

Molina Jiménez, B.; Álvarez Mozos, J.; González de Audicana Amenábar, M. Evaluación de variables radar para la discriminación de daños agrícolas por granizo

# Evaluación de variables radar para la discriminación de daños agrícolas por granizo

**Molina Jiménez, Barbara Beatriz**<sup>1</sup> **Álvarez Mozos, Jesús**<sup>1</sup> **González de Audicana Amenábar, María**<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institute for Sustainability & Food Chain Innovation (IS-FOOD), Dpto. Ingeniería, Universidad Pública de Navarra

ORCID: Molina Jiménez 0000-0003-2662-1414 Álvarez Mozos 0000-0002-6518-2533 González de Audicana Amenábar 0000-0002-2430-3853

Correspondencia: [barbarabeatriz.molina@unavarra.es](mailto:barbarabeatriz.molina@unavarra.es) [jesus.alvarez@unavarra.es](mailto:jesus.alvarez@unavarra.es) [maria.audicana@unavarra.es](mailto:maria.audicana@unavarra.es)

## RESUMEN

Este trabajo evalúa la capacidad de variables derivadas de radares meteorológicos para discriminar parcelas agrícolas con y sin daño por episodios de granizo. El estudio se centra en la zona oriental de la Península Ibérica y utiliza datos de los radares de Murcia y Zaragoza correspondientes al año 2022. Para ese año se dispone de una base de datos de parcelas afectadas por eventos de granizo y de otras no afectadas, que incluye cultivo, fecha de siembra, fecha del episodio y el porcentaje de daño tasado en campo. Para generar un conjunto de datos balanceado se seleccionó, para cada parcela dañada con un nivel de daño >20%, una parcela sin daño del mismo cultivo, con fecha de siembra similar ( $\pm 7$  días) y situadas entre 5 y 10 km. Para dichas parcelas, se extrajeron los datos de reflectividad radar y de precipitación correspondientes al día del daño. A partir de ellos se derivaron las variables: reflectividad máxima en 24h ( $Z_{max}$ ), precipitación acumulada en 24h ( $P_{acum}$ ), precipitación máxima horaria en 24h ( $P_{max}$ ) y energía cinética del granizo acumulada en 24h ( $E_{cG}$ ), calculada a partir de la integración temporal de la reflectividad. La capacidad de discriminación se evaluó mediante curvas ROC y el índice de Youden, que permitió determinar umbrales operativos óptimos. A nivel global,  $Z_{max}$  y  $E_{cG}$  mostraron la mayor capacidad discriminativa ( $AUC = 0,70$ ), mientras que  $P_{max}$  ( $AUC = 0,65$ ) y  $P_{acum}$  ( $AUC = 0,62$ ) presentaron menor rendimiento. El análisis por cultivo evidenció variabilidad en la respuesta, con valores elevados del índice de Youden en cultivos como melón, calabaza, pimiento o cebolla, y menor capacidad discriminativa en otros como lechuga. Los resultados indican que las variables basadas en la reflectividad presentan mayor consistencia para identificar daño por granizo y que el índice de Youden constituye una herramienta útil para definir umbrales operativos reproducibles a partir de datos radar.


**Palabras clave:** Radar meteorológico, reflectividad, granizo, umbral, índice de Youden.


Fecha de recepción: 18 febrero 2026 · Fecha de aceptación: 18 febrero 2026


# Evaluación de variables radar para la discriminación de daños agrícolas por granizo

Molina Jiménez, Barbara Beatriz <sup>(1)</sup>, Álvarez Mozos, Jesús <sup>(1)</sup>, González de Audicana Amenábar, María <sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup> Institute for Sustainability & Food Chain Innovation (IS-FOOD), Dpto. Ingeniería, Universidad Pública de Navarra.

 0000-0003-2662-1414, barbarabeatriz.molina@unavarra.es.

 0000-0002-6518-2533, jesus.alvarez@unavarra.es.

 0000-0002-2430-3853, maria.audicana@unavarra.es.

