

ARTICLE INFO

Received 17 September 2025
Revised 19 October 2025
Accepted 21 October 2025
Published 30 December 2025

PAESAGGI PRODUTTIVI IN TRASFORMAZIONE

Sistemi agro-energetici e benefici ambientali

PRODUCTIVE LANDSCAPES IN TRANSFORMATION

Agro-energy systems and environmental benefits

Federica Marandino

ABSTRACT

Nel quadro della transizione ecologica i paesaggi produttivi assumono un ruolo strategico come sistemi dinamici in cui si intrecciano pratiche insediative, cicli ecologici e dispositivi tecnologici. Il contributo propone una scoping review della letteratura sul ruolo delle infrastrutture agro-energetiche nei processi di trasformazione dei paesaggi produttivi, con particolare attenzione ai sistemi agrivoltaici, considerati dispositivi multifunzionali e adattivi. L'analisi individua quattro assi principali: riconfigurazione multifunzionale dei paesaggi produttivi, risposta adattiva e resilienza climatica, produzione di benefici ambientali e potenziamento dei servizi ecosistemici, adozione e implementazione di modelli valutativi e di governance. I risultati evidenziano il potenziale contributo dei sistemi agrivoltaici al raggiungimento di diversi Obiettivi di Sviluppo Sostenibile.

Within the framework of the ecological transition, productive landscapes assume a strategic role as dynamic systems in which settlement practices, ecological cycles, and technological devices intertwine. This paper presents a scoping review of the literature on the role of agro-energy infrastructures in the transformation of productive landscapes, with particular attention to agrivoltaic systems, which are regarded as multifunctional and adaptive devices. The analysis identifies four principal axes: multifunctional reconfiguration of productive landscapes; adaptive response and climate resilience; production of environmental benefits and enhancement of ecosystem services; and adoption and implementation of assessment and governance models. The results highlight the potential contribution of agrivoltaic systems to several Sustainable Development Goals.

KEYWORDS

sistemi agrivoltaici, paesaggi produttivi, gestione delle risorse, servizi ecosistemici, crescita economica

agrivoltaic systems, productive landscapes, resource management, ecosystem services, economic growth



Federica Marandino, Architetto, è Dottoranda presso il Dipartimento di Architettura dell'Università di Napoli 'Federico II' (Italia). Svolge attività di ricerca nell'ambito della Tecnologia dell'Architettura e Progettazione Ambientale con focus sull'applicazione di sistemi integrati per la produzione di energia da fonti rinnovabili in contesto rurale, periurbano e nell'ambiente costruito. E-mail: federica.marandino@unina.it

I paesaggi produttivi, definiti come spazi territoriali trasformati dall'azione antropica finalizzata alla produzione di beni e servizi, sono l'esito di processi evolutivi in cui le tecnologie hanno progressivamente ridefinito i rapporti tra pratiche agricole, sistemi insediativi e risorse naturali (Sereni, 1961). Con la rivoluzione industriale la meccanizzazione ha modificato i cicli culturali e l'organizzazione del lavoro, mentre la selezione genetica ha orientato le produzioni verso varietà ad alta resa e standardizzate (Grigg, 1995): ne è derivato un modello agricolo integrato ai mercati e alle reti globali, accompagnato da una trasformazione radicale degli spazi produttivi (Mazoyer and Roudart, 2006). Questa continuità può essere letta alla luce del concetto di 'tecnologia appropriata', intesa come mezzo flessibile capace di potenziare la capacità dell'uomo e di produrre condizioni di vita differenziate (Amirante, 1985).

La fase odierna, segnata dalle transizioni ecologica ed energetica, introduce nuove trasformazioni nei paesaggi produttivi in risposta ai cambiamenti climatici, alla gestione sostenibile delle risorse e alla necessità di garantire sicurezza alimentare ed energetica. L'Agenda 2030 delle Nazioni Unite (UN, 2015) e i rapporti IEA (2022) e OECD (2024) sottolineano che la resilienza dei territori dipende dall'integrazione di obiettivi ambientali, energetici e socio-economici; in questo quadro l'agricoltura è oggi affiancata da infrastrutture per la generazione di energia rinnovabile che ridefiniscono gli usi agricoli del suolo e pongono nuove sfide di compatibilità.

All'interno di questo quadro si colloca la diffusione dei sistemi agrivoltaici, promossi dalle misure della Missione 2 del Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (PNRR; MIMIT, 2023) e della Politica Agricola Comune 2023-2027 (European Parliament and Council, 2024), come dispositivi agro-energetici capaci di integrare produzione agricola ed energetica nello stesso spazio. I benefici che ne derivano interessano i settori produttivi, attraverso il miglioramento della resilienza delle colture agli stress climatici (Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE, 2024), l'impiego più efficiente della risorsa idrica e la valorizzazione delle produzioni locali e si estendono al sistema socio-economico, grazie alla diversificazione del reddito agricolo e allo sviluppo di nuove professionalità ibride tra agricoltura ed energia (Fig. 1).

L'insieme di tali dinamiche concorre al rafforzamento della resilienza delle comunità locali, poiché questi sistemi possono attivare processi inclusivi di governance e favorire una distribuzione più equilibrata dei benefici, aspetti riconosciuti come condizioni essenziali per l'accettazione sociale e per l'attivazione di percorsi di sviluppo sostenibile (Torra and Aschemann-Witzel, 2023).

In tale ottica il presente articolo chiarisce come i sistemi agrivoltaici concorrano alla riconfigurazione dei paesaggi produttivi, rafforzando la resilienza climatica e attivando co-benefici ambientali e socio-economici in linea con gli Obiettivi di Sviluppo Sostenibile (SDG). L'originalità consiste nell'integrare le prospettive tecnologica, agro-ambientale e socio-economica dentro una griglia di lettura comune che guida la codifica delle fonti e la discussione. Il contributo combina la scoping review della letteratura scientifica con la consultazione bibliografica tradizionale, così da includere contributi non sempre indicizzati. Rispetto alle review più recenti, la presente sistematizza le evidenze tramite

cluster tematici derivati da mappe di co-occorrenza delle parole chiave (VOSviewer), che rendono leggibili i nuclei concettuali e le loro relazioni, ne mostrano l'evoluzione temporale e mettono in luce lacune e convergenze.

La trattazione si articola come segue: rapporto tra paesaggi produttivi e tecnologia; metodi e criteri di selezione della letteratura sul tema; risultati quantitativi con mappatura dei cluster; analisi dei temi emergenti alla luce delle tre prospettive e della loro coerenza con gli SDG; conclusioni, limiti e direzioni di ricerca che alimentano il dibattito contemporaneo.

Paesaggi produttivi e tecnologia: continuità e trasformazioni

Il paesaggio produttivo può essere interpretato come costruzione storica e culturale oltre che ecologica, risultato dell'azione sistematica che l'uomo imprime al paesaggio naturale attraverso le attività agricole (Sereni, 1961). Ogni rivoluzione agricola ha comportato una riorganizzazione strutturale degli ecosistemi coltivati: dai sistemi idraulici e di terrazzamento alle rotazioni colturali, fino alle enclosures europee e alla meccanizzazione moderna (Mazoyer and Roudart, 2006; Grigg, 1995). Un antecedente di particolare rilievo è la centuriazione romana, dispositivo tecnico-territoriale fondato sulla trama ortogonale di cardines e decumani, che integrava produzione, mobilità e gestione idrica e ha impresso al paesaggio un ordine geometrico durevole (Chevallier, 1961).

