

# Cartografía de alta resolución del riesgo de heladas: peligro, vulnerabilidad y exposición agrícola (SE de España)

David Espín Sánchez

Universidad de Murcia  
david.espin1@um.es



Recibido: junio de 2021  
Aceptado: febrero de 2022  
Publicado: mayo de 2022

## Resumen

El riesgo de heladas en el sureste de España ha supuesto históricamente importantes pérdidas económicas para el sector hortofrutícola. En la Demarcación Hidrográfica del Segura (DHS), el sector agrícola representa 8.161 km<sup>2</sup>, algo más del 43% del área total de estudio. Los días de heladas, que aparecen principalmente a causa de los procesos de inversión térmica nocturna (ITN), influyen en los cultivos periódicamente todos los años. Los factores que explican la evolución y el cálculo del riesgo de heladas (peligro, vulnerabilidad y exposición) se analizan desde el punto de vista espaciotemporal, con especial énfasis en el análisis del período de heladas (FP) (1950-2020). Los resultados muestran una clara disminución de la peligrosidad de heladas en las últimas siete décadas (1950-2020), mientras que la vulnerabilidad y la exposición aumentan en el área de estudio. Marzo y abril son los meses de mayor riesgo, cuando destaca la potencial afectación al cultivo del almendro y a los cereales de secano y de regadío, con más de 4.000 km<sup>2</sup> con riesgo de heladas significativo. Se ha generado una cartografía del riesgo de helada mensual de muy alta resolución con el objetivo de ser útil para la futura planificación agrícola del área de estudio.

**Palabras clave:** riesgo; cultivos; peligrosidad; vulnerabilidad; cartografía

---

**Resum.** *Cartografia d'alta resolució del risc de gelades: perillositat, vulnerabilitat i exposició agrícola (SE d'Espanya)*

---

El risc de gelades al sud-est d'Espanya ha suposat històricament importants pèrdues econòmiques per al sector hortofructícola. A la Demarcació Hidrogràfica del Segura (DHS), el sector agrícola representa 8.161 km<sup>2</sup>, una mica més del 43% de l'àrea total d'estudi. Els dies de gelades, que apareixen principalment a causa dels processos d'inversió tèrmica nocturna (ITN), influeixen en els cultius de la zona periòdicament cada any. Els factors que expliquen l'evolució i el càlcul del risc de gelades (perillositat, vulnerabilitat i exposició) s'analitzen des del punt de vista espacio-temporal, amb un especial èmfasi en l'anàlisi del període de gelades (FP) (1950-2020). Els resultats mostren una clara disminució de la perillositat de gelades durant les últimes set dècades (1950-2020), mentre que la vulnerabilitat i l'exposició augmenten. El març i l'abril són els mesos de més risc, quan destaca la potencial afectació als cultius d'ametllers i als cereals de secà i de regadiu, amb més de 4.000 km<sup>2</sup> amb risc de gelades significatiu. S'ha generat una cartografia del risc mensual de molt alta resolució amb l'objectiu de ser útil per a la futura planificació agrícola de l'àrea d'estudi.

**Paraules clau:** risc; cultius; perillositat; vulnerabilitat; cartografia

---

**Résumé.** *Cartographie en haute résolution du risque de gel : dangerosité, vulnérabilité et exposition agricole (SE de l'Espagne)*

---

Le risque de gel dans le sud-est de l'Espagne a toujours entraîné des pertes économiques importantes pour le secteur des fruits et légumes. Dans la démarcation hydrographique du bassin de la rivière Segura (DHS), le secteur agricole représente 8161 km<sup>2</sup>, soit un peu plus de 43% de la zone d'étude totale. Les jours de gel, qui apparaissent principalement en raison de l'inversion thermique nocturne (ITN), influencent périodiquement les cultures de la zone au fil des années. Les facteurs qui expliquent l'évolution et le calcul du risque de gel (danger, vulnérabilité et exposition) sont analysés du point de vue spatio-temporel, notamment en mettant en évidence l'analyse de la durée de la période de gel (FP) (1950-2020). Les résultats montrent une nette diminution du dangerosité de gel au cours des sept dernières décennies (1950-2020), tandis que la vulnérabilité et l'exposition augmentent dans la zone d'étude. Mars et avril sont les mois les plus à risque de gel dans la zone d'étude, où se démarque la culture d'amandiers et de céréales sèches et irriguées, avec plus de 4000 km<sup>2</sup> présentant un risque de gel important. Une cartographie mensuelle des risques en très haute résolution est générée afin de servir à la future planification agricole de la zone d'étude.

**Mots-clés:** risque ; cultures ; dangerosité ; vulnérabilité ; cartographie

---

**Abstract.** *High resolution mapping of frost risk: hazard, vulnerability and agriculture exposure (Southeast Spain)*

---

Frost risk in the southeast of Spain has historically led to significant economic losses for the fruit and vegetable sector. The agricultural sector in the Segura river basin covers 8,161 km<sup>2</sup>, slightly more than 43% of the total study area. Frost days, which mainly occur due to nocturnal temperature inversion processes, regularly affect crops in the area every year. The factors that explain the evolution and calculation of the frost risk (hazard, vulnerability and exposure) are analyzed from a spatio-temporal point of view, with particular emphasis on the analysis of the frost period (FP) (1950-2020). The results show a clear decrease in the frost hazard in the last seven decades (1950-2020), while vulnerability and exposure increase in the study area. March and April are the months with the highest frost risk in the study area, notably in potentially affecting the cultivation of almond trees and dry and

irrigated cereals, with more than 4,000km<sup>2</sup> at significant frost risk. Very high resolution monthly mapping is generated, with the aim of providing a useful tool in the future agricultural planning of the study area.

**Keywords:** risk; crops; hazard; vulnerability; mapping

---

## Sumario

- |                    |                             |
|--------------------|-----------------------------|
| 1. Introducción    | 4. Discusión y conclusiones |
| 2. Datos y métodos | Referencias bibliográficas  |
| 3. Resultados      |                             |

## 1. Introducción

Las temperaturas mínimas extremas y las heladas asociadas han sido secularmente un riesgo natural para la sociedad, especialmente en las actividades socioeconómicas. Aunque los riesgos de inundaciones han recibido un tratamiento científico más exhaustivo, otros peligros de origen meteorológico (sequías, viento, granizos o las heladas) se contemplan también en la normativa sectorial correspondiente, en la Ley del Seguro Agrario Combinado de 1978 (Olcina Cantos, 2009).

En las últimas décadas, el número de desastres naturales con impactos económicos importantes se ha incrementado drásticamente, de modo que se han triplicado las pérdidas en dos billones de dólares respecto a las décadas anteriores en todo el mundo (Ripple et al., 2019). El riesgo de frío extremo y bajas temperaturas también parece estar aumentando en los últimos años, a pesar de la reducción de la peligrosidad (Garatwa y Bollin, 2002). Además, los efectos en la mortalidad que causa el frío en España son similares a los del calor, con unas cifras diarias durante las olas de frío de 3,48 muertes/día. En España, sería muy necesaria la creación de planes de prevención frente al frío para cada nivel regional, ya que permitiría reducir la mortalidad atribuible a las bajas temperaturas y también los costes socioeconómicos (Carmona et al., 2016).

El calentamiento global, con temperaturas medias más elevadas en primavera y una mayor variabilidad climática, ha alterado los estados fenológicos de los cultivos, lo que ha generado un mayor riesgo de daños por heladas, especialmente en primavera (Hänninen, 1991, 1995; Kramer et al., 1996, 2000). Estos cambios también han sido observados recientemente en el suroeste de Australia, en la región del Trentino (Italia), en Illinois (EE. UU.) y en el noreste de Inglaterra (Rigby y Porporato, 2008; Eccel et al., 2009; Crimp et al., 2015).

En efecto, la agricultura se encuentra muy sometida a la evolución de la meteorología anual, con una constante exposición a temperaturas inferiores a 0 °C durante la época fría en el hemisferio norte (octubre a mayo). El daño por heladas constituye uno de los principales peligros climáticos a escala planetaria

para los cultivos (Synder y Melo-Abreu, 2005), de ahí, el interés en las últimas décadas por cartografiar las heladas desde el punto de vista territorial.

La helada tiene lugar cuando la temperatura del aire es igual o inferior a 0° a una altura de 1,5 m sobre el suelo y dentro de un abrigo meteorológico homologado. Un estudio realizado por Chemung (1995) mostró que las heladas se forman cuando la temperatura de la superficie cae por debajo de los 0 °C y el vapor de agua en la atmósfera se condensa y se congela, aunque existen las heladas con un punto de rocío muy bajo (muy perniciosas). Cada planta tiene un umbral más allá del cual es dañada por la disminución de las temperaturas.

Las heladas tardo-invernales durante la primavera pueden menoscabar los brotes de los cultivos y provocar daños en la fruta durante la cosecha (Molitor et al., 2014; Schulze et al., 2014). Son de particular preocupación para los productores las heladas que ocurren en las plantas durante o después de la brotación, y que son sensibles a la temperatura de congelación.

La susceptibilidad al perjuicio por heladas aumenta a medida que los brotes continúan desarrollándose, lo que hace crecer la vulnerabilidad (Trought et al., 1999). En climas templados o altamente continentales, el daño por heladas durante esta etapa crítica puede ser persistente a pesar de tener suficiente acumulación de calor durante el día (Hall y Jones, 2010; Yau et al., 2014). Desde una perspectiva económica, el daño por heladas reduce el promedio de rendimiento hasta en un 39% (Molitor y Junk, 2011). Por lo tanto, es importante ubicar nuevos cultivos en terrenos donde la probabilidad de heladas primaverales sea baja para evitar las pérdidas en el futuro (Trought et al., 1999).

En los últimos años se ha avanzado considerablemente en el estudio del impacto de las heladas en los cultivos de todo el mundo. Los análisis de umbrales térmicos en diferentes tipos de cultivos se han desarrollado durante las últimas décadas, y entre ellos destacan especialmente el elaborado por Snyder y Melo-Abreu (2010) y el de Chaar (2013) en cultivos de frutales.

A principios de la década de los noventa, se realiza cartografía del riesgo de helada entre Sídney y Melbourne (Australia) con la utilización de datos observacionales en superficie (Laughlin y Kalma, 1990). En territorios susceptibles a las heladas, como la región de Otago (Nueva Zelanda), es necesario conocer detalladamente la frecuencia y el momento de las heladas para minimizar el riesgo de daños. En ese sentido, se utilizan datos del Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) de la NOAA, combinados con datos observacionales de temperatura, para generar cartografía de 1 km de resolución espacial sobre la longitud del periodo de heladas (Tait y Zheng, 2003).

En Sudamérica, se han elaborado diversos análisis cartográficos y se han utilizado índices agroclimáticos de peligrosidad de heladas (IPH), como en el caso de Argentina (Monterubbianesi y Cendoya, 2001), en sus áreas montañosas (Pascale et al., 1997) o en la región del Charco (Jiménez y Snaider, 2014). Los trabajos en Argentina son muy prolíficos en los últimos años, y entre ellos destaca el de Fernández-Long et al. (2016), que hace un análisis exhaustivo sobre el periodo de heladas con la utilización de un total de 124 estaciones meteorológicas. Además, se estudia el riesgo de helada en el Altiplano

no boliviano, con un análisis de la evolución temporal del periodo de heladas (Le Tacón et al., 1992).

Finalmente, en la península Ibérica destacan los trabajos realizados sobre daños por heladas en diferentes tipos de cultivos, como es el caso del almendro en Aragón (Konrad y Lemieux., 2005) o el estudio del riesgo agroclimático de heladas en la provincia de Lugo, con un análisis estadístico pormenorizado de las características de las heladas (Vilatte y Nogueiras, 2008). En época reciente, se desarrolla un geoportal para el inventario y la evaluación de daños por heladas en los cítricos de la Región de Murcia (Erena et al., 2017), así como un análisis del riesgo de helada para la misma región (Pérez Morales, 2016).

El objetivo principal de la presente investigación es crear una cartografía del riesgo de heladas de muy alta resolución espacial. Para ello, el trabajo se complementa con un exhaustivo análisis de la peligrosidad, la vulnerabilidad y la exposición, elementos básicos en la cuantificación del riesgo. La principal novedad metodológica en el análisis de la peligrosidad radica en la caracterización temporal del período de heladas (inicio y final del mismo) en diferentes observatorios meteorológicos del área de estudio, así como el uso de termografías satelitales. Por último, se elaboran mapas de peligrosidad, vulnerabilidad, exposición y riesgo mensualmente para el periodo fenológico de los cultivos predominantes del área estudiada (de noviembre a abril).