**Resumen:** Este trabajo evalúa la capacidad de variables derivadas de radares meteorológicos para discriminar parcelas agrícolas con y sin daño por episodios de granizo. El estudio se centra en la zona oriental de la Península Ibérica y utiliza datos de los radares de Murcia y Zaragoza correspondientes al año 2022. Para ese año se dispone de una base de datos de parcelas afectadas por eventos de granizo y de otras no afectadas, que incluye cultivo, fecha de siembra, fecha del episodio y el porcentaje de daño tasado en campo. Para generar un conjunto de datos balanceado se seleccionó, para cada parcela dañada con un nivel de daño >20%, una parcela sin daño del mismo cultivo, con fecha de siembra similar ( $\pm 7$  días) y situadas entre 5 y 10 km. Para dichas parcelas, se extrajeron los datos de reflectividad radar y de precipitación correspondientes al día del daño. A partir de ellos se derivaron las variables: reflectividad máxima en 24h ( $Z_{max}$ ), precipitación acumulada en 24h ( $P_{acum}$ ), precipitación máxima horaria en 24h ( $P_{max}$ ) y energía cinética del granizo acumulada en 24h ( $E_{CG}$ ), calculada a partir de la integración temporal de la reflectividad. La capacidad de discriminación se evaluó mediante curvas ROC y el índice de Youden, que permitió determinar umbrales operativos óptimos. A nivel global,  $Z_{max}$  y  $E_{CG}$  mostraron la mayor capacidad discriminativa (AUC = 0,70), mientras que  $P_{max}$  (AUC = 0,65) y  $P_{acum}$  (AUC = 0,62) presentaron menor rendimiento. El análisis por cultivo evidenció variabilidad en la respuesta, con valores elevados del índice de Youden en cultivos como melón, calabaza, pimiento o cebolla, y menor capacidad discriminativa en otros como lechuga. Los resultados indican que las variables basadas en la reflectividad presentan mayor consistencia para identificar daño por granizo y que el índice de Youden constituye una herramienta útil para definir umbrales operativos reproducibles a partir de datos radar.

**Palabras clave:** Radar meteorológico, reflectividad, granizo, umbral, índice de Youden.

## ***Evaluation of radar-derived variables for the discrimination of agricultural damage caused by hail***

**Abstract:** This study evaluates the ability of variables derived from weather radars to discriminate agricultural parcels with and without damage from hail events. The study focuses on the eastern area of the Iberian Peninsula and uses data from the Murcia and Zaragoza radars corresponding to the year 2022. For that year, a database is available of parcels affected by hail events and other unaffected parcels, which includes crop type, sowing date, date of the event, and the percentage of damage assessed in the field. To generate a balanced dataset, for each damaged parcel with a damage level >20%, an undamaged parcel of the same crop was selected, with a similar sowing date ( $\pm 7$  days) and located between 5 and 10 km away. For these parcels, radar reflectivity and precipitation data corresponding to the day of the damage were extracted. From these, the following variables were derived: maximum reflectivity in 24 h ( $Z_{max}$ ), accumulated precipitation in 24 h ( $P_{acum}$ ), maximum hourly precipitation in 24 h ( $P_{max}$ ), and accumulated hail kinetic energy in 24 h ( $E_{CG}$ ), calculated from the temporal integration of reflectivity. Discriminatory ability was evaluated using ROC curves and the Youden index, which allowed optimal operational thresholds to be determined. Overall,  $Z_{max}$  and  $E_{CG}$  showed the highest discriminatory ability (AUC = 0.70), whereas  $P_{max}$  (AUC = 0.65) and  $P_{acum}$  (AUC = 0.62) showed lower performance. The crop-specific analysis evidenced variability in the response, with high Youden index values in crops such as melon, pumpkin, pepper, or onion, and lower discriminatory ability in others such as lettuce. The results indicate that reflectivity-based variables show greater consistency for identifying hail

damage and that the Youden index is a useful tool for defining reproducible operational thresholds from radar data.

**Keywords:** Weather radar, reflectivity, hail, threshold, Youden index.

## 1. INTRODUCCIÓN

El granizo constituye uno de los fenómenos meteorológicos con mayor impacto en el sector agrícola, afectando tanto a la cantidad como a la calidad de la producción de diversos cultivos. Estas tormentas se originan en sistemas convectivos de fuerte desarrollo vertical, donde las corrientes ascendentes favorecen la formación de partículas de hielo que, al superar la capacidad de sustentación, precipitan en forma de granizo o pedrisco. En el contexto actual de cambio climático, la evidencia científica señala un incremento en la frecuencia e intensidad de eventos extremos (WMO, 2025), con efectos significativos sobre la producción agrícola (FAO, 2025; van Tilburg & Hudson, 2022). En España, las tormentas de pedrisco representan de forma recurrente uno de los riesgos más costosos para el sector agrario, con indemnizaciones que superan los 200 millones de euros en algunos años y cifras récord recientes de 804 millones de euros en 2025 (Agroseguro, 2026).

