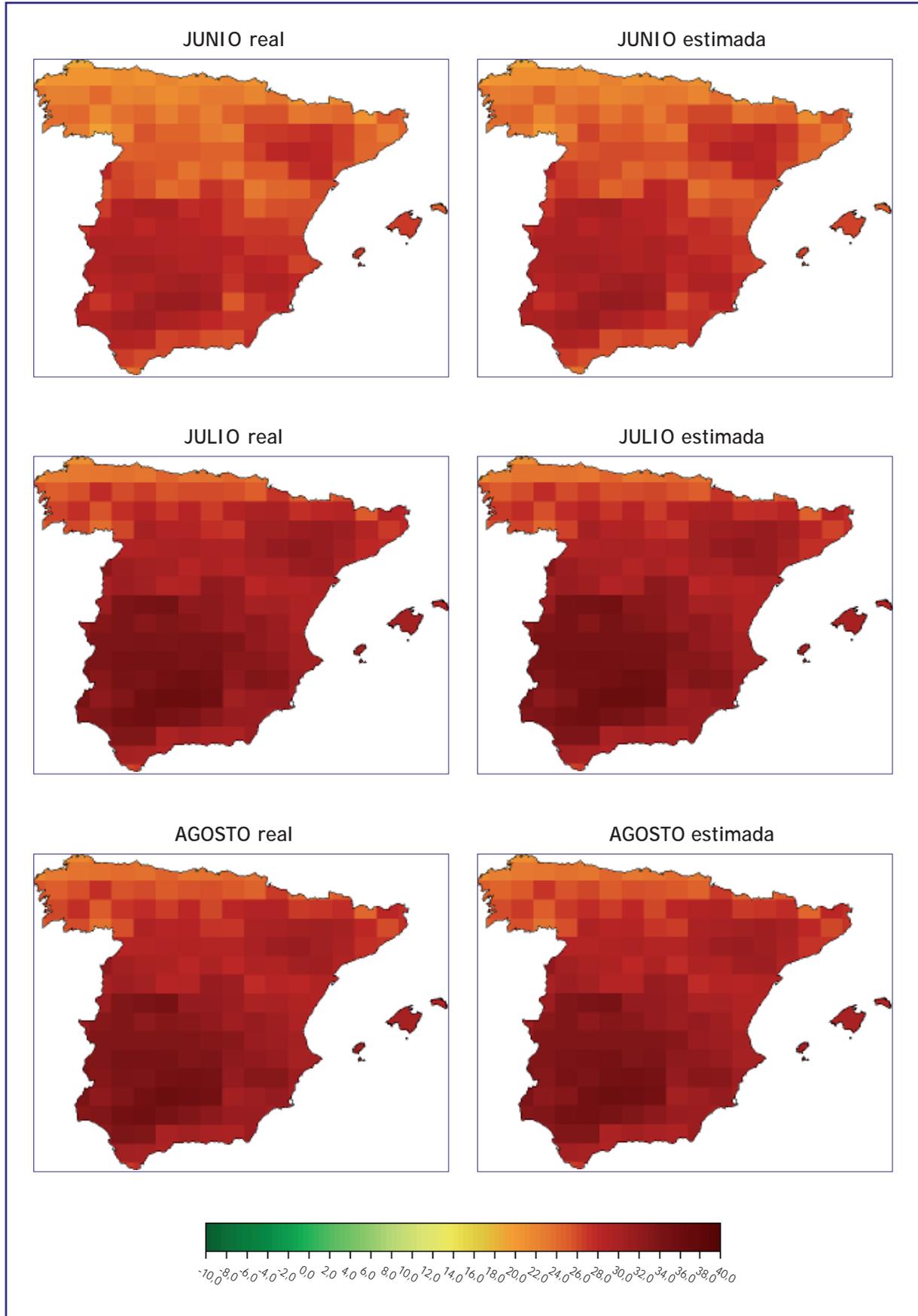


Figura 6. Temperatura máxima media observada (izda.) y estimada (dcha.) para los meses de verano del período 1961-1990.

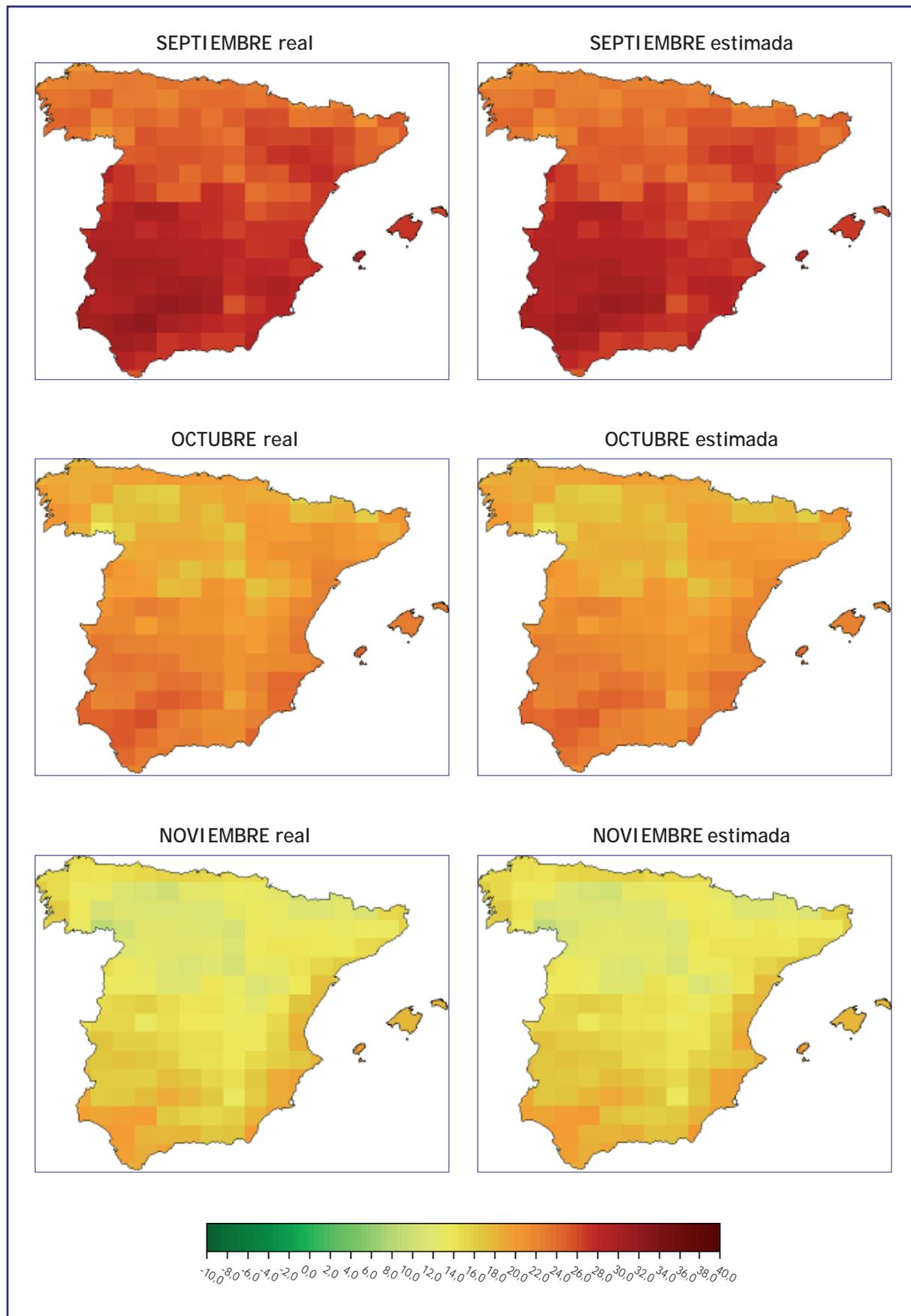


Figura 7. Temperatura máxima media observada (izda.) y estimada (dcha.) para los meses de otoño del período 1961-1990.

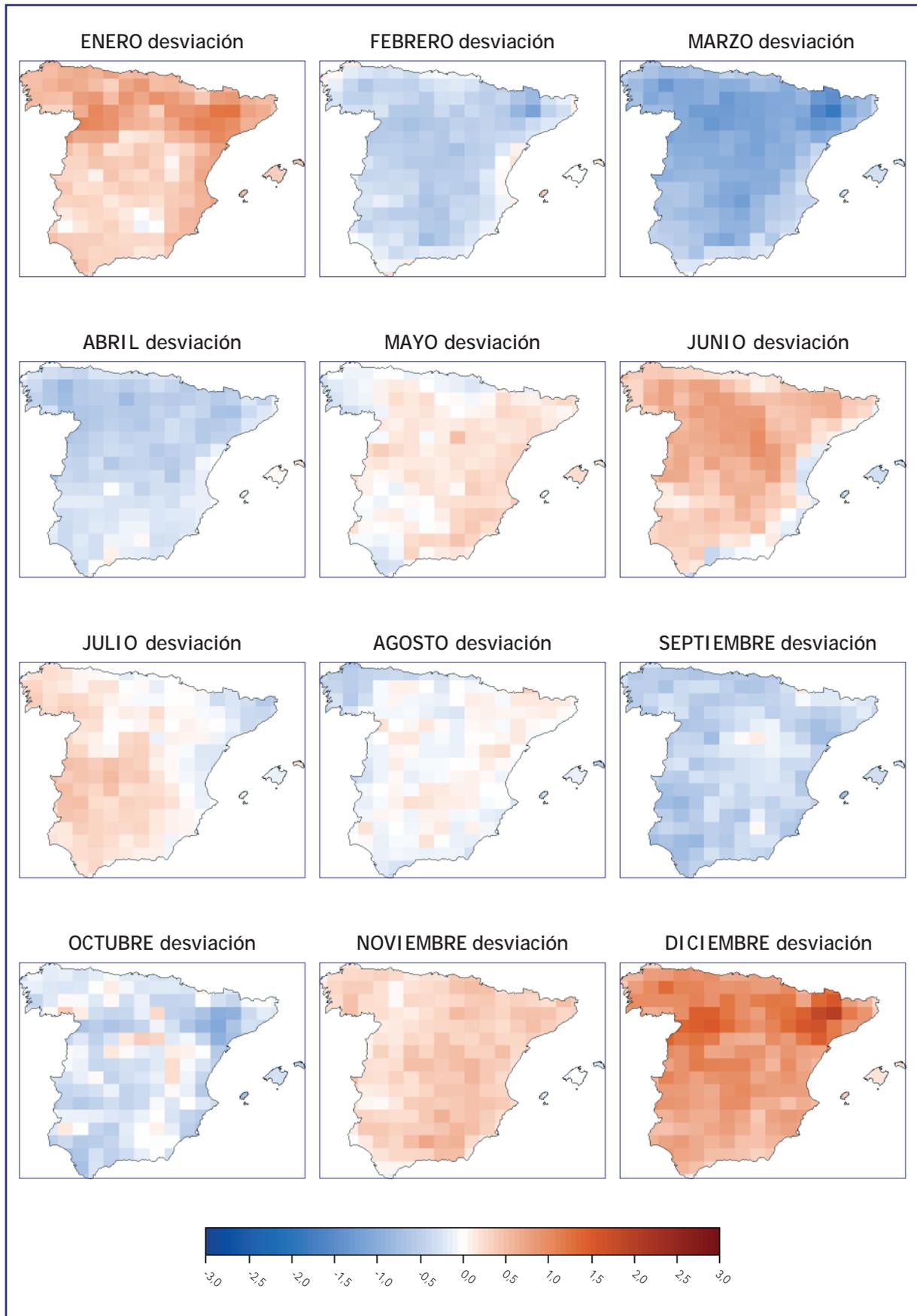


Figura 8. Desviación de la temperatura máxima media mensual estimada respecto a la observada para el período 1961-1990.

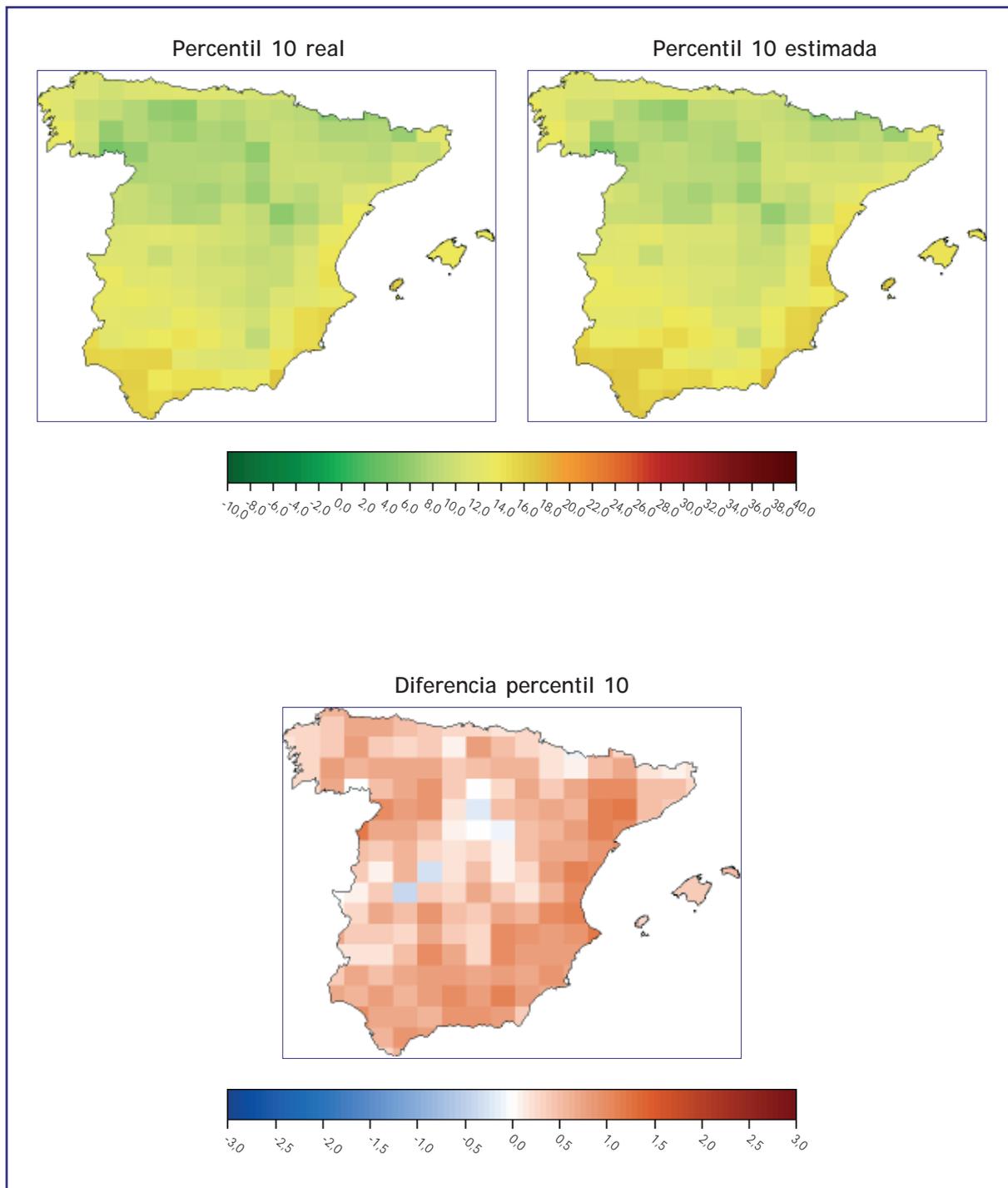


Figura 9. En la parte superior, percentil 10 para la temperatura máxima diaria observada y estimada para el período 1981-1990. Abajo, diferencia entre el valor del percentil de la temperatura máxima estimada y el correspondiente de la máxima observada.

