

Campoy, J.; Sánchez, J.; Beltrán, A.; Sánchez, D.; Arellano, I.; Molina-Medina, A.; González-Piqueras, J.; Galve, J.; Rodríguez, E.; Romero, R.; Calera, A. Análisis del efecto del cambio climático en la demanda hídrica futura de los cultivos en regadío en el Alto Guadiana mediante teledetección y proyecciones climáticas

Análisis del efecto del cambio climático en la demanda hídrica futura de los cultivos en regadío en el Alto Guadiana mediante teledetección y proyecciones climáticas

Campoy, Jaime¹ **Sánchez, Juan Manuel**¹ **Beltrán, Antonio**¹ **Sánchez, David**¹
Arellano, Irene¹ **Molina-Medina, Antonio**¹ **González-Piqueras, José**¹ **Galve, Joan Miquel**¹
Rodríguez, Esteban² **Romero, Ramiro**² **Calera, Alfonso**¹

¹ Grupo de Teledetección y SIG. Instituto de Desarrollo Regional. Universidad de Castilla-La Mancha. Campus Universitario SN, 02071. Albacete (España).

² AEMET, C/ Leonardo Prieto Castro, 8, 28071 Madrid (España).

ORCID: Campoy 0000-0003-3356-5609 Sánchez 0000-0003-1027-9351 Beltrán 0009-0005-3666-9739 Molina-Medina 0000-0002-3706-2489 González-Piqueras 0000-0003-2226-5731 Galve 0000-0003-1066-7717 Rodríguez 0000-0002-9608-1751 Romero 0009-0007-0534-6712 Calera 0000-0003-4271-2439

Correspondencia: Jaime.Campoy@uclm.es JuanManuel.Sanchez@uclm.es Antonio.Beltran@uclm.es David.SanchezPerez@uclm.es Irene.Arellano@uclm.es AntonioJesus.Molina@uclm.es Jose.Gonzalez@uclm.es JoanMiquel.Galve@uclm.es erodriguezg@aemet.es rromerof@aemet.es Alfonso.Calera@uclm.es

RESUMEN

El Alto Guadiana presenta una elevada presión sobre los recursos hídricos debido a la expansión del regadío y la sobreexplotación de los acuíferos, situación que podría agravarse por los efectos del cambio climático. Este trabajo estima la demanda hídrica futura de los principales cultivos de regadío de la zona para los periodos 2021-2050, 2041-2070 y 2071-2100, bajo los escenarios climáticos SSP2-4.5 y SSP5-8.5 del IPCC. Para ello, se emplea el modelo de balance diario de agua en el suelo explorado por las raíces descrito en el manual de FAO 56 y asistido por teledetección, que integra las proyecciones climáticas regionalizadas por AEMET junto con coeficientes de cultivo derivados de las series temporales de imágenes de NDVI de satélite. Los resultados indican un incremento progresivo de la evapotranspiración de los cultivos y de las necesidades de agua de riego neto para los periodos futuros considerados. La metodología propuesta constituye una herramienta robusta para apoyar la planificación hidrológica y la gestión sostenible del regadío en un contexto de cambio climático.

Palabras clave: Riego; Evapotranspiración del cultivo; Balance de Agua; NDVI; Satélite


Fecha de recepción: 16 febrero 2026 · Fecha de aceptación: 16 febrero 2026



Análisis del efecto del cambio climático en la demanda hídrica futura de los cultivos en regadío en el Alto Guadiana mediante teledetección y proyecciones climáticas



Campoy, Jaime ⁽¹⁾, Sánchez, Juan Manuel ⁽¹⁾, Beltrán, Antonio ⁽¹⁾, Sánchez, David ⁽¹⁾, Arellano, Irene ⁽¹⁾, Molina-Medina, Antonio ⁽¹⁾, González-Piqueras, José ⁽¹⁾, Galve, Joan Miquel ⁽¹⁾, Rodríguez, Esteban ⁽²⁾, Romero, Ramiro ⁽²⁾, Calera, Alfonso ⁽¹⁾

⁽¹⁾ Grupo de Teledetección y SIG. Instituto de Desarrollo Regional. Universidad de Castilla-La Mancha.N. albacete (españa).