Los daños dependen de la intensidad del episodio y del estado fenológico del cultivo, pudiendo provocar pérdidas directas de producción y deterioro de la calidad comercial. Sin embargo, la intensidad del fenómeno no siempre se correlaciona de manera directa con el daño final, existiendo una notable variabilidad espacial y específica del cultivo (Schmitt *et al.*, 2022).

En este contexto, las redes de radares meteorológicos permiten caracterizar de forma sistemática la intensidad de los episodios convectivos mediante variables como la reflectividad, las estimaciones de precipitación o parámetros físicos asociados a la energía del hidrometeoro. No obstante, la relación entre estas variables y el daño observado requiere una evaluación cuantitativa. Herramientas como las curvas de Característica Operativa del Receptor (ROC del inglés Receiver Operating Characteristic) o el índice de Youden proporcionan un marco estadístico objetivo para comparar variables y definir umbrales operativos reproducibles.

El objetivo de este trabajo es comparar distintas variables derivadas de las imágenes diezminutales de reflectividad y horarias de precipitación de los radares meteorológicos de AEMET con el fin de identificar cuáles presentan mayor capacidad para discriminar parcelas agrícolas con o sin daños por granizo y establecer umbrales óptimos de discriminación para distintos cultivos.

## 2. MATERIAL Y MÉTODOS

### 2.1. Área de estudio y datos radar

Este estudio se realizó para el año 2022, en la zona oriental de la Península Ibérica, utilizando datos de los radares meteorológicos de Murcia (MU) y Zaragoza (ZA). Se utilizaron imágenes de radar de reflectividad y

precipitación correspondientes a productos operativos distribuidos por AEMET. Las imágenes se procesaron y georreferenciaron para obtener campos cuantitativos en formato raster. A partir de estas imágenes se generaron series temporales completas de 24 horas, considerando únicamente aquellos días para los que se disponía de la totalidad de las imágenes necesarias.

Las variables analizadas fueron la reflectividad máxima en 24 h ( $Z_{max}$ ), la precipitación acumulada en 24 h ( $P_{acum}$ ), la precipitación máxima horaria en 24 h ( $P_{max}$ ) y la energía cinética del granizo acumulada en 24 h ( $E_{cG}$ ).  $Z_{max}$  se definió como el valor máximo de reflectividad en el píxel central de la parcela considerando las 144 imágenes diezminutales del día;  $P_{acum}$  como la suma de las estimaciones de precipitación horarias; y  $P_{max}$  como el mayor valor horario registrado en un día. La energía cinética del granizo ( $E_{cG}$ ) se estimó a partir de la reflectividad lineal utilizando la relación empírica propuesta por Waldvogel *et al.* (1978), donde la tasa instantánea de flujo de energía cinética viene dada por (Eq. 1):

$$\dot{E} = 5 \times 10^{-6} z^{0.84} \quad (1)$$

siendo  $z$  la reflectividad en unidades lineales ( $\text{mm}^6\text{mm}^{-3}$ ) y  $\dot{E}$  la energía cinética instantánea expresada en  $\text{Jm}^{-2}\text{s}^{-1}$ . La energía diaria acumulada se obtuvo mediante la integración temporal de todos los intervalos diezminutales del día (Eq. 2).

$$E = \int_{t_0}^{t_1} \dot{E}(t) dt \quad (2)$$

### 2.2. Datos de campo

Para el año 2022 se dispone de una base de datos de parcelas afectadas y no afectadas por episodios de granizo, que incluye además del cultivo y su fecha de siembra, la fecha de ocurrencia del episodio y el porcentaje de daño tasado en campo. Con el fin de generar un conjunto de datos balanceado entre parcelas dañadas y no dañadas se seleccionó, para cada parcela con un nivel de daño superior al 20%, una parcela sin daño del mismo cultivo, con fecha de siembra similar ( $\pm 7$  días) y situada a una distancia entre 5 y 10 km. En total, se trabajó con un conjunto de 613 pares de parcelas.

