

Modelización del secuestro de carbono en plantaciones de higuera mediante teledetección.

Antonio Jesús Galán ^{1*}, Margarita López-Corrales ¹ y José Marques da Silva ^{2,3}

¹ Junta de Extremadura, Centro de Investigación Finca La Orden-Valdesequera (CICYTEX), Fruticultura, Autovía Madrid-Lisboa, s/n, 06187, Guadajira, Spain.

² MED—Mediterranean Institute for Agriculture, Environment and Development and CHANGE—Global Change and Sustainability Institute, Institute for Advanced Studies and Research, Universidade de Évora, Pólo da Mitra, Ap. 94, 7006-554 Évora, Portugal.

³ Agroinsider Lda. (Spin-off of Universidade de Évora), Parque Industrial e Tecnológico de Évora, R. Circular Norte, NERE, Sala 18, 7005-841 Évora, Portugal

* Correspondence: antoniojesus.galan@juntaex.es.

Abstract: El cambio climático constituye uno de los mayores desafíos actuales, siendo prioritaria la reducción de gases de efecto invernadero como el dióxido de carbono (CO₂). En este contexto, los sistemas agrícolas actúan como sumideros de carbono mediante la captura de CO₂ atmosférico por fotosíntesis y su almacenamiento en la biomasa. La teledetección se presenta como una herramienta precisa, eficiente y no invasiva para estimar biomasa y monitorizar grandes superficies. Extremadura, al suroeste de España, concentra más del 50% de la superficie nacional cultivada con higuera (*Ficus carica* L.), un frutal con alto potencial de secuestro de carbono. Este estudio evaluó tres sistemas de manejo (tradicional en secano, intensivo y superintensivo en regadío), correlacionando parámetros estructurales de los árboles, como el diámetro del tronco, con los índices espectrales NDVI y NDWI obtenidos mediante imágenes Sentinel-2 (2019–2024). Los resultados muestran una correlación positiva entre ambos índices y la cantidad de CO₂ acumulado por metro de tronco, destacando NDWI como mejor predictor del crecimiento diametral ($R^2 = 0,87$). Este trabajo contribuye al desarrollo de modelos innovadores para cuantificar el carbono fijado por frutales, apoyando estrategias de mitigación climática y el potencial diseño de esquemas de créditos de carbono.

Keywords: Cambio climático, Dióxido de Carbono, Teledetección, *Ficus carica* L.

1. Introducción

El cambio climático representa uno de los mayores desafíos de la sociedad actual y es causado principalmente por la emisión de gases de efecto invernadero (GEI)[1]. Entre estos, el dióxido de carbono (CO₂), el metano (CH₄) y el óxido nitroso (N₂O) son los tres más importantes, contribuyendo en conjunto al 90% del calentamiento global antropogénico [2]. Estas emisiones han generado cambios en los principales indicadores climáticos, como la temperatura, las precipitaciones, la elevación del nivel del mar, la acidificación de los océanos y la intensificación de eventos climáticos extremos. Entre los desastres asociados a estas variaciones se incluyen

sequías, inundaciones, huracanes, tormentas severas, olas de calor, incendios forestales, olas de frío y deslizamientos de tierra [3].

A nivel global, las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) continúan en aumento. No obstante, existen diversas estrategias para mitigar su impacto, entre las cuales destacan, por su origen natural, el cultivo y la conservación de árboles frutales y forestales [4]. En concreto, el CO₂ es absorbido de la atmósfera y almacenado como carbono en la biomasa en forma de tronco, ramas, hojas, raíces e incorporándolo al suelo. [5]. En el secuestro de Carbono en árboles frutales intervienen diversos factores como edad de la plantación, especie, necesidades nutritivas, disponibilidad de agua, latitud, temperatura y los gases atmosféricos influyen en gran medida en la tasa de secuestro de carbono[4] .