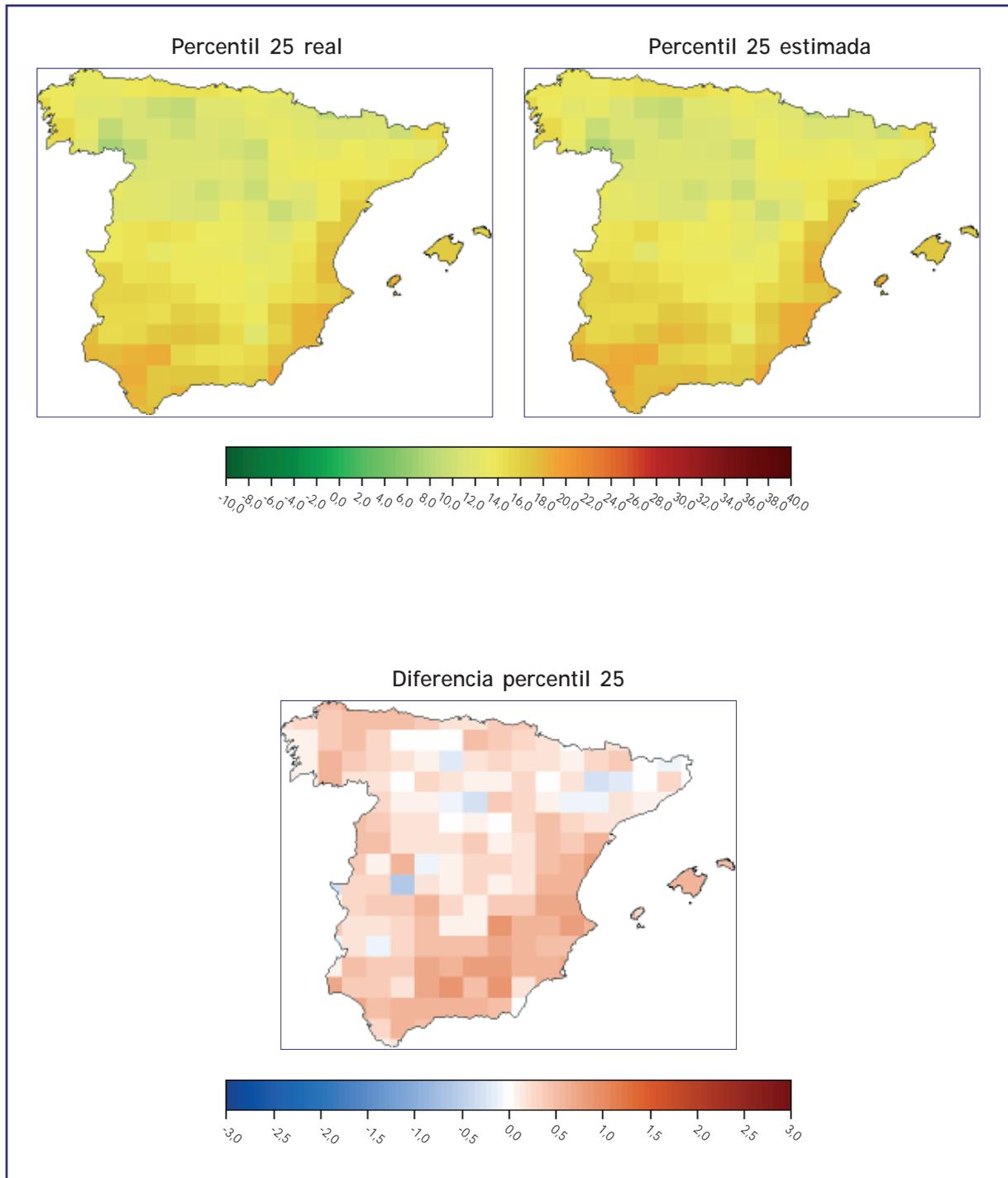


Figura 10. En la parte superior, percentil 25 para la temperatura máxima diaria real y estimada para el período 1981-1990. En la parte inferior, diferencia entre el valor del percentil de la temperatura máxima estimada y el correspondiente de la máxima observada.

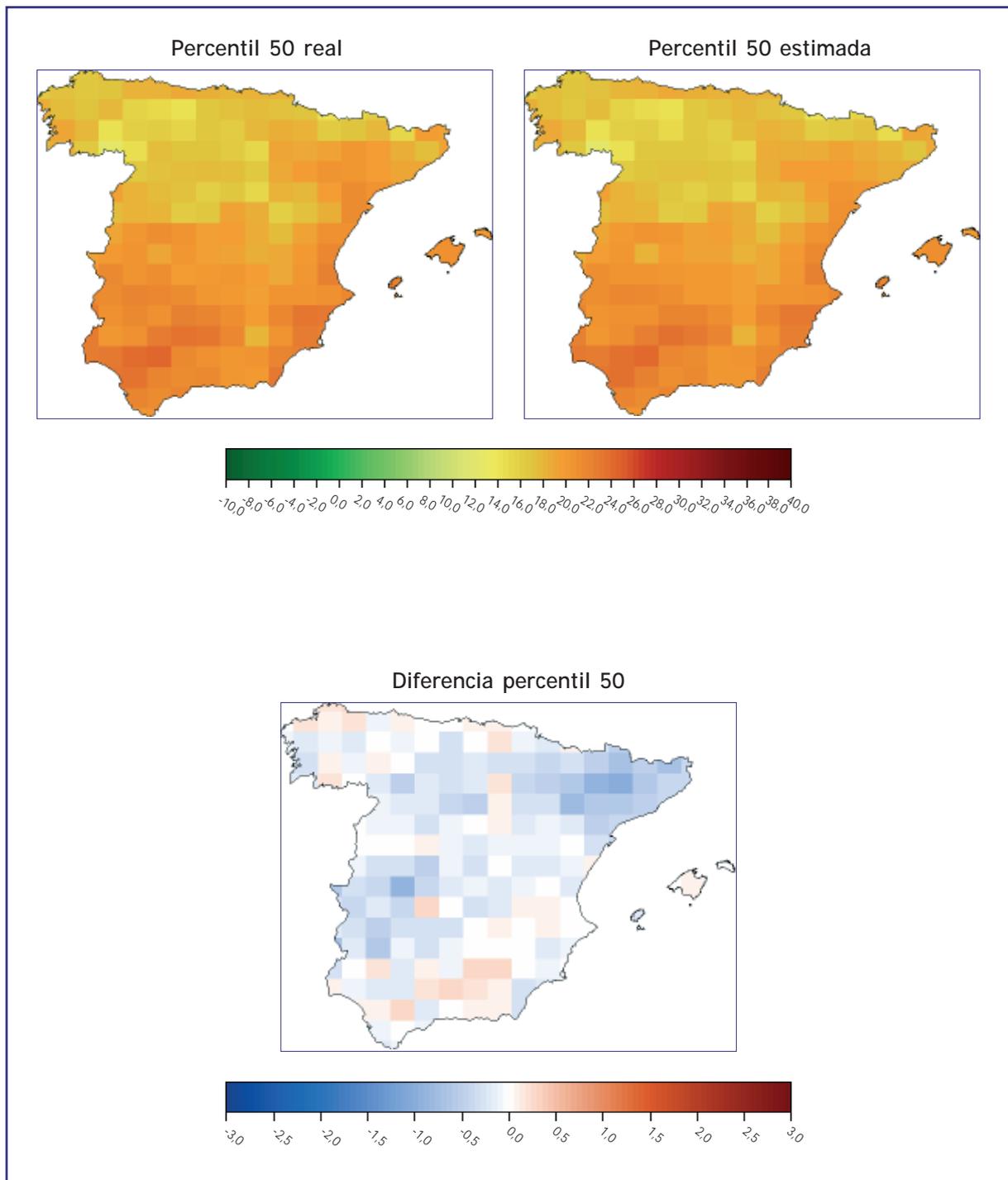


Figura 11. En la parte superior, percentil 50 para la temperatura máxima diaria real y estimada para el período 1981-1990. En la parte inferior, diferencia entre el valor del percentil de la temperatura máxima estimada y el correspondiente de la máxima observada.

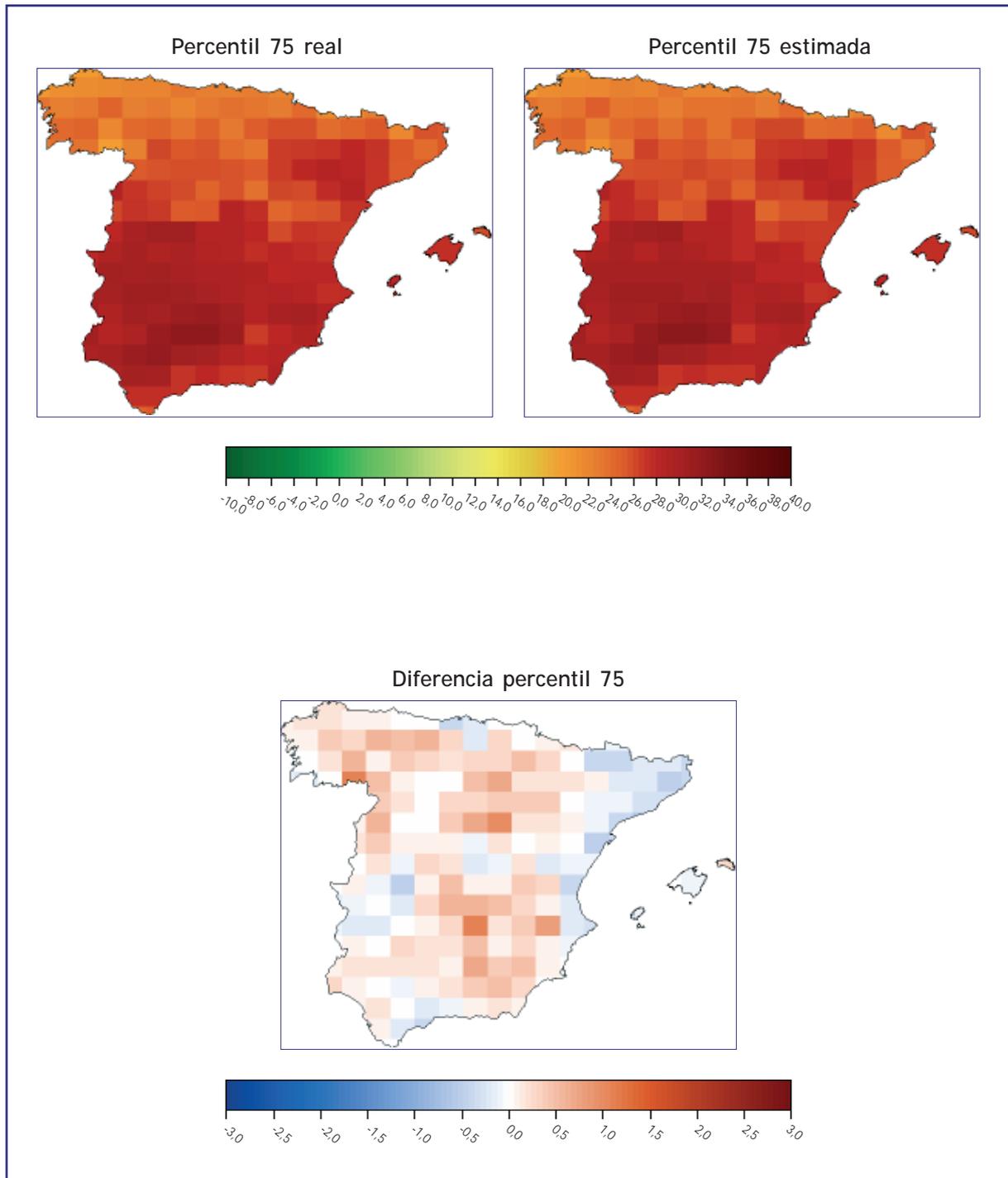


Figura 12. En la parte superior, percentil 75 para la temperatura máxima diaria real y estimada para el período 1981-1990. En la parte inferior, diferencia entre el valor del percentil de la temperatura máxima estimada y el correspondiente de la máxima observada.

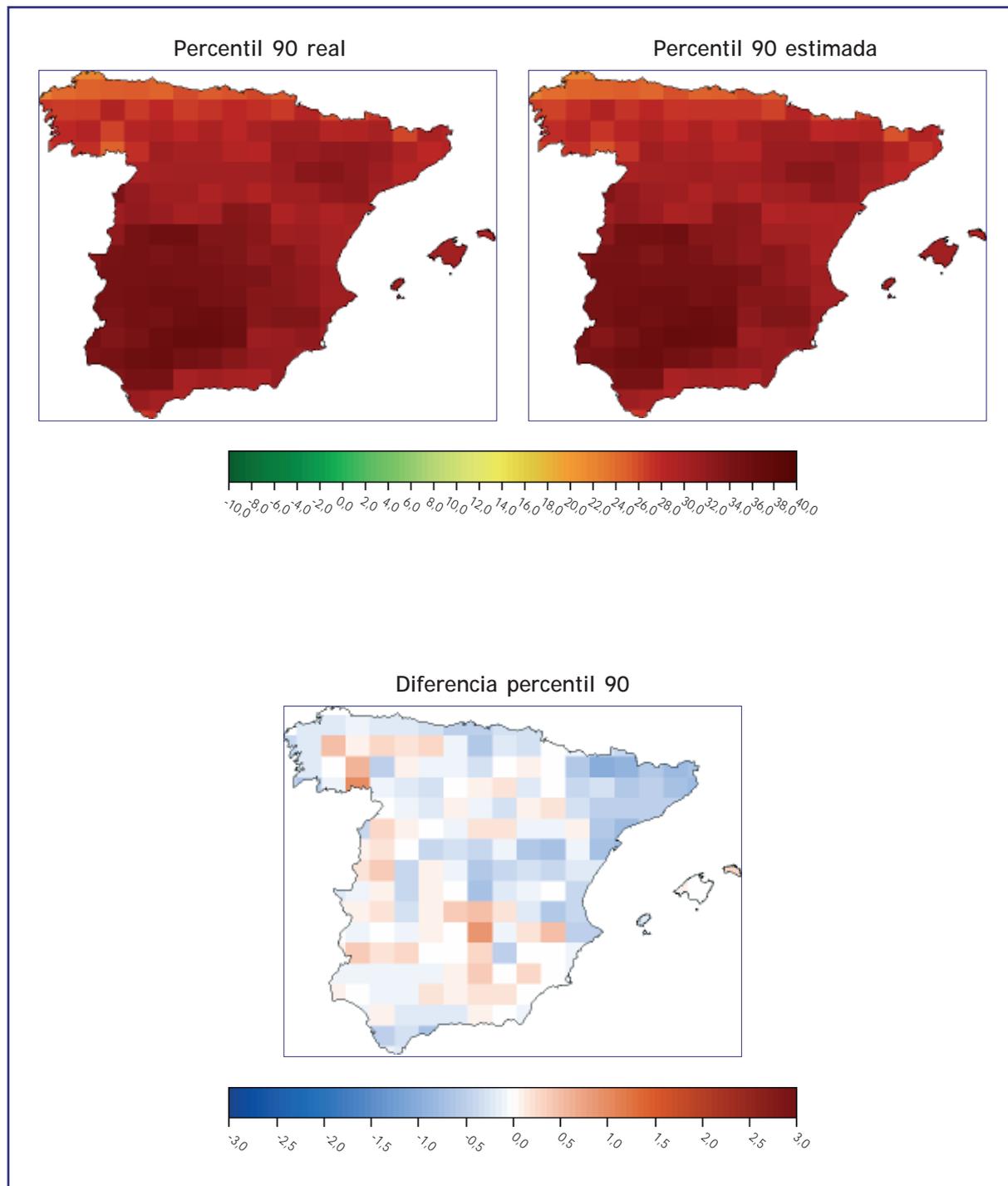


Figura 13. En la parte superior, percentil 90 para la temperatura máxima diaria real y estimada para el período 1981-1990. En la parte inferior, diferencia entre el valor del percentil de la temperatura máxima estimada y el correspondiente de la máxima observada.