Para cada par (daño/no daño), se extrajeron los datos de reflectividad de las imágenes diezminutales y los datos horarios de precipitación del radar meteorológico correspondientes al día de ocurrencia del granizo, y se calcularon las variables mencionadas en el apartado anterior.

### 2.3. Evaluación estadística

La capacidad discriminativa de cada variable se evaluó mediante curvas ROC, utilizándose el área bajo la curva (AUC) como medida global de rendimiento, donde un

valor de 1 indica una discriminación perfecta (Zweig & Campbell, 1993).

El umbral óptimo de discriminación daño/no daño se determinó, para cada variable, mediante el índice de Youden (Youden, 1950), definido en la Ecuación (3).

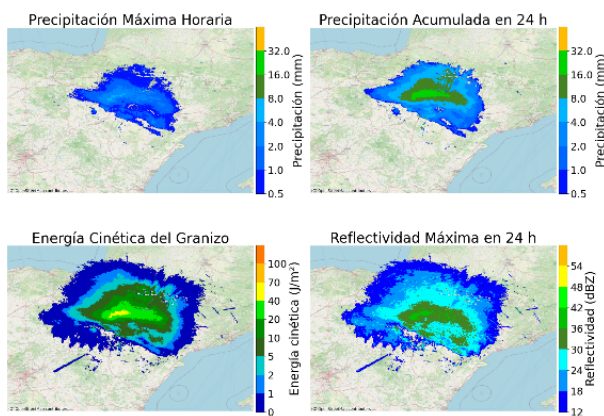
$$J = \text{Sensibilidad} + \text{Especificidad} - 1 \quad (3)$$

donde la Sensibilidad representa la proporción de parcelas dañadas correctamente identificadas y la Especificidad la proporción de parcelas no dañadas correctamente identificadas. El valor de corte que maximiza  $J$  se consideró el umbral operativo óptimo, ya que corresponde a la distancia vertical máxima entre la curva ROC y la línea diagonal. El análisis se realizó tanto a nivel global como por cultivo, garantizando la estabilidad de los resultados.

### 3. RESULTADOS

#### 3.1. Comparación global de variables

La Figura 1 presenta la distribución espacial de las variables obtenidas a partir de campos de reflectividad y precipitación estimados por radar para el día 1 de enero.



**Figura 1.** Mapas de variables radar derivadas de un episodio de granizo de ejemplo: (a)  $P_{max}$ , (b)  $P_{acum}$ , (c)  $E_{cg}$  y (d)  $Z_{max}$ .

En la Tabla 1 se muestran los resultados globales de las variables radar en la discriminación de daño por granizo, incluyendo para cada variable el umbral óptimo estimado, el índice de Youden y el AUC de las curvas ROC como métricas de rendimiento.

**Tabla 1.** Resultados globales de las variables radar en la discriminación de daño por granizo (año 2022).

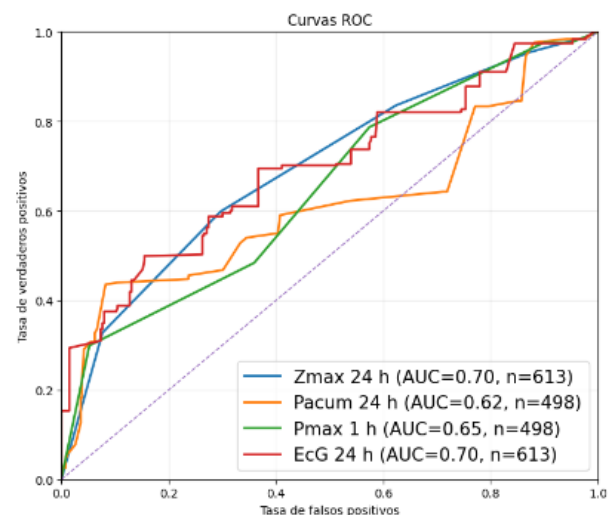
Variable	Umbral	Youden	AUC	Nº pares
$E_{cg}$	50,66 J/m <sup>2</sup>	0,34	0,70	613
$Z_{max}$	48 dBZ	0,30	0,70	613
$P_{max}$	16 mm	0,25	0,65	498
$P_{acum}$	12,5 mm	0,35	0,62	498