La estimación *in situ* del secuestro de CO₂ por los cultivos, es una tarea difícil y costosa que requiere una exploración espacial de forma exhaustiva [6]. Actualmente, la tecnología de teledetección se está utilizando para realizar estos cálculos. Los datos satelitales proporcionan valores de reflectividad en diferentes longitudes de onda, lo que permite monitorizar la captura de carbono en grandes superficies de forma precisa, rápida y económica [7].

La higuera (*Ficus carica* L.) es un cultivo en expansión en la región de Extremadura (España). Desde 2010, su superficie se ha duplicado, alcanzando 12821 ha en el año 2024, lo que representa el 55,7% de la superficie total cultivada en el país (ESYRCE, 2025). En esta zona, la higuera está establecida tanto en sistemas más tradicionales, con amplios marcos de plantación en secano, como en sistemas superintensivos, de marcos más reducidos y con riego [8].

Por ello, los objetivos de este estudio fueron determinar la relación entre distintos parámetros agronómicos y los índices satelitales NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada) y NDWI (Índice de Agua de Diferencia Normalizada), como primer paso para desarrollar un modelo que permita estimar la captura y el secuestro de carbono en el cultivo de la higuera.

2. Materiales y métodos.

Este estudio se realizó en 2024 en tres higuerales ubicados en las principales zonas productoras de higo de la comunidad autónoma de Extremadura. Cada uno de ellos representa un tipo de plantación, desde el sistema más tradicional hasta el más intensivo. Las características de las parcelas son las siguientes:

Tipo de plantación	de Características
Tradicional	 Variedad: Calabacita Superficie: 10,63 ha Marco plantación: 7 x 7 m (204 árboles/ha) Régimen hídrico: Secano Edad de plantación: 13 años Localización: La Nava de Santiago (Badajoz). (39° 0'39.30"N, 6° 3'41.15"O)
Intensivo	 Variedad: Calabacita Superficie: 18,10 ha Marco plantación: 5 x 5 m (400 árboles/ha) Régimen hídrico: Regadío Edad de plantación: 7 años Localización: Guareña (Badajoz). (39° 0'35.55"N, 6° 3'39.16"O)
Superintensivo	 Variedad: Calabacita Superficie: 13,34 ha Marco plantación: 4 x 2 m (1200 árboles/ha) Régimen hídrico: Regadío Edad de plantación: 5 años Localización: Conquista del Guadiana (Badajoz). (39° 6'41.38"N, 6° 2'35.37"O)

Se realizó un seguimiento durante los años 2019 a 2024 del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) y del Índice de Agua de Diferencia Normalizada (NDWI) mediante la aplicación smartAG (versión 4.5.8) de la empresa Agroinsider. Esta plataforma emplea datos de observación de la Tierra del programa Copernicus de la Agencia Espacial Europea, utilizando imágenes satelitales de los sensores Sentinel-1 y Sentinel-2. Los datos son descargados y procesados automáticamente

mediante algoritmos de inteligencia artificial que proporcionan macrodatos y el uso de técnicas de aprendizaje aplicadas al monitoreo agrícola [9].

Teniendo en cuenta los datos obtenidos entre los años 2019 y 2023, se seleccionaron tres puntos por parcela correspondiente a los máximos, mínimos y medios del NDVI, con el fin de representar de forma eficiente la variabilidad espacial de cada sistema de cultivo.

Una vez determinados los puntos de muestreo, se calculó el promedio anual de los valores de NDVI y NDWI correspondiente a cada punto, considerando el periodo comprendido entre septiembre de 2023 y finales de agosto de 2024, para obtener el promedio de un año.

A continuación, se seleccionaron nueve árboles por punto, sobre los cuales se midió el perímetro del tronco a 20 cm del suelo, utilizando cinta métrica. A partir de estas mediciones, se calculó el diámetro del tronco ($D = P/\pi$), y se estimó el crecimiento anual del diámetro dividiendo el valor total entre la edad del cultivo en cada sistema.