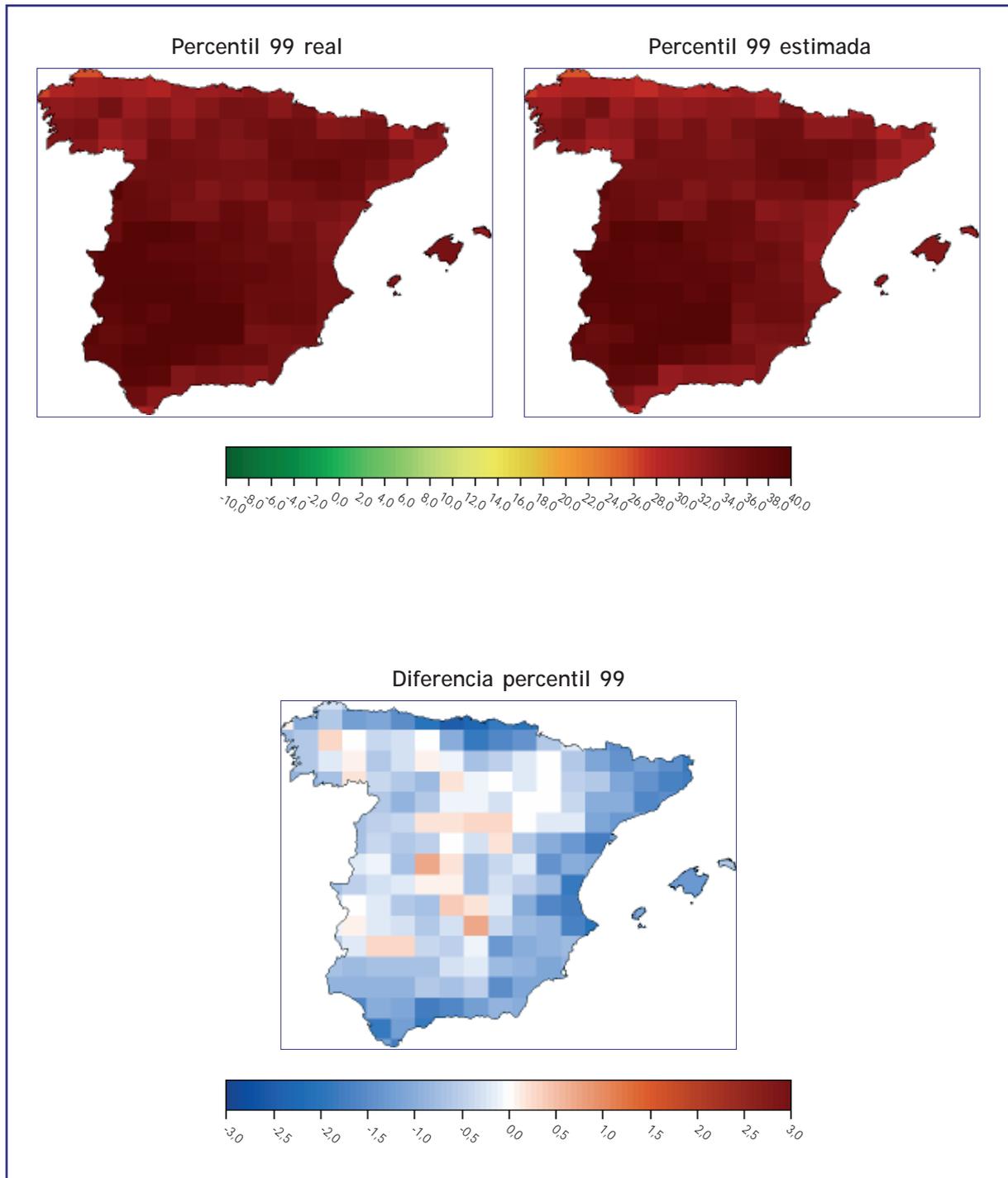


Figura 14. En la parte superior, percentil 99 para la temperatura máxima diaria real y estimada para el período 1981-1990. En la parte inferior, diferencia entre el valor del percentil de la temperatura máxima estimada y el correspondiente de la máxima observada.

4.3.2. Índices de verificación. Errores

Se consideran las estimaciones diarias de temperatura máxima para el período 1961-1990. Estas estimaciones se realizan buscando análogos fuera del entorno de diez días del día a estimar por la razón anteriormente mencionada.

Se calcula para cada mes, el error absoluto medio EAM o media de los valores absolutos de las diferencias entre los valores estimados diarios y los correspondiente observados. Su expresión sería

$$EAM = \frac{\sum_{i=1}^n |x_{ie} - x_{io}|}{n} \quad [2]$$

donde n es el número de datos y x_{ie} y x_{io} son los valores estimados y observados respectivamente.

Dado su amplio uso, también calcularemos la raíz cuadrada del error cuadrático medio RECM, el cual, a su vez, es la media de los cuadrados de las desviaciones de los valores estimados respecto de los observados y cuya expresión sería

$$RECM = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n |x_{ie} - x_{io}|^2}{n}} \quad [3]$$

Si bien el error EAM es más propio como medida de error, el error RECM es más sensible a los casos en que las diferencias entre valores estimados y observados son grandes, debido a que las diferencias están elevadas al cuadrado.

Se analizan el error absoluto medio EAM y la raíz cuadrada del error cuadrático medio RECM de las estimaciones diarias de temperatura máxima para el período 1961-1990.

En la figura 15 se representa la distribución mensual de los errores EAM. Los aspectos más destacados son el aumento del error en los meses más fríos en zonas del interior, y la disminución en verano; también parecer manifestarse un error algo más bajo en algunas zonas costeras, como la costa sur, la gallega y Baleares; los mayores valores de EAM llegan a superar ligeramente los 2°C en algunos puntos pero en la mayoría de los casos los valores están comprendidos entre 1°C y 2°C. Los errores RECM se representan en la figura 16; como puede observarse, siguen una distribución parecida a la de los EAM aunque sus valores son algo más altos pues están más afectados por las desviaciones diarias más grandes.

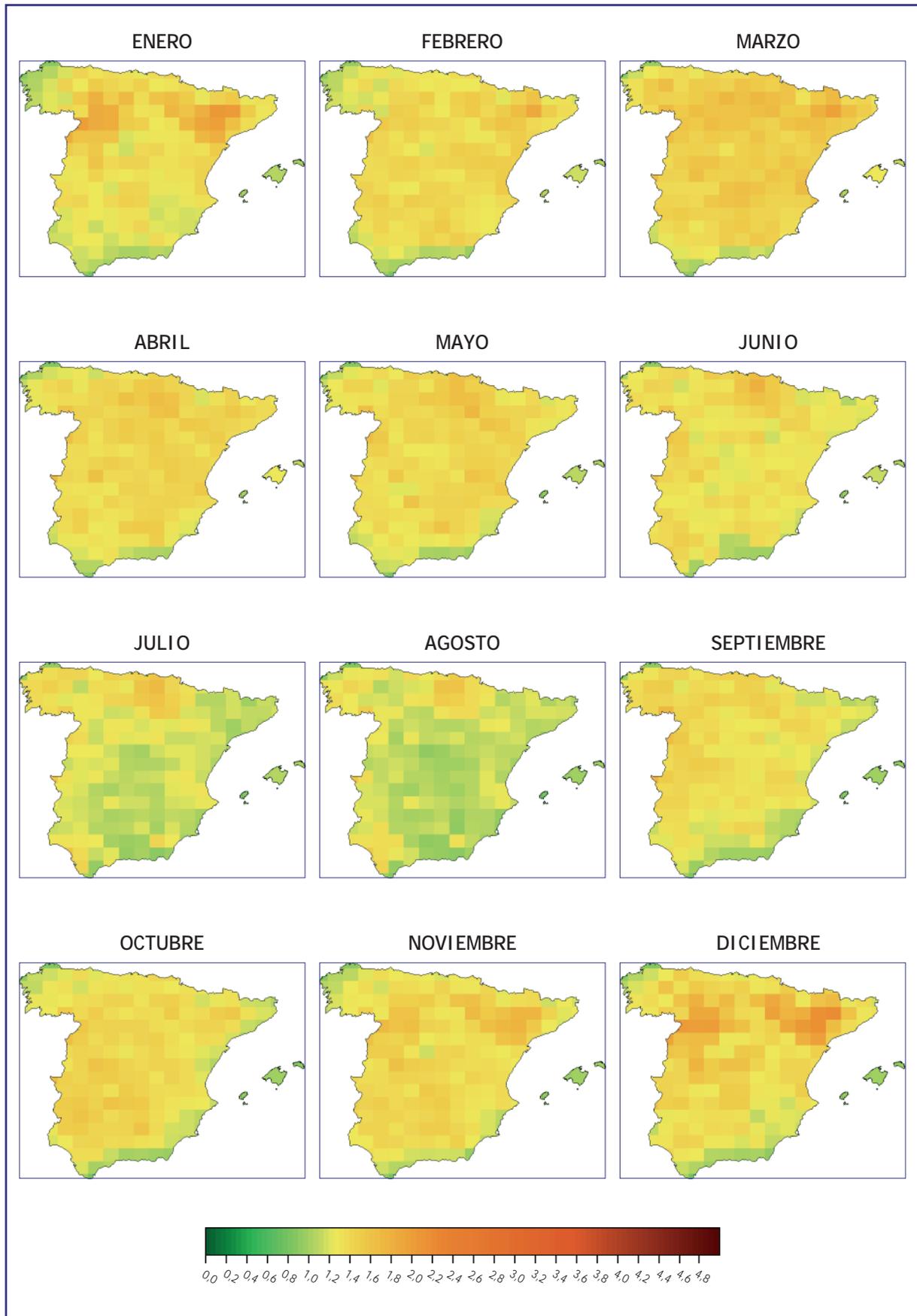


Figura 15. Error absoluto medio mensual de la temperatura máxima diaria estimada respecto a la observada para el periodo 1961-1990.

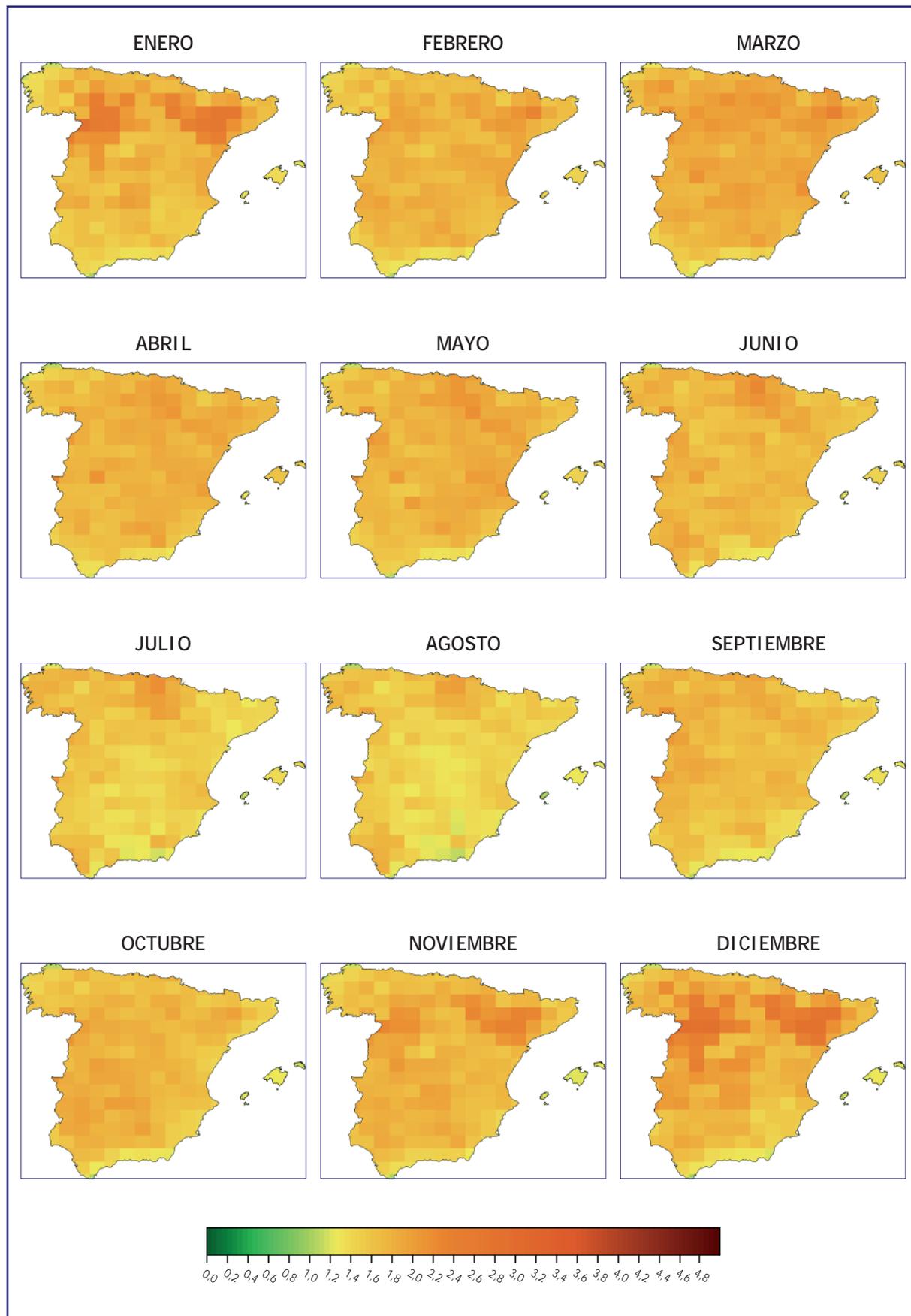


Figura 16. Raíz cuadrada del error cuadrático medio mensual de la temperatura máxima diaria estimada respecto a la observada para el periodo 1961-1990.

4.3.3. Índices de verificación. *Skill-scores*

Se trata de determinar si las estimaciones obtenidas con el método son mejores que las obtenidas mediante otro procedimiento que tomamos como referencia. En este caso se consideran como referencia las estimaciones obtenidas tomando los valores climatológicos mensuales del punto de estima, correspondientes al mes del día para el que se trata de estimar. Se valoran las estimaciones diarias en el período 1961-1990, que se han realizado tomando análogos fuera del entorno de diez días del día de estima.

Las expresiones [4] y [5] representarían, respectivamente, el error absoluto medio y la raíz del error cuadrático medio para el caso en que las estimaciones se realizasen tomando los valores climatológicos mensuales correspondientes. Estas expresiones representarían, además, medidas de dispersión de los datos observados de cada mes siendo [4] la desviación media y [5] la desviación tipo.

$$EAM_c = \frac{\sum_{i=1}^n |x_c - x_{io}|}{n} \quad [4]$$

$$RECM_c = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n |x_c - x_{io}|^2}{n}} \quad [5]$$

Definimos entonces los índices *skill-score* de la siguiente manera:

$$SK_{EAM} = 1 - \frac{EAM}{EAM_c} \quad [6]$$

$$SK_{RECM} = 1 - \frac{RECM}{RECM_c} \quad [7]$$

La expresión [6] se calcula basándose en el error absoluto medio, mientras que la expresión [7] se calcula basándose en la raíz del error cuadrático medio. Obsérvese que los valores de los *skill-score* serán cero si los errores del método igualasen a los de la referencia, lo que no supondría mejora respecto a esta, mientras que serán positivos si el método mejora a la referencia, tanto más cuanto mayor sea el valor del *skill-score*, de manera que en el límite de la estimación perfecta (error cero) el *skill-score* sería 1; por el contrario, valores negativos del *skill-score* supondrían estimaciones peores que la referencia. Otra interpretación de las expresiones [6] y [7] es que las estimaciones con el método pueden considerarse mejores cuanto más pequeños sean sus errores medios en relación a la dispersión propia de los datos observados.