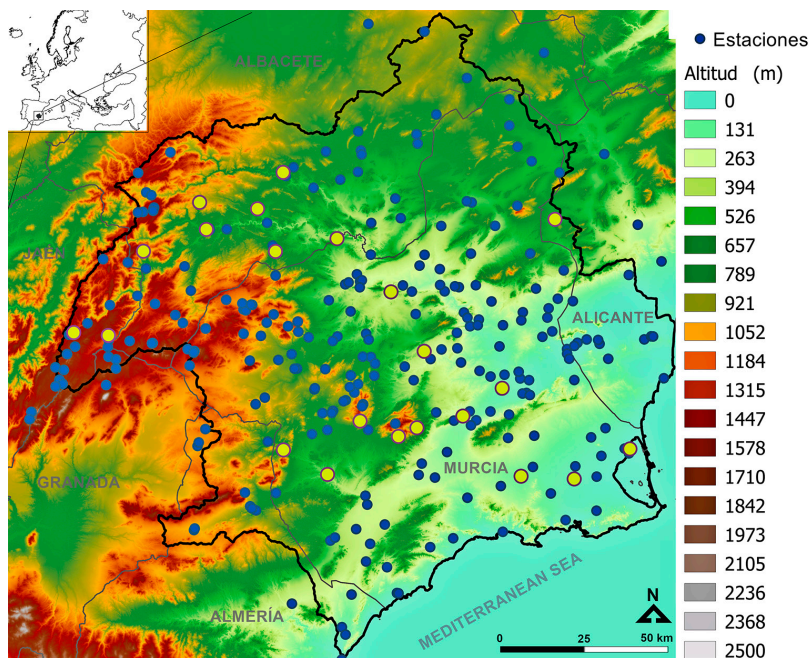
## 2. Datos y métodos

### 2.1. Datos

La Demarcación Hidrográfica del Segura (DHS), localizada en el sureste de la península Ibérica, es una de las cuencas hidrográficas más importantes de España, con una superficie de 18.870 km<sup>2</sup> (figura 1). El régimen térmico se caracteriza por temperaturas medias anuales templadas, pero sujetas a la influencia orográfica y al acusado desnivel altitudinal, con valores medios muy heterogéneos, entre 19,6 °C en Águilas-Murcia (litoral meridional) y 10,6 °C en Pontones-Jaén (Sierra de Segura). La marcada continentalidad en zonas de interior, lejos de la línea litoral, incrementa los extremos térmicos durante el invierno y el verano (Conesa García y Alonso Sarría, 2006). La relativa frecuencia (cada 3,4 días) de la llegada de los frentes atlánticos al oeste de la cuenca, especialmente en invierno (Martín Vide, 2005), origina una marcada degradación pluviométrica, desde los 900 mm anuales en la Sierra de Segura (901,6 mm en Pontones) a promedios inferiores a 250 mm en los espacios subdesérticos litorales (Águilas, con 217,0 mm).

A fines de la década de los ochenta, se produjo un notable desarrollo de la horticultura intensiva que adquirió una enorme importancia en la región, lo que favoreció una política exportadora con un modelo muy exitoso de inserción en las cadenas agrícolas mundiales (Hernández Pedreño, 2014). La importancia del sector agrario en el sureste peninsular es capital, hasta representar, por ejemplo, el 4,6% del PIB de la Región de Murcia. Además, el sector agroalimentario

**Figura 1.** Delimitación natural de la Demarcación Hidrográfica del Segura (DHS). Los puntos amarillos muestran las 22 estaciones meteorológicas utilizadas para el análisis de índices climáticos



Fuente: elaboración propia.

de esta región genera el 20,0% del PIB, con un volumen de 2,5 millones de toneladas, cifra que representa el 12,9% del total nacional (Martínez-Carrasco y Martínez Paz, 2012). Las heladas, además, han comportado históricamente graves pérdidas económicas para el campo sureste peninsular, incluso en valles y depresiones prelitorales, como ha sido analizado en los últimos años (García Moreno et al., 2010; Conesa et al., 2014; Guillén-Navarro et al., 2019).

Para la generación de cartografía de alta resolución de peligrosidad, vulnerabilidad, exposición y riesgo de heladas, se han utilizado los siguientes datos de entrada.

### *2.1.1. Usos del suelo para el análisis del tipo de cultivo (TC) y fenología del cultivo (FC)*

El análisis de usos del suelo se realizó utilizando la información facilitada por la sede electrónica del catastro (<<https://www.sedecatastro.gob.es/>>). Se estudian los 129 municipios que comprende la Demarcación Hidrográfica del Segura (DHS), pertenecientes a las provincias de Alicante, Murcia, Albacete, Jaén, Granada y Almería, con un total de 1.418.620 parcelas con información

de TC (figura 4). La cartografía se obtiene a partir de un vuelo fotogramétrico realizado a escala 1/20.000 o 1/15.000 (para zonas muy parceladas). Los ortofotos se obtienen a escala 1/5.000 o 1/2.000 respectivamente, a partir de las cuales se realiza el retintado de la parcela catastral y la digitalización de las líneas. Ha sido utilizada la fuente de datos del catastro debido a las siguientes ventajas respecto a otras coberturas de usos de suelo:

- Facilidad en la descarga de datos abiertos.
- Actualización del parcelario a fecha del 24/01/2020.
- Resolución espacial a una mayor escala (mayor detalle), en detrimento de otras coberturas como SIOSE (1/25.000).
- Única cobertura de usos de suelo con información de tipo de cultivo por parcela (código de cultivo), a diferencia del resto donde se realizan agrupaciones genéricas de cultivos.

La base de datos Corine Land Cover (CLC) también ha sido utilizada para calcular la evolución de la superficie agraria del área de estudio. El inventario de CLC se inició en 1985 y se han realizado actualizaciones en 2000, 2006, 2012 y 2018. Se trata de un inventario de cobertura terrestre en 44 clases, utilizando una unidad mínima de mapeo (MMU) de 25 hectáreas (ha) para fenómenos areales y un ancho mínimo de 100 m para fenómenos lineales.

#### *2.1.2. Pendiente (P)*

El mapa de pendientes ha sido obtenido del modelo digital de elevaciones (MDE), con paso de malla de 25 metros (resolución espacial), procedente del Centro Nacional del Instituto Geográfico Nacional (CNIG). El MDE se ha obtenido por interpolación de modelos digitales del terreno de 5 metros de paso de malla, procedente de la interpolación a partir de la clase terreno de vuelos LIDAR del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA), gracias a la estereocorrelación automática de vuelos fotogramétricos del PNOA.

#### *2.1.3. Valor económico del cultivo (VC)*

La estadística de índices y precios percibidos agrarios por el agricultor mide la evolución nacional, mensual y anual de los índices y precios que percibe el agricultor por la venta de los productos agrarios que genera (cereales, leguminosas, patatas, cultivos industriales y forrajeros, cítricos, frutas no cítricas, frutas frescas y secas, hortalizas, vino y mosto, aceite, semillas, flores y plantas ornamentales). La información bruta ha sido descargada de la web del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, con la consulta de informes desde enero de 2005 a 2020.

#### *2.1.4. Índices climáticos asociados a temperaturas mínimas*

Los índices climáticos se han obtenido a partir del análisis de datos diarios de temperatura mínima absoluta (°C) de una base de datos de 346 series meteorológicas, pertenecientes a las redes meteorológicas de la Agencia Estatal de

Tabla 1. Características de los observatorios meteorológicos (1950-2020)

ID	Altitud (m)	SNHT	RMSE	POD	Roturas	Nombre serie
7.228	70	89,5	1,9	99	0	Alcantarilla
7.083	360	431,7	2,1	99	0	Emb. Cenajo
7.031	4	96,3	1,7	99	0	San Javier
7.226	180	249,1	1,8	96	0	Librilla CHS
7.045	1.350	1.100,4	2,5	96	0	Pontones CHS
7.023	140	389,5	1,4	93	0	Fuente Álamo CHS
7.168	395	129,6	1,8	74	1	Emb. Cierva
7.066	680	795,2	2,0	74	2	Emb. Fuensanta
7.219	760	152,3	1,7	70	3	Huerta Espuña
7.129	312	947,4	2,3	69	3	Emb. Alfonso XIII
7.205	450	1.126,8	1,9	69	1	Emb. Puentes
7.056	1.340	1.108,3	2,1	69	1	S. de la Espada CHS
7.059	980	487,4	1,9	68	5	Arguellite
7.026	50	175,6	1,5	65	2	Pozo Estrecho
7.198	690	444,6	2,6	64	2	Emb. Valdeinfierno
7.214	799	57,8	1,7	58	1	Alquerías
7.077	630	122	2,3	50	2	Elche de la Sierra
7.081	724	797	1,5	40	6	Socovos
7.206	861	514,6	2,0	32	3	Zarz. de Totana
7.092	641	549,8	1,5	30	3	Liétor CHS
7.065	823	694	2,5	30	4	Molinicos
7.247	575	126,2	2,0	27	10	Pinoso CHS

SNHT: prueba estándar de homogeneidad normal en series de anomalías; RMSE: error cuadrático medio de los datos estimados; POD: porcentaje de datos originales de las series ya homogeneizadas.

Fuente: elaboración propia a través de datos de AEMET.

Meteorología (AEMET); a la Red del Sistema de Información Agrario de Murcia, dependiente del Instituto Murciano de Investigación y Desarrollo Agrario y Alimentario de la Comunidad Autónoma de la Región de Murcia (SIAM IMIDA), y al SAIH de la Confederación Hidrográfica del Segura (CHS) (figura 1). La densidad de las series meteorológicas utilizadas es una por cada 47,4 km<sup>2</sup>, con una distribución homogénea en el área de estudio.

Para el análisis estadístico de los índices climáticos, se han utilizado 22 series meteorológicas de larga duración, pertenecientes a la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) (1950-2020) (tabla 1). Las variables empleadas para el análisis y la elaboración de la cartografía de peligrosidad son las siguientes:

- Temperatura media de las mínimas (°C) (TN<sub>m</sub>).
- Temperatura mínima absoluta mensual y anual (°C) (TN<sub>n</sub>).
- N.º de días de helada o *frost days* (FD) registrados por mes y año.
- N.º de días de helada con temperatura mínima igual o inferior a -2 °C (FD -2).
- N.º de horas de helada o *frost hours* (FH) registradas por mes y año.

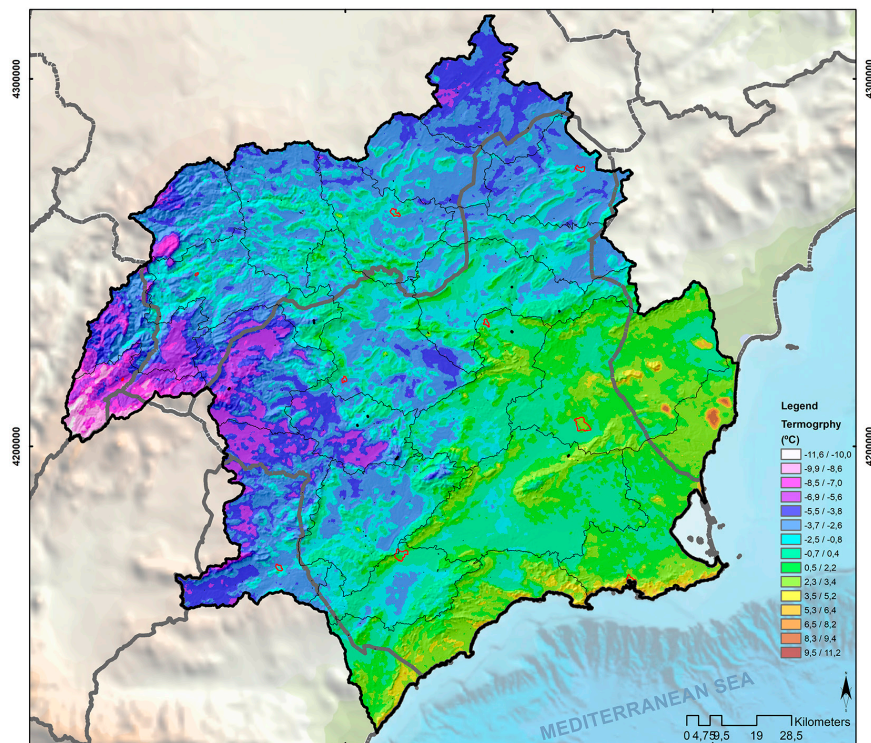


- Probabilidad de alcanzar o descender de  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$  (FP5) en cada mes o año.
- Primera helada del periodo de heladas o *first frost fallen* (FFF).
- Última helada del periodo de heladas o *last spring frost* (LSF).
- Longitud del periodo libre de heladas o *frost free period* (FFP).
- Longitud del periodo de heladas o *frost period* (FP).

### 2.1.5. Termografías satelitales

Los productos satelitales del Visible Infrared Imaging Radiometer Suite, Land Surface Temperature (VIIRS LST) se utilizan para realizar las termografías (temperaturas superficiales nocturnas) (figura 2), obtenidas del sitio web <<https://worldview.earthdata.nasa.gov/>>. El producto VIIRS LST se obtiene del instrumento VIIRS a bordo del satélite SUOMI-NPP, una vez se convierten las unidades de radiancia del brillo de la superficie terrestre a temperatura del aire a 1,5 m ( $T_a$ ) (Nicolòs et al., 2018). Se trata de un radiómetro de barrido que mide radiancias a escala global en los espectros visible e infrarrojo sobre tierra, atmósfera, criosfera y océanos (Hillger et al., 2013). Tiene una órbita

Figura 2. Ejemplo de termografía satelital elaborada (VIIRS LST) para el área de estudio



Fuente: elaboración propia.

solar sincrona a una altitud de 829 km y con tiempos de cruce ecuatorial de 1:30 pm/1:30 am, con un paso aproximado por el área de estudio entre la 1:40 y las 2:40 am (Niclòs et al., 2018). Las imágenes del sensor VIIRS se dividen en 22 bandas, con una cobertura espectral de 0,412 a 12  $\mu\text{m}$ . Entre las 22 bandas hay cinco canales de imagen de alta resolución (bandas I), 16 canales de resolución moderada (bandas M) y una banda día/noche (*day/night bands*, DNB). Las bandas I tienen una resolución espacial de 375 m y las bandas M (y DNB) de 750 m. Además, poseen una resolución de 0,7 \* 0,8 km y un total de 3200 \* 3200 columnas (Minnett et al., 2014). La precisión de medición (sesgo) y la precisión (1 sigma) especificadas para el producto VIIRS LST son 1,4 y 0,5 K, respectivamente, que deben cumplirse cuando la máscara de nube VIIRS indica una alta confianza en condiciones claras.