Posteriormente, se calculó la superficie transversal del tronco usando la fórmula del área del círculo $A = \pi \cdot (D/2)^2$, y se estimó el volumen de un metro de tronco como $V = A \cdot 100$ (en cm^3). La biomasa leñosa seca fue calculada multiplicando el volumen por la densidad de la madera, utilizando un valor de $0,54 \text{ g/cm}^3$, reportado por Odabaş-Serin y Kılıç (2020)[10] para madera de higuera. Para la estimación del contenido de carbono, se aplicó un coeficiente promedio de 0,46 [11], correspondiente al porcentaje de carbono en la materia seca de especies frutales. Finalmente, la cantidad de CO_2 equivalente almacenado se calculó multiplicando el carbono estimado por 3,67, siguiendo el factor de conversión estándar (IPCC, 2006).

3. Resultados

Para la selección de los puntos de muestreo en las parcelas, se utilizó el mapa rasterizado del promedio del NDVI correspondiente a los últimos cinco años (2019–2023), mostrado en la Figura 1. Con base en esta información, se identificaron los siguientes puntos:

- **Puntos con valores máximos de NDVI**, representados en las zonas por el color verde intenso: T1, I1 y S1.
- **Puntos con valores medios de NDVI**, representados en las zonas por el color amarillo: T2, I2 y S2.
- **Puntos con valores mínimos de NDVI**, representados en las zonas por el color azul: T3, I3 y S3.