Accanto a questa matrice di scala territoriale, le comunità rurali hanno progressivamente elaborato soluzioni riconoscibili come tecnologie adattive, sviluppate per rispondere a condizioni pedoclimatiche e socio-economiche specifiche. I terrazzamenti mediterranei hanno reso coltivabili i versanti acclivi, stabilizzando i suoli e regolando i deflussi idrici; le pergole viticole trentine hanno organizzato lo spazio produttivo in modo da modulare luce e ventilazione, migliorare la qualità delle uve e tutelare il benessere dei lavoratori; i limoneti terrazzati della Costiera sorrentina, con muri a secco e pergolati lignei (Figg. 2-4), hanno coniugato la protezione dalle sollecitazioni climatiche con la sicurezza dei pendii e la continuità delle produzioni (Scaramellini and Varotto, 2008). Questi sistemi, interpretabili come archivi di soluzioni resilienti, anticipano la concezione contemporanea di infrastruttura territoriale (Figg. 5-7; Angelucci, 2015) e riflettono il principio di innovazione localmente appropriata (Scudo, 2017).

Nel Novecento, con la meccanizzazione e le prime infrastrutture energetiche, il paesaggio produttivo assume la configurazione di paesaggio agro-energetico, in cui funzioni agricole ed energetiche convivono (Ginelli and Daglio, 2016). Le ricerche recenti sottolineano la necessità di coniugare produzione e qualità paesaggistica e di adottare una visione transdisciplinare che consideri modelli, densità e servizi ecosistemici nei layout energetici (Scognamiglio, 2016).

In questa prospettiva i sistemi agrivoltaici ereditano la logica delle tecnologie adattive, ponendosi in continuità con i principi di modularità (intesa come organizzazione per campate e file su griglie orientate con parametri controllabili come passo e altezza utile); ombreggiamento controllato (ovvero regolazione selettiva della radiazione attraverso assetti fissi o a inseguimento per mitigare lo stress idrico e termico e ottimizzare la fotosintesi) e mul-

tifunzionalità (intesa come produzione congiunta di beni privati – alimenti ed energia – e di beni e servizi ecosistemici con elevata interdipendenza tra gli output che richiede criteri progettuali e strumenti di governance dedicati).

Metodologia, strumenti e criteri di selezione

La ricerca adotta l'approccio della scoping review (Arksey and O'Malley, 2005) con riferimento alla checklist PRISMA-ScR (Peters et alii, 2020), adeguato a un ambito emergente e interdisciplinare per mappare risultati e lacune della letteratura.

Come banca dati di riferimento è stata utilizzata Scopus (Elsevier), interrogata nel campo 'title-abs-key' mediante ricerca avanzata. La scelta di basarsi su Scopus risponde all'esigenza di adottare un repertorio ampio e interdisciplinare, capace di garantire copertura internazionale e comparabilità tra risultati; eventuali lacune sono state compensate con l'integrazione di testi di biblioteca e fonti di letteratura grigia, comprendenti linee guida ministeriali, report di ricerca e documentazione progettuale non sempre indicizzati nelle banche dati digitali (Tab. 1).

La strategia di ricerca è stata costruita in maniera iterativa e ha previsto quattro passaggi successivi: una query iniziale su energie rinnovabili e paesaggi agricoli (16.723 risultati); una restrizione al solare (6.526 risultati); un filtro sugli studi relativi a uso del suolo e pianificazione territoriale (1.498 risultati); infine la focalizzazione sui sistemi agrivoltaici (138 risultati), che costituiscono il corpus finale analizzato. I record sono stati esportati in formato CSV ed esaminati attraverso uno screening su titolo e abstract, seguito da lettura del testo per verificarne l'ammissibilità.

I criteri di selezione hanno seguito lo schema Population / Concept / Context (PCC; Peters et alii, 2020), includendo paesaggi produttivi e agroecosistemi, infrastrutture agro-energetiche e sistemi agrivoltaici in contesti rurali e periurbani. Sono stati ammessi articoli scientifici, atti, linee guida e report, escludendo contributi solo tecnici privi di implicazioni paesaggistiche o socio-ambientali.

L'analisi delle parole chiave è stata realizzata con VOSviewer (van Eck and Waltman, 2010), utilizzando un thesaurus per uniformare varianti e sinonimi. La mappa dei co-occurrence network ha restituito nove cluster tematici, riconducibili a specifici sotto-ambiti di ricerca: agricoltura, energia, paesaggi produttivi, uso del suolo e doppio uso, cambiamenti climatici, biodiversità e servizi ecosistemici, tecnologia e innovazione, governance e contesti geografici. Sebbene distinti, questi cluster presentano una forte interconnessione semantica, riflesso della natura multidimensionale del tema.

Per garantire una lettura integrata, i cluster sono stati ricondotti a quattro assi interpretativi: 1) riconfigurazione multifunzionale dei paesaggi produttivi; 2) risposta adattiva e resilienza climatica; 3) benefici ambientali; 4) modelli valutativi e governance. Questo passaggio ha consentito di trasformare la rete semantica emersa dall'analisi bibliometrica in un framework interpretativo coerente, utilizzato come base per l'organizzazione dei risultati della letteratura.

Tra i limiti emersi vi sono la rapidità di evoluzione della produzione scientifica e il livello di dettaglio dei contributi inclusi che è eterogeneo: alcuni articoli riportano dati sperimentali e metriche misurabili, mentre altri si limitano a descrizioni qualitative, riducendo la possibilità di confronti diretti.

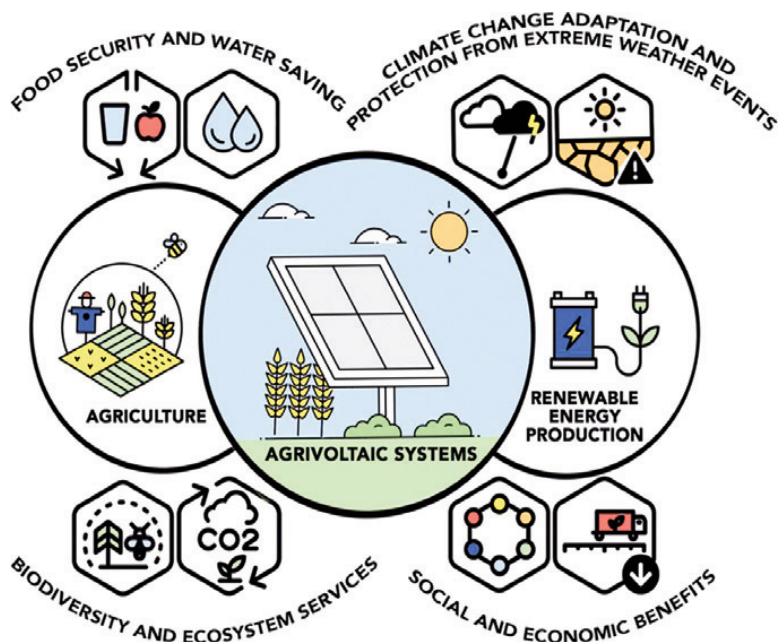


Fig. 1 | Diagram of agrivoltaic systems as an integration between agriculture and renewable energy production, showing benefits for food security and water savings, adaptation to climate change and protection from extreme events, biodiversity and ecosystem services, and socio-economic impacts along the value chain (credit: the Author, 2022).

Risultati quantitativi della review | La ricerca ha restituito un corpus iniziale di 16.723 contributi, progressivamente ridotti attraverso tre fasi di affinamento fino a raggiungere i 138 articoli esplicitamente focalizzati sui sistemi agrivoltaici (Tab. 2). L'analisi quantitativa ha considerato la distribuzione temporale delle pubblicazioni, la provenienza geografica, i settori disciplinari di riferimento, le parole chiave maggiormente ricorrenti e il loro uso in relazione ai cluster tematici individuati (Fig. 8) e all'evoluzione del tema negli anni.