El índice de Youden permitió determinar los umbrales operativos óptimos para cada variable (Tabla 1). En el caso de  $Z_{max}$ , el umbral óptimo fue 48 dBZ (Youden =

0,30), mientras que para  $E_{cg}$  se obtuvo un valor de 50,66 J/m<sup>2</sup> (Youden = 0,34). Las variables de precipitación mostraron umbrales de 16 mm para  $P_{max}$  (Youden = 0,25) y 12,5 mm para  $P_{acum}$  (Youden = 0,35).

Aunque  $P_{acum}$  presentó el mayor valor puntual del índice de Youden (0,35), su capacidad discriminativa global fue inferior (AUC = 0,62) frente al 0,70 obtenido por  $Z_{max}$  y  $E_{cg}$ . Esto indica que, si bien puede definirse un punto de corte relativamente equilibrado para  $P_{acum}$ , la separación global entre parcelas dañadas y no dañadas es más consistente cuando se emplean variables derivadas de reflectividad. Las curvas ROC (Figura 2) muestran que  $Z_{max}$  y  $E_{cg}$  presentan un comportamiento muy similar, superior al de las variables de precipitación en la mayor parte del rango de umbrales.  $P_{max}$  alcanza un rendimiento intermedio (AUC = 0,65), mientras que  $P_{acum}$  muestra la menor capacidad discriminativa global.

En conjunto, los resultados muestran que las variables basadas en reflectividad capturan de forma más robusta la intensidad física de los episodios asociados a daño por granizo que las variables basadas exclusivamente en precipitación acumulada u horaria.



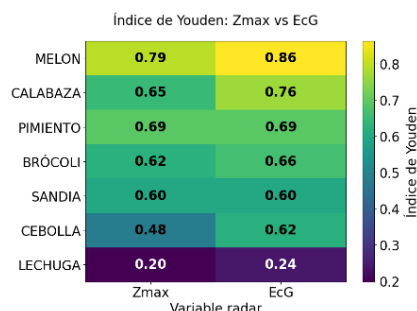
**Figura 2.** Curvas ROC comparadas de las variables radar para la discriminación de daño por granizo (año 2022).

#### 3.2. Análisis por cultivo

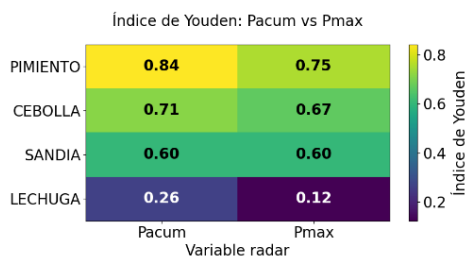
El análisis por cultivo evidenció variabilidad en la capacidad discriminativa de las variables radar (Fig. 3 y 4). En el caso de las variables basadas en reflectividad, tanto  $Z_{max}$  como  $E_{cg}$  mostraron valores elevados del índice de Youden en cultivos como melón, calabaza, pimiento o brócoli, mientras que en cultivos como lechuga la capacidad discriminativa fue notablemente menor.

La comparación entre  $Z_{max}$  y  $E_{cg}$  indica que, aunque ambas variables presentan un rendimiento global similar,  $E_{cg}$  alcanza valores ligeramente superiores del índice de Youden en determinados cultivos, lo que sugiere que la integración temporal de la energía cinética del granizo puede aportar información adicional respecto al uso exclusivo de la reflectividad máxima.

En el grupo de variables de precipitación,  $P_{max}$  y  $P_{acum}$  mostraron comportamientos similares, con capacidad discriminativa moderada en algunos cultivos específicos y menor rendimiento en otros. En general, su capacidad de discriminación fue inferior a la observada en las variables basadas en reflectividad.



**Figura 3.** Índice de Youden por cultivo para reflectividad máxima y energía cinética del granizo (2022).



**Figura 4.** Índice de Youden por cultivo para precipitación acumulada y precipitación máxima horaria (2022).

Estos resultados reflejan que la respuesta al granizo no es homogénea entre cultivos y que la utilidad de cada variable radar puede variar en función del tipo de cultivo analizado.