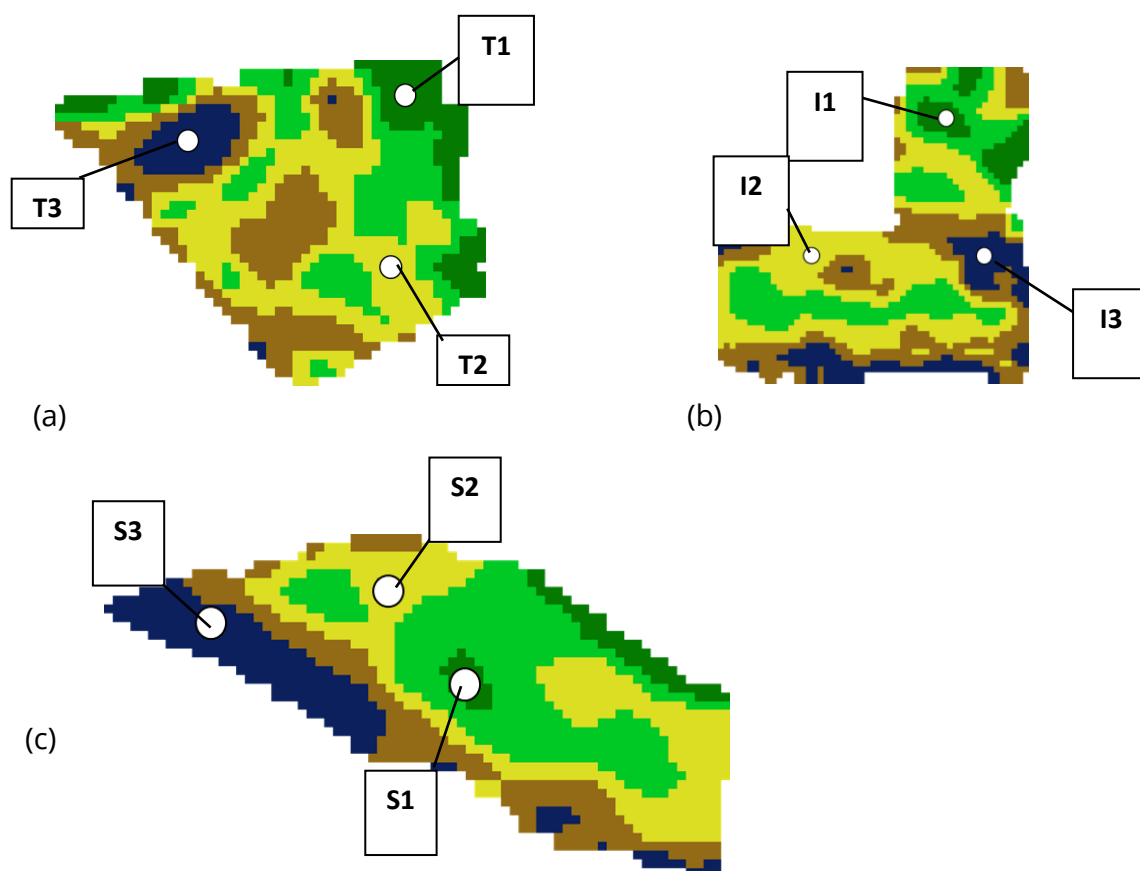
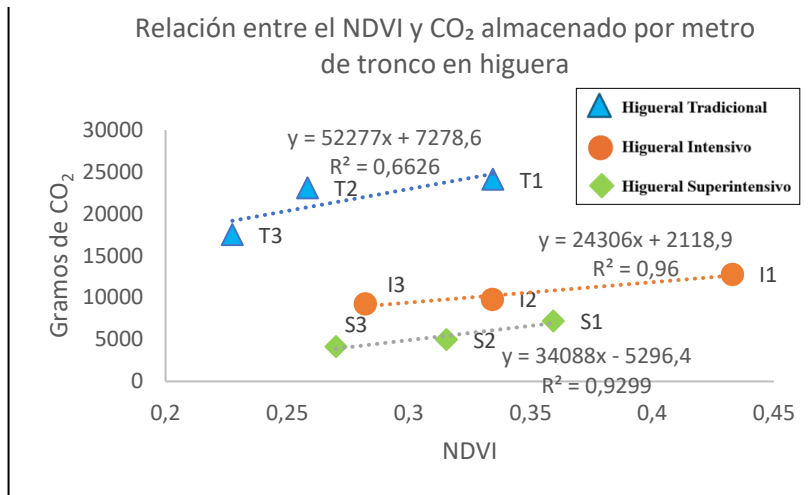
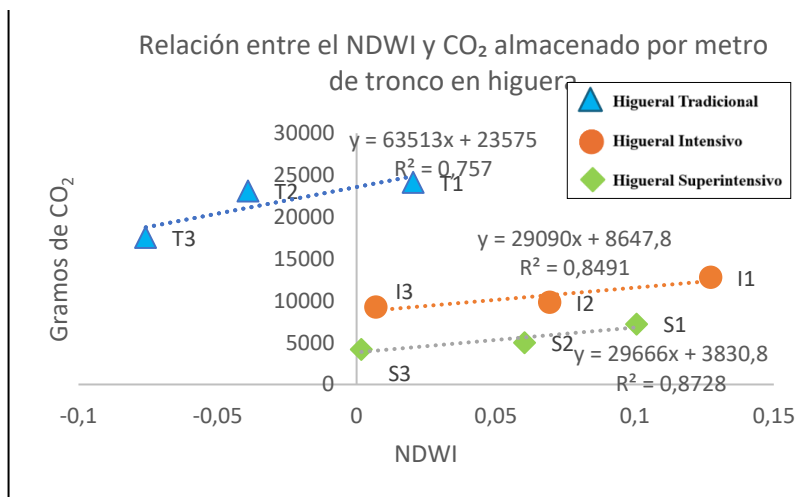


Figura 1. Mapa rasterizado del promedio de NDVI (2019-2023) de las parcelas en estudio y los puntos muestreados obtenido por SmartAG. (a) Higueral tradicional, (b) Higueral intensivo y (c) Higueral superintensivo.