Sul piano temporale si osserva una crescita costante a partire dal 2018, con un incremento marcato nel triennio 2022-2024. Questo andamento riflette l'attenzione crescente della comunità scientifica e la formalizzazione dell'agrivoltaico come tecnologia innovativa nelle strategie europee e nazionali (MASE, 2022). La revisione della Renewable Energy Directive (RED II) e la EU Solar Energy Strategy hanno infatti incluso l'agrivoltaico tra le forme prioritarie di sviluppo del fotovoltaico, mentre in Italia il PNRR (MIMIT, 2023) ha fissato obiettivi espliciti di installazione con procedure semplificate e incentivi dedicati. Geograficamente, emergono Europa (Italia, Germania, Francia, Spagna) e Stati Uniti, con contributi crescenti da India, Brasile, Marocco e Africa subsahariana. Rispetto al passato, il panorama risulta più equilibrato e l'Europa è uno dei principali poli di ricerca.

I contributi appartengono soprattutto ai settori dell'Energia, delle Scienze Ambientali e delle Scienze Agrarie e Biologiche, confermando l'interdisciplinarietà del tema. L'analisi delle parole chiave evidenzia nove cluster tematici fortemente interconnessi, riflesso della natura multidimensionale della ricerca. Le connessioni tra cluster mostrano l'elevata interdipendenza semantica tra domini diversi, riflesso della natura multidimensionale della ricerca sull'agrivoltaico.

L'overlay temporale delle keyword (Fig. 9) mostra inoltre un cambiamento tematico: dai primi studi incentrati sull'efficienza energetica e riduzione dei gas climalteranti (2022-2023, giallo chiaro) ai contributi più recenti che esplorano policy, accettazione sociale, governance e innovazione (dal 2024 in avanti, rosso). Questo spostamento testimonia

l'evoluzione del dominio da un approccio prevalentemente tecnico-ingegneristico a una prospettiva più ampia, che integra aspetti territoriali e socio-istituzionali. L'analisi complessiva conferma la rapida strutturazione dei sistemi agrivoltaici come campo di ricerca riconoscibile e interdisciplinare. Restano tuttavia alcune criticità: la scarsità di dati longitudinali, misurazioni ripetute nel tempo sugli stessi soggetti / unità di osservazione, l'assenza di protocolli condivisi e di indicatori standardizzati, e soprattutto la forte specificità del sito e del clima dipendente dalle evidenze disponibili, che rende difficile la comparabilità tra casi e limita la possibilità di estrarre modelli e risposte generalizzabili.

Discussione degli esiti | L'analisi conferma che i sistemi agrivoltaici si configurano come dispositivi infrastrutturali capaci di superare la logica monofunzionale, integrando produzione agricola, energetica ed ecosistemica. Ad esempio in Puglia simulazioni indicano che lo 0,25-0,5% della superficie agricola utilizzata può coprire un terzo degli obiettivi rinnovabili al 2030 senza ridurre la produttività (Cammerino et alii, 2025); esperienze in Lazio mostrano la possibilità di utilizzare sistemi agrivoltaici all'interno di strategie di rigenerazione periurbana e smart community (D'Alessandro et alii, 2023). Strumenti che integrano GIS e Analisi Decisionale Multi-Criterio confermano infine l'opportunità di integrare criteri agricoli, ambientali e paesaggistici per il supporto al processo di scelta dei siti idonei e per la valutazione di progetti (Neesham-McTiernan and Barron-Gafford, 2025).

Le evidenze sperimentali emerse dalla review confermano che l'agrivoltaico rafforza la capacità adattiva degli agroecosistemi, contribuendo alla stabilità produttiva in condizioni di stress: in Africa orientale sono stati documentati risparmi idrici e maggiore sopravvivenza delle orticole (Neesham-McTiernan and Barron-Gafford, 2025), mentre in Germania prati permanenti sotto moduli sopraelevati hanno registrato microclimi più freschi e minore erosione eolica (Diekmann et alii, 2025). Dati di monitoraggio pluriennali ripetuti sullo stesso sito in Massachusetts evidenziano rese più stabili negli anni siccitosi rispetto al pieno campo (Doubleday et alii,

2025) e studi in Italia e Stati Uniti confermano benefici analoghi per efficienza idrica, benessere animale e resilienza delle colture.

Le ricadute ambientali riguardano in particolare biodiversità e qualità del suolo: in Germania è stato rilevato un aumento della ricchezza floristica e faunistica negli impianti con interfilari e nei prati permanenti (Diekmann et alii, 2025), mentre in Italia esperienze viticole costiere hanno evidenziato riduzioni della salinizzazione e miglioramenti della fertilità. Altri studi confermano benefici sul contenimento dell'erosione, sulla maggiore capacità di infiltrazione e sugli incrementi nello stoccaggio di carbonio organico, soprattutto se associati a pratiche rigenerative come colture di protezione e rotazioni (Pandey et alii, 2025; Merheb et alii, 2025); restano tuttavia assenti protocolli condivisi che consentano la comparabilità dei dati tra diversi contesti.

La governance emerge come dimensione cruciale per la diffusione e l'accettazione sociale dei sistemi. In Italia studi di scenario e strumenti di supporto alle decisioni confermano l'importanza di criteri integrati e soglie d'uso del suolo (Cammerino et alii, 2025). Le indagini percettive mostrano che l'accettazione sociale cresce quando i benefici sono condivisi e i processi decisionali sono inclusivi (Biró-Varga, Sirnik and Stremke, 2024; Seay-Fleming, Swanson and Gerlak, 2025). Le ricerche comparate evidenziano che modelli di governance inclusiva riducono i conflitti e generano valore economico, occupazionale ed ecologico (Stern et alii, 2025; Merheb et alii, 2025), tuttavia l'integrazione sistematica della dimensione socio-economica nei sistemi di valutazione / monitoraggio rimane minoritaria (circa 42% del corpus analizzato), mentre le menzioni socio-economiche / governance risultano presenti in oltre il 78% dei contributi.

Sistemi agrivoltaici e Obiettivi di Sviluppo Sostenibile | I sistemi agrivoltaici contribuiscono in modo rilevante al raggiungimento degli SDG, a partire dal n. 6, dedicato all'uso efficiente e sostenibile della risorsa idrica. L'ombreggiamento parziale generato dalle strutture fotovoltaiche riduce l'evapotraspirazione e migliora l'infiltrazione del suolo, con risparmi idrici documentati in diversi contesti aridi e

semi-aridi e un incremento complessivo dell'efficienza d'uso dell'acqua (Elamri et alii, 2018; Coluccia et alii, 2025). In Africa orientale sperimentazioni hanno mostrato una maggiore sopravvivenza delle colture orticole e benefici nella gestione del bilancio idrico a conferma della capacità di questi sistemi di rafforzare la resilienza in aree ad alta vulnerabilità climatica (Neesham-McTiernan and Barron-Gafford, 2025).

In relazione alla salute e sicurezza (SDG 3) si osserva una riduzione dei parametri microclimatici sotto le strutture rispetto al pieno sole (Disciglio et alii, 2025) e, in termini di esposizione dei lavoratori, valori WBGT più bassi e minori superamenti della soglia in condizioni d'ombra rispetto al pieno sole (Flunker et alii, 2024).

Il contributo all'SDG 7 (energia pulita e accessibile) riguarda la possibilità di incrementare la produzione da fonti rinnovabili senza sottrarre superficie alla produzione agricola, promuovendo modelli di doppio uso del suolo. Le configurazioni sopraelevate consentono di mantenere la continuità delle colture e raggiungere valori di densità energetica fino a 1 MW per ettaro (Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE, 2024), favorendo al tempo stesso la diffusione di Comunità Energetiche e Distretti a Energia Positiva e contribuendo alla riduzione delle emissioni climalteranti.