#### 4. CONCLUSIONES

El análisis realizado para el año 2022 muestra que las variables derivadas de imágenes de reflectividad de radar meteorológico presentan mayor consistencia en la discriminación de daños agrícolas por granizo que las variables basadas exclusivamente en estimaciones de precipitación.

A nivel global, tanto la reflectividad máxima en 24 h ( $Z_{max}$ ) como la energía cinética del granizo acumulada en 24 h ( $E_{cG}$ ) alcanzaron valores de AUC de 0,70, superiores a los obtenidos para la precipitación máxima horaria (0,65) y la precipitación acumulada diaria (0,62). Si bien  $P_{acum}$  alcanzó el mayor índice de Youden en el umbral óptimo, su menor AUC evidencia que su poder de separación global entre parcelas dañadas y no dañadas es menor. Por tanto, la selección de la variable no debe basarse únicamente en el valor máximo de Youden, sino en su comportamiento discriminativo global.

El uso del índice de Youden permitió definir umbrales operativos objetivos para cada variable, como 48 dBZ para  $Z_{max}$  y 50,66 J/m<sup>2</sup> para  $E_{cG}$ , facilitando su posible aplicación en contextos operativos o de análisis de

riesgo. El análisis por cultivo evidenció variabilidad en la respuesta, observándose valores elevados del índice de Youden en cultivos como melón, calabaza o pimiento y menor capacidad discriminativa en otros como lechuga. En varios cultivos,  $E_{cG}$  presentó valores ligeramente superiores a  $Z_{max}$ , lo que apunta a que la consideración de la evolución temporal de la reflectividad puede mejorar la caracterización del episodio respecto al uso exclusivo del valor máximo.

En conjunto, los resultados confirman que las variables basadas en reflectividad constituyen una herramienta más consistente para la identificación de daño por granizo a partir de datos de radar meteorológico y que el índice de Youden constituye un parámetro adecuado para la definición de umbrales reproducibles.

#### 5. AGRADECIMIENTOS

Esta investigación ha sido financiada por Agroseguro mediante el contrato OTRI 2024904260 y por el proyecto DAMAGE (PID2023-152885OBI00 financiado por MCIU/AEI/10 13039 501100011033/UE).

#### 6. REFERENCIAS

- Agroseguro. (2026, January 28). La siniestralidad del seguro agrario crece un 15% en 2025 y se eleva hasta los 804 millones de euros. <https://agroseguro.es/la-siniestralidad-del-seguro-agrario-crece-un-15-en-2025-y-se-eleva-hasta-los-804-millones-de-euros/>
- FAO. (2025). Climate change adaptation and mitigation | Modules | SFM Toolbox | Food and Agriculture Organization of the United Nations. SFM-Toolbox. <https://www.fao.org/home/es>
- Schmitt, J., Offermann, F., Söder, M., Frühauf, C., & Finger, R. (2022). Extreme weather events cause significant crop yield losses at the farm level in German agriculture. *Food Policy*, 112, 102359. <https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2022.102359>
- van Tilburg, A. J., & Hudson, P. F. (2022). Extreme weather events and farmer adaptation in Zeeland, the Netherlands: A European climate change case study from the Rhine delta. *Science of The Total Environment*, 844, 157212. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157212>
- Waldvogel, A., Schmid, W., & Federer, B. (1978). The Kinetic Energy of Hailfalls. Part I: Hailstone Spectra. *Journal of Applied Meteorology*, 17(4), 515–520.
- WMO. (2025). WMO report documents spiralling weather and climate impacts. World Meteorological Organization. <https://wmo.int/news/media-centre/wmo-report-documents-spiralling-weather-and-climate-impacts>
- Youden, W. J. (1950). Index for rating diagnostic tests. *Cancer*, 3(1), 32–35. [https://doi.org/10.1002/1097-0142\(1950\)3:1<32::AID-CNCR2820030106>3.0.CO;2-3](https://doi.org/10.1002/1097-0142(1950)3:1<32::AID-CNCR2820030106>3.0.CO;2-3)
- Zweig, M. H., & Campbell, G. (1993). Receiver-operating characteristic (ROC) plots: A fundamental evaluation tool in clinical medicine. *Clinical Chemistry*, 39(4), 561–577.