## 2.2. Métodos

### 2.2.1. Índice de peligrosidad de helada (IPE)

La peligrosidad es la probabilidad estadística de ocurrencia de un fenómeno natural potencialmente dañino, bien sea dentro de un período específico de tiempo como en un área determinada. Cada peligro plantea un nivel de riesgo que varía espacial y temporalmente (Wilhite, 2000). Se propone el índice de peligrosidad de helada (IPE) según una ponderación sobre base 100 (eq. 1) otorgándole el siguiente peso:

$$\text{IPE} = \frac{\text{TNn (10)} + \text{TNm (10)} + \text{FD (15)} + \text{FH (15)} + \text{FP5 (20)} + \text{Termografía (30)}}{6} \quad (1)$$

donde: TNn es la temperatura mínima absoluta; TNm la temperatura media de las mínimas; FD días de heladas; FH hora de heladas; FP5 probabilidad de temperatura mínima < -5,0 °C, y termografía es el producto elaborado a través de VIIRS LST.

La cartografía de TNn, TNm, FD, FH y FP5 (figura 3) se realiza mediante un proceso de interpolación (eq. 2). Se hace mediante el método de *kriging* ordinario (píxel de 25 m), con un modelo de semivariograma esférico. Se agrega un segundo factor complementario con el gradiente altitudinal:

$$X_{\text{Det}} = X_{\text{mensual}} + (R (Z_{\text{Det}} - Z_{\text{estación}})) \quad (2)$$

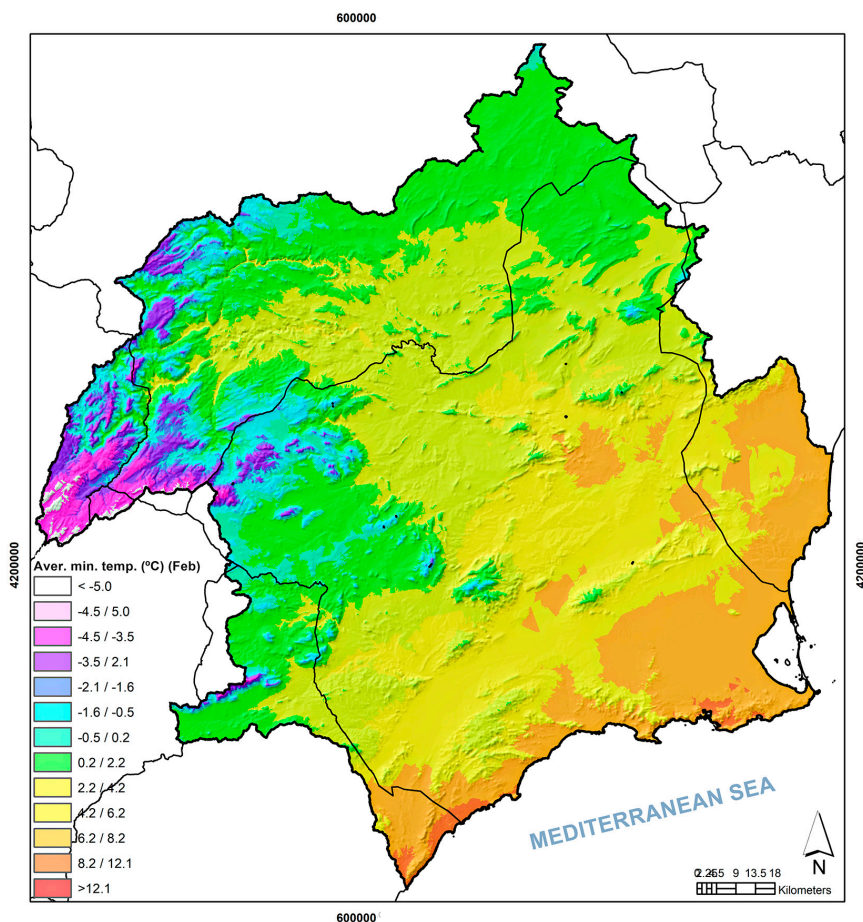
donde:  $X_{\text{Det}}$  es la variable determinada;  $X_{\text{mensual}}$  es el valor que analizar de la estación meteorológica; R es el gradiente térmico del total de estaciones analizadas respecto a su altitud;  $Z_{\text{Det}}$  es la altitud homogénea elegida para todas las estaciones meteorológicas, y  $Z_{\text{estación}}$  la altitud de cada estación (eq. 3).

$$T_{xy} = X_{\text{Det}} + (R (Z_{\text{DEM}(x,y)} - Z_{\text{Det}})) \quad (3)$$

donde:  $Z_{DEM(x,y)}$  es la altitud para cada píxel del modelo digital de elevaciones (DEM).

Las horas de helada muestran la duración de las temperaturas bajo cero, de vital importancia para el cálculo del IPE. La intensidad y especialmente la duración son los factores que más inciden en los daños por helada. Por ejemplo, un estudio realizado por Urbina Vallejo (2007) para la variedad Delicious de manzana estima daños con una helada de  $-4,0\text{ }^{\circ}\text{C}$  según el estado fenológico de la floración. Concluye daños del 3% con 0,5 horas con 1 hora; del 47% con 2 horas, y del 70% con 4 horas de duración.

Figura 3. Ejemplo cartográfico generado para la elaboración de peligrosidad de heladas. Temperatura media de las mínimas ( $^{\circ}\text{C}$ ) para el periodo frío (de noviembre a abril)



Fuente: elaboración propia.

Por su parte, el producto de termografía (VIIRS LST) se utiliza para enfatizar y ubicar la distribución espacial de las piscinas de aire frío o *cold air pools* (CAP) en el área de estudio. El uso de este producto se considera especialmente relevante, ya que es una herramienta clave para el mapeo del riesgo de heladas. Para el cálculo y la elaboración de índices de riesgo de heladas, se han incorporado imágenes de satélite en algunas investigaciones de los últimos años, como la de Nilahue (Chile) de Santibáñez (2013).

Se utiliza el subproducto Band I5 Night (VIIRS LST) del VIIRS Environmental Data Record (EDR), con una resolución espacial de 750 m y aproximadamente 1,5 km en el borde de la franja. Emplea el algoritmo de ventana dividida (Yu et al., 2005), con temperaturas de brillo ( $T_i$ ) medidas en dos bandas espectrales de VIIRS: M15 colocado a 10,76  $\mu\text{m}$  ( $i = 15$ ) y M16 colocado a 12,01  $\mu\text{m}$  ( $i = 16$ ). Se utilizan diferentes conjuntos de coeficientes ( $a_j$ , con  $j = 0-4$ ) para el día y la noche y para 17 tipos de superficie de los mapas de clasificación del Programa Internacional de Geosfera-Biosfera (IGBP) (Guillevic et al., 2014; Liu et al., 2014).

El algoritmo (eq. 4) utiliza temperaturas de brillo medidas en el canal M15 ( $T_{15}$ ) y el canal M16 ( $T_{16}$ ) centrados en 10,76  $\mu\text{m}$  y 12,01  $\mu\text{m}$  (4,2), respectivamente (Schroeder, 2017).

$$\text{VIIRS LST} = a_0 + a_1 T_{15} + a_2 (T_{15} - T_{16}) + a_3 (\sec\theta_v - 1) + a_4 (T_{15} - T_{16})^2 \quad (4)$$

donde:  $a_k$  (con  $k = 0$  a  $4$ ) son los coeficientes del algoritmo y  $\theta_v$  es el ángulo cenital del sensor. Se obtuvieron conjuntos de coeficientes diurnos y nocturnos para 17 tipos de superficies diferentes a partir del análisis de regresión de las simulaciones de transferencia de radiación MODTRAN para condiciones de superficie y atmosféricas representativas a escala mundial.

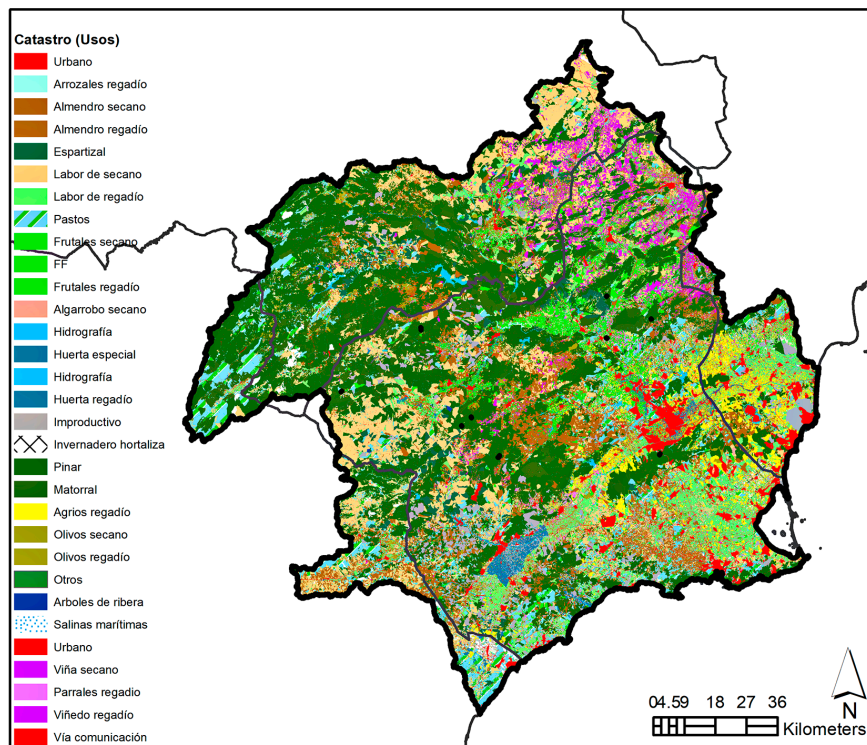
La elaboración de la cartografía de termografía final se realiza con el promedio de 50 mapas (madrugadas estables con procesos de inversión de temperatura nocturna, ITN), libres de nubosidad (0%), y elegidos con el análisis de datos de temperaturas superficiales mínimas y datos de sondeos atmosféricos durante los últimos inviernos de observación (2016-2020) (figura 2).

### 2.2.2. Índice vulnerabilidad de helada (IVE)

Westgate y O'Keefe (1976) son los primeros en implantar el concepto de vulnerabilidad al definir un desastre como la interacción entre fenómenos naturales extremos y una sociedad vulnerable. Los riesgos naturales tienen la característica de representar un peligro para las diferentes entidades sociales, y son el resultado de los sistemas humanos y sus vulnerabilidades asociadas hacia ellos (Alcántara-Ayala, 2002).

La vulnerabilidad agrícola ante las heladas está marcada por el tipo y la ubicación de los cultivos en un territorio. El asentamiento de variedades poco resistentes al frío en zonas de inversión térmica nocturna (ITN) hace que estas sean altamente vulnerables, especialmente al final del periodo de heladas (finales de invierno e inicios de primavera).

Figura 4. Usos del suelo en el área de estudio, obtenidos a través del catastro



Fuente: elaboración propia.

Se propone el índice de vulnerabilidad de heladas (IVE) según una ponderación sobre base 100 (eq. 5) otorgándole el siguiente peso:

$$\text{IVE: } \frac{\text{TC (30)} + \text{FC (45)} + \text{P (25)}}{3} \quad (5)$$

donde: TC es el tipo de cultivo; FC la fenología del cultivo, y P es la pendiente.

- Cada tipo de cultivo (TC) tiene una vulnerabilidad según las características vegetales. Los valores, por ejemplo, difieren significativamente entre campos de arroz o invernaderos de hortalizas y cultivos de cítricos (mucho más vulnerables) (tabla 2).
- La fenología del cultivo (FC) o estado del ciclo vegetativo (aparición, transformación o rápida desaparición de órganos vegetales) es muy influyente en el efecto de las heladas para los meses que componen el período frío (FP). Marzo y abril suelen presentar estados fenológicos más vulnerables,

en que la aparición de brotes y frutos pequeños, junto con la aparición ocasional de días helados, aumenta considerablemente la sensibilidad a las bajas temperaturas.