En la figura 17 se representan los *skill-score* basados en los EAM; puede observarse una mejora general considerable de las estimaciones respecto a las basadas en la climatología mensual, aunque algo menor en los meses más fríos. Lo mismo puede decirse relativo a los *skill-score* basados en el RECM, que se representan en la figura 18, si bien los valores de índice son algo más bajos.

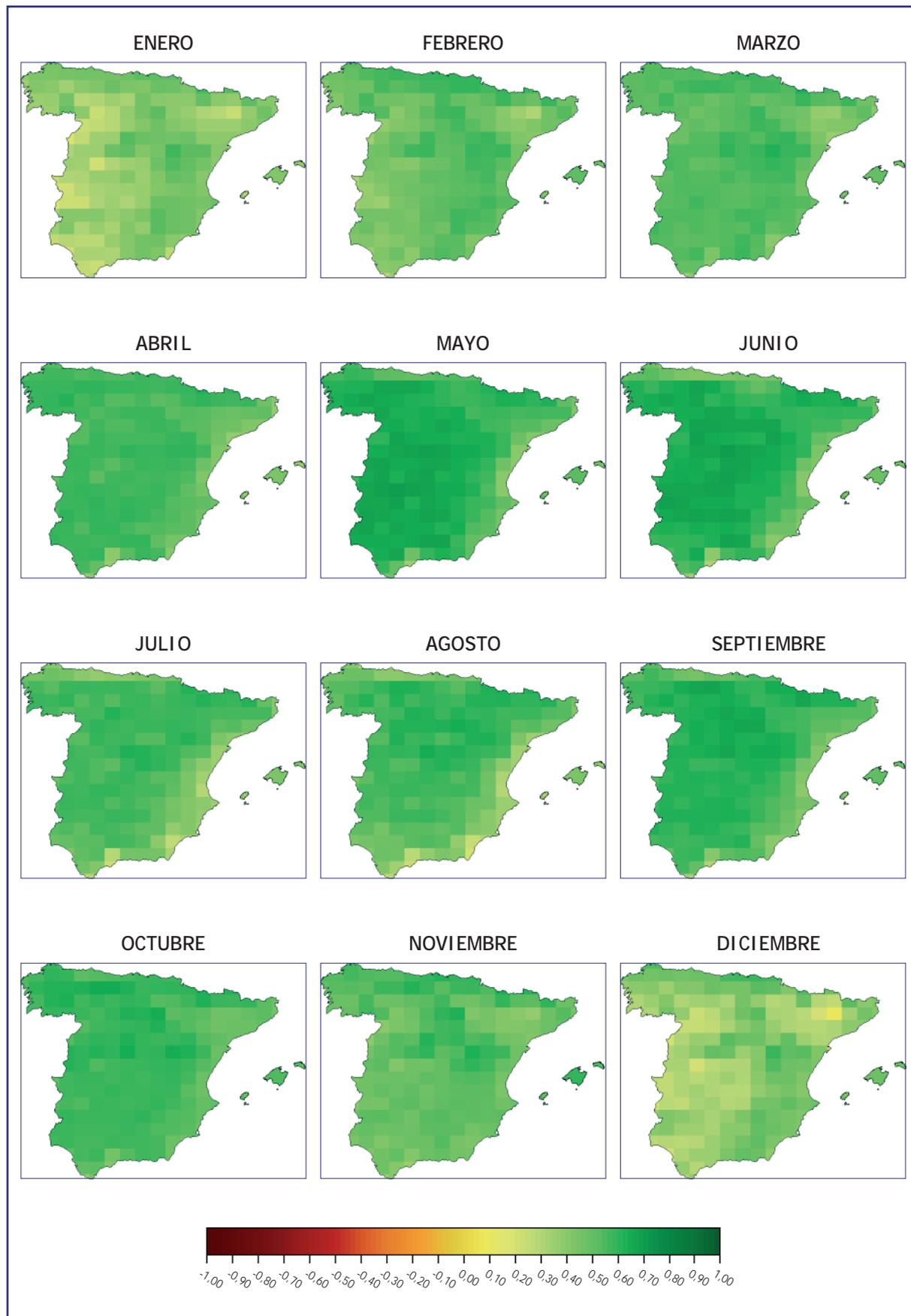


Figura 17. Skill-score mensual de la temperatura máxima diaria estimada basado en el EAM calculado respecto a la climatología mensual para el período 1961-1990.

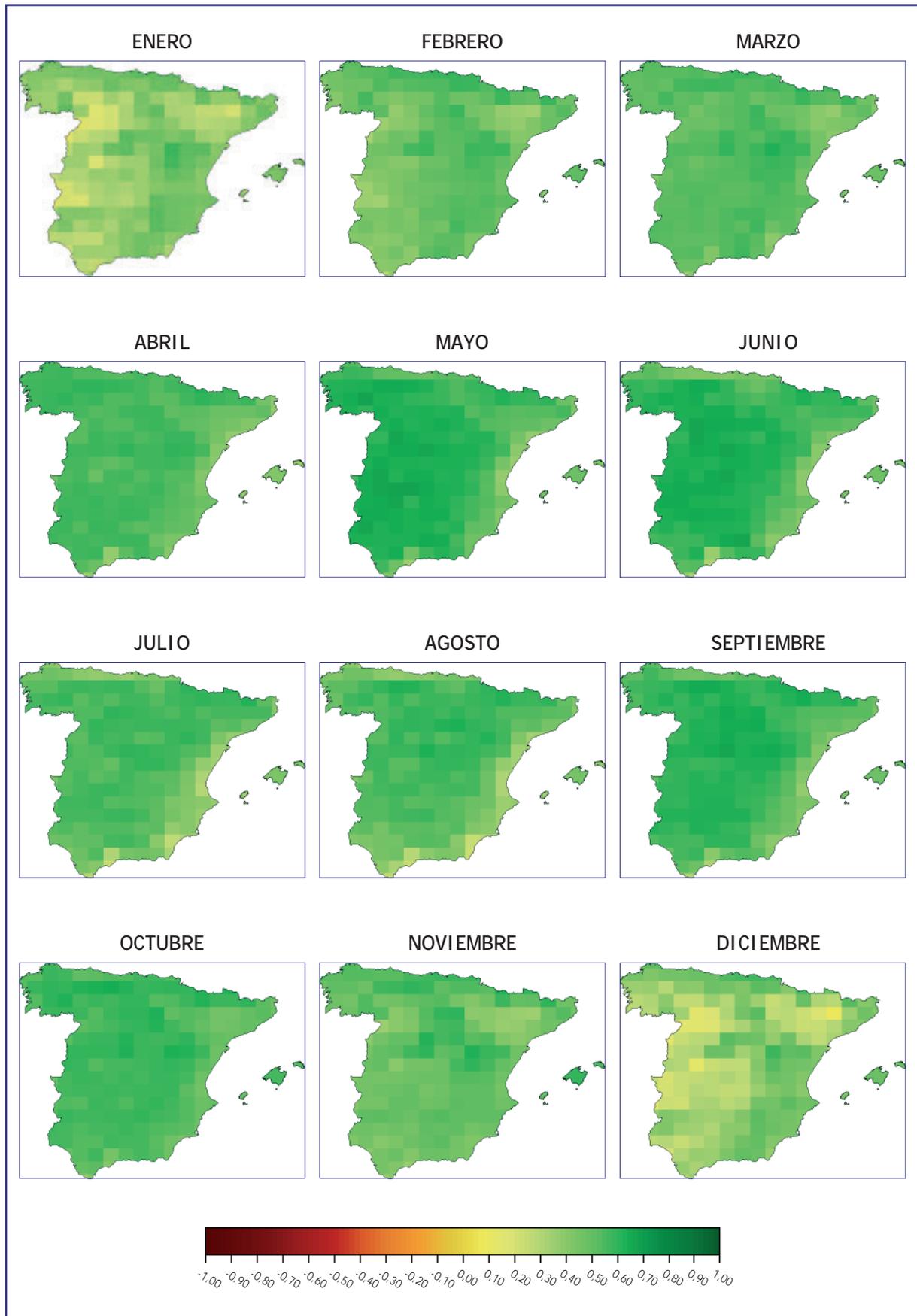


Figura 18. *Skill-score* mensual de la temperatura máxima diaria estimada basado en el RECM calculado respecto a la climatología mensual para el período 1961-1990.

5. VALIDACIÓN DE LAS ESTIMACIONES DE TEMPERATURA MÍNIMA

De un modo semejante al caso de la temperatura máxima, y en base a los mismos criterios y consideraciones, se validará el comportamiento de los valores medios anuales y mensuales estimados, y el de las estimaciones diarias en cuanto a sus distribuciones, errores y *skill-scores*.

5.1. Validación de las medias anuales

En la figura 19 se presentan los valores de la temperatura mínima media anual observada y estimada, así como la variación en °C de esta última respecto al valor observado correspondiente, para el período 1981-1990. Como puede observarse, la distribución geográfica de la temperatura máxima estimada es muy similar a la observada. De un modo similar a como ocurre con la temperatura máxima, las variaciones son muy pequeñas en la mayoría de la zona de estudio siendo, como máximo del orden de 0,5°C y con un ligero predominio de la sobreestima.

5.2. Validación de las medias mensuales

En las figuras 20-23 se muestran los mapas donde se representan los valores mensuales medios de temperatura mínima observada y estimada para los meses de todas las estaciones del año; igualmente en la figura 24, se representan las variaciones en °C de las medias mensuales de temperatura mínima estimada respecto al valor observado correspondiente.

Puede observarse que la correspondencia entre las medias mensuales de las temperaturas mínimas estimadas y observadas es bastante buena aunque con algunas diferencias en más o en menos que se manifiestan en los distintos meses. Así hay una mayoría de puntos con sobreestima desde noviembre a enero; de febrero a junio parecen predominar los puntos con subestima aunque menos acusadamente en mayo; en julio y agosto parece predominar la sobreestima exceptuando a las zonas más próximas a las costas; finalmente, en septiembre y octubre parece predominar la subestima. En cualquier caso, las desviaciones de las medias estimadas respecto a las observadas son pequeñas, alcanzando muy raramente el valor de 1°C.

5.3. Validación de las estimaciones de temperatura mínima diaria

En la misma forma que en el caso de las temperaturas máximas, realizaremos la comparación de percentiles significativos y analizaremos los errores y los *skill-score* de las temperaturas mínimas diarias estimadas.

5.3.1. Comparación de percentiles

En las figuras 25-30 se representan las distribuciones geográficas de los valores de los percentiles más representativos de la temperatura mínima diaria observada y estimada así como la diferencia entre los mismos. Parece que la pauta general es parecida a la de los percentiles de las temperaturas máximas: los valores de los percentiles más bajos tienden a estar sobreestimados mientras que lo contrario tiende a ocurrir con los percentiles más altos, no obstante, puede observarse también la presencia de algunos puntos en que ocurre lo contrario, principalmente en el percentil 75. De ello se deduciría que las temperaturas mínimas más bajas tenderían, en general, a estar sobreestimadas mientras que las más altas tenderían, en general, a ser subestimadas, principalmente las más extremas (percentil 99), aunque no en todos los puntos. Los valores de las desviaciones pueden llegar a sobrepasar el valor de $\pm 1^\circ\text{C}$ en algunos casos, fundamentalmente en el percentil 10 (sobreestimas) y en el percentil 99 (subestimas) donde se puede encontrar un punto en que la subestima llega a los 2°C .

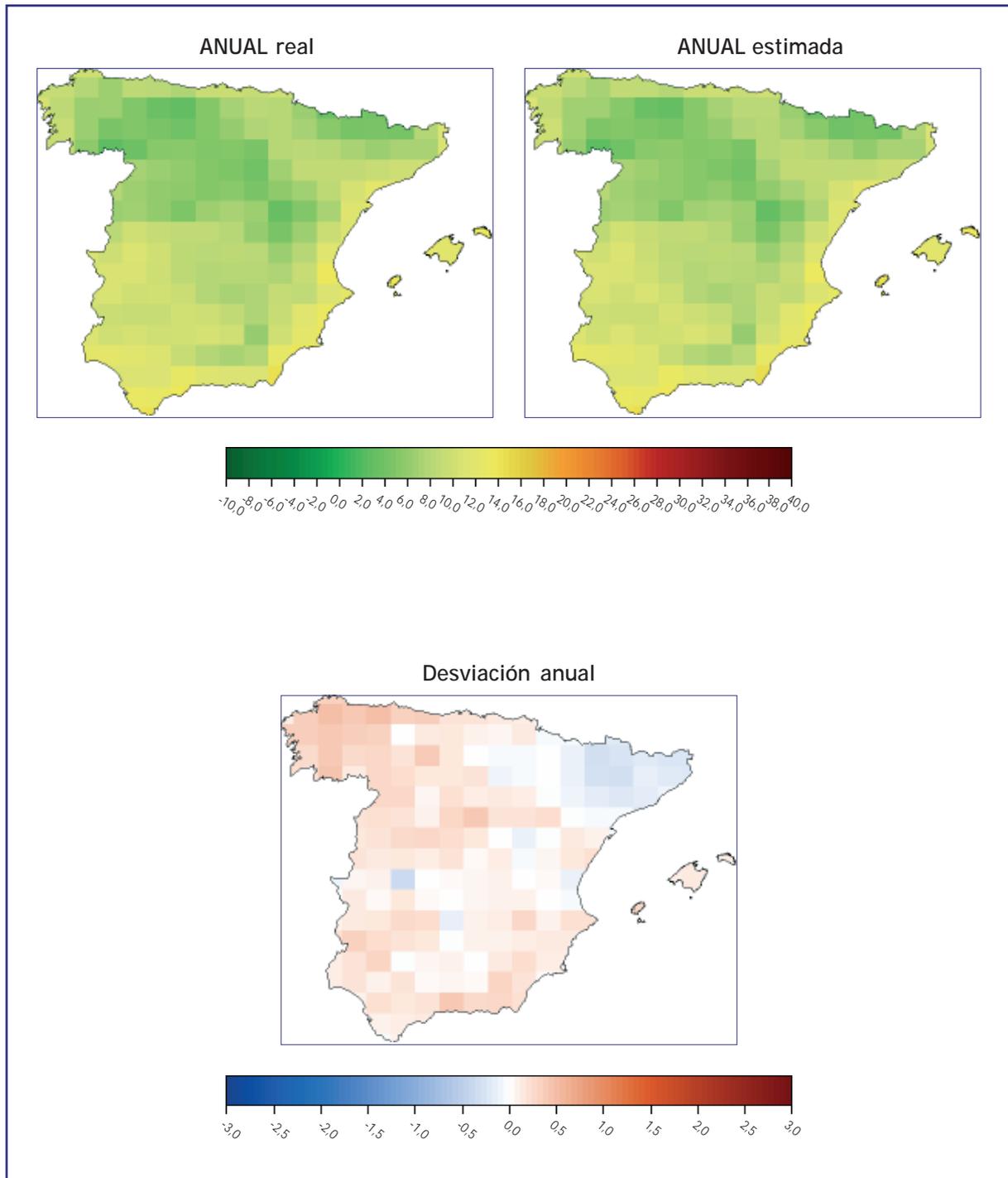


Figura 19. En la parte superior, temperatura mínima media anual observada y estimada para el periodo 1981-1990. En la parte inferior, desviación en °C de la temperatura mínima estimada respecto de la observada.