La figura 2 presenta la relación entre NDVI/ NDWI y la cantidad de dióxido de carbono (CO_2) almacenado por metro de tronco en higuera bajo los tres sistemas de cultivo estudiados: tradicional en secano (azul), intensivo en regadío (naranja) y superintensivo en regadío (verde).



(a)



(b)

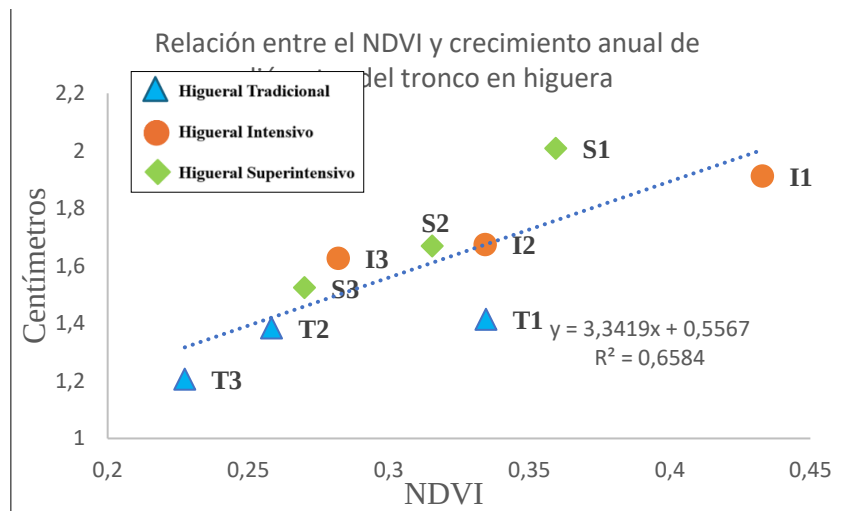
Figura 2. Relación entre la cantidad de CO₂ almacenado por metro de tronco en tres sistemas de cultivo de higuera y (a) NDVI, (b) NDWI.

En términos generales, tanto el NDVI como el NDWI mostraron un comportamiento similar en los tres sistemas de plantación, observándose en ambos casos una correlación positiva entre los valores de los índices y la cantidad de CO₂ acumulado por metro de tronco.

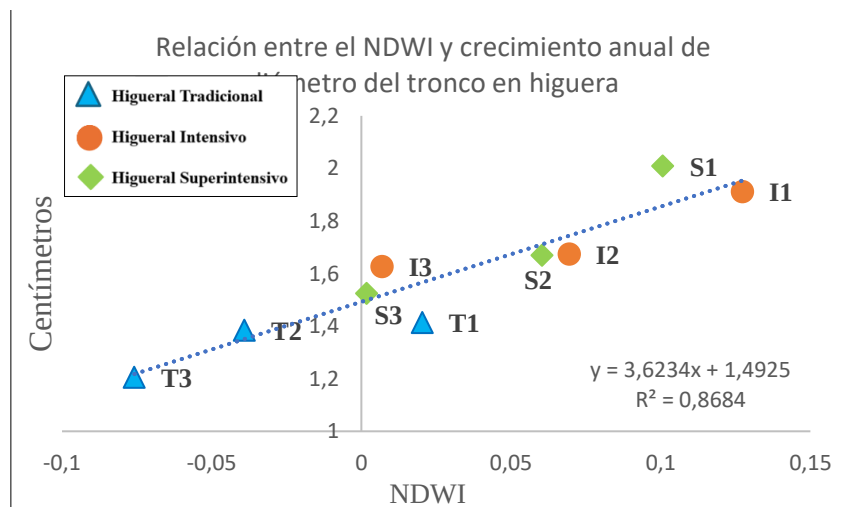
Respecto a la cantidad de CO₂ almacenado, los sistemas se ordenaron de mayor a menor en el siguiente orden: tradicional, intensivo y superintensivo, lo cual se relaciona con la edad de las plantaciones, de 14, 7 y 5 años respectivamente. Esta asociación fue particularmente fuerte en los sistemas intensivo y superintensivo, donde se observaron coeficientes de determinación (R²) superiores a 0.84, lo que sugiere una relación consistente entre la actividad fisiológica detectada por los índices espectrales y la capacidad de secuestro de carbono.