- La pendiente orográfica (P) es un factor de ubicación clave. Los sectores orográficamente deprimidos acumulan aire más frío durante las madrugadas estables. Para un mismo tipo de cultivo, aquellos que se asientan en el fondo del valle experimentarán una mayor vulnerabilidad. Por tanto, a mayor pendiente orográfica, menor vulnerabilidad. El factor S es utilizado por Simbaña Chorlango (2014) en la elaboración de los mapas de riesgo de heladas para Pichincha (Ecuador).

### 2.2.3. Índice de exposición de helada (IEE)

La exposición abarca todos los elementos, procesos y temas que podrían verse afectados por un evento peligroso. En consecuencia, la exposición es la presencia de activos sociales, económicos, ambientales o culturales en áreas que pueden verse afectadas por un peligro natural o antrópico (Birkmann, 2013).

El índice de exposición de helada (IEE) se calcula a través de la valoración económica de la tipología de cultivo (VE). La reclasificación está basada igualmente en 14 niveles. Así pues, los más elevados (13-14) hacen referencia

**Tabla 2.** Reclasificación de vulnerabilidad según tipos de cultivo (según estado fenológico de noviembre a abril) y exposición general

Tipo de cultivo	Nov.	Dic.	En.	Febr.	Mzo.	Abr.	Exposición
Arrozales regadío	13	13	13	13	13	13	12
Almendo seco	13	13	7	2	3	2	2
Almendo regadío	13	13	8	3	4	3	2
Labor de seco	6	4	4	5	3	2	13
Cereal riego	5	3	3	4	2	1	13
Cereal seco	6	4	4	5	3	2	13
Labor de regadío	4	3	1	1	1	1	6
Frutales seco	9	10	4	2	1	1	7
Frutales regadío	10	11	5	3	2	1	7
Algarrobo seco	9	7	5	4	3	1	9
Algarrobos regadío	8	5	4	3	2	1	9
Huerta regadío	4	3	1	1	1	1	6
Invernaderos flores	13	8	6	6	8	12	1
Invernaderos hortalizas	13	10	8	8	10	13	6
Agrios regadío	7	7	5	4	3	2	10
Olivos seco	13	13	13	8	3	1	11
Olivos regadío	13	13	13	9	4	1	11
Higueras seco	13	13	13	11	2	1	4
Higueras regadío	13	13	13	12	3	2	4
Víña seco	10	9	9	9	4	2	9
Víñedos regadío	10	10	10	10	5	3	9

Fuente: elaboración propia.

a valores económicos más bajos (IEE extremadamente baja o nula), mientras que los índices de reclasificación más bajos (1-2) coinciden con la exposición más elevada (excepcionalmente alta y extraordinariamente alta), y el valor económico más elevado de los cultivos (tabla 2).

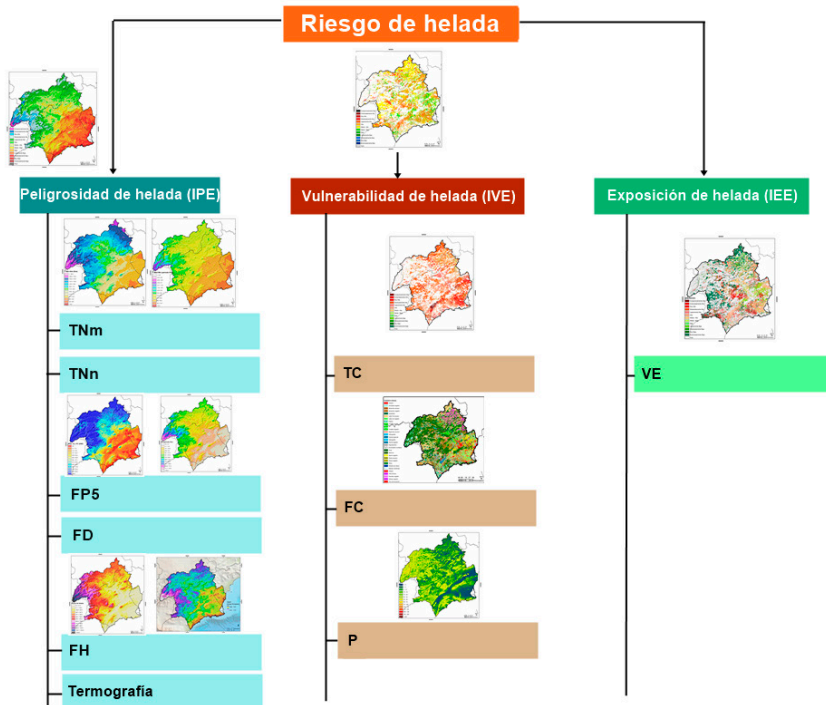
#### 2.2.4. Índice del riesgo de helada (IRE)

El término riesgo viene definido como el producto de un peligro y sus consecuencias. Donde no hay personas o valores que puedan verse afectados por un fenómeno natural no hay riesgo (Kron, 2005), es decir, aparece el riesgo en la interacción potencial entre sociedad y eventos naturales extremos (Montz et al., 2017). Para la realización y el análisis de la cartografía, se propone el índice del riesgo de helada (IRE) representada en la eq. 6:

$$IRE = IPE + IVE + IEE \quad (6)$$

donde: IPE es el índice de peligrosidad de helada; IVE el índice de vulnerabilidad de helada, e IEE el índice de exposición de helada.

Figura 5. Flujo de trabajo para la obtención de la cartografía final del riesgo de helada



Fuente: elaboración propia.

La cartografía final de riesgo de heladas se ha generado promediando estadísticamente los mapas de peligrosidad, vulnerabilidad y exposición a heladas (figura 5). Debe considerarse que solo aparecen valores en el mapa de vulnerabilidad, exposición y riesgo final en aquellos píxeles donde hay información de cobertura agrícola, y por lo tanto existe vulnerabilidad, exposición y riesgo de heladas. Todos los mapas utilizados en la preparación de los mapas finales se han sometido a un proceso de reclasificación (con 14 niveles o umbrales) para facilitar los promedios cartográficos finales.

### 3. Resultados

#### 3.1. Análisis espaciotemporal de la peligrosidad de heladas (1950-2020)

La peligrosidad de heladas se ha reducido drásticamente durante las últimas décadas en el sureste de la península Ibérica. Después de una década particularmente fría en los años cincuenta del siglo pasado, los índices fríos tienden a ser cada vez más suaves a partir de los sesenta. La temperatura media de las mínimas (TNm), así como los valores mínimos absolutos por año, aumenta, se reducen los días de heladas, y los días con temperaturas iguales o inferiores a  $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$  experimentan un notable descenso (tabla 3).

Un aspecto trascendental para el análisis de heladas es la caracterización del período anual de heladas (FP) y sus características. Generalmente, se observa una importante reducción en la duración del período, con un cambio temporal de promedios de más de 80 días en las décadas de los cincuenta, sesenta y setenta, al no superar los 70 días durante las últimas tres décadas (1990, 2000 y 2010). La reducción de la peligrosidad de heladas también se manifiesta en el cambio de los extremos del período, especialmente con el avance de la última helada del período (LSF).

Los eventos de heladas en primavera y otoño tienen un claro impacto en el ciclo vegetativo de las plantas. Cuando se reducen los umbrales térmicos, el daño al sistema vegetativo (a flores, frutos...) puede arruinar la cosecha (Chmielewski y Rötzer, 2001; Menzel, 2000). De esta manera, los cambios temporales del período de heladas, así como el inicio y el final del mismo,

**Tabla 3.** Promedio estadístico en diferentes índices climáticos por década para el conjunto de 22 observatorios meteorológicos del área de estudio (1950-2020)

Década	TNm ( $^{\circ}\text{C}$ )	TNn ( $^{\circ}\text{C}$ )	FD (días)	FD $-2$ (días)	FFF (días)	LSF (días)	FFP (días)	FP (días)
1950-1960	2,6	-5,4	26,0	12,8	16 dic.	8 mzo.	284,6	80,4
1960-1970	3,2	-4,5	18,6	8,2	4 dic.	1 mzo.	282,2	82,8
1970-1980	3,5	-4,0	20,8	8,7	4 dic.	10 mzo.	277,6	87,4
1980-1990	3,4	-4,3	18,5	8,8	10 dic.	5 mzo.	288,0	77,0
1990-2000	3,8	-3,0	15,1	6,6	8 dic.	27 febr.	296,4	68,6
2000-2010	3,7	-3,6	17,0	8,7	8 dic.	26 febr.	295,3	69,7
2010-2020	3,9	-3,3	15,4	7,0	11 dic.	3 mzo.	298,8	66,2

Fuente: elaboración propia.

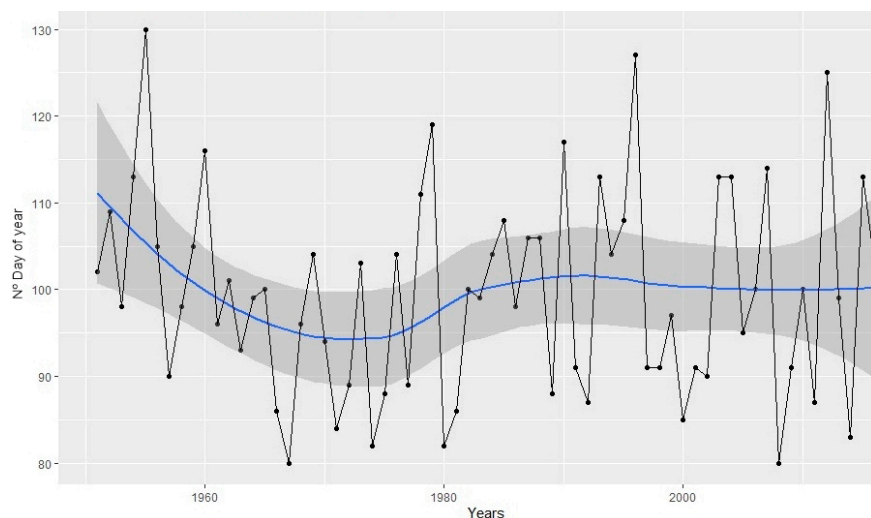


determinan en gran medida la salud del ciclo vegetativo anual (Graczyk y Kundzewicz, 2016; Wypych et al., 2017).

Las primeras heladas (FFF) del período (FP) no son especialmente relevantes en el área de estudio, ya que la gran mayoría de cultivos presentan estados fenológicos poco vulnerables a las bajas temperaturas en los meses de noviembre y diciembre. Más temidas son las últimas heladas primaverales (LSF), ya que actúan en periodos vegetativos especialmente vulnerables (floración avanzada y primeras etapas de los frutos). Las heladas durante los meses de marzo y abril siguen siendo frecuentes en los sectores occidentales y elevados del área de estudio, así como en zonas de valles de altitud media, y pueden aparecer durante días aislados en zonas medias y prelitorales.

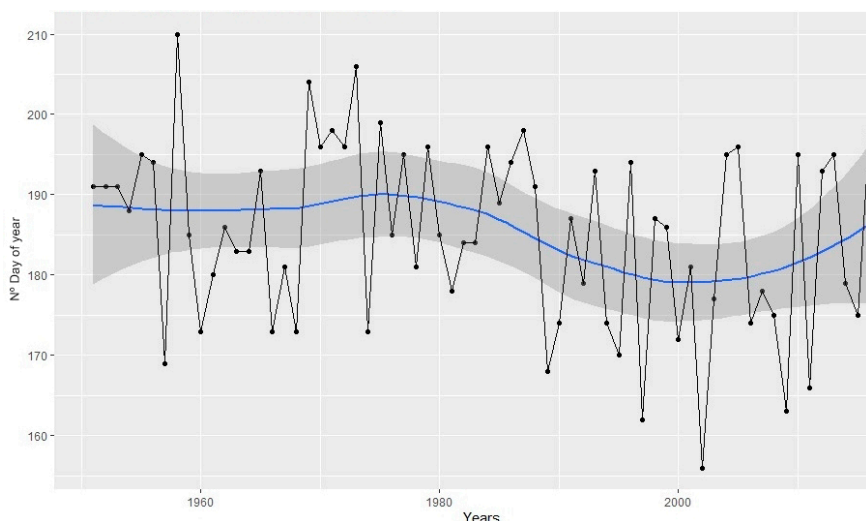
La FFF apenas ha experimentado cambios significativos desde 1950 hasta la actualidad. Sí hay un avance temporal entre finales de los sesenta y setenta, con valores que se mantienen desde principios de los noventa hasta la actualidad (figura 6). Sin embargo, la última helada primaveral (LSF) sí que experimenta un cambio mayor durante las últimas décadas. Se aprecia un retraso temporal en la aparición de la última helada, especialmente desde la década de los ochenta, que es relevante a principios de la década del 2000 (figura 7). Todo ello condiciona un acortamiento de la duración del período de heladas, con un descenso muy notable entre mediados de los setenta y la década del 2000 (figura 8). Sin duda, se trata de un resultado trascendente en la reducción de la peligrosidad de heladas. Las heladas se reducen a lo largo del año y, además, las de finales de invierno y primavera aparecen antes. Durante los últimos 70 años, los días de helada han experimentado un importante descenso en el número anual en la DHS (-1,6 días/década).