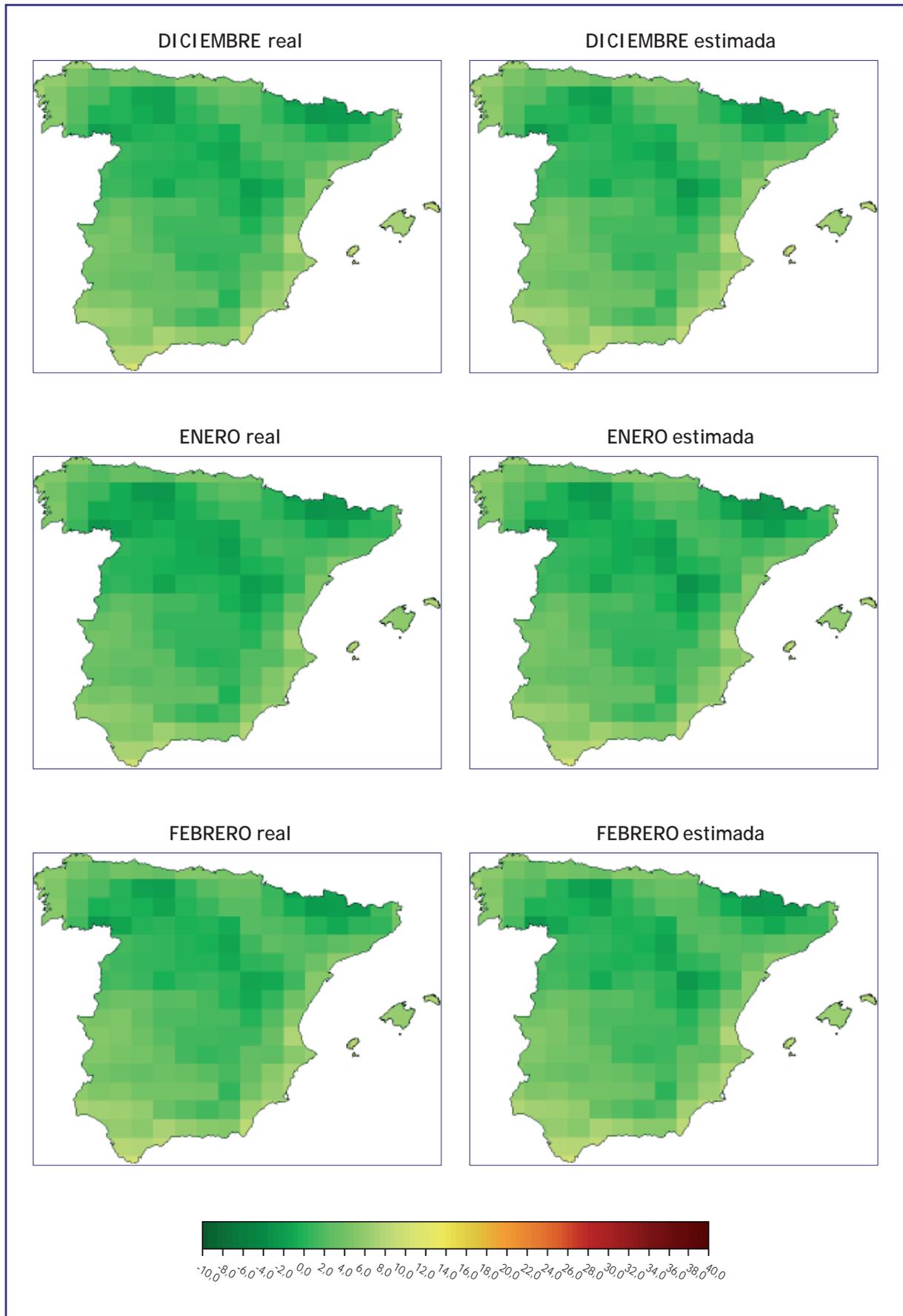


Figura 20. Temperatura mínima media observada y estimada para los meses de invierno del período 1961-1990.

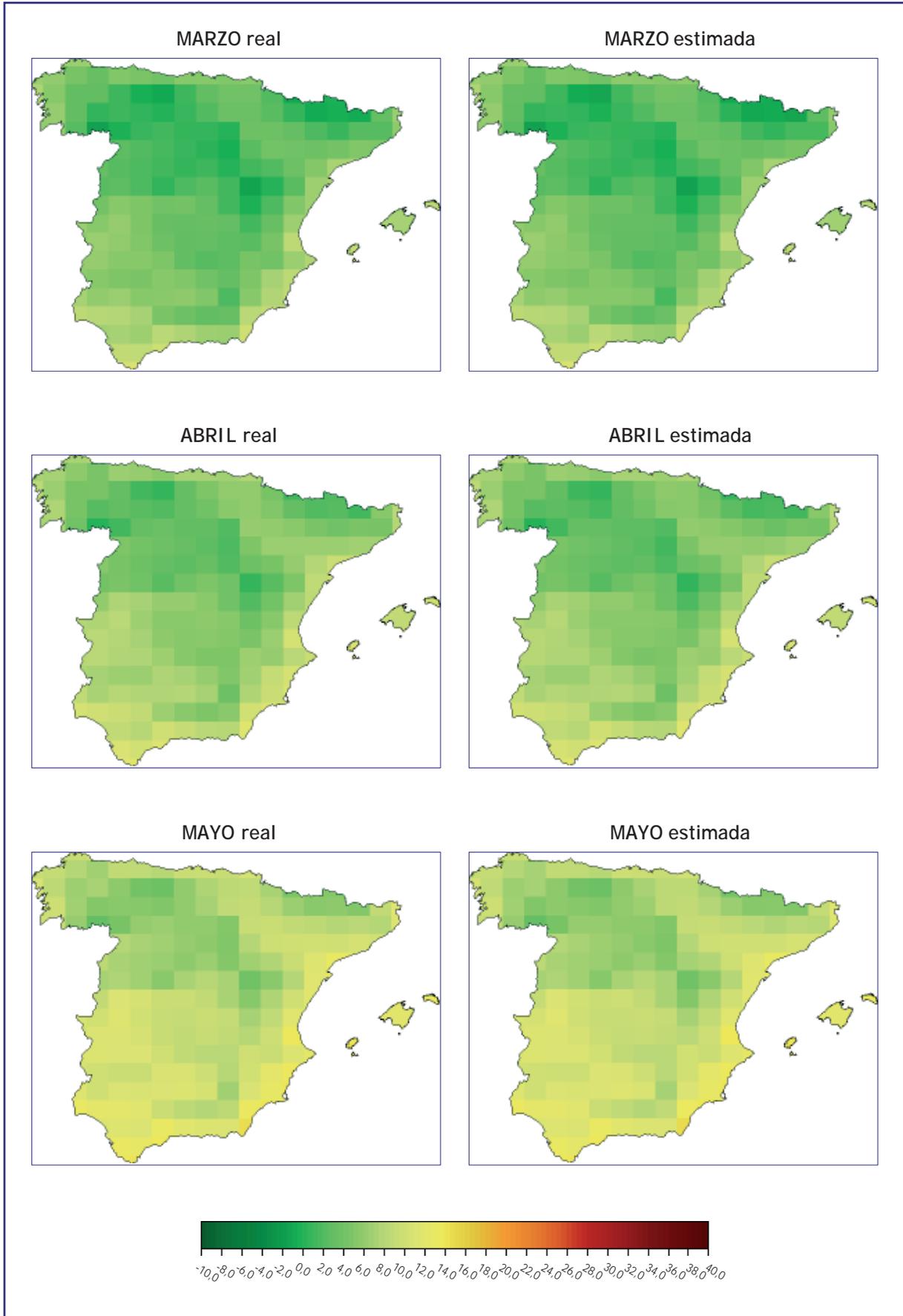


Figura 21. Temperatura mínima media observada y estimada para los meses de primavera del periodo 1961-1990.

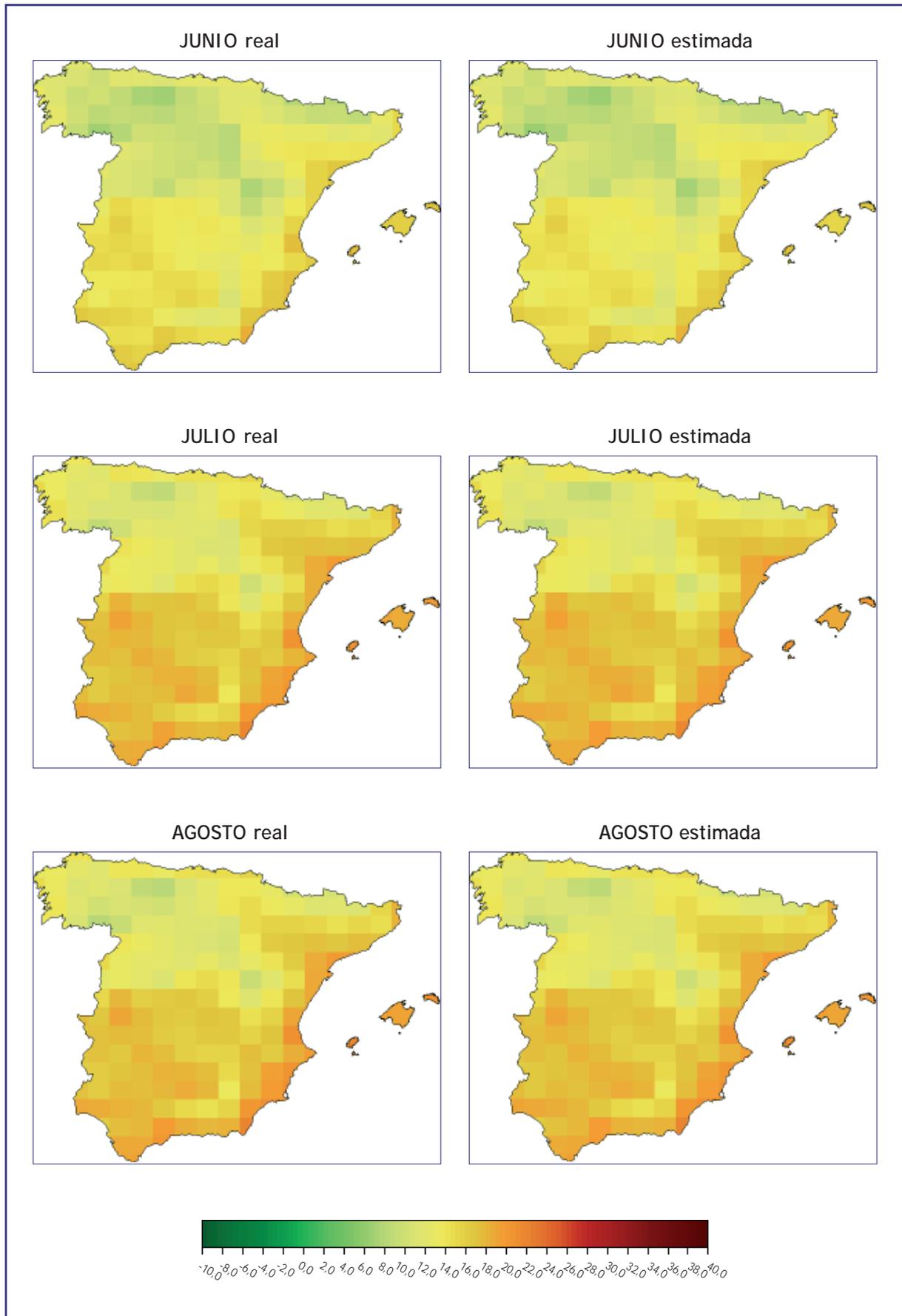


Figura 22. Temperatura mínima media observada y estimada para los meses de verano del periodo 1961-1990.

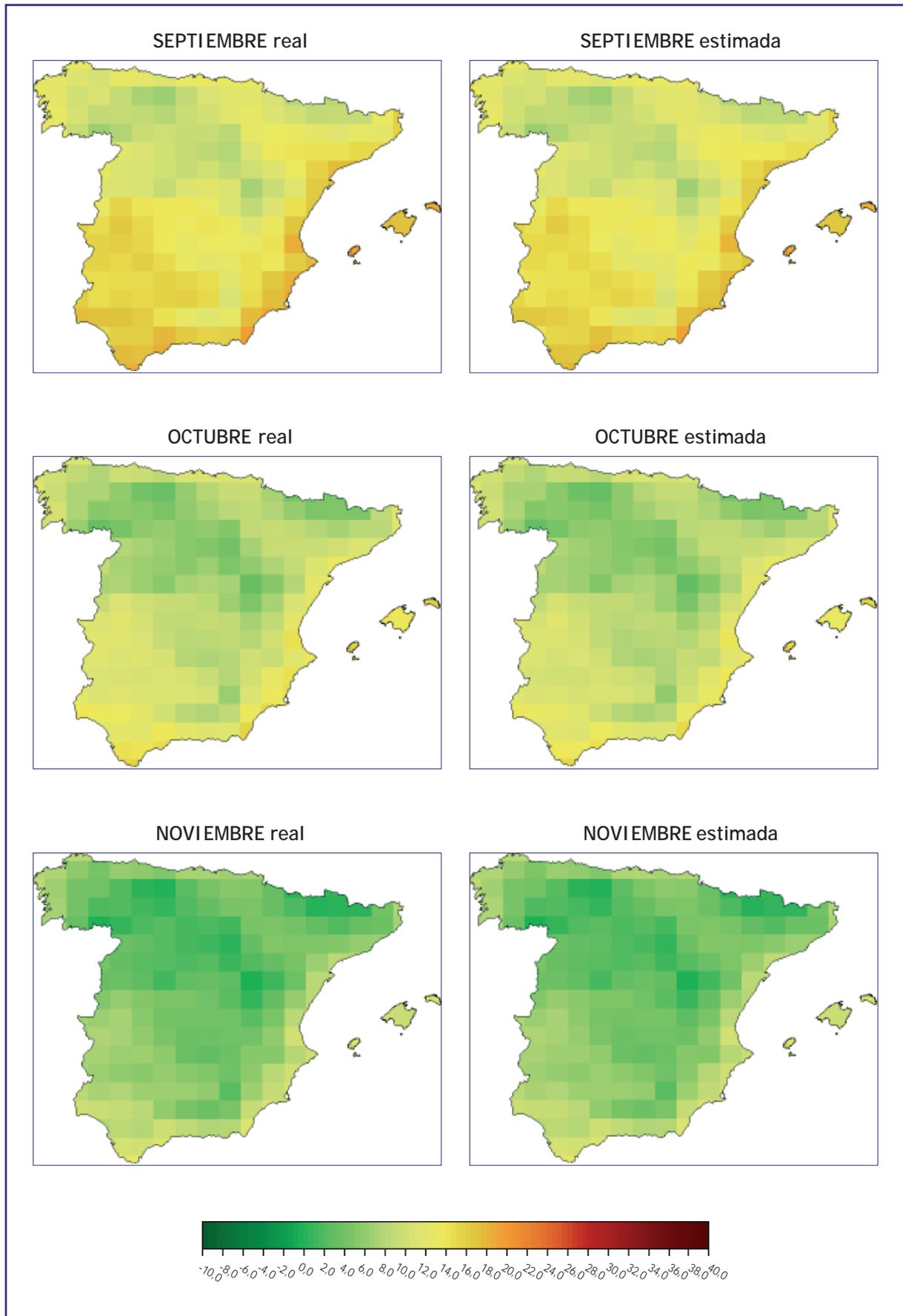


Figura 23. Temperatura mínima media observada y estimada para los meses de otoño del período 1961-1990.