In questa prospettiva l'agrivoltaico si configura come tecnologia chiave per la transizione energetica, coerente con i percorsi di innovazione tecnologica e culturale evocati nel dibattito più ampio sulla progettazione appropriata e contestuale delle infrastrutture (Vacanti and Leonardi, 2024). La letteratura recente sulla pianificazione del doppio uso del suolo e sulla percezione paesaggistica evidenzia preferenze e sensibilità diverse tra configurazioni sopraelevate e negli spazi interfilari, con ricadute sulla loro integrazione negli strumenti di Piano e sull'accettabilità sociale (Biró-Varga, Simik and Stremke, 2024).

Rispetto all'SDG 8 (lavoro dignitoso e crescita economica) l'agrivoltaico si presenta come un'opportunità per diversificare il reddito agricolo, creare nuove professionalità ibride e sostenere la vitalità socio-economica delle aree rurali. Le indagini mostrano che l'accettazione sociale cresce quando i benefici economici e occupazionali sono condivisi e i processi decisionali inclusivi (Seay-Fleming, Swanson and Gerlak, 2025; Steren et alii, 2025), aprendo la strada a microfilieri innovative e a nuove opportunità di sviluppo locale. Tuttavia resta necessaria una più sistemica integrazione della dimensione socio-economica nei modelli di pianificazione e valutazione (Merheb et alii, 2025). Per la quantificazione degli impatti occupazionali si possono utilizzare parametri (tra cui I-JEDI / NREL¹ e IRENA / ILO²) per stimare il numero medio di addetti a tempo pieno (FTE) per MW operativo su base annua, sia in fase di costruzione sia in fase di esercizio (Rutovitz et alii, 2025).

Pur incentrando la revisione sugli SDG 6, 7 e 8 i sistemi agrivoltaici producono benefici anche rispetto ad altri obiettivi, in particolare a quelli legati all'azione per il clima e alla tutela della biodiversità, contribuendo a rafforzare la resilienza territoriale e a promuovere pratiche di governance multilivello (Tabb. 3-6).

La diffusione dell'agrivoltaico richiede di affrontare criticità e compromessi progettuali: sul versante tecnico-economico incidono i costi iniziali delle



Figg. 2-4 | Trentino vine pergola over vineyard (Trentino-Alto Adige); Sorrento pergola over lemon grove in Sant'Agnello; Agrivoltaic vineyard, Le Rene site – Community Agrivoltaic Vineyard in Laterza (credits: the Author, 2025).



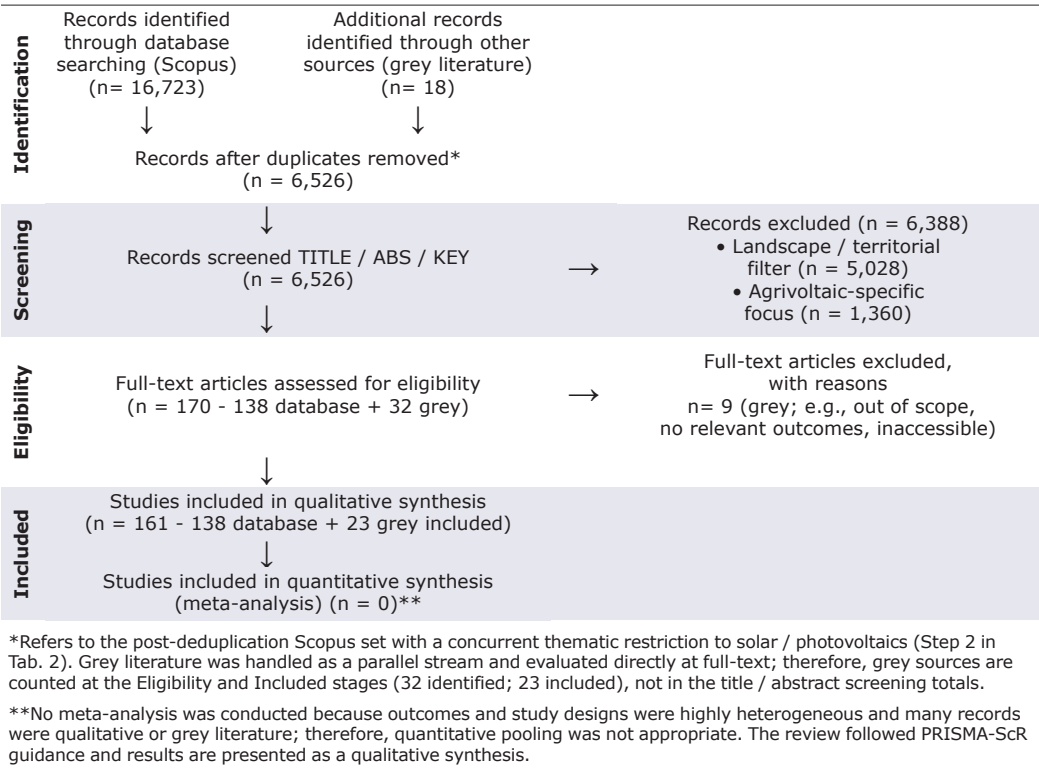
Figg. 5-7 | Protection systems using nets over apple orchards; Agrivoltaic systems on apple orchards with protective nets, SYMBIOSYST project (Ora, BZ); Productive landscape along the Wine Route (Ora, BZ), integrating agrivoltaics and crop protection systems (credits: the Author, 2025).

strutture dedicate e la gestione integrata agro-elettrica, oltre che connessioni di rete e iter autorizzativi eterogenei (IEA, 2025). Dal punto di vista socio-culturale la solidità dei progetti dipende dalla capacità di far dialogare diverse competenze e instaurare processi partecipativi in grado di costruire legittimazione e accettazione sociale (Seay-Fleming, Swanson and Gerlak, 2025). Sul piano ambientale-paesaggistico la qualità degli esiti è funzione della progettazione e della gestione: layout e densità vanno calibrati perché l'incremento della resa energetica non comprometta funzionalità ecosistemiche (Solar Energy UK, 2025; Jarcuška et alii, 2024; Ludzuweit et alii, 2025).

In questa chiave i compromessi possono essere resi espliciti e governati tramite linee guida tipologico-paesaggistiche, indicatori verificabili e accordi di governance che responsabilizzano gli attori locali lungo tutto il ciclo di vita del sito.

Conclusioni | Il contributo ricostruisce lo stato dell'arte sui sistemi agrivoltaici, evidenziandone il ruolo nella riconfigurazione dei paesaggi produttivi, nella

Tab. 1 | PRISMA process of the review: identification of records, screening, and final inclusion (credit: the Author, 2025).



Tab. 2 | Refinement of advanced search strings on Scopus (credit: the Author, 2025).

Step	Focus	Search string	Result (n)	Rationale for refinement
1°	Broad query	('renewable energy' OR 'energy infrastructure*' OR 'solar farm*' OR 'wind farm*') AND ('agricultural land' OR 'farmland' OR 'productive landscape*' OR 'rural landscape*' OR 'agri-environment*')	16723	Identification of a general corpus on the effects of renewables in agricultural / productive landscapes; scope too broad and heterogeneous
2°	Solar energy	('solar energy' OR 'photovoltaic*' OR 'solar farm*') AND ('agricultural land' OR 'farmland' OR 'productive landscape*' OR 'rural landscape*' OR 'agri-environment*')	6526	Exclude other renewable sources (wind, biomass, hydropower) to keep a solar focus
3°	Landscape / territorial dimension	('solar energy' OR 'photovoltaic*') AND ('agricultural land use' OR 'productive landscape*' OR 'farmland') AND ('landscape' OR 'territorial planning' OR 'land use change')	1498	Select studies addressing the relationship between solar energy, land use and landscape; reduce purely technical / agronomic papers
4°	Agrivoltaic systems	TITLE / ABS / KEY ('agrivoltaic*' OR 'agrovoltaic*' OR 'agrophotovoltaic*' OR 'solar sharing' OR 'dual use photovoltaics') AND TITLE / ABS / KEY ('landscape*' OR 'productive landscape*' OR 'agri-environment*' OR 'rural' OR 'agricultural land use')	138	Define the final corpus specific to agrivoltaics and the reconfiguration of productive landscapes; used for the qualitative analysis and coding into the four axes