 0000-0003-3356-5609, jaime.campoy@uclm.es ;  0000-0003-1027-9351, juanmanuel.sanchez@uclm.es.

 0009-0005-3666-9739, antonio.beltran@uclm.es ; david.sanchezperez@uclm.es ; irene.arellano@uclm.es

 0000-0002-3706-2489, antoniojesus.molina@uclm.es ;  0000-0003-2226-5731, jose.gonzalez@uclm.es

 0000-0003-1066-7717, joanmiquel.galve@uclm.es ;  0000-0003-4271-2439, Alfonso.Calera@uclm.es.

⁽²⁾ AEMET, 8 Madrid (España).

 0000-0002-9608-1751, erodriguezg@aemet.es ;  0009-0007-0534-6712, rromerof@aemet.es.

Resumen: El Alto Guadiana presenta una elevada presión sobre los recursos hídricos debido a la expansión del regadío y la sobreexplotación de los acuíferos, situación que podría agravarse por los efectos del cambio climático. Este trabajo estima la demanda hídrica futura de los principales cultivos de regadío de la zona para los periodos 2021-2050, 2041-2070 y 2071-2100, bajo los escenarios climáticos SSP2-4.5 y SSP5-8.5 del IPCC. Para ello, se emplea el modelo de balance diario de agua en el suelo explorado por las raíces descrito en el manual de FAO 56 y asistido por teledetección, que integra las proyecciones climáticas regionalizadas por AEMET junto con coeficientes de cultivo derivados de las series temporales de imágenes de NDVI de satélite. Los resultados indican un incremento progresivo de la evapotranspiración de los cultivos y de las necesidades de agua de riego neto para los periodos futuros considerados. La metodología propuesta constituye una herramienta robusta para apoyar la planificación hidrológica y la gestión sostenible del regadío en un contexto de cambio climático.

Palabras clave: Riego; Evapotranspiración del cultivo; Balance de Agua; NDVI; Satélite

Analysis of the impact of climate change on the future water demand of irrigated crops in the Upper Guadiana using Remote Sensing and climate projections

Abstract: *The Upper Guadiana region is under high pressure on water resources due to the expansion of irrigated agriculture and the overexploitation of the aquifers, a situation that could be further aggravated by the impacts of climate change. This study estimates the future water demand of the main irrigated crops in the area for the periods 2021-2050, 2041-2070 and 2071-2100 under the IPCC SSP2-4.5 and SSP5-8.5 climate scenarios. For this purpose, the daily soil water balance model described in the FAO 56 manual using a remote sensing-based approach is applied, integrating climate projections regionalized by AEMET together with crop coefficients derived from satellite NDVI time series. The results indicate a progressive increase in crop evapotranspiration and net irrigation water requirements for the future periods considered. The proposed methodology provides a robust tool to support hydrological planning and sustainable management of irrigated agriculture in a climate change context.*

Keywords: *Irrigation; Crop evapotranspiration; Soil water balance; NDVI; Satellite*

1. INTRODUCCIÓN

La zona del Alto Guadiana constituye una de las áreas más complejas desde el punto de vista de la gestión de los recursos hídricos de la Península Ibérica. Se trata de un territorio de carácter semiárido en el que la

agricultura de regadío ha experimentado un notable desarrollo durante las últimas décadas, convirtiéndose en un pilar fundamental de la economía regional. Este proceso ha ido acompañado de una fuerte dependencia de los recursos hídricos subterráneos, lo que ha dado lugar a situaciones prolongadas de sobreexplotación de

los acuíferos y a un acusado deterioro de los ecosistemas asociados, especialmente de los humedales de alto valor ambiental.

A esta problemática se suma el impacto del cambio climático, que introduce un factor adicional de incertidumbre en la disponibilidad futura de los recursos hídricos. Las proyecciones climáticas más recientes apuntan a un incremento progresivo de la temperatura y de la demanda evaporativa de la atmósfera, así como a cambios en los patrones de precipitación caracterizados por una mayor irregularidad temporal y espacial. Estas alteraciones conllevan un aumento significativo de las necesidades hídricas de los cultivos, incrementando la presión sobre unos recursos hídricos ya limitados.