**Figura 6.** Evolución temporal de la primera helada (FFF) del período de heladas para el conjunto de las 22 estaciones meteorológicas analizadas (1950-2020)



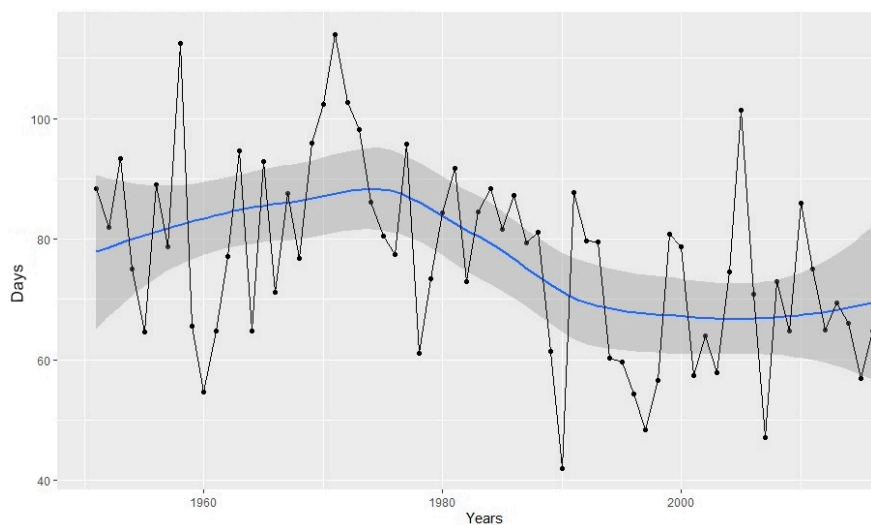
Fuente: elaboración propia.

**Figura 7.** Evolución temporal de la última helada primaveral (LSF) del período de heladas para el conjunto de las 22 estaciones meteorológicas analizadas (1950-2020)



Fuente: elaboración propia.

**Figura 8.** Evolución temporal de la duración del período de heladas para el conjunto de las 22 estaciones meteorológicas analizadas (1950-2020)



Fuente: elaboración propia.

### 3.2. Análisis de la vulnerabilidad de heladas

En los últimos años, se ha producido un importante crecimiento absoluto y relativo de la cobertura agraria en la Región de Murcia. De 1975 a 2018 hay un incremento de 2,4 millones de toneladas, según datos de la Comunidad Autónoma de la Región de Murcia (Consejería de Agricultura y Agua), lo que representa un aumento relativo del 72% (tabla 4). Por grupos de cultivos, el mayor incremento en términos absolutos se da en hortalizas (con casi un millón y medio de toneladas) y en cítricos (725.000 toneladas). Estos son cultivos muy vulnerables a la helada a partir de enero.

**Tabla 4.** Evolución de las toneladas producidas para diferentes grupos de cultivo en la Región de Murcia (1975-2018)

Grupos de cultivo	Variación (1975-2018) (%)	Variación (1975-2018) (t)
Cítricos	324,7	725.437
Frutales no cítricos	164,1	292.338
Vid	61,1	105.831
Aceituna	681,6	59.952
Hortalizas	281,3	1.342.367
Cereales	-71,5	-163.498
Tubérculo	72,5	61.895
Total	71,8	2.424.322

Fuente: Comunidad Autónoma de la Región de Murcia (Consejería de Agricultura y Agua). Elaboración propia.

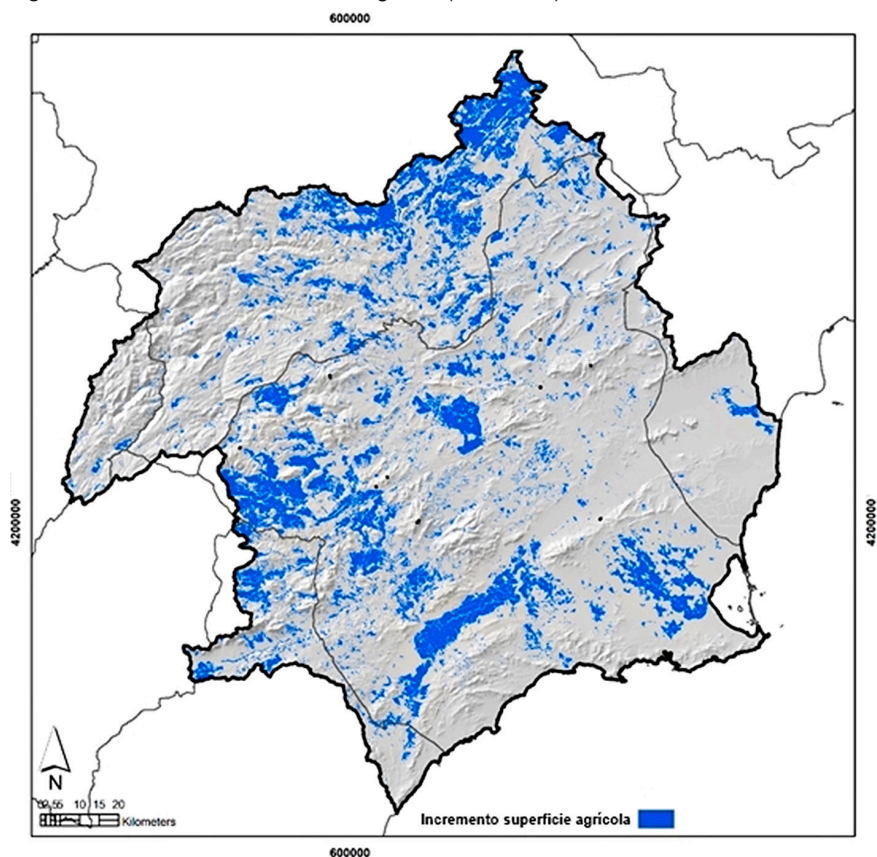
Desde el punto de vista relativo, el mayor incremento es para el olivo, con una variación del 681% en las últimas tres décadas. También ha sido relevante la variación de los árboles frutales no cítricos, con un incremento del 164,1%.

La mayor parte del aumento de la superficie agrícola se ha producido en áreas de valles, donde tradicionalmente aparecen los mejores suelos para el cultivo, lo que repercute en mejores rendimientos económicos. Estas áreas se caracterizan por registrar procesos de inversión térmica nocturna (ITN), lo que configura áreas frías nocturnas con probabilidad de heladas débiles durante los meses de febrero a abril. De 1990 a 2018, según datos de Corine Land Cover (CLC), se ha producido un aumento significativo de la superficie agrícola en casi 2.000 km<sup>2</sup>, especialmente en áreas de inversión térmica nocturna (ITN) (figura 9).

### 3.3. Análisis de la exposición de helada

La exposición a las heladas está marcada especialmente por el precio económico según el grupo de cultivo. Uno de los índices más utilizados es el precio que recibe el agricultor, que es, en definitiva, quien corre el riesgo económico de perder la cosecha por una posible helada. Según datos de la Consejería de Agricultura y Agua de la Comunidad Autónoma de la Región

Figura 9. Incremento de la cobertura agrícola (1990-2018)



Fuente: elaboración propia.

de Murcia, la variación durante los últimos 13 años es ligeramente positiva, es decir, el agricultor está percibiendo un precio algo superior por sus productos (tabla 5).

Aunque la serie estadística no es lo suficientemente amplia, sí se observa un notable incremento en el precio del viñedo, con un aumento absoluto de 3,0 euros/kg y una variación relativa del 130%. Es, sin duda, el cultivo con mayor crecimiento en los últimos años, lo que determina un incremento de la exposición a las heladas en la mayoría de tipos de cultivos. Solo el precio recibido por las hortalizas ha disminuido ligeramente en los últimos años. Mientras tanto, el resto de precios experimentaron crecimientos porcentuales poco relevantes (del 20% al 33%), aunque, desde el punto de vista del incremento absoluto, los ascensos fueron algo más importantes en la almendra (1,10 euros/kg) y la algarroba (0,50 euros/kg).

**Tabla 5.** Evolución del precio percibido por el agricultor para diferentes grupos de cultivo en la Región de Murcia (1975-2018)

Grupos de cultivo	Variación (1975-2018) (%)	Variación (1975-2018) (euros/kg)
Cítricos	47,6	0,10
Almendra	19,6	1,10
Vid	130,0	3,00
Hortalizas	-27,6	-0,32
Cereales	30,8	0,04
Garrofa	33,3	0,50
Total	4,9	0,07

Fuente: Comunidad Autónoma de la Región de Murcia (Consejería de Agricultura y Agua). Elaboración propia.

### *3.4. Análisis del riesgo de helada en el SE de la península Ibérica*

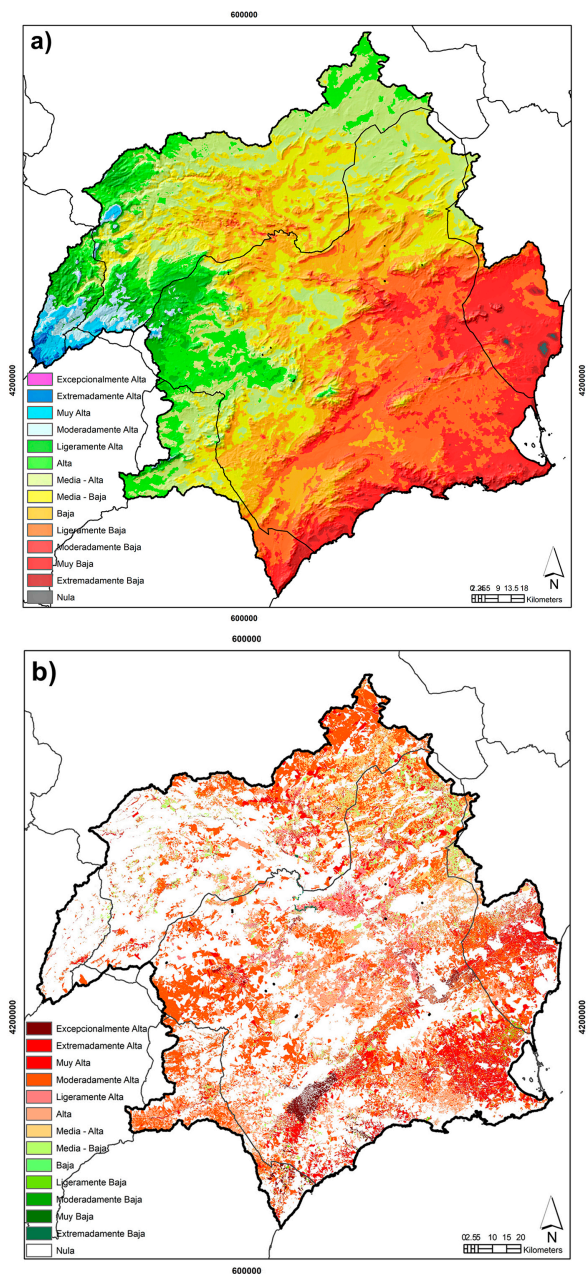
La cartografía de riesgo de heladas muestra una clara dicotomía en el área de estudio, con una franja central de separación que recorre un amplio sector del centro del área de estudio. Separa nítidamente la peligrosidad más baja en el sector oriental con la peligrosidad más importante en las áreas occidentales (figura 10a).

En los últimos años, diferentes investigaciones científicas han confirmado una alta correlación estadística entre el aumento de la temperatura media y los cambios fenológicos en los cultivos, generalmente con una floración y una maduración más tempranas del fruto (Peñuelas et al., 2002; Galán et al., 2005; García-Mozo et al., 2010). En el sureste peninsular son relevantes las conclusiones aportadas por Hernández Aroca (2012) en un análisis de cambios fenológicos por cambios de temperatura para diferentes tipos de cultivos. En la mayoría de los cultivos predominan los avances en foliación, floración y maduración. Así, se observan avances en la fecha de floración en albaricoque, peral y ciruelo (frutales), mientras que no se observan cambios significativos en olivo, viñedo, naranjo y manzano. Por su parte, la maduración se produce en albaricoque, melocotonero, peral, ciruelo y membrillo.