risposta adattiva al cambiamento climatico e nella generazione di benefici ambientali e socio-economici. Dalla rassegna emergono limiti che incidono sulla trasferibilità delle evidenze: la scarsità di dati comparabili, la mancata omogeneità di protocolli e indicatori, con unità e metadati non sempre comparabili, la forte dipendenza dai contesti locali in termini di clima, suoli, sistemi colturali e assetti istituzionali. Le prospettive future riguardano quindi il rafforzamento di comparabilità e robustezza degli studi attraverso l'adozione di descrittori minimi comuni per contesto, configurazione e prestazioni agro-energetiche ed ecologiche, l'ampliamento della copertura geografica verso casi oggi sottorappresentati, l'integrazione, lungo il ciclo di vita, di valutazioni su acqua, suolo, biodiversità, percezione paesaggistica e ricadute socio-economiche, in coerenza con gli obiettivi di riduzione dei gas climalteranti.

Un ulteriore asse di lavoro concerne il rafforzamento della governance attraverso meccanismi di condivisione dei benefici da testare in contesti pilota: comunità energetiche rurali con quote di energia condivisa localmente, fondi dedicati alla qualità

paesaggistica e alla gestione del suolo, dividendo di comunità a favore degli attori locali, tariffe incentivanti per l'immissione in rete condizionate a impegni ambientali e sociali, accompagnate da monitoraggi su accettazione ed equità territoriale.

L'approccio interdisciplinare proposto consente di superare letture settoriali e fornisce una cornice critica utile alla comunità scientifica e alle pratiche di progetto e pianificazione, favorendo un lessico condiviso tra ricerca, politiche e attori territoriali. La cornice risulta trasferibile perché distingue ciò che è specifico di un sito da ciò che può essere comparato tra territori, permettendo di operare con strumenti e indicatori comuni, riducendo asimmetrie informative e orientando valutazioni coerenti con la sostenibilità.

In questo quadro i sistemi agrivoltaici si configurano nel dibattito sui paesaggi energetici come processi culturali e territoriali che ridefiniscono le relazioni tra società e ambiente (Peghin, 2024). La traiettoria ricostruita conferma l'esigenza di approcci integrati capaci di tradurre le evidenze in criteri operativi comparabili e sensibili al contesto, a so-

stegno di politiche e progetti di transizione ecologica radicati nei territori.

Productive landscapes, defined as territorial spaces transformed by human action to produce goods and services, are the outcome of evolutionary processes in which technologies have progressively redefined the relationships among agricultural practices, settlement systems, and natural resources (Sereni, 1961). With the Industrial Revolution, mechanisation altered crop cycles and the organisation of labour, while genetic selection directed production toward high-yield, standardised varieties (Grigg, 1995). The result was an agricultural model integrated into global markets and networks, accompanied by a radical transformation of productive spaces (Mazoyer and Roudart, 2006). This continuity can be reinterpreted in light of the concept of appropriate technology, understood as a flexible means capable of extending human capacity and generating differentiated living conditions (Amirante, 1985).

The current phase, shaped by ecological and energy transitions, introduces new transformations in productive landscapes in response to climate change, sustainable resource management, and the need to ensure both food and energy security. The 2030 Agenda of the United Nations (UN, 2015) and reports by the IEA (2022) and the OECD (2024) emphasise that the resilience of territories depends on integrating environmental, energy, and socio-economic objectives. Within this framework, agriculture is now accompanied by infrastructures for renewable energy generation, which redefine agricultural land uses and pose new compatibility challenges. Within this context emerges the spread of

agrivoltaic systems, promoted by the measures of Mission 2 of Italy's National Recovery and Resilience Plan (PNRR; MIMIT, 2023) and by the Common Agricultural Policy 2023-2027 (European Parliament and Council, 2024), as agro-energy devices capable of integrating agricultural and energy production within the same space. The resulting benefits affect productive sectors through improved crop resilience to climatic stress (Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE, 2024), more efficient use of water resources, and the valorisation of local products, and extend to the socio-economic system through income diversification for farmers and the development of new hybrid professional profiles between

agriculture and energy (Fig. 1). Together, these dynamics strengthen the resilience of local communities, as such systems can activate inclusive governance processes and promote a more balanced distribution of benefits, factors recognised as essential conditions for social acceptance and for triggering sustainable development pathways (Torma and Aschemann-Witzel, 2023).

From this perspective, the present article clarifies how agrivoltaic systems contribute to the reconfiguration of productive landscapes, enhancing climate resilience and generating environmental and socio-economic co-benefits consistent with the Sustainable Development Goals (SDGs). The originality of