En este escenario, el conocimiento de la futura demanda hídrica de los cultivos de regadío en el Alto Guadiana adquiere una relevancia estratégica. Esta información permitirá gestionar de manera más eficiente los recursos hídricos disponibles en la zona, facilitando el desarrollo de escenarios de adaptación al cambio climático basados en la mejora de la eficiencia en el uso del agua y cambios en los usos del suelo.

El objetivo principal de este trabajo es utilizar la descripción del ciclo de crecimiento desde las series temporales de imágenes de satélite para mejorar la estimación de la futura demanda hídrica de los principales cultivos en regadío de la zona del Alto Guadiana para diferentes periodos futuros (2021-2050, 2041-2070 y 2071-2100), considerando los efectos del cambio climático. Para ello, se emplean las proyecciones de los 11 modelos climáticos globales regionalizados por AEMET basadas en los escenarios integrados SSP-RCP desarrollados en el marco del Sexto Informe de Evaluación (AR6) del IPCC. En concreto, se analizan dos escenarios futuros: SSP2-4.5, que representa un escenario intermedio con políticas moderadas de mitigación y adaptación, y SSP5-8.5, que refleja un futuro con altas emisiones asociado al uso intensivo de combustibles fósiles.

La metodología aplicada para estimar la demanda hídrica de los cultivos es el modelo de balance diario de agua en el suelo explorado por las raíces descrito en el manual de FAO 56 (Allen *et al.*, 1998) y asistido por teledetección. Este enfoque integra como datos de entrada los valores diarios de precipitación y evapotranspiración de referencia (ET_o) derivados de los modelos climáticos, junto con un nuevo procedimiento que obtiene las curvas patrón que describen el ciclo de crecimiento de los cultivos a partir de series temporales de imágenes multispectrales de satélite.

Los resultados obtenidos permitirán anticipar el impacto del cambio climático sobre el consumo de agua en los cultivos de regadío, proporcionando una herramienta robusta y operativa que respalde la planificación hidrológica y la adaptación del sector agrícola a escenarios futuros. Además, la información derivada de la metodología propuesta resulta de gran utilidad para el desarrollo de estrategias que garanticen un uso eficiente y sostenible de los recursos hídricos a largo plazo en un contexto de cambio climático.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Zona de estudio

El presente trabajo se centra en la zona del Alto Guadiana, localizada en el centro-sur de la Península Ibérica, ver Figura 1. La zona abarca las provincias de Ciudad Real, Albacete, Toledo y Cuenca, dentro de la Demarcación Hidrográfica del Guadiana, y presenta un clima mediterráneo-continental con una precipitación media en torno a los 400 mm/año. En la Tabla 1 se presentan los cultivos principales de regadío que se han determinado en función de la superficie que ocupan en la zona de estudio.

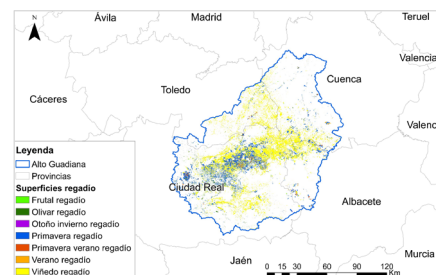


Figura 1. Mapa de cultivos regados en el Alto Guadiana.

Tabla 1. Cultivos principales de regadío, superficie dedicada a cada uno de ellos y su porcentaje correspondiente.

Cultivos principales	Superficie (ha)	Porcentaje (%)
Cereal primavera	61133	21.4
Ajo	9077	3.2
Adormidera guisante	4527	1.6
Otros cultivos primavera	4176	1.5
Cebolla	3523	1.2
Melón/sandía	7326	2.6
Otros cultivos verano	6190	2.2
Alfalfa	385	0.1
Doble cosecha	591	0.2
Viña vinificación	150591	52.7
Olivo	20311	7.1
Frutal cáscara	18063	6.3

2.2. Balance de agua asistido por teledetección

La estimación de la evapotranspiración del cultivo (ET_c) y las necesidades de agua de riego neto se realiza mediante el modelo de balance diario de agua en el suelo explorado por las raíces descrito en el manual de FAO 56 y asistido por teledetección. Este modelo calcula las variaciones diarias del contenido de agua en el suelo considerando las entradas (precipitación, riego, ascenso capilar) y salidas (ET_c, percolación profunda, escorrentía) en el sistema. El modelo estima la ET_c mediante la metodología denominada Coeficiente de Cultivo-Evapotranspiración de Referencia K_c-ET_o, que se describe detalladamente en el manual FAO 56 (Allen *et al.*, 1998). El modelo aplica el enfoque del coeficiente dual del cultivo, que determina por separado los efectos de la transpiración del cultivo y de la evaporación en el suelo. La metodología propuesta integra el coeficiente basal de cultivo (K_{cb}) derivado de la serie temporal de imágenes NDVI en el modelo diario de balance de agua en el suelo (Campoy *et al.*, 2023).