### *3.5. Cartografía de alta resolución del riesgo de heladas*

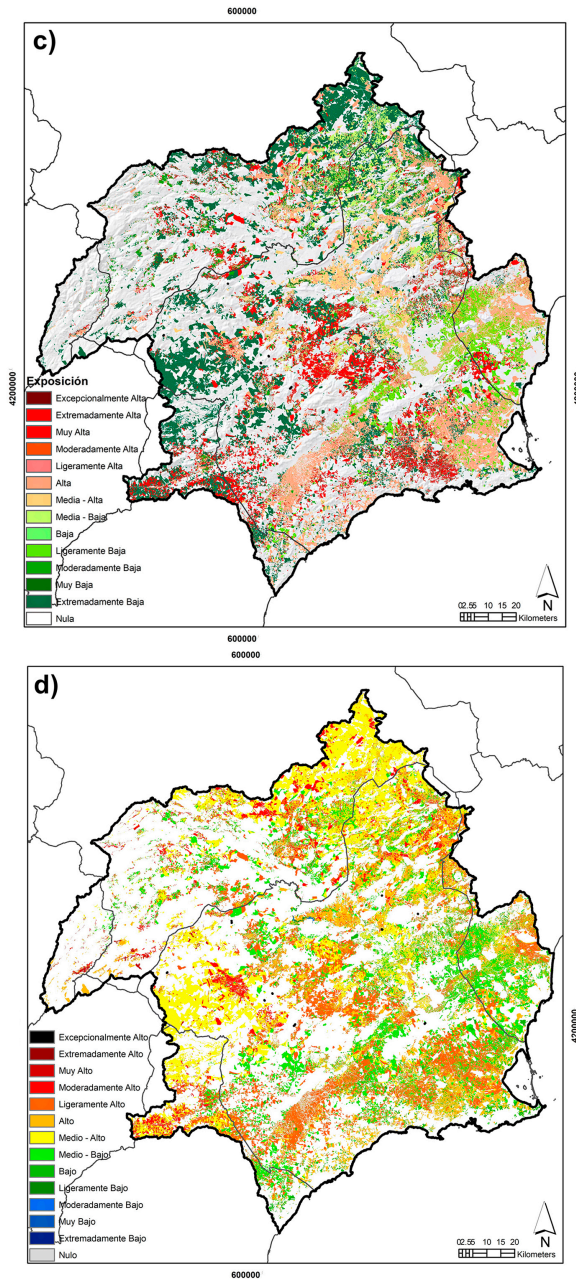
La generación de cartografía de alta resolución permite obtener un análisis muy detallado en la zona de estudio, como se puede apreciar en los mapas de las figuras 11 y 12, concretamente en zonas sensibles como la huerta que rodea la ciudad de Murcia y el almendro que predomina en zonas de interior. Las imágenes de alta resolución permiten análisis detallados de gran interés. La figura 13 muestra la combinación de los diferentes grados de riesgo de heladas en cítricos con el producto de termografía, y refleja las acumulaciones de aire más frío en zonas de valles y los valores térmicos menos fríos en zonas orográficamente complejas y en la isla de calor urbana (ICU) de la ciudad de Murcia.

Figura 10. Cartografía final para el área de estudio: a) peligrosidad, b) vulnerabilidad, c) exposición y d) riesgo de heladas



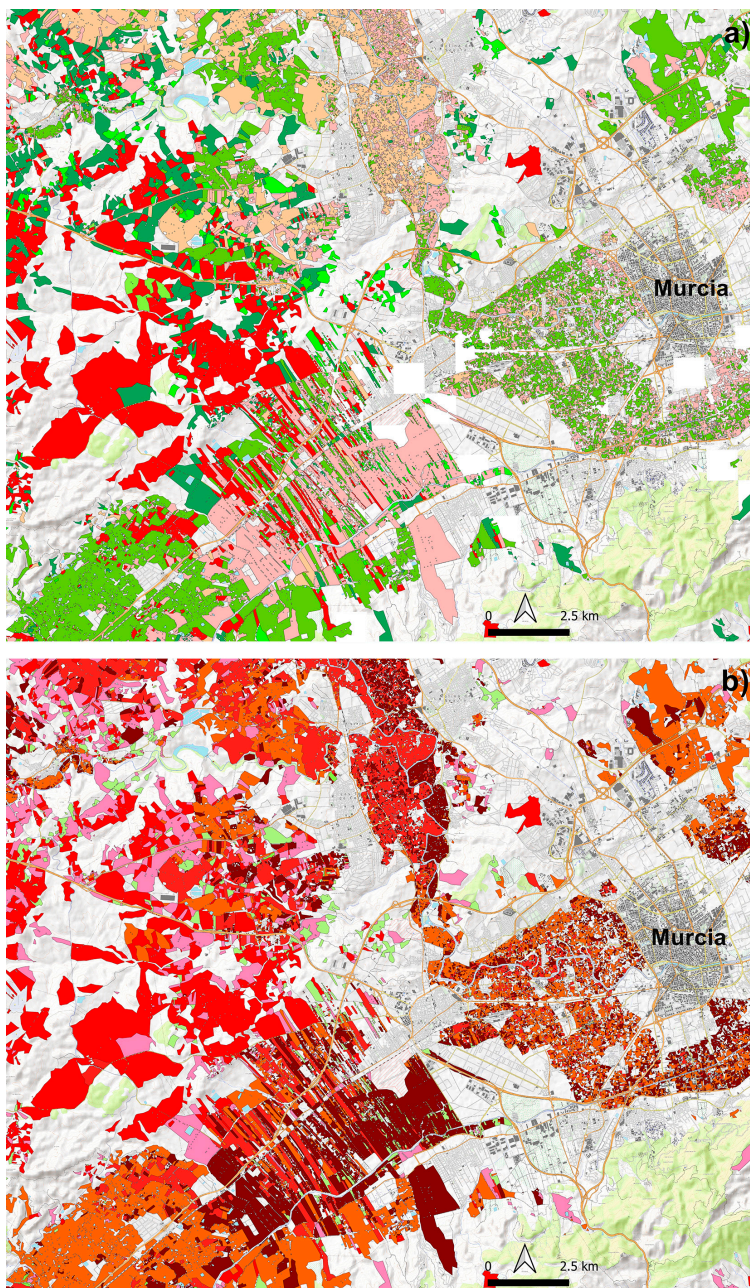
Fuente: elaboración propia.

Figura 10. Cartografía final para el área de estudio: a) peligrosidad, b) vulnerabilidad, c) exposición y d) riesgo de heladas (*continuación*)



Fuente: elaboración propia.

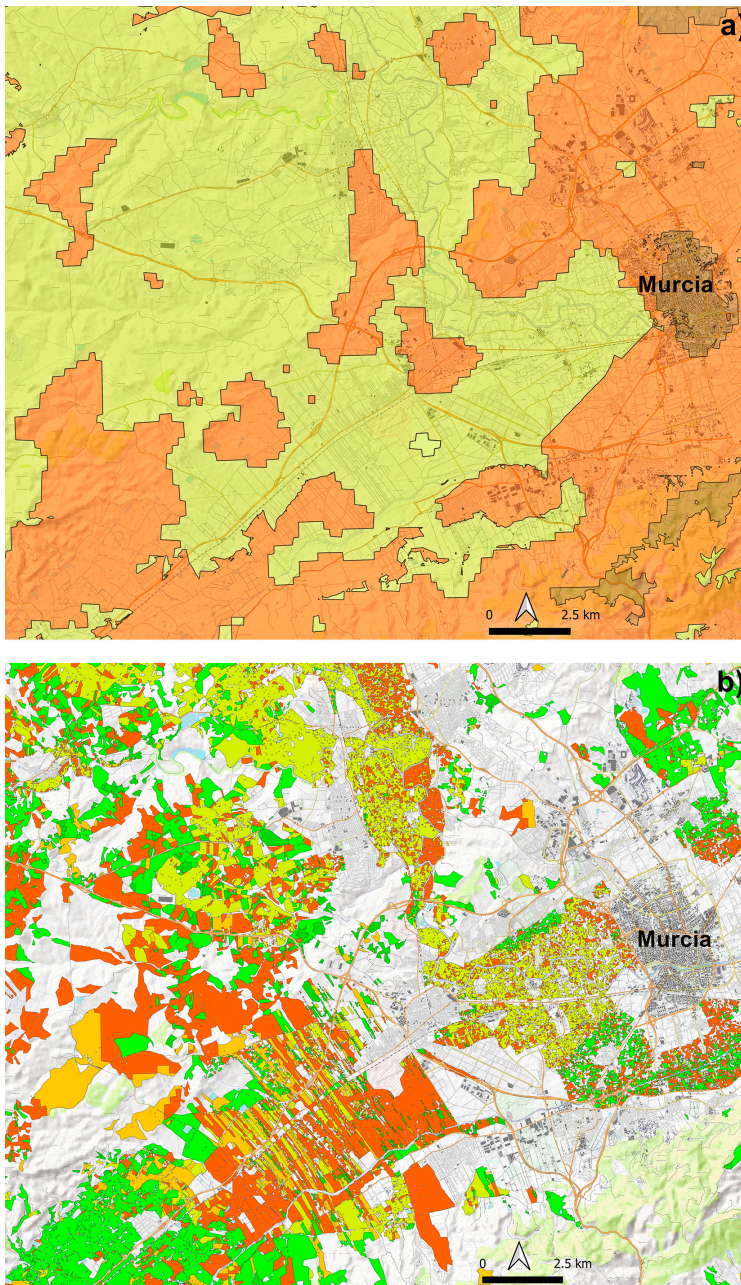
Figura 11. Ejemplo de cartografía de alta resolución en los alrededores de la ciudad de Murcia: a) exposición y b) vulnerabilidad de heladas. Leyenda similar a la figura 10



Fuente: elaboración propia.

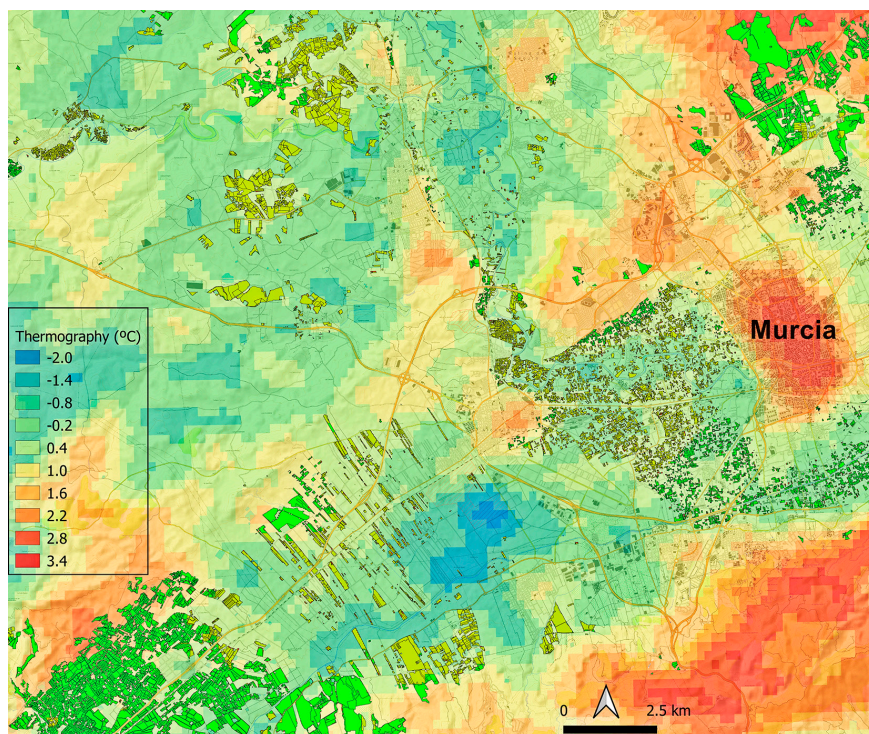


**Figura 12.** Ejemplo de cartografía de alta resolución en los alrededores de la ciudad de Murcia: a) peligrosidad y b) riesgo de helada. Leyenda similar a la figura 10



Fuente: elaboración propia.

Figura 13. Cartografía del riesgo de helada en cítricos sobre producto final de la termografía (coloreado con leyenda en mapa). Leyenda del riesgo de helada similar a figura 10



Fuente: elaboración propia.

Todo ello genera extensas superficies agrícolas en zonas de importante riesgo de heladas, especialmente durante los meses de marzo y abril. Un total de más de 1.200 km<sup>2</sup> (15,7% del área agrícola total) se encuentran en áreas de riesgo extremadamente a moderadamente alto cada año, con predominio de almendros y cereales de secano (entre 70-75% del total). Además, más de 3.000 km<sup>2</sup> (39,8% del total agrícola) se encuentran cada año en áreas de alto o ligeramente alto riesgo de heladas, desglosadas en más de 800 km<sup>2</sup> de nuevos regadíos, 585 km<sup>2</sup> de cereales de secano, 460 km<sup>2</sup> de almendros, 440 km<sup>2</sup> de frutales, 400 km<sup>2</sup> de viñedos y 241 km<sup>2</sup> de cítricos (tabla 6).

En las zonas más frías de la zona de estudio, impera un cultivo predominantemente de secano (cereal, almendro, olivo...), que históricamente aparece en los sectores occidentales de la zona de estudio. Son tierras secas tradicionales, de cultivo extensivo, ubicadas en zonas de gran altitud, y que en las últimas décadas han sido fuente de autosuficiencia para las zonas rurales del interior. La baja productividad del almendro marginal viene determinada por las pésimas condiciones del medio de cultivo: pendiente excesiva, clima muy adverso, etcé-

**Tabla 6.** Superficie absoluta (km<sup>2</sup>) y relativa (%) por tipo de cultivo en los cuatro grados de mayor riesgo de helada

Grado de riesgo	Superficie (km <sup>2</sup> )	(% total)	Tipo de cultivo	Superficie (km <sup>2</sup> )	(%)
Excepcionalmente alto	35,1	0,2	Labor de secano	10,5	100,0
Extremadamente alto	250,0	1,3	Labor de secano	48,2	77,4
			Labor de regadío	9,3	14,9
			Almendo	4,7	7,7
Muy alto	1.691,0	9,0	Labor de secano	746,3	74,1
			Almendo	128,1	12,7
			Labor de regadío	94,6	9,4
			Frutales	18,8	1,9
			Olivo	12,8	1,3
			Huerta tradicional	6,9	0,7
Moderadamente alto	5.558,7	29,4	Labor de secano	1.488,4	49,6
			Almendo	616,8	20,6
			Labor de regadío	392,3	13,1
			Olivo	248,6	8,3
			Frutales	223,3	7,4
			Huerta tradicional	26,8	0,9
			Arroz	5,0	0,2

Fuente: elaboración propia.

tera, aunque en ocasiones los niveles productivos podrían mejorarse con acciones culturales, especialmente con la implantación de variedades de floración tardía, para aliviar los daños causados por las heladas (Arquero et al., 2013).