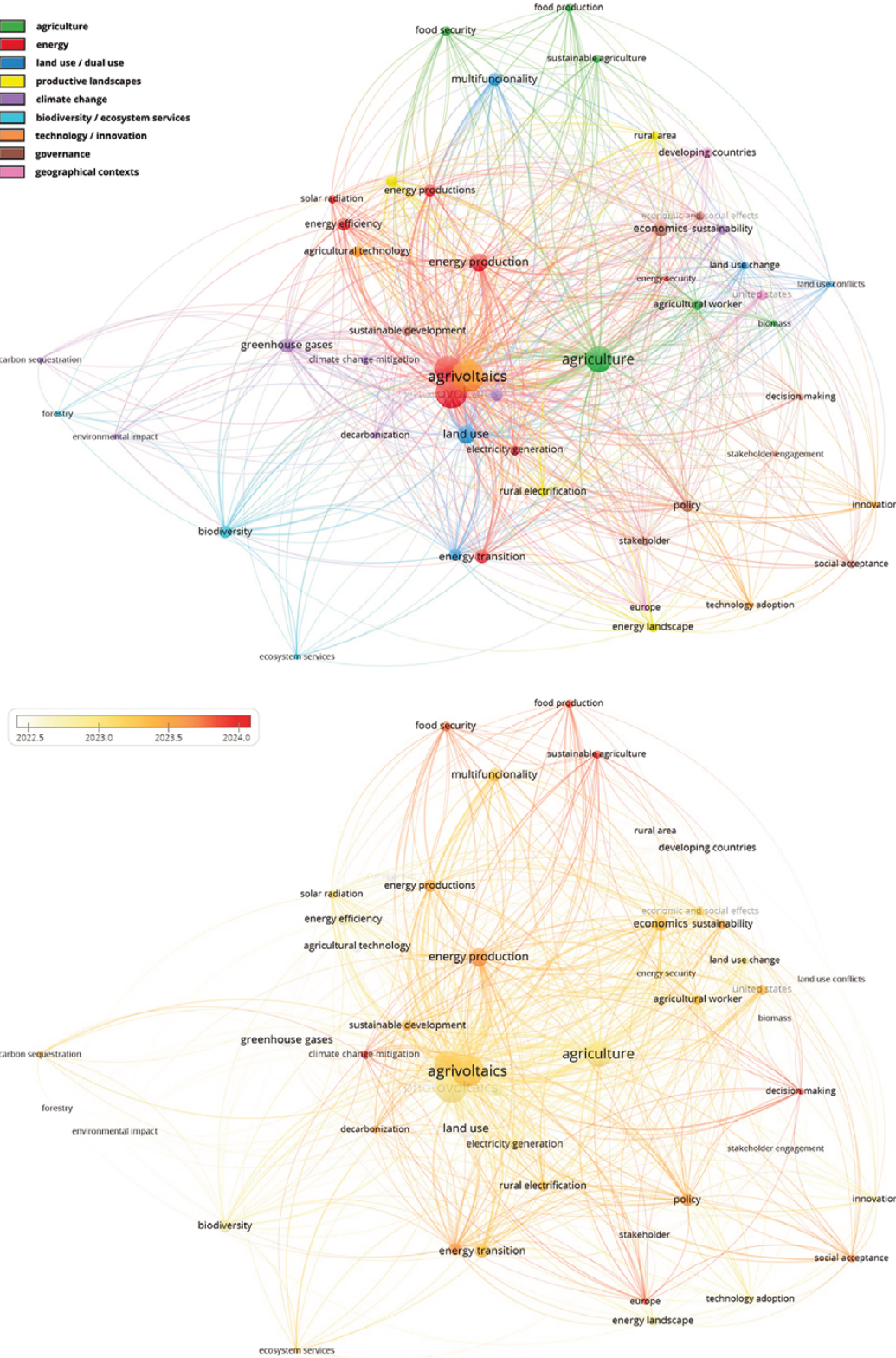


Fig. 8 | Keyword co-occurrence network (VOSviewer): the map highlights the nine thematic clusters emerging from the bibliometric analysis, showing the multidimensionality of the research field and its disciplinary articulation (credit: the Author, 2025).

Fig. 9 | Temporal overlay of keywords (VOSviewer): the colour distribution illustrates the evolution of scientific production between 2022 and 2024, showing the shift from technical studies on energy performance to contributions exploring social, economic, and policy dimensions (credit: the Author, 2025).

Next page

Tabb. 3-6 | Thematic axis / SDG matrices: correspondence with the goals identified through literature analysis, relevant indicators and targets from the 2030 Agenda, design metrics, calculation formulas and methods, and primary sources (credits: the Author, 2025).

Thematic axis / SDG matrix (1): Multifunctional Reconfiguration of Productive Landscapes

				
UN indicators (target)	2.3; 2.4	7.1; 7.2; 7.a	9.4; 9.5	12.2; 12.3
Project metrics and units	Land Equivalent Ratio (LER), crop yield and stability (LER –; t/ha; CV%)	Renewable electricity from AV per unit land; energy intensity per kg product (MWh/ha-yr)	R&D investments and AV demonstrators; infrastructure efficiency (€; # projects; t CO _{2eq} /unit value added)	Resource efficiency in the agro-energy (kg inputs/MWh; kg N/ha)
Formula / method	LER = (yield under AV / full-sun yield) + (energy yield expressed as LER-energy); track year-to-year yield	Electricity (MWh) = Installed capacity (MW) × equivalent full-load hours; document Wp/ha layout density	R&D as % revenue; operational carbon intensity benchmarking	Reduced irrigation water and fertiliser under controlled shading; track per-unit outputs
Key sources	IEA, 2025; IRENA, 2024; Widmer et alii, 2024			

Thematic axis / SDG matrix (2): Adaptive Response and Climate Resilience

				
UN indicators (target)	3.9	6.4; 6.6	11.3	13.2; 13.3
Project metrics and units	Reduced heat exposure for farm workers (°C; hours above threshold)	Irrigation water saved and Water Use Efficiency (WUE) under AV (m ³ /ha-yr; kg/m ³)	Land-use efficiency (dual-use vs ground-mounted) (ha avoided / MW; LSF index)	GHG emissions avoided through AV (t CO _{2eq} /yr)
Formula / method	ΔWBGT measured under AV vs control; track hours above ISO thresholds	Water saved (m ³) = baseline irrigation demand × % ET reduction under AV	Land-Sparing Factor (LSF) = energy produced without additional net land take	t CO _{2eq} avoided = annual MWh × grid emission factor (t CO ₂ /MWh)
Key sources	Ember, 2024; IEA, 2025; Witwit, Al-agele and Higgins, 2025; Disciglio et alii, 2025; Omer et alii, 2025			

Thematic axis / SDG matrix (3): Environmental Benefits and Ecosystem Services

				
UN indicators (target)	11.7	12.4; 12.6	–	15.1; 15.5
Project metrics and units	Managed public access and ecological corridors (ha; # visits/yr)	Reduced plant-protection products and inputs (kg a.i./ha; treatments/ha)	Co-benefit: Soil and biomass carbon sequestration (t C/ha-yr)	Species richness, Shannon / Simpson indices, habitat provision (# species; H'; % habitat cover)
Formula / method	Project design and visitor management plans	Compare farm logs and field trials AV vs control	SOC sampling (0-30 cm) and hedgerow/groundcover allometries	Standardised transects / plots under AV; multi-taxa protocols
Key sources	Solar Energy UK, 2025; De Francesco et alii, 2025; Jarčuska et alii, 2024; Ludzweit et alii, 2025;			

Thematic axis / SDG matrix (4): Evaluation Models and Governance

				
UN indicators (target)	8.2; 8.3; 8.4	11.3; 11.b	16.7	17.16; 17.17
Project metrics and units	Jobs created (FTE) per MW and per ha; construction vs O&M – Operations & Maintenance (job-yr/MW; FTE/yr)	Planning instruments and inclusive AV zoning adopted (#instruments)	Inclusive decision-making: stakeholder mapping; social licence (# meetings; % stakeholder categories represented)	PPP agreements and research-industry-public partnerships (#; € co-funded)
Formula / method	FTE= installed MW × employment factor (use I-JEDI/NREL or 2025 factors; separate construction and O&M)	Council resolutions, regulations, SEA / local plans	Participation protocol and issues log	Active MOUs and partnership KPIs
Key sources	European Commission, n.d.; IRENA and ILO, 2024; National Renewable Energy Laboratory, 2025; Seay-Fleming et alii, 2025			

this study lies in integrating technological, agro-environmental, and socio-economic perspectives within a common interpretive framework that guides the coding of sources and the discussion. The paper combines a scoping review of the scientific literature with traditional bibliographic consultation to include contributions that are not always indexed in databases. Compared with more recent reviews, this study systematises evidence through thematic clusters derived from keyword co-occurrence maps (VOSviewer), which make conceptual cores and their relationships visible, show their temporal evolution, and highlight gaps and convergences.

The discussion is structured as follows: the relationship between productive landscapes and technology; methods and criteria for selecting literature on the topic; quantitative results with cluster mapping; analysis of emerging themes in light of the three perspectives and their coherence with the SDGs; conclusions, limitations, and research directions that fuel the contemporary debate.

Productive landscapes and technology: continuity and transformations | The productive landscape can be interpreted as a historical, cultural, and ecological construct, the result of the systematic action humans impose on the natural landscape through agricultural activity (Sereni, 1961). Each agricultural revolution has entailed a structural reorganisation of cultivated ecosystems: from hydraulic and terracing systems to crop rotations, through the European enclosures and modern mechanisation (Mazoyer and Roudart, 2006; Grigg, 1995). A particularly significant precedent is the Roman centuriation, a technical-territorial device based on the orthogonal grid of cardines and decumani, which integrated production, mobility, and water management, imprinting a lasting geometric order upon the landscape (Chevallier, 1961).

Alongside this territorial-scale matrix, rural communities have progressively developed solutions recognisable as adaptive technologies, designed to respond to specific pedoclimatic and socio-economic conditions. Mediterranean terraces made steep slopes cultivable, stabilising soils and regulating runoff; the Trentino vine pergolas organised the productive space to modulate light and ventilation, improve grape quality, and safeguard workers' well-being; the terraced lemon groves of the Sorrento Coast, with dry-stone walls and wooden trellises (Fig. 2-4), combined protection from climatic stresses with slope safety and continuity of production (Scaramellini and Varotto, 2008). These systems, interpretable as archives of resilient solutions, anticipate the contemporary conception of territorial infrastructure (Fig. 5-7; Angelucci, 2015) and reflect the principle of locally appropriate innovation (Scudo, 2017). In the twentieth century, with mechanisation and the emergence of the first energy infrastructures, the productive landscape took on the configuration of an agro-energy landscape, in which agricultural and energy functions coexist (Ginelli and Daglio, 2016). Recent research stresses the need to combine production and landscape quality and to adopt a transdisciplinary vision that considers models, densities, and ecosystem services within energy layouts (Scognamiglio, 2016).