2.3. Datos meteorológicos

Los datos meteorológicos requeridos en el balance de agua son la precipitación y la evapotranspiración de referencia (ET_o) a escala diaria. Para el periodo observado, AEMET proporciona valores observacionales diarios de precipitación, temperatura máxima (T_{máx}) y temperatura mínima (T_{mín}). Por otro lado, cada uno de los 11 modelos climáticos del sistema AR6 (ACCESS-CM2, CMCC-CM2-SR5, CNRM-ESM2-1, EC-Earth3-Veg, IITM-ESM, KACE-1-0-G, MIROC6, MPI-ESM1-2-HR, MRI-ESM2-0, NorESM2-MM, UKESM1-0-LL) aportan proyecciones diarias de precipitación, T_{máx} y T_{mín}, tanto para el escenario histórico como para los escenarios futuros considerados (SSP2-4.5 y SSP5-8.5). Los valores diarios de ET_o son calculados a partir de los valores de T_{máx} y T_{mín}, y posteriormente son corregidos los sesgos mediante ajustes basados en los datos observacionales de ET_o (Sánchez *et al.*, 2025).

2.4. Patrones temporales para describir el crecimiento de los cultivos. Imágenes de satélite

Tradicionalmente la descripción del ciclo de crecimiento del cultivo ha descansado en el conocimiento de las fechas de siembra y cosecha de los diferentes cultivos (Gabr, 2023). Sobre la base de esta información de fechas de siembra y cosecha, el procedimiento usual para describir el crecimiento del cultivo suele ser el de dibujar una curva de evolución del coeficiente de cultivo, que sigue aquellas genéricas descritas en FAO 56 en muchos casos, lo que suele llevar a curvas teóricas que no acaban de reflejar las características reales del crecimiento de los cultivos, especialmente en cultivos como los leñosos.

Por ello, en este trabajo se propone describir el ciclo de crecimiento mediante series temporales de imágenes NDVI adquiridas por los satélites Sentinel 2 (S2A, S2B, S2C), que permiten caracterizar con precisión el patrón temporal del crecimiento de los cultivos. Los valores de NDVI utilizados se han obtenido a partir de imágenes correspondientes a los años 2022 y 2023, seleccionando únicamente aquellas imágenes libres de nubes, lo que permite representar de forma fiable el comportamiento reciente de los cultivos en la zona de estudio.

Las curvas patrón se obtienen para cada cultivo a partir del valor promedio del NDVI calculado sobre un conjunto representativo de parcelas regadas de la zona de estudio lo que permite caracterizar el comportamiento medio del cultivo, como se muestra en la Figura 2.

Los valores NDVI utilizados son valores normalizados, obtenidos al reescalar el valor NDVI_{TOA} (*Top of the Atmosphere*) a los correspondientes a superficies consideradas invariantes (0.91 para vegetación densa como alfalfa y 0.15-0.20 suelo desnudo). La alta resolución espacial (10x10m) y la alta frecuencia (tiempo de revisita entre 2 y 5 días) de las imágenes NDVI, permiten describir con precisión el ciclo de crecimiento del cultivo. El valor de NDVI se interpola entre imágenes consecutivas para obtener valores diarios y se transforma en valor del coeficiente de cultivo basal (K_{cb})

mediante una ecuación lineal robusta y ampliamente utilizada propuesta por Campos *et al.*, (2010).