En cuanto a las pendientes de las regresiones, se observaron diferencias relevantes entre los sistemas de cultivo y los índices utilizados. Las pendientes más altas se registraron en el sistema tradicional, tanto para NDVI como para NDWI, lo que indica una mayor cantidad de CO₂ almacenado por unidad de incremento en el índice. Esto sugiere que, en sistemas más desarrollados y con mayor edad, pequeños aumentos en la respuesta espectral se traducen en una mayor acumulación de biomasa leñosa. En contraste, los sistemas intensivo y superintensivo, con árboles más jóvenes y menor desarrollo estructural, presentaron pendientes menores, reflejando una menor eficiencia en términos de acumulación de carbono por unidad de índice.

La Figura 3 muestra la relación entre los índices espectrales NDVI y NDWI con el crecimiento anual del diámetro del tronco en las diferentes parcelas estudiadas y su relación entre sí. En ambos casos, se observa una tendencia positiva, es decir, a medida que aumentan los valores de NDVI o NDWI, también lo hace el incremento del diámetro del tronco.



(a)



(b)

Figura 3. Relación entre el crecimiento anual del diámetro del tronco en tres sistemas de cultivo de higuera y (a) NDVI, (b) NDWI.

Se observa que los sistemas intensivo y superintensivo presentan crecimientos anuales del diámetro del tronco mayores y más similares entre sí, en comparación con el sistema tradicional, que muestra los valores más bajos. Esta diferencia puede atribuirse al manejo del riego, ya que tanto el sistema intensivo como el superintensivo cuentan con riego, mientras que el sistema tradicional es de secano. El aporte hídrico constante podría favorecer un desarrollo vegetativo más vigoroso y sostenido, traducándose en un mayor incremento anual del diámetro del tronco.

En el caso de NDVI presenta una pendiente del 3,34 y un coeficiente de determinación de $R^2 = 0.66$, lo que indica una relación moderadamente fuerte. Sin embargo, algunos puntos (como S1 y T1) se desvían de la tendencia, lo que podría estar relacionado con características fisiológicas particulares o prácticas agronómicas. El índice NDWI presenta una pendiente ligeramente mayor (3,62) y un ajuste mucho más fuerte con $R^2 = 0,87$. Esto nos sugiere que el índice de agua de diferencia normalizada (NDWI), podría ser un mejor predictor de crecimiento en diámetro que el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI).

4. Conclusiones

El presente estudio demostró que los índices espectrales obtenidos por teledetección, en particular el NDVI y el NDWI, presentan una relación positiva con el crecimiento anual del tronco y con la cantidad de CO_2 almacenado en diferentes sistemas de cultivo de higuera. Entre ambos índices, el NDWI mostró un mayor grado de correlación, lo que indica que el contenido hídrico de la vegetación puede ser un predictor más sensible del desarrollo leñoso en comparación con la actividad fotosintética.

Los sistemas de cultivo con riego (intensivo y superintensivo) presentaron mayores incrementos anuales en el diámetro del tronco, probablemente como resultado de una mejor disponibilidad hídrica, mientras que el sistema tradicional (de secano) mostró un mayor almacenamiento total de CO_2 , atribuido a su mayor edad y desarrollo estructural acumulado.

Además, la integración de datos satelitales multianuales (2019–2023) y el análisis específico de puntos con valores extremos y medios de NDVI, permitió capturar de manera efectiva la variabilidad intra-parcelaria, evidenciando el potencial del monitoreo mediante plataformas como SmartAG para la gestión de cultivos leñosos y la estimación del secuestro de carbono.