From this standpoint, agrivoltaic systems inherit the logic of adaptive technologies, maintaining continuity with the principles of: Modularity (organisation in spans and rows arranged on grids with control-

lable parameters such as spacing and proper height); Controlled shading (selective regulation of solar radiation through fixed or tracking layouts to mitigate water and heat stress and optimise photosynthesis); and Multifunctionality (the joint production of private goods, food and energy, and of public goods and ecosystem services, with a high degree of interdependence among outputs, requiring specific design criteria and dedicated governance tools).

Methodology, tools, and selection criteria | The research adopts the scoping review approach (Arksey and O'Malley, 2005) and follows the PRISMA-ScR checklist (Peters et alii, 2020), which is appropriate for an emerging and interdisciplinary field to map advances and gaps in the literature.

The reference database used was Scopus (Elsevier), and the search was conducted across the title, abstract, and keywords fields using an advanced search. The choice of Scopus responds to the need for a broad, interdisciplinary repository that ensures international coverage and the comparability of results. Any gaps were addressed through the integration of library texts and grey literature sources, including ministerial guidelines, research reports, and project documentation that are not always indexed in digital databases (Tab. 1).

The research strategy was built iteratively and included four successive steps: an initial query on renewable energy and agricultural landscapes (16,723 results); a restriction to solar energy (6,526 results); a filter on studies related to land use and spatial planning (1,498 results); finally, the focus on agrivoltaic systems (138 results), which constitute the final corpus analysed. The records were exported in CSV format, screened for titles and abstracts, and then reviewed in full text to verify eligibility.

The selection criteria followed the Population / Concept / Context (PCC) framework (Peters et alii, 2020), including productive landscapes and agroecosystems, agro-energy infrastructures, and agrivoltaic systems in rural and peri-urban contexts. Scientific articles, conference proceedings, guidelines, and reports were included, while purely technical contributions lacking landscape or socio-environmental implications were excluded.

Keyword analysis was conducted using VOSviewer (van Eck and Waltman, 2010), with a thesaurus used to harmonise variants and synonyms. The co-occurrence network map produced nine thematic clusters, corresponding to specific research subfields: agriculture, energy, productive landscapes, land use and dual use, climate change, biodiversity and ecosystem services, technology and innovation, governance, and geographical contexts. Although distinct, these clusters exhibit strong semantic interconnections, reflecting the multidimensional nature of the topic. To ensure an integrated reading, the clusters were grouped into four interpretive axes: 1) multifunctional reconfiguration of productive landscapes; 2) adaptive response and climate resilience; 3) environmental benefits; and 4) evaluation models and governance. This step enabled transforming the semantic network emerging from bibliometric analysis into a coherent interpretive framework, which served as the basis for organising the literature results.

Among the limitations identified are the rapid pace of scientific production and the heterogeneity of detail among the included studies: some papers report experimental data and measurable metrics,

while others are limited to qualitative descriptions, reducing the possibility of direct comparison.

Quantitative results of the review | The research produced an initial corpus of 16,723 contributions, progressively reduced through three refinement phases until reaching the 138 articles explicitly focused on agrivoltaic systems (Tab. 2). The quantitative analysis considered the temporal distribution of publications, their geographical origin, the disciplinary sectors involved, the most recurring keywords, and their use in relation to the thematic clusters identified (Fig. 8) as well as to the evolution of the topic over time.

From a temporal standpoint, there has been steady growth since 2018, with a marked increase in the 2022-2024 triennium. This trend reflects the growing attention of the scientific community and the formal recognition of agrivoltaics as an innovative technology in European and national strategies (MASE, 2022). The revision of the Renewable Energy Directive (RED II) and the EU Solar Energy Strategy have included agrivoltaics among the priority forms of photovoltaic development, while in Italy, the PNRR (MIMIT, 2023) established explicit installation targets supported by simplified procedures and dedicated incentives. Geographically, Europe (Italy, Germany, France, Spain) and the United States stand out, with growing contributions from India, Brazil, Morocco, and sub-Saharan Africa. Compared to the past, the landscape now appears more balanced, with Europe among the principal poles of research.

The contributions primarily fall within the fields of Energy, Environmental Sciences, and Agricultural and Biological Sciences, confirming the interdisciplinary nature of the topic. The keyword analysis revealed nine highly interconnected thematic clusters, reflecting the multidimensionality of the research area. The links between clusters demonstrate the strong semantic interdependence among different domains, a clear indicator of the multidimensional character of agrivoltaic research.

The temporal overlay of keywords (Fig. 9) also shows a thematic shift: from the early studies focused on energy efficiency and greenhouse gas reduction (2022-2023, light yellow) to more recent contributions exploring policy, social acceptance, governance, and innovation (from 2024 onwards, red). This shift illustrates the evolution of the field from a primarily technical-engineering approach toward a broader perspective that integrates territorial and socio-institutional aspects.

Overall, the analysis confirms the rapid structuring of agrivoltaic systems as a recognisable and interdisciplinary field of research. However, some criticalities remain: the scarcity of longitudinal data, i.e., repeated measurements over time on the same subjects or observation units; the absence of shared protocols and standardised indicators; and especially, the strong site- and climate-specificity of available evidence, which hampers comparability among case studies and limits the ability to derive generalisable models and responses.

Discussion of the results | The analysis confirms that agrivoltaic systems operate as infrastructural devices that overcome a monofunctional logic by integrating agricultural, energy, and ecosystem production. For instance, in Apulia, simulations indicate that only 0.25-0.5% of the utilised agricultural area could meet one-third of the region's renewable en-



Fig. 10 | Radial diagram synthesising the contribution of agrivoltaic systems to the UN 2030 Agenda Sustainable Development Goals, based on the SDG goals / targets mapping derived from the literature analysis presented in this paper (Tabb. 3–6). For each SDG included, the percentage indicates the share of targets addressed by agrivoltaic systems out of the total targets for that goal (credit: the Author, 2025).

ergy targets for 2030 without reducing agricultural productivity (Cammerino et alii, 2025). Experiments in Lazio demonstrate the potential of using agrivoltaic systems within strategies for peri-urban regeneration and smart communities (D'Alessandro et alii, 2023). Tools integrating GIS and Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA) further confirm the feasibility of merging agricultural, environmental, and landscape criteria to support the identification of suitable sites and the assessment of project proposals (Neesham-McTiernan and Barron-Gafford, 2025).

Experimental evidence from the review shows that agrivoltaics enhance the adaptive capacity of agroecosystems, contributing to production stability under stress conditions: in East Africa, water savings and higher survival rates for horticultural crops have been documented (Neesham-McTiernan and Barron-Gafford, 2025), while in Germany, permanent grasslands under elevated panels experienced cooler microclimates and reduced wind erosion (Diekmann et alii, 2025). Long-term monitoring data from a site in Massachusetts showed more stable yields during drought years than in open-field cultivation (Doubleday et alii, 2025), and studies in Italy and the United States confirm similar benefits in water-use efficiency, animal welfare, and crop resilience.