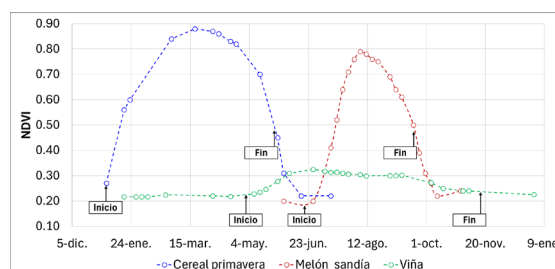


Figura 2. Curvas patrón del cereal de primavera, melón/sandía y viña de la zona de estudio, indicando el inicio y el final del ciclo de crecimiento de cada cultivo analizado.

2.5. Procedimiento de cálculo

El balance de agua utiliza como inputs los valores diarios de la precipitación y ET_o para el periodo observado y para cada uno de los 11 modelos de proyecciones climáticas del sistema AR6 para el escenario histórico y para los dos escenarios futuros considerados (SSP2-4.5 y SSP5-8.5). A estos inputs se unen las curvas patrón de los ciclos de crecimiento de los principales cultivos de regadío de la zona de estudio obtenidas a partir de series temporales de imágenes NDVI de satélite, que determinan la métrica temporal en la que el cultivo se desarrolla.

Las demandas de agua del cultivo (ET_c) y el riego neto (mensual y anual) se estiman durante el ciclo de crecimiento del cultivo para cada uno de los 11 modelos en el escenario histórico, obteniendo los promedios correspondientes al período de control (1981-2010). Posteriormente, se realiza el mismo cálculo para los periodos futuros (2021-2050, 2051-2070 y 2071-2100) en los escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5. A continuación, se determina la señal de cambio, es decir, la variación porcentual de las proyecciones futuras en comparación con el período de control, para cada modelo, cultivo y escenario. Una vez obtenida la señal de cambio para cada cultivo y periodo, se calculan los valores absolutos de ET_c y riego neto durante el ciclo de cultivo para los periodos futuros, aplicando la señal de cambio a las estimaciones realizadas con los datos observados del periodo 1981-2010. Finalmente, se estima el volumen total de agua de riego neto requerido para cada uno de los periodos futuros, considerando la distribución actual de la superficie de los cultivos de regadío en la zona de estudio (ver Tabla 1).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Tabla 2 se presenta la ET_c y el riego neto estimado para el cereal de primavera, melón/sandía y viña de la zona de estudio, para cada periodo futuro y para los escenarios considerados.

La Figura 3 muestra el volumen total de agua de riego neto requerido (hm³) en la zona, considerando las superficies de los principales cultivos indicadas en la Tabla 1, calculado para el periodo observado y para los periodos futuros en los escenarios analizados.

Los resultados obtenidos muestran un incremento en el consumo hídrico de los cultivos de regadío en la zona de estudio para los periodos futuros analizados, en comparación con el periodo de control establecido (1981-2010). Aunque todos los cultivos presentan incrementos en la demanda hídrica, la magnitud del cambio no es homogénea y varía en función del cultivo, del escenario climático y del horizonte temporal considerado.

De esta manera, se estima un incremento promedio de la ETC del 7%, 9-11% y 11-21% para los periodos futuros 2021-2050, 2041-2070 y 2071-2100, respectivamente, y en función de cada uno de los escenarios futuros considerados (SSP2-4.5 y SSP5-8.5). Asimismo, se estima un aumento en las necesidades de agua de riego neto de los cultivos del 11-15%, 16-23% y 23-42% para los mismos periodos futuros y escenarios analizados.

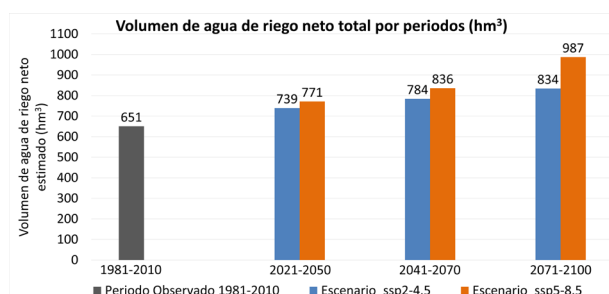


Figura 3. Volumen de agua de riego neto total requerido en la zona, en hm³. La figura muestra los resultados calculados para el periodo observado y los periodos futuros con los escenarios considerados.