En conjunto, los resultados respaldan la utilidad de los índices espectrales como herramientas no invasivas para la evaluación del crecimiento y la captura de carbono en sistemas agrícolas, y ofrecen una base metodológica para el desarrollo de modelos predictivos aplicables a diferentes condiciones de manejo en cultivos de higuera.

Financiación: Esta investigación se encuentra dentro del proyecto 0100_TID4AGRO_4_E. El proyecto 0100_TID4AGRO_4_E está cofinanciado por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER) a través del Programa INTERREG VI-A España-Portugal (POCTEP) 2021-2027 de la Comisión Europea.

5. Bibliografía

1. Oreggioni, G.D.; Monforti Ferraio, F.; Crippa, M.; Muntean, M.; Schaaf, E.; Guizzardi, D.; Solazzo, E.; Duerr, M.; Perry, M.; Vignati, E. Climate Change in a Changing World: Socio-Economic and Technological Transitions, Regulatory Frameworks and Trends on Global Greenhouse Gas Emissions from EDGAR v.5.0. *Global Environmental Change* **2021**, *70*, doi:10.1016/j.gloenvcha.2021.102350.
2. Li, K.; Du, L.; Qin, C.; Bolan, N.; Wang, H.; Wang, H. Microplastic Pollution as an Environmental Risk Exacerbating the Greenhouse Effect and Climate Change: A Review. *Carbon Research* **2024**, *3*.
3. Climate Action and Support Trends; 2019;
4. Sharma, S.; Rana, V.S.; Prasad, H.; Lakra, J.; Sharma, U. Appraisal of Carbon Capture, Storage, and Utilization Through Fruit Crops. *Front Environ Sci* **2021**, *9*.
5. Hurd, C.L.; Law, C.S.; Bach, L.T.; Britton, D.; Hovenden, M.; Paine, E.R.; Raven, J.A.; Tamsitt, V.; Boyd, P.W. Forensic Carbon Accounting: Assessing the Role of Seaweeds for Carbon Sequestration. *J Phycol* **2022**, *58*, 347–363.
6. Uttaruk, Y.; Laosuwan, T. Carbon Sequestration Assessment of the Orchards Using Satellite Data. *Journal of Ecological Engineering* **2017**, *18*, 11–17, doi:10.12911/22998993/66257.
7. Laosuwan, T.J.; Uttaruk, P.; Klinhom, A.; Butthep, A.; Samek, A.; ' ' And Skole, J.H. The Development of Web-Based GIS Application for Agroforestry Carbon Sequestration Offset Project in Thailand;
8. Galán, A.J.; Martín, A.; Torres-Vila, L.M.; Ruiz-Moyano, S.; Galván, A.I.; Serradilla, M.J.; López-Corrales, M. Quantification and Identification of Damage Caused by Pests and Fungi in Dried Figs from Orchards with Different Levels of Agronomic Management in the Main Production Areas of Extremadura (SW Spain). *Crop Protection* **2023**, *172*, 106334, doi:10.1016/j.cropro.2023.106334.
9. Lourenco, P.; Da Silva, J.R.M.; Paixao, L. SmartAG - A Smart Farming Tool. In Proceedings of the 6th Experiment at International Conference, exp.at 2023 - Proceedings; Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2023; pp. 51–52.
10. Makalesi, A.; Odabaş Serin, Z.; Penezoğlu, K. İncir (Ficus Carica) Odunun Kimyasal, Fiziksel ve Morfolojik Özellikleri. *European Journal of Science and Technology* **2020**, 843–849, doi:10.31590/ejosat.784500.
11. Mota, C.; Alcaraz-López, C.; Iglesias, M.; Martínez-Ballesta, M.C.; Carvajal, Micaela. *Investigación Sobre La Absorción de Co2 Por Los Cultivos Más Representativos.*; Murcia, España, 2010;