The environmental impacts are particularly relevant to biodiversity and soil quality. In Germany, an increase in floristic and faunal richness was recorded in installations with inter-row spacing and permanent grasslands (Diekmann et alii, 2025), while

in coastal Italian vineyards, reductions in soil salinisation and improvements in fertility were observed. Other studies highlight benefits such as erosion control, increased infiltration capacity, and enhanced organic carbon storage, primarily when associated with regenerative practices such as cover crops and crop rotations (Pandey et alii, 2025; Merheb et alii, 2025). However, there is still a lack of shared protocols allowing data comparability across different contexts. Governance emerges as a crucial dimension for the diffusion and social acceptance of these systems. In Italy, scenario studies and decision-support tools confirm the importance of integrated criteria and thresholds for land use (Cammerino et alii, 2025). Perceptual surveys show that social acceptance increases when benefits are shared and decision-making processes are inclusive (Biró-Varga, Simik and Stremke, 2024; Seay-Fleming, Swanson and Gerlak, 2025). Comparative research indicates that inclusive governance models reduce conflict and generate economic, occupational, and ecological value (Steren et alii, 2025; Merheb et alii, 2025). However, the systematic integration of the socio-economic dimension into evaluation and monitoring systems remains limited (approximately 42% of the analysed corpus). In contrast, socio-economic or governance-related mentions appear in over 78% of the reviewed contributions.

Agrivoltaic systems and the Sustainable Development Goals | Agrivoltaic systems make a signifi-

cant contribution to achieving the Sustainable Development Goals (SDGs), beginning with SDG 6, dedicated to the efficient and sustainable use of water resources. Partial shading from photovoltaic structures reduces evapotranspiration. It improves soil infiltration, leading to documented water savings in various arid and semi-arid contexts, as well as an overall increase in water-use efficiency (Elamri et alii, 2018; Coluccia et alii, 2025). In East Africa, experiments have shown greater survival rates for horticultural crops and benefits in water balance management, confirming these systems' capacity to strengthen resilience in areas of high climatic vulnerability (Neesham-McTiernan and Barron-Gafford, 2025).

Regarding health and safety (SDG 3), a reduction in microclimatic parameters has been observed beneath the structures compared to full-sunlight conditions (Disciglio et alii, 2025). In terms of worker exposure, lower WBGT (Wet Bulb Globe Temperature) values and fewer threshold exceedances were recorded in shaded conditions compared to full sun (Flunker et alii, 2024).

The contribution to SDG 7 (Affordable and Clean Energy) lies in the ability to increase renewable energy generation without displacing agricultural production, thereby promoting dual land-use models. Elevated configurations enable continuous cultivation and achieve energy densities of up to 1 MW per hectare (Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE, 2024), while simultaneously fostering the spread of Energy Communities and Positive Ener-

gy Districts and contributing to reductions in greenhouse gas emissions.

In this perspective, agrivoltaics is emerging as a key technology for the energy transition, consistent with the technological and cultural innovation paths evoked in the broader debate on the appropriate, context-sensitive design of infrastructure (Vacanti and Leonardi, 2024). Recent literature on dual land-use planning and landscape perception highlights different preferences and sensitivities toward elevated configurations and inter-row layouts, with implications for their integration into planning instruments and for social acceptability (Biró-Varga, Simik and Stremke, 2024).

Regarding SDG 8 (Decent Work and Economic Growth), agrivoltaics represent an opportunity to diversify agricultural income, create new hybrid professional profiles, and support the socio-economic vitality of rural areas. Studies indicate that social acceptance increases when economic and employment benefits are shared and decision-making processes are inclusive (Seay-Fleming, Swanson and Gerlak, 2025; Steren et alii, 2025), paving the way for innovative micro-supply chains and new opportunities for local development. However, there remains a need for a more systematic integration of the socio-economic dimension into planning and assessment models (Merheb et alii, 2025). For the quantification of employment impacts, parameters such as those provided by I-JEDI/NREL¹ and IRENA/ILO² can be used to estimate the average number of full-time equivalent (FTE) jobs per operational MW per year, both during construction and in operation (Rutovitz et alii, 2025). Although this review primarily focuses on SDGs 6, 7, and 8, agrivoltaic systems also deliver benefits linked to other goals, particularly those related to climate action and biodiversity conservation, thereby contributing to territorial resilience and promoting multi-level governance practices (Tabb. 3-6).

The spread of agrivoltaics, however, requires addressing technical, economic, and socio-cultural challenges. On the technical and economic side, factors include the initial costs of dedicated structures, integrated agro-electric management, and he-

terogeneous grid-connection and permitting procedures (IEA, 2025). From a socio-cultural perspective, the sustainability of projects depends on fostering dialogue across disciplines and establishing participatory processes that build legitimacy and social acceptance (Seay-Fleming, Swanson, and Gerlak, 2025). From an environmental and landscape standpoint, the quality of outcomes depends on design and management: layouts and densities must be calibrated so that the increase in energy yield does not compromise ecosystem functions (Solar Energy UK, 2025; Jarcuška et alii, 2024; Ludzuweit et alii, 2025). In this regard, trade-offs can be made explicit and managed through typological landscape guidelines, verifiable indicators, and governance agreements that hold local stakeholders accountable throughout the site's life cycle.

Conclusions | This paper reconstructs the state of the art on agrivoltaic systems, highlighting their role in reconfiguring productive landscapes, in adaptive responses to climate change, and in generating environmental and socio-economic benefits. The review reveals several limitations affecting the transferability of current evidence: the scarcity of comparable data; the lack of homogeneous protocols and indicators, with units and metadata that are not always consistent; and the strong dependence on local contexts, including climate, soils, cropping systems, and institutional frameworks.

Future perspectives therefore involve strengthening the comparability and robustness of studies through: the adoption of minimum common descriptors for context, configuration, and agro-energy and ecological performance; the expansion of geographical coverage toward underrepresented cases; and the integration, throughout the life cycle, of evaluations on water, soil, biodiversity, landscape perception, and socio-economic impacts, in line with greenhouse gas reduction goals.

Another line of development concerns the enhancement of governance through benefit-sharing mechanisms to be tested in pilot contexts: rural energy communities with locally shared energy quotas; funds dedicated to landscape quality and soil

management; community dividends in favour of local stakeholders; incentive tariffs for grid injection conditioned on environmental and social commitments, accompanied by monitoring of social acceptance and territorial equity.

The interdisciplinary approach proposed here enables moving beyond sectoral interpretations. It provides a critical, valuable framework to both the scientific community and design and planning practices, fostering a shared lexicon among research, policy, and territorial actors. The framework is transferable because it distinguishes between what is site-specific and what can be compared across territories, enabling the use of standard tools and indicators, reducing informational asymmetries, and guiding assessments consistent with sustainability principles. Within this perspective, agrivoltaic systems appear in the broader debate on energy landscapes as cultural and territorial processes that redefine the relationship between society and the environment (Peghin, 2024). The trajectory reconstructed here confirms the need for integrated approaches capable of translating empirical evidence into comparable, context-sensitive operational criteria, supporting ecological transition policies and projects rooted in local territories.

Notes

1) For more information on 'I-JEDI – Jobs and Economic Development Impact Models', see the webpage: nrel.gov/analysis/jedi/international [Accessed 10 September 2025].

2) For more information on 'Energy and Jobs – IRENA (series 'Renewable Energy and Jobs', in collaboration with ILO), see the webpage: irena.org/Energy-Transition/Socio-economic-impact/Energy-and-Jobs [Accessed 10 September 2025].

References

- Amirante, I. (1985), *Architettura e tecnologia appropriata*, FrancoAngeli, Milano.
- Angelucci, F. (2015), "Evolutionary Scenarios for the Design of Infrastructure in the Landscape | Scenari evolutivi per il progetto delle infrastrutture nel paesaggio", in Angelucci, F., Braz Afonso, R., Di Sivo, M. and Ladiana, D. (eds), *The Technological Design of Resilient Landscape | Il progetto tecnologico del paesaggio resiliente*, FrancoAngeli, Milano, pp. 113-146.
- Arksey, H. and O'Malley, L. (2005), "Scoping studies – To-

wards a methodological framework", in *International Journal of Social Research Methodology*, vol. 8