Tabla 2. ETC y riego neto (en mm) acumulados durante el ciclo de crecimiento calculados para cereal de primavera, melón/sandía y viña, para cada periodo futuro considerado y para los dos escenarios futuros. Se representa el valor promedio y desviación estándar (entre paréntesis) de los modelos utilizados.

Cultivo	Periodo	ETc (mm)		Riego neto (mm)	
		SSP 2-4.5	SSP 5-8.5	SSP 2-4.5	SSP 5-8.5
Cereal primavera	2021-2050	425 (7)	428 (9)	245 (9)	259 (16)
	2041-2070	435 (9)	446 (11)	259 (10)	284 (14)
	2071-2100	448 (14)	494 (19)	279 (17)	344 (25)
Melón sandía	2021-2050	527 (9)	534 (10)	481 (15)	491 (12)
	2041-2070	540 (12)	556 (11)	498 (17)	515 (14)
	2071-2100	553 (12)	598 (19)	515 (14)	562 (22)
Viña vinificación	2021-2050	382 (5)	381 (7)	175 (12)	182 (10)
	2041-2070	384 (6)	391 (7)	188 (12)	199 (12)
	2071-2100	389 (9)	408 (9)	201 (11)	238 (18)

Sin embargo, es necesario señalar que en este trabajo se parte de la hipótesis de que los patrones temporales del ciclo de crecimiento de los cultivos regados son cuasi-invariantes en el tiempo, es decir, se asumen estáticos en cuanto a la fenología del cultivo. No obstante, el propio cambio climático, las prácticas de manejo y la incorporación de nuevas variedades pueden influir significativamente en la fenología (Estrella et al., 2007), lo que podría tener un impacto relevante en la estimación de la demanda de agua de riego, lo que requiere futura investigación.

4. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos evidencian que el cambio climático descrito por los modelos tendrá un impacto significativo sobre la demanda hídrica de los cultivos de regadío en el Alto Guadiana. Se prevé un incremento progresivo tanto de la evapotranspiración de los cultivos como de las necesidades de agua de riego neto para los periodos futuros considerados.

La integración de las proyecciones climáticas en el modelo de balance de agua asistido por teledetección constituye una metodología robusta y operativa que permite evaluar escenarios futuros de demanda hídrica de los cultivos en grandes áreas.

La información obtenida resulta clave para apoyar la planificación hidrológica y el diseño de estrategias de adaptación orientadas a mejorar la eficiencia y sostenibilidad del regadío en un contexto de creciente escasez de recursos hídricos.

5. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido realizado en el marco del proyecto ECLIMAR (Evaluación de los Efectos del cambio CLIMático sobre las demandas de Agua en Regadíos) financiado por el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (Fundación Biodiversidad). Los autores agradecen la colaboración de AEMET y la Oficina Española de Cambio Climático.

6. REFERENCIAS

Allen, R. G., Raes, D., & Smith, M. (1998). Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Requirements. In Irrig. Drain. Pap. No. 56, FAO, Rome, Italy.

Campos, I., Neale, C. M. U., Calera, A., Balbontín, C., & González-Piqueras, J. (2010). Assessing satellite-based basal crop coefficients for irrigated grapes (*Vitis vinifera* L.). *Agricultural Water Management*, 98(1), 45–54.

Campoy, J., Campos, I., Villodre, J., Bodas, V., Osann, A., & Calera, A. (2023). Remote Sensing-based crop yield model at field and within-field scales in wheat and barley crops. *European Journal of Agronomy*, 143, 126720.

Estrella, N., Sparks, T. H., & Menzel, A. (2007). Trends and temperature response in the phenology of crops in Germany. *Global Change Biology*, 13(8), 1737–1747.

Gabr, M. E. (2023). Impact of climatic changes on future irrigation water requirement in the Middle East and North Africa's region: a case study of upper Egypt. *Applied Water Science*, 13(7), 158.

Sánchez, J. M., Beltrán, A., Calera, A., Campoy, J., Galve, J. M., Rodríguez, E., & Romero, R. (2025). Proyecciones climáticas de la evapotranspiración de referencia en España, como principal factor de las demandas de agua en regadíos. XIII Congreso de La AEC. Cambio Climático y Sociedad: De La Ciencia Básica a Los Servicios Climáticos. San Lorenzo de El Escorial (Madrid), 22 al 24 Enero de 2025.