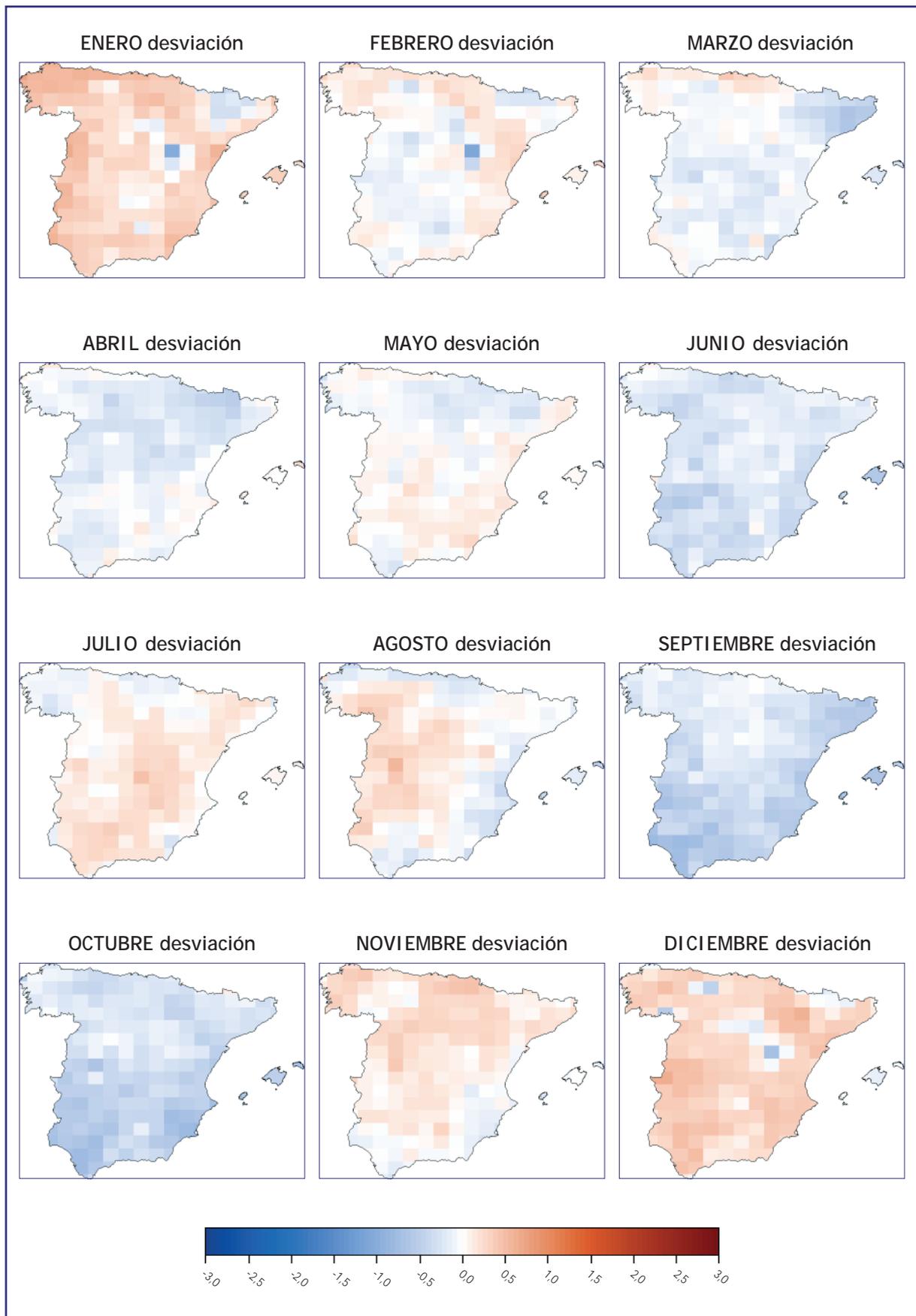


Figura 24. Desviación de la temperatura mínima media mensual estimada respecto a la observada para el período 1961-1990.

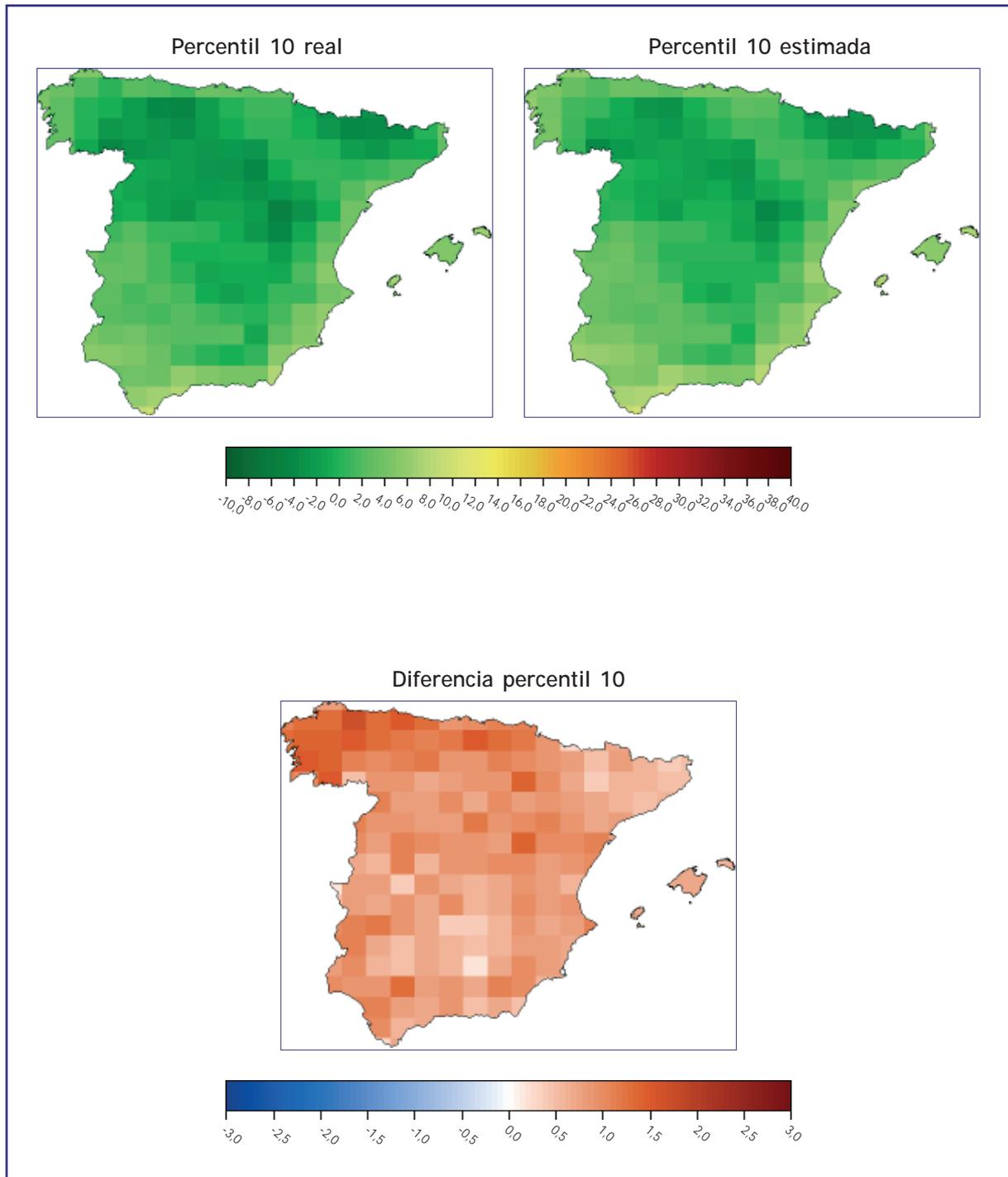


Figura 25. En la parte superior, percentil 10 para la temperatura mínima diaria observada y estimada para el período 1981-1990. Abajo, diferencia entre el valor del percentil de la temperatura mínima estimada y el correspondiente de la mínima observada.

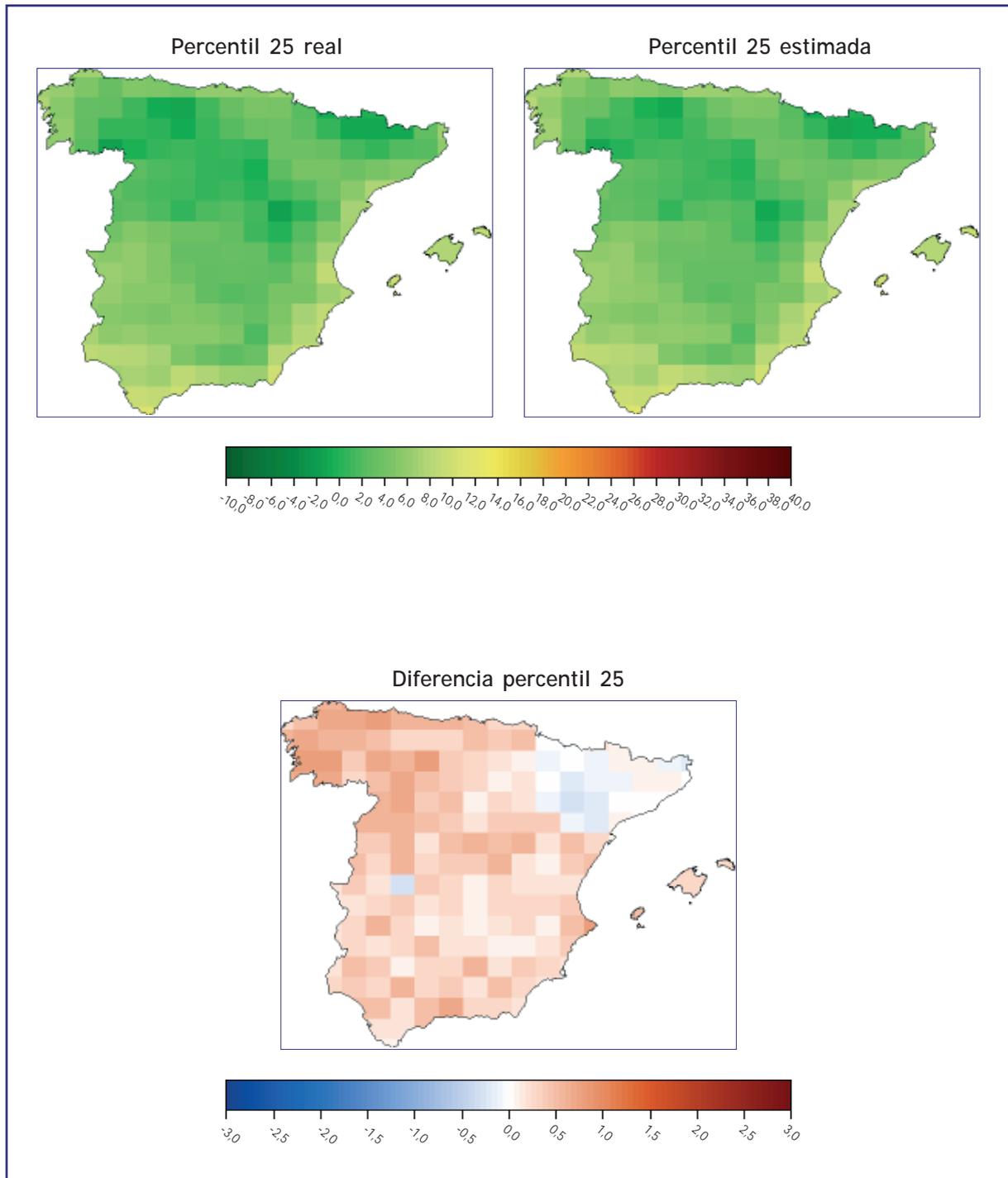


Figura 26. En la parte superior, percentil 25 para la temperatura mínima diaria observada y estimada para el período 1981-1990. Abajo, diferencia entre el valor del percentil de la temperatura mínima estimada y el correspondiente de la mínima observada.

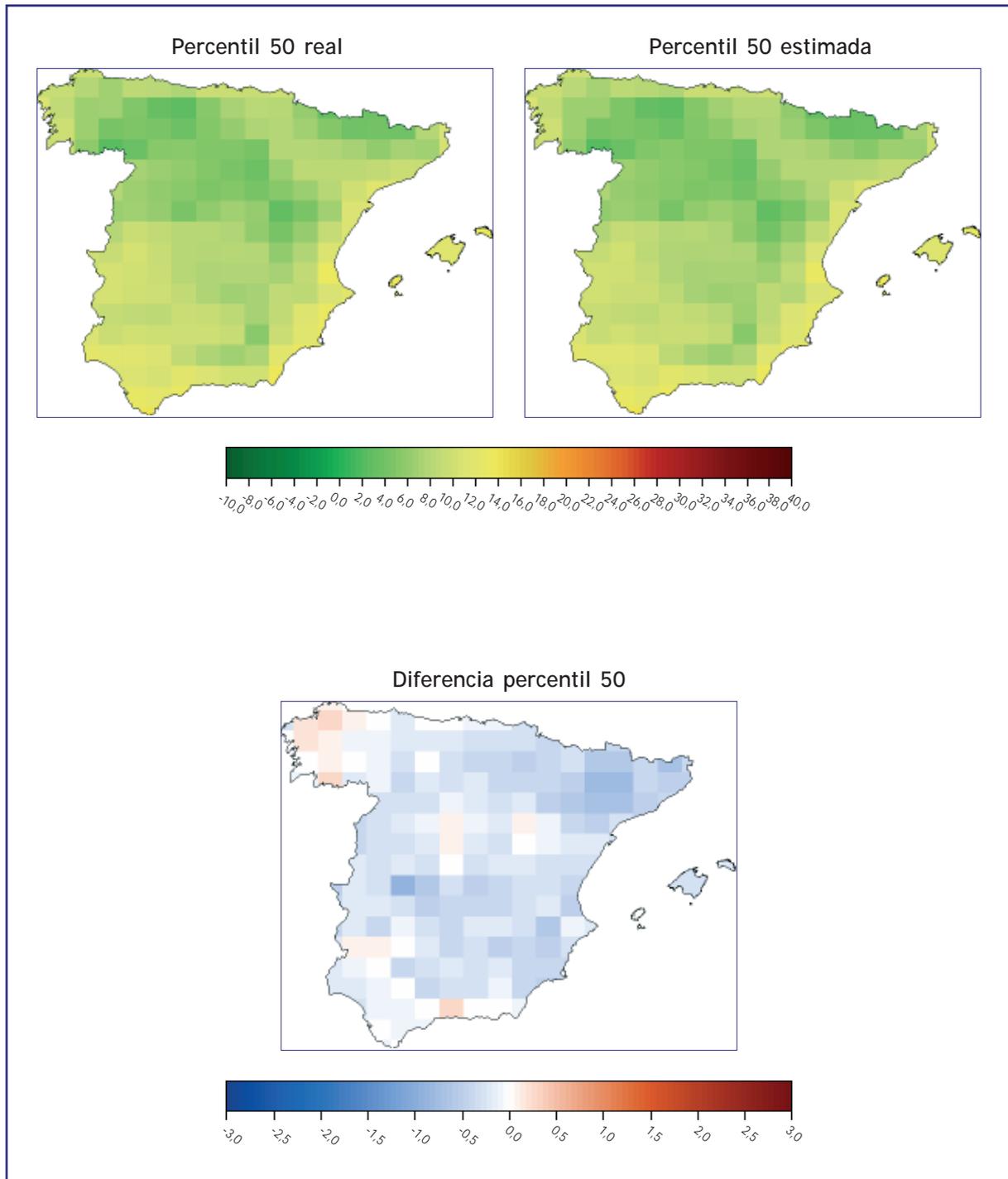


Figura 27. En la parte superior, percentil 50 para la temperatura mínima diaria observada y estimada para el período 1981-1990. Abajo, diferencia entre el valor del percentil de la temperatura mínima estimada y el correspondiente de la mínima observada.