#### 4. Discusión y conclusiones

Durante las últimas décadas, el riesgo de heladas ha disminuido notablemente en el área de estudio. El análisis de tendencias temporales realizado, así como el de los periodos de heladas, arroja valores concluyentes de un menor grado de frío durante las noches del periodo frío anual. De hecho, la duración del período de heladas (FP) se ha reducido desde 1950 hasta el presente (-1,3 días/década), y esto es especialmente relevante (estadísticamente significativo) en áreas cercanas a la costa y en el centro de las áreas del interior del área de estudio. Solo la cabecera más occidental del área de estudio registró un ligero aumento (0,6 días/década). A escala peninsular, los resultados en la región mediterránea muestran descensos estadísticamente significativos de los días de helada (-3,6 días/década) en el periodo temporal 1929-2005 (Fernández-Montes y Rodrigo, 2012).

Las proyecciones futuras para el período 2071-2101 muestran desde hace varios años un incremento de 3-4 °C en el sureste de la Península durante la temporada de invierno (Castro et al., 2005). Más recientemente, los resultados de Gómez-Navarro et al. (2010) constatan un aumento de las temperaturas

mínimas durante el invierno de 1-2 °C para el mismo período de tiempo. Los resultados están en línea con los obtenidos por Hartmann et al. (2013), con incrementos de temperatura en los días más fríos del invierno entre 2-3 °C (escenarios más suaves RCP 2,6 y 4,5).

Según Fonseca et al. (2016), a través de un reanálisis del Weather Research and Forecast (WRF), se observa una disminución de las noches frías ( $T_{n10p}$ ) en el sureste de la Península durante la primavera, coincidiendo con el final del FP, mientras que los cambios observados en el otoño son mínimos. Se trata de observaciones similares a las registradas en el área de estudio, que influyen directamente en el acortamiento del período, especialmente durante la primavera.

La teledetección se ha convertido en los últimos años en una herramienta metodológica de primer orden para muchos campos de la climatología. La estimación satelital de la temperatura de la superficie terrestre (LST) se considera una de las formas más adecuadas de recuperar la temperatura de la superficie del aire ( $T_a$ ) (Phan et al., 2019).

La necesidad de cartografiar los fenómenos nocturnos de inversión térmica (ITN) y la distribución de las temperaturas mínimas en un territorio deben estar respaldadas por una herramienta imprescindible como son las imágenes de satélite. A causa de la complejidad de la distribución espacial de las temperaturas nocturnas durante las madrugadas estables (formación de CAP en los fondos de los valles) y de la imposibilidad de mantener una red de estaciones meteorológicas lo suficientemente densa para identificar bien el fenómeno, se utiliza la termografía a través de bandas de satélite, como insumo clave en la generación de cartografía de peligros y, por tanto, de riesgo de heladas.

Los productos de temperatura de la superficie terrestre (LST) de VIIRS tienen el potencial de obtener excelentes estimaciones espaciales de la temperatura de la superficie terrestre a una resolución temporal (diaria) y espacial (1.000/750 m) muy alta en todo el planeta. El análisis nocturno realizado, junto con anteriores investigaciones, arroja excelentes resultados, ya que existe una mejor predicción para temperaturas mínimas ( $T_{min}$ ) que para temperaturas máximas ( $T_{max}$ ) en el análisis de productos MODIS LST (Yang et al., 2017). Las correlaciones estadísticas proporcionadas por Neteler (2010) muestran valores entre 0,70 y 0,98, con diferencias térmicas de 0,5 °C con las temperaturas de las estaciones meteorológicas en los Alpes centroorientales (noreste de Italia).

La mayoría de los modelos de interpolación espacial para la estimación de la temperatura mínima incorporan una corrección de gradiente vertical para adaptarse a la diferencia de elevación (Dodson y Marks, 1997; Nalder y Wein, 1998). Además, la ubicación de la estación de referencia puede afectar el gradiente vertical (Bolstad et al., 1998) y provocar un sesgo positivo para elevaciones más bajas. Por lo tanto, aunque el método de interpolación se ha aplicado ampliamente para estimar temperaturas mínimas durante fenómenos MTI, su limitación espacial y vertical limita su uso.

## Referencias bibliográficas

- ALCÁNTARA-AYALA, I. (2002). «Geomorphology, natural hazards, vulnerability and prevention of natural disasters in developing countries». *Geomorphology*, 47 (2-4), 107-124.  
<[https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(02\)00083-1](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(02)00083-1)>
- ARQUERO, A.; BELMONTE, A.; CASADO, B.; CRUZ-BLANCO, M.; ESPADAFOR, M.; FERNÁNDEZ, J. L. y PARRA, M. A. (2013). «Manual del Almendro». Consejería de Agricultura, Pesca y Desarrollo Rural. Junta de Andalucía.
- BIRKMANN, J. (2013). «Exposure to natural hazards». En: *Encyclopedia of Natural Hazards*. Dordrecht: Springer, 305-306.
- BOLSTAD, P. V.; SWIFT, L.; COLLINS, F. y RÉGNIÈRE, J. (1998). «Measured and predicted air temperatures at basin to regional scales in the southern Appalachian Mountains». *Agricultural and forest meteorology*, 91 (3-4), 161-176.  
<[https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(98\)00076-8](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(98)00076-8)>
- CARMONA, R.; DÍAZ, J.; MIRÓN, I. J.; ORTIZ, C.; LEÓN, I. y LINARES, C. (2016). «Geographical variation in relative risks associated with cold waves in Spain: The need for a cold wave prevention plan». *Environment International*, 88, 103-111.  
<<https://doi.org/10.1016/j.envint.2015.12.027>>
- CASTRO, M. D. de; MARTÍN-VIDE, J. y ALONSO, S. (2005). *El clima de España: pasado, presente y escenarios de clima para el siglo XXI. Impactos del cambio climático en España*. Madrid: Ministerio de Medio Ambiente (España).
- CHAAR, J. E. (2013). «Resistencia a heladas en plantas frutales». *Avances en Investigación Agropecuaria*, 17 (3), 109-112.
- CHEMUNG, E. (1995). «Understanding frost: Cornell cooperative extension of Chemung county». [Internet]. Available from: <<http://www.gardening.cornell.edu/weather/frost.pdf>>.
- CHMIELEWSKI, F. M. y RÖTZER, T. (2001). «Response of tree phenology to climate change across Europe». *Agricultural and Forest Meteorology*, 108 (2), 101-112.  
<[https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(01\)00233-7](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(01)00233-7)>
- CONESA GARCÍA, C. y ALONSO SARRÍA, F. (2006). «El clima de la Región de Murcia». En: CONESA GARCÍA, C. (ed.). *El Medio Físico de la Región de Murcia*. Murcia: Editum, 95-127.
- CONESA GARCÍA, C.; ESPÍN SÁNCHEZ, D.; GARCÍA MARÍN, R.; CASTEJÓN PORCEL, G. y MORENO MUÑOZ, D. (2014). «Inversiones térmicas con advección cálida inferior en la Vega Media del Segura (Región de Murcia)». *Estudios Geográficos*, 75 (277), 521-552.  
<<https://doi.org/10.3989/estgeogr.201416>>
- CRIMP, S.; BAKAR, K. S.; KOKIC, P.; JIN, H.; NICHOLLS, N. y HOWDEN, M. (2015). «Bayesian space-time model to analyse frost risk for agriculture in Southeast Australia». *International Journal of Climatology*, 35 (8), 2.092-2.108.  
<<https://doi.org/10.1002/joc.4109>>
- DODSON, R. y MARKS, D. (1997). «Daily air temperature interpolated at high spatial resolution over a large mountainous region». *Climate research*, 8 (1), 1-20.  
<<https://doi.org/10.3354/cr008001>>
- ECCHEL, E.; REA, R.; CAFFARRA, A. y CRISCI, A. (2009). «Risk of spring frost to apple production under future climate scenarios: the role of phenological acclimation». *International Journal of Biometeorology*, 53 (3), 273-286.  
<<https://doi.org/10.1007/s00484-009-0213-8>>

- ERENA, M.; BROTONS, J. M.; CONESA, A.; MANERA, F. J.; CASTAÑER, R.; GARCÍA, P. y PORRAS, I. (2017). «Desarrollo de un geoportal para el inventario y la evaluación de daños por heladas en los cítricos de la Región de Murcia». *XVII Congreso de la Asociación Española de Teledetección*.
- FERNÁNDEZ-LONG, M. E.; BARNATÁN, I.; DOMINICI, C. y MURPHY, G. (2016). «Información agroclimática de las heladas en la Argentina: generación y uso». *Meteorologica*, 41 (2), 7-31.
- FERNÁNDEZ-MONTES, S. y RODRIGO, F. (2012). «Trends in seasonal indices of daily temperature extremes in the Iberian Peninsula, 1929-2005». *International Journal of Climatology*, 32 (15), 2.320-2.332.  
<<https://doi.org/10.1002/joc.3399>>
- FONSECA, D.; CARVALHO, M. J.; MARTA-ALMEIDA, M.; MELO-GONÇALVES, P. y ROCHA, A. (2016). «Recent trends of extreme temperature indices for the Iberian Peninsula». *Physics and Chemistry of the Earth*, parts A/B/C, 94, 66-76.  
<<https://doi.org/10.1016/j.pce.2015.12.005>>
- GALÁN, C.; GARCÍA-MOZO, H.; VÁZQUEZ, L.; RUIZ, L., DÍAZ DE LA GUARDIA, C. y TRIGO, M. M. (2005). «Heat requirement for the onset of the “Olea europaea” L. pollen season in several sites in Andalusia and the effect of the expected future climate change». *International Journal of Biometeorology*, 49, 184-188.  
<<https://doi.org/10.1007/s00484-004-0223-5>>
- GARATWA, W. y BOLLIN, C. (2002). *Disaster Risk Management: Working Concept*. Eschborn, Germany: Deutsche Gesellschaft fur Technische Zusammenarbeit (GTZ).
- GARCÍA MORENO, R.; TARQUIS, A. M.; DÍAZ ÁLVAREZ, M.; BURGAZ MORENO, F. y SAA REQUEJO, A. (2010). «Influence of climate change on damages to fruit trees produced by frost temperatures at Spanish semiarid Region of Murcia». En: *Semi-Arid Environments: Agriculture, Water Supply*. Nova Science Publishers.
- GARCÍA-MOZO, H.; MESTRE, A. y GALÁN, C. (2010). «Phenological trends in southern Spain: A response to climate change». *Agricultural and Forest Meteorology*, 150, 575-580.  
<<https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2010.01.023>>
- GÓMEZ-NAVARRO, J. J.; MONTÁVEZ, J. P.; JIMÉNEZ-GUERRERO, P.; JEREZ, S.; GARCÍA-VALERO, J. A. y GONZÁLEZ-ROUCO, J. F. (2010). «Warming patterns in regional climate change projections over the Iberian Peninsula». *Meteorologische Zeitschrift*, 19 (3), 275-285.  
<<https://doi.org/10.1127/0941-2948/2010/0351>>
- GRACZYK, D. y KUNDZEWICZ, Z. W. (2016). «Changes of temperature-related agroclimatic indices in Poland». *Theoretical and Applied Climatology*, 124 (1), 401-410.  
<<https://doi.org/10.1007/s00704-015-1429-7>>
- GUILLÉN-NAVARRO, M.A.; CADENAS, J.M.; GARRIDO, M.C.; AYUSO, B. y MARTÍNEZ-ESPAÑA, R. (2019). «Minimum temperature prediction models in plots to forecast frost in crops». En: MUÑOZ, A. y PARK, J. (eds.). *Agriculture and Environment Perspectives in Intelligent Systems*. Washington: IOS Press, 91-106.
- GUILLEVIC, P. C.; BIARD, J. C.; HULLEY, G. C.; PRIVETTE, J. L.; HOOK, S. J.; OLIOSO, A. ... y CSISZAR, I. (2014). «Validation of Land Surface Temperature products derived from the Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS) using ground-based and heritage satellite measurements». *Remote Sensing of Environment*, 154, 19-37.  
<<https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.08.013>>