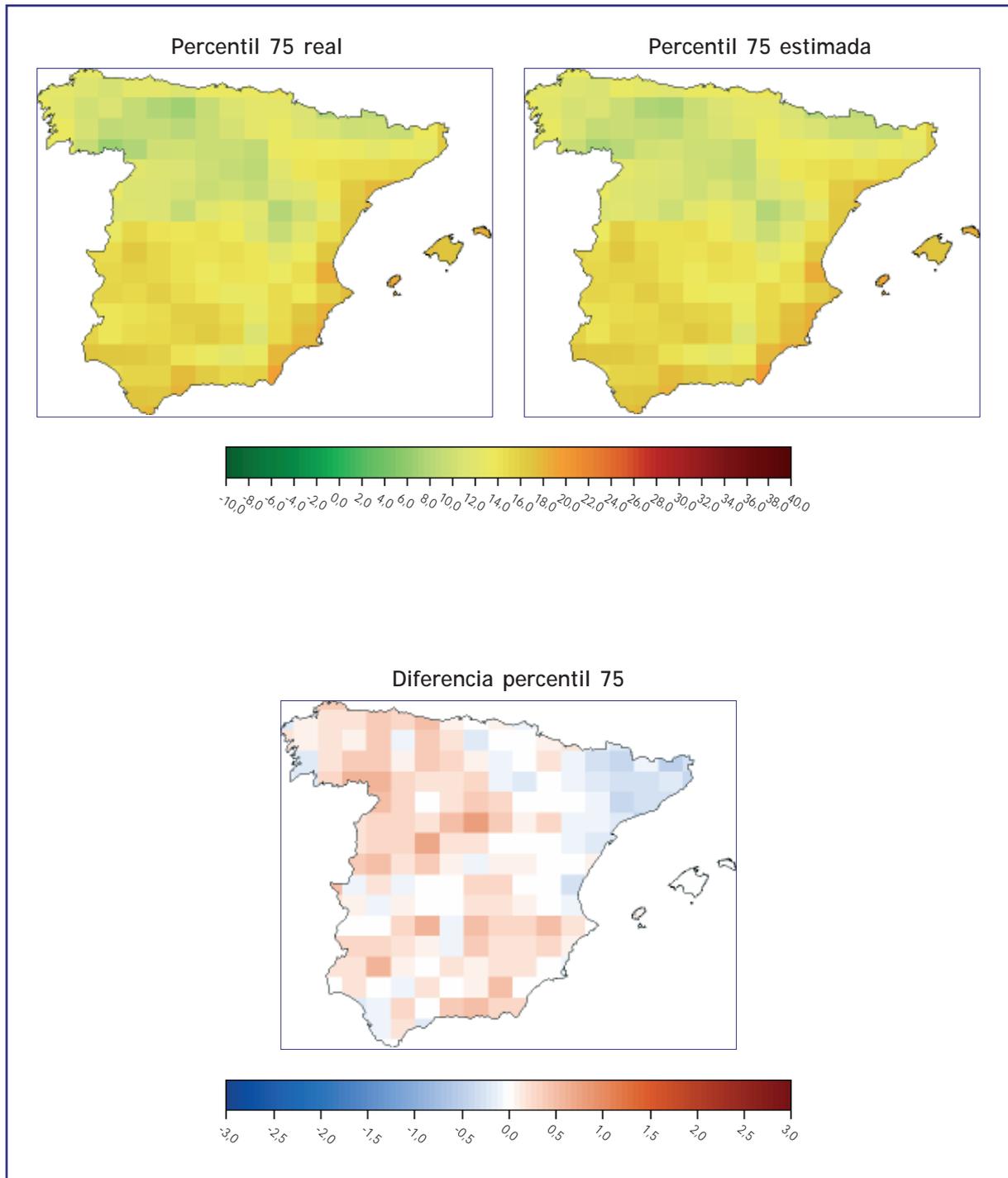


Figura 28. En la parte superior, percentil 75 para la temperatura mínima diaria observada y estimada para el período 1981-1990. Abajo, diferencia entre el valor del percentil de la temperatura mínima estimada y el correspondiente de la mínima observada.

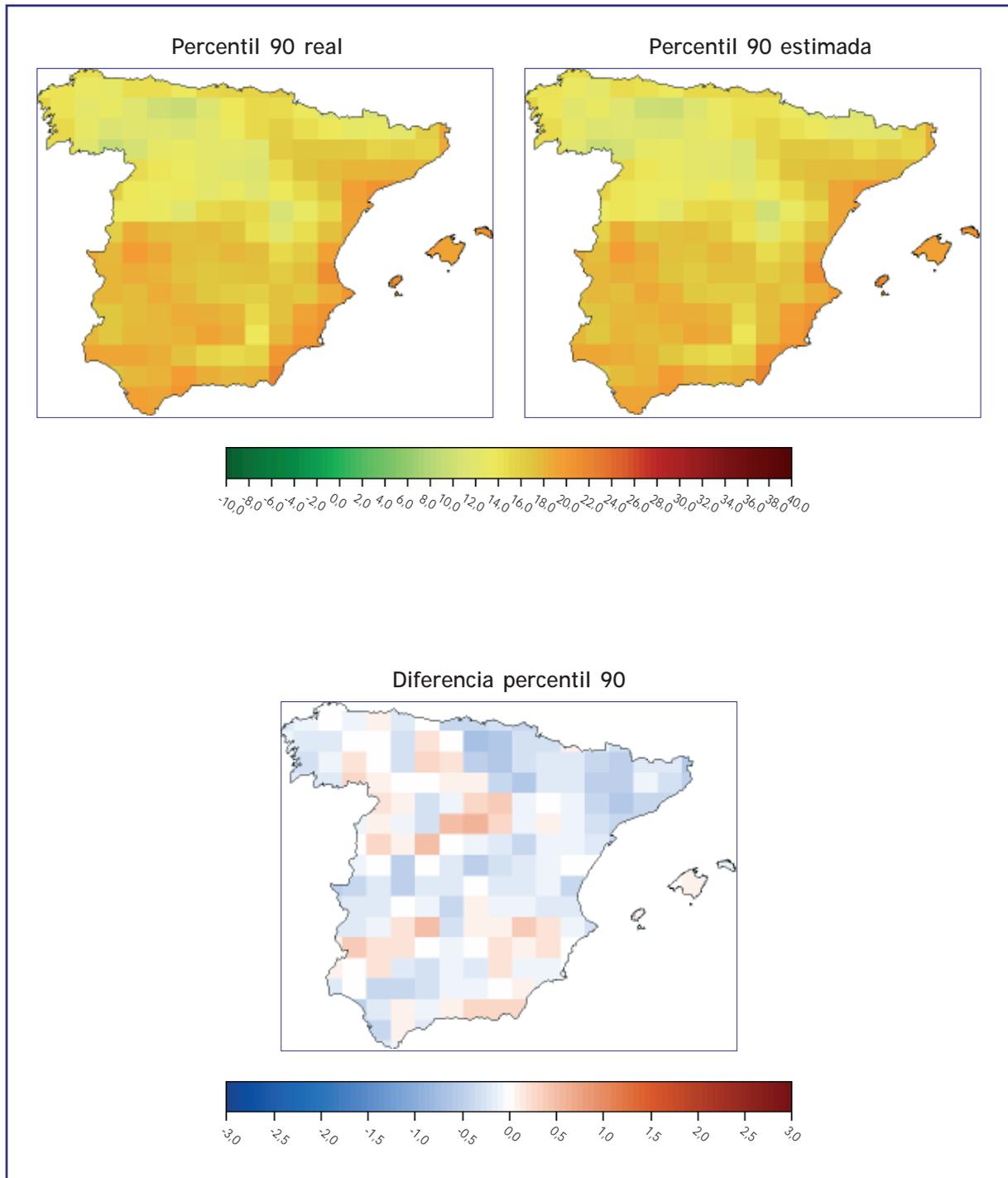


Figura 29. En la parte superior, percentil 90 para la temperatura mínima diaria observada y estimada para el período 1981-1990. Abajo, diferencia entre el valor del percentil de la temperatura mínima estimada y el correspondiente de la mínima observada.

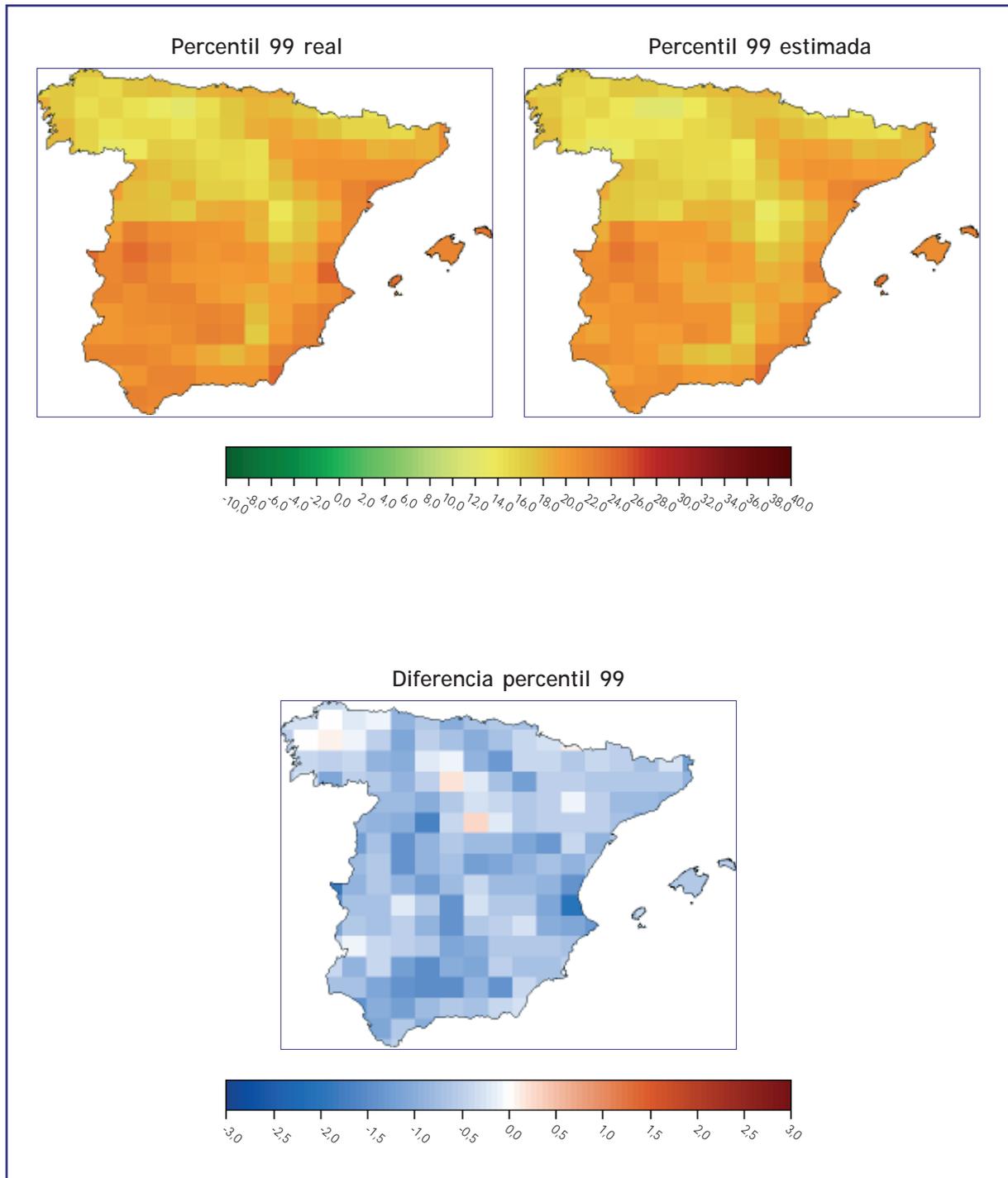


Figura 30. En la parte superior, percentil 99 para la temperatura mínima diaria observada y estimada para el período 1981-1990. Abajo, diferencia entre el valor del percentil de la temperatura mínima estimada y el correspondiente de la mínima observada.

5.3.2. Índices de verificación. Errores

En la figura 31 se representa la distribución mensual de los errores EAM. Los aspectos más destacados son el aumento del error en los meses más fríos, principalmente en zonas del interior, y la disminución en los meses más cálidos; también parece manifestarse un error algo más bajo en algunas zonas costeras, como la costa sur mediterránea; los mayores valores de EAM llegan a superar ligeramente los 2°C en algún punto pero en los meses en que los errores son mayores, en la mayoría de los casos los valores están comprendidos entre 1°C y 2°C. Los errores RECM se representan en la figura 32; como puede observarse siguen una distribución parecida a la de los EAM aunque sus valores son algo más altos pues están más afectados por las desviaciones diarias más grandes.

5.3.3. Índices de verificación. *Skill-scores*

En la figura 33 se representan los *skill-score* basados en los EAM; puede observarse una mejora general de las estimaciones respecto a las basadas en la climatología mensual, aunque esta mejora resulta algo menor que la que resultó para las temperaturas máximas, de hecho existen algunos puntos en donde la mejora respecto a la estima climatológica es pequeña en verano, incluso inferior al 10% en algún caso en el sur. Los *skill-score* basados en el RCEM, se representan en la figura 34, siendo los valores del mismo orden que el de los basados en el EAM.

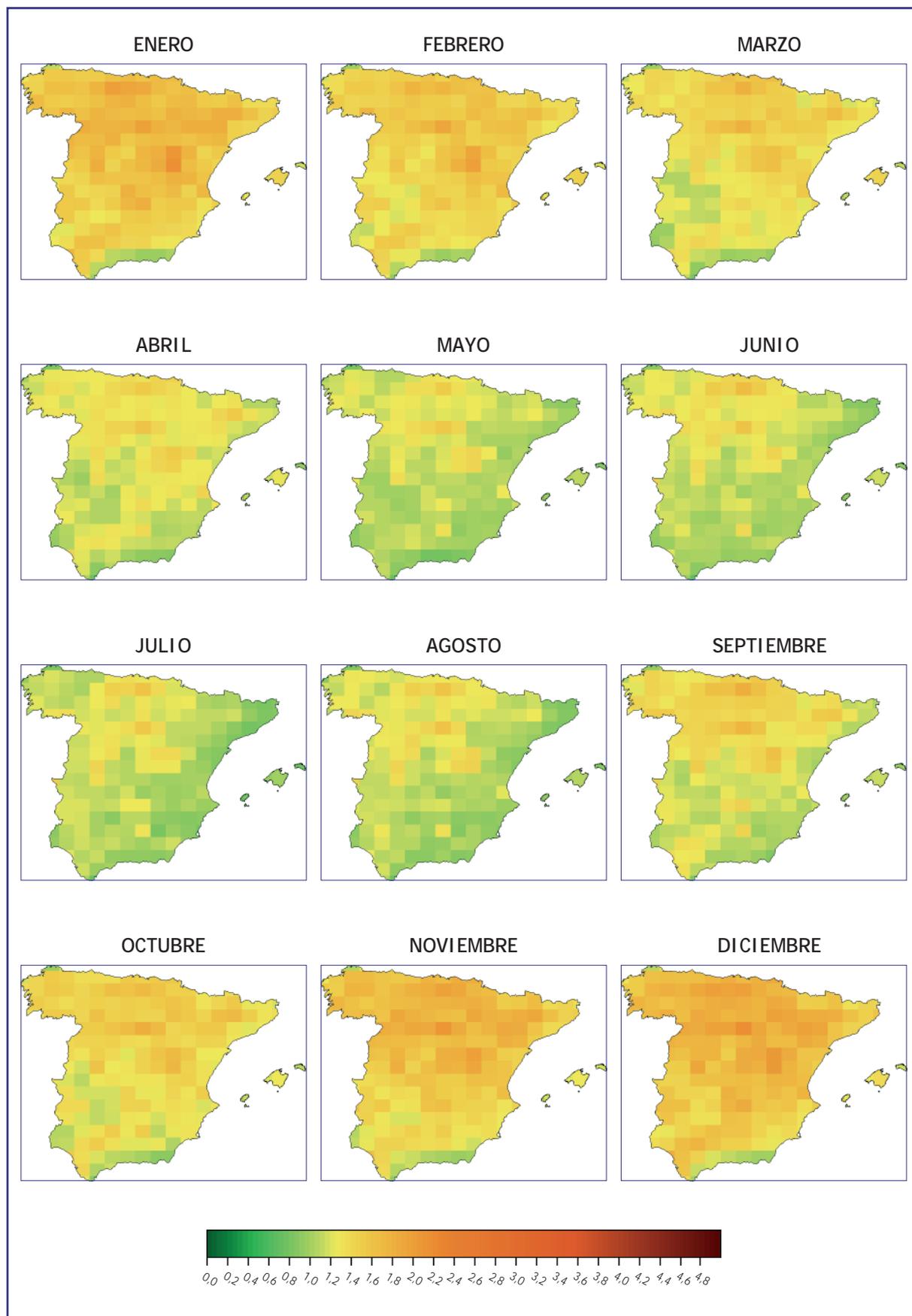


Figura 31. Error absoluto medio mensual de la temperatura mínima diaria estimada respecto a la observada para el período 1961-1990.