- HALL, A. y JONES, G.V. (2009). «Effect of potential atmospheric warming on temperature-based indices describing Australian winegrape growing conditions». *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 15 (2), 97-119.  
<<https://doi.org/10.1111/j.1755-0238.2008.00035.x>>
- HÄNNINEN, H. (1991). «Does climatic warming increase the risk of frost damage in northern trees?». *Plant Cell Environ*, 14, 449-454.  
<<https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.1991.tb01514.x>>
- (1995). «Effects of climatic change on trees from cool and temperate regions: An ecophysiological approach to modeling bud burst phenology». *Canadian Journal of Botany*, 73, 183-199.  
<<https://doi.org/10.1139/b95-022>>
- HARTMANN, D. L.; KLEIN TANK, A. M. G.; RUSTICUCCI M.; ALEXANDER, L. V.; BRÖNNIMANN, S.; CHARABI, Y.; DENTENER, F. J.; DLUGOKENCKY, E. J.; EASTERLING, D. R.; KAPLAN, A.; SODEN, B. J.; THORNE, P. W.; WILD, M. y ZHAI, P. M. (2013). «Observations: Atmosphere and Surface». En: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [STOCKER, T. F.; QIN, G.-K.; PLATTNER, M.; TIGNOR, S. K.; ALLEN, J.; BOSCHUNG, A.; NAUELS, Y.; XIA, V. Bex y MIDGLEY, P. M. (eds.)]. Cambridge, Reino Unido, y Nueva York, EE. UU.: Cambridge University Press.  
<<https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.008>>
- HERNÁNDEZ AROCA, M. D. (2012). *Respuestas al cambio climático en la fenología de plantas y animales desde 1945 hasta 2009 en la Región de Murcia*. Trabajo de fin de máster. Universidad Católica San Antonio (Murcia).
- HERNÁNDEZ PEDREÑO, M. (dir.) (2014). *Evolución de la exclusión social en la Región de Murcia: repercusiones sociales de la crisis*. Murcia: Editum. Ediciones de la Universidad de Murcia.
- HILLGER, D.; KOPP, T.; LEE, T.; LINDSEY, D.; SEAMAN, C.; MILLER, S. ... y RINK, T. (2013). «First-light imagery from Suomi NPP VIIRS». *Bulletin of the American Meteorological Society*, 94 (7), 1019-1029.  
<<https://doi.org/10.1175/BAMS-D-12-00097.1>>
- KONRAD, J. M. y LEMIEUX, N. (2005). «Influence of fines on frost heave characteristics of a well-graded base-course material». *Canadian Geotechnical Journal*, 42 (2), 515-527.
- KRAMER, K.; FRIEND, A. y LEINONEN, I. (1996). «Modeling comparison to evaluate the importance of phenology and spring frost damage for the effects of climate change on growth of mixed temperate-zone deciduous forests». *Climate Research*, 7, 31-44.  
<<https://doi.org/10.3354/cr007031>>
- KRAMER, K.; LEINONEN, I. y LOUSTAU, D. (2000). «The importance of phenology for the evaluation of impact of climate change on growth of boreal, temperate, and Mediterranean forests ecosystems». *International Journal of Biometeorology*, 44, 67-75.  
<<https://doi.org/10.1007/s004840000066>>
- KRON, W. (2005). «Flood risk = hazard • values • vulnerability». *Water International*, 30 (1), 58-68.  
<<https://doi.org/10.1080/02508060508691837>>
- JIMÉNEZ, M. D. y SNAIDER, P. P. (2014). «La ocurrencia de heladas y su influencia en las fases de los cultivos en la Provincia del Chaco entre 1951 y 2000». *Geográfica Digital*, 11 (21), 1-26.  
<<http://dx.doi.org/10.30972/geo.11212332>>

- LAUGHLIN, G. P. y KALMA, J. D. (1990). «Frost risk mapping for landscape planning: a methodology». *Theoretical and Applied climatology*, 42 (1), 41-51.  
<<https://doi.org/10.1007/BF00865525>>
- LE TACON, P.; VACHER, J. J.; ELDIN, M. e IMAÑA, E. (1992). «Los riesgos de helada en el Altiplano boliviano». *Actas del VII Congreso Internacional sobre Cultivos Andinos*, 4-8.
- LIU, B.; HENDERSON, M. y XU, M. (2014). «Spatiotemporal change in China's frost days and frost-free season, 1955-2000». *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 113 (D12).  
<<https://doi.org/10.1029/2007JD009259>>
- MARTÍN-VIDE, J. (2005). *Los mapas del tiempo*. Mataró: Davinci Continental.
- MARTÍNEZ-CARRASCO PLEITE, F. y MARTÍNEZ PAZ, J. M. (2012). «El clúster agroalimentario de la región de Murcia». *Cuadernos de Estudios Agroalimentarios (CEA)*, 2, 175-198.
- MENZEL, A. (2000). «Trends in phenological phases in Europe between 1951 and 1996». *International Journal of Biometeorology*, 44 (2), 76-81.  
<<https://doi.org/10.1007/s004840000054>>
- MENZEL, A.; JAKOBI, G.; AHAS, R.; SCHEIFINGER, H. y ESTRELLA, N. (2003). «Variations of the climatological growing season (1951-2000) in Germany compared with other countries». *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 23 (7), 793-812.  
<<https://doi.org/10.1002/joc.915>>
- MINNETT, P. J.; EVANS, R. H.; PODESTÁ, G. P. y KILPATRICK, K. A. (2014). «Sea-surface temperature from Suomi-NPP VIIRS: Algorithm development and uncertainty estimation». *Proceedings SPIE 9111, Ocean Sensing and Monitoring VI, 91110C*.  
<<https://doi.org/10.1117/12.2053184>>
- MOLITOR, D. y JUNK, J. (2011). «Spätfrostschäden 2011- Boten des Klimawandels?». *Das Deutsche Weinmagazin*, 22, 30-33.
- MOLITOR, D.; JUNK, J.; EVERS, D.; HOFFMANN, L.; y BEYER, M. (2014). «A high-resolution cumulative degree day-based model to simulate phenological development of grapevine». *American Journal of Enology and Viticulture*, 65 (1), 72-80.
- MONTERUBBIANESI, M. G. y CENDOYA, M. G. (2001). «Caracterización del régimen de heladas meteorológicas y agrometeorológicas en Balcarce (Argentina) en el período 1970-1999». *Revista de la Facultad de Agronomía*, 21 (1), 69-78.
- MONTZ, B. E.; TOBIN, G. A. y HAGELMAN, R. R. (2017). *Natural hazards: explanation and integration*. Nueva York: Guilford Publications.
- NALDER, I. A. y WEIN, R. W. (1998). «Spatial interpolation of climatic normals: test of a new method in the Canadian boreal forest». *Agricultural and forest meteorology*, 92 (4), 211-225.  
<[https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(98\)00102-6](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(98)00102-6)>
- NETELER, M. (2010). «Estimating daily land surface temperatures in mountainous environments by reconstructed MODIS LST data». *Remote sensing*, 2 (1), 333-351.  
<<https://doi.org/10.3390/rs1020333>>
- NICLÓS, R.; PÉREZ-PLANELL, L.; COLL, C.; VALIENTE, J. A. y VALOR, E. (2018). «Evaluation of the S-NPP VIIRS land surface temperature product using ground data acquired by an autonomous system at a rice paddy». *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 135, 1-12.  
<<https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2017.10.017>>
- OLCINA CANTOS, J. (2009). «Cambio climático y riesgos climáticos en España». *Investigaciones Geográficas*, 49, 197-220.  
<<https://doi.org/10.14198/INGEO2009.49.10>>



- PASCALÉ, A. J.; DAMARIO, E. A. y BUSTOS, C. A. (1997). «Índice agroclimático de peligrosidad de heladas primaverales en frutales». *Rev. La Facultad Agronomía* (Universidad de Buenos Aires), 17, 25-30.
- PEÑUELAS, J.; FILELLA I. y COMAS P. (2002). «Changed plant and animal life cycles from 1952 to 2000 in the Mediterranean region». *Global Change Biology*, 9, 531-544.  
<<https://doi.org/10.1046/j.1365-2486.2002.00489.x>>
- PÉREZ MORALES, A. (2016). «Riesgo de heladas en cultivos. Análisis y evaluación». En: *Paisaje, cultura territorial y vivencia de la geografía. Libro homenaje al profesor Alfredo Morales Gil*. Alicante: Instituto Interuniversitario de Geografía (Universidad de Alicante), 1.005-1.022.
- PHAN, T. N.; KAPPAS, M.; NGUYEN, K. T.; TRAN, T. P.; TRAN, Q. V. y EMAM, A. R. (2019). «Evaluation of MODIS land surface temperature products for daily air surface temperature estimation in northwest Vietnam». *International Journal of Remote Sensing*, 40 (14), 5544-5562.  
<<https://doi.org/10.1080/01431161.2019.1580789>>
- RIGBY, J. R. y PORPORATO, A. (2008). «Spring frost risk in a changing climate». *Geophysical Research Letters*, 35 (12).  
<<https://doi.org/10.1029/2008GL033955>>
- RIPPLE, W.; WOLF, C.; NEWSOME, T.; BARNARD, P.; MOOMAW, W. y GRANDCOLAS, P. (2019). «World scientists' warning of a climate emergency». *BioScience*, 70 (1), 8-12.  
<<https://doi.org/10.1093/biosci/biz088>>
- SANTIBÁÑEZ QUEZADA, F. (2013). «Origen, dinámica, daño y control de heladas». *Revista Frutícola*, 13, 14-21.
- SCHULZE, B.; HUBBERMANN, E. M. y SCHWARZ, K. (2014). «Stability of quercetin derivatives in vacuum impregnated apple slices after drying (microwave vacuum drying, air drying, freeze drying) and storage». *LWT-Food Science and Technology*, 57 (1), 426-433.
- SCHROEDER, W. (2017). «Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS) 375 m & 750 m Active Fire Detection Data Sets Based on NASA VIIRS Land Science Investigator Processing System (SIPS) Reprocessed Data». NASA. Recuperado de <[https://ladswb.modaps.eosdis.nasa.gov/missions-and-measurements/viirs/VNP14\\_Active-Fire\\_UG\\_2017.pdf?msckid=776e450ba9c311ec836c90eb0638bca5](https://ladswb.modaps.eosdis.nasa.gov/missions-and-measurements/viirs/VNP14_Active-Fire_UG_2017.pdf?msckid=776e450ba9c311ec836c90eb0638bca5)>.
- SIMBAÑA CHORLANGO, B. E. (2014). *Análisis de vulnerabilidad del sector agropecuario frente a fenómenos naturales hidrometeorológicos en el cantón Pedro Moncayo, Provincia de Pichincha*. Tesis doctoral. Universidad Internacional SEK.
- SNYDER, R. L. y MELO-ABREU, J. P. (2005). «Frost protection: fundamentals, practice and economics». *Frost Protection: Fundamentals, Practice and Economics*, FAO, 1, 1-240.
- (2010). «El daño producido por las heladas. Fisiología y temperaturas críticas». *Protección contra las Heladas: Fundamentos, Práctica y Economía*, FAO, 1, 241.
- TAIT, A. y ZHENG, X. (2003). «Mapping frost occurrence using satellite data». *Journal of Applied Meteorology*, 42 (2), 193-203.  
<[https://doi.org/10.1175/1520-0450\(2003\)042<0193:MFOUSD>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(2003)042<0193:MFOUSD>2.0.CO;2)>
- TROUGHT, M.C.T.; HOWELL, G.S. y CHERRY, N. (1999). «Practical considerations for reducing frost damage in vineyards». *Report New Zealand Winegrowers*, 43 p.
- URBINA VALLEJO, V. (2007). *Daños por heladas en frutales. Sintomatología y evaluación*. Barcelona: Generalitat de Catalunya – Departament d'Agricultura, Alimentació i Acció Rural.

- VILATTE, C. A. y NOGUEIRAS, B. R. (2008). «Régimen y riesgo agroclimático de heladas en Lugo, provincia de Lugo, Galicia, España». *Recursos Rurais: Revista Oficial do Instituto de Biodiversidade Agraria e Desenvolvimento Rural (IBADER)*, 4, 13-18.  
<<https://doi.org/10.15304/rr.id5309>>
- WESTGATE, K. N. y O'KEEFE, P. (1976). *Natural disasters: An intermediate text*. Bradford: University of Bradford, Disaster Research Unit/School of Science and Society.
- WILHITE, D. A. (2000). *Drought as a natural hazard: concepts and definitions*. Drought Mitigation Center Faculty Publications.
- WYPYCH, A.; USTRNUL, Z.; SULIKOWSKA, A.; CHMIELEWSKI, F. M. y BOCHENEK, B. (2017). «Spatial and temporal variability of the frost free season in Central Europe and its circulation background». *International Journal of Climatology*, 37 (8), 3.340-3.352.  
<<https://doi.org/10.1002/joc.4920>>
- YANG, Y. Z.; CAI, W. H. y YANG, J. (2017). «Evaluation of MODIS land surface temperature data to estimate near-surface air temperature in Northeast China». *Remote Sensing*, 9 (5), 410.  
<<https://doi.org/10.3390/rs9050410>>
- YAU, I. H.; DAVENPORT, J. R. y MOYER, M. M. (2014). «Developing a wine grape site evaluation decision support system for the inland Pacific Northwestern United States». *HortTechnology*, 24 (1), 88-98.  
<<https://doi.org/10.21273/HORTTECH.24.1.88>>
- YU, Y.; PRIVETTE, J. L. y PINHEIRO, A. C. (2005). «Analysis of the NPOESS VIIRS land surface temperature algorithm using MODIS data». *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 43 (10), 2340-2350.  
<<https://doi.org/10.1109/TGRS.2005.856114>>