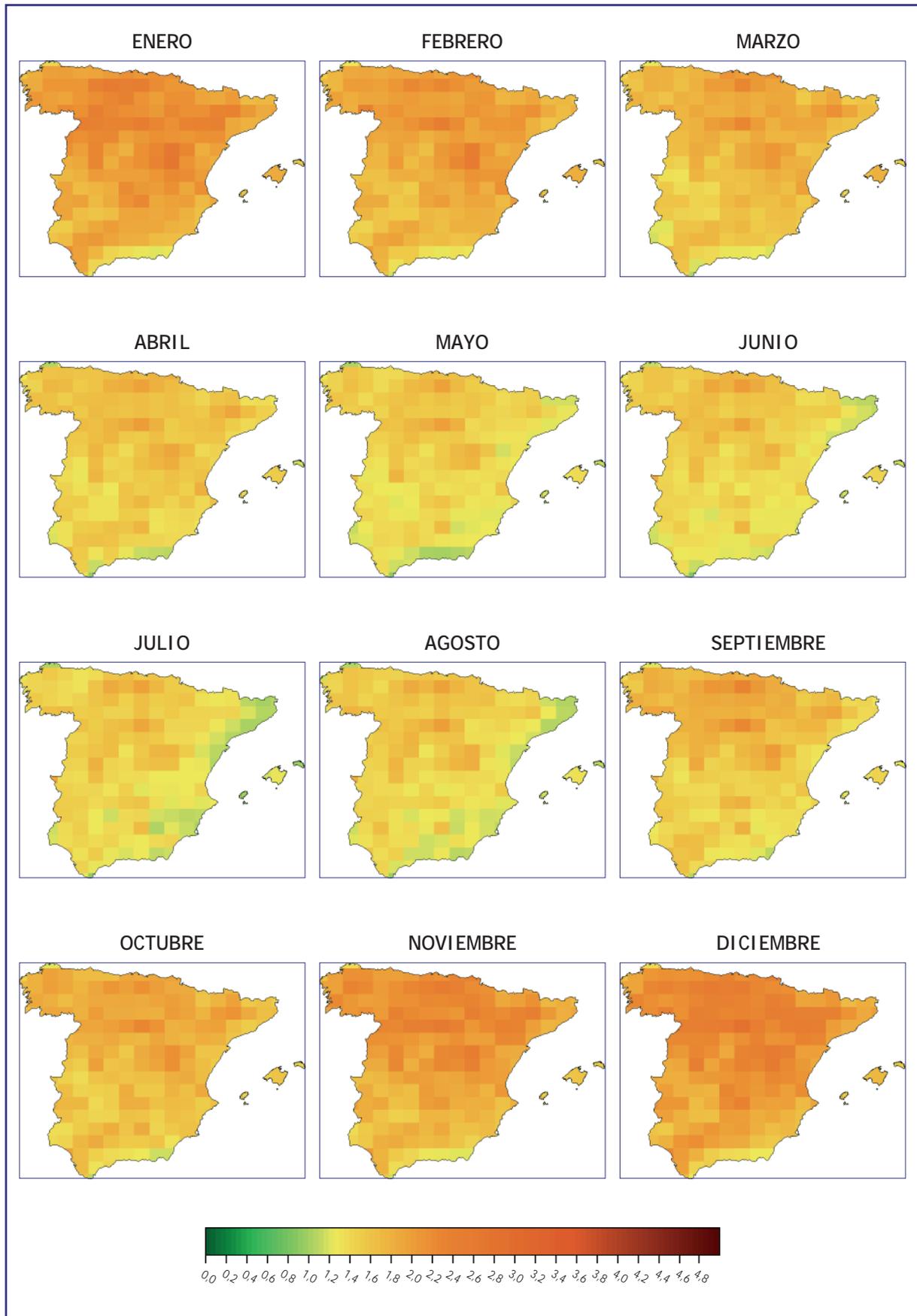


Figura 32. Raíz cuadrada del error cuadrático medio mensual de la temperatura mínima diaria estimada respecto a la observada para el periodo 1961-1990.

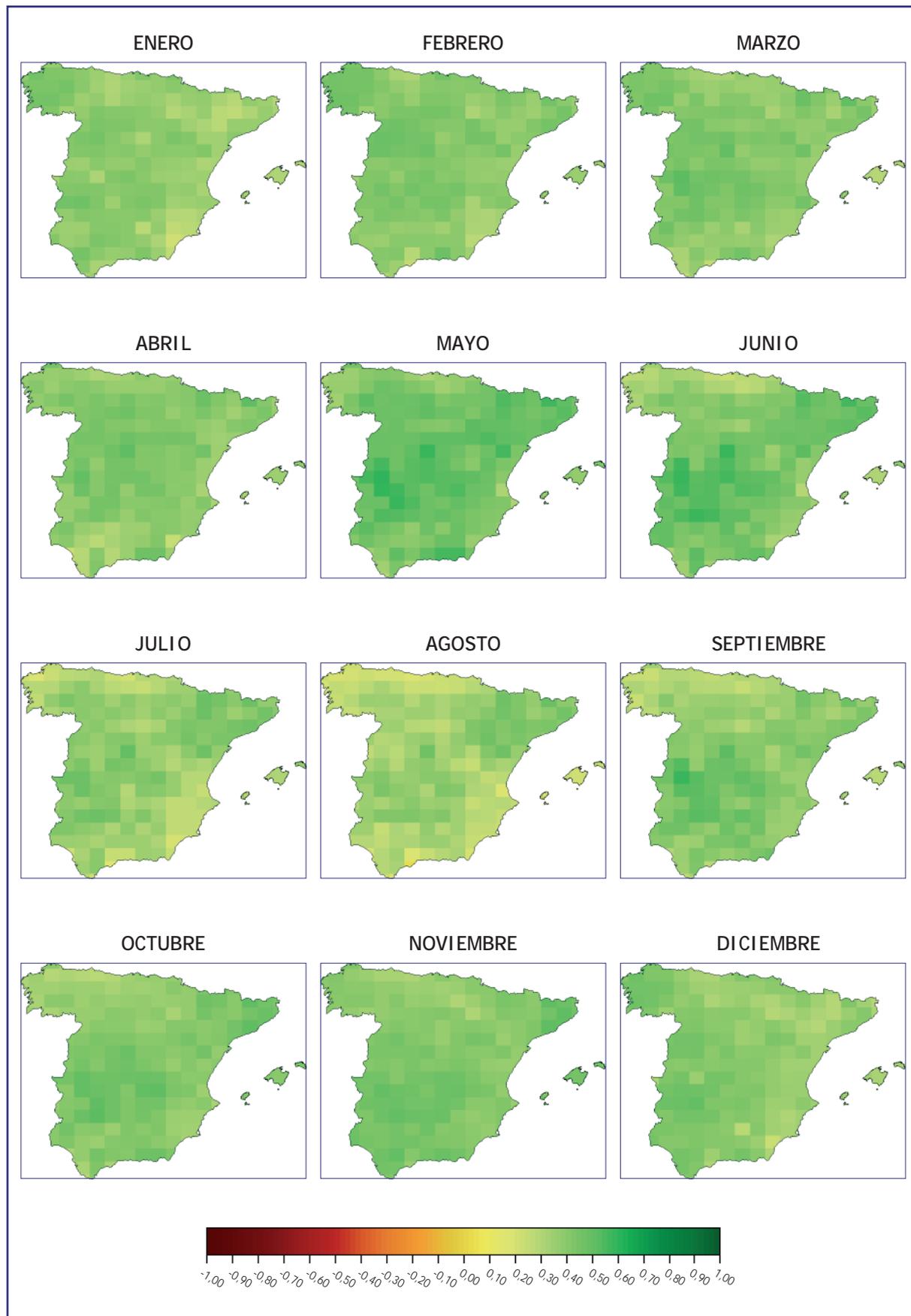


Figura 33. Skill-score mensual de la temperatura mínima diaria estimada basado en el EAM calculado respecto a la climatología mensual para el período 1961-1990.

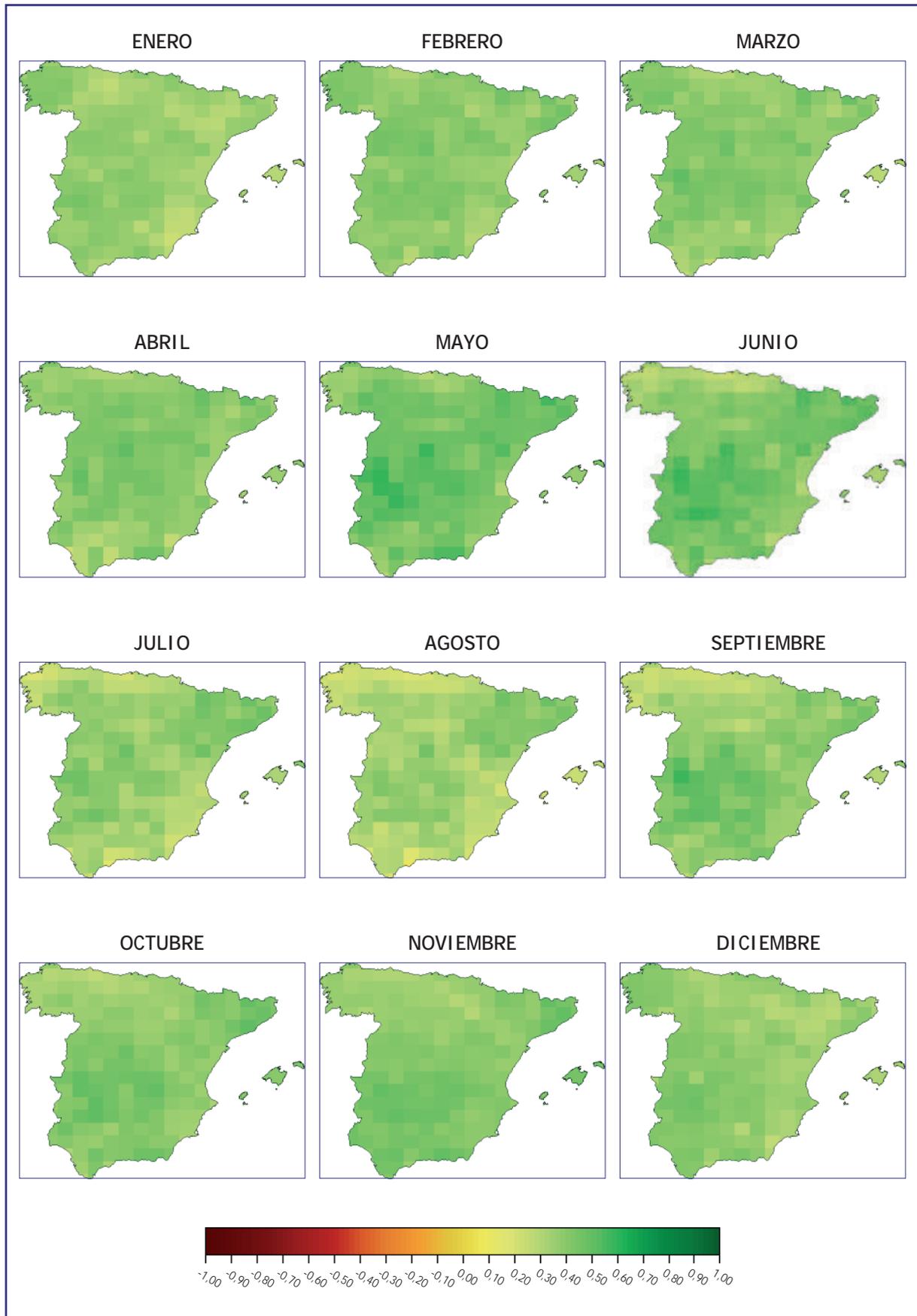


Figura 34. *Skill-score* mensual de la temperatura mínima diaria estimada basado en el RECM calculado respecto a la climatología mensual para el período 1961-1990.

6. CONCLUSIONES

Se ha presentado un método de estimación para la regionalización de temperaturas máximas y mínimas basándose en análogos sinópticos.

Se han validado los métodos analizando el comportamiento de los valores estimados en relación con los correspondientes observados tanto para los valores medios anuales y mensuales como para los diarios donde se analiza su distribución, los errores medios y los *skill-score* indicativos de la mejora de las estimaciones basadas en el método, respecto a las estimaciones basadas en la climatología.

Las estimaciones obtenidas son bastante buenas en general. Los valores medios tanto anuales como mensuales de las temperaturas máximas presentan una distribución geográfica y unos valores muy similares a los observados.

La distribución de los valores diarios de temperaturas máximas estimadas se ajusta bastante bien a la de los valores observados, aunque los percentiles más bajos tienden a estar ligeramente sobre-estimados ocurriendo lo contrario con los percentiles más altos.

Los errores medios de las temperaturas máximas diarias son bajos por lo general, presentando algunas diferencias estacionales y geográficas, mientras que los *skill-score* muestran una considerable mejora respecto a las estimaciones basadas en los valores climatológicos mensuales, aunque la mejora es algo menor en los meses más fríos.

Consideraciones similares podemos hacer respecto a las estimaciones de las temperaturas mínimas, aunque los *skill-score* para las estimaciones diarias indican unas mejoras algo más discretas que en el caso de las temperaturas máximas.

BIBLIOGRAFÍA

- BORÉN, R., J. RIBALAYGUA, L. BALAIRÓN, 1997: *Método Analógico de Simulación de Escenarios Climáticos a Escala Comarcal*. Informe Técnico n.º4. Servicio de Variabilidad y Predicción del Clima, INM, Madrid.
- IPCC, 1999: *Guidelines on the Use of Scenario Data for Climate Impact and Adaptation Assessment*.
- KALNAY, E. y otros, 1996: The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 77, 437-471.
- WILKS, D., 1995: *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*, Academic Press.
- ZORITA, E., H. VON STORCH, 1999: The Analog Method as a Simple Statistical Downscaling Technique: Comparison with More Complicated Methods. *J. Climate*, 12, 2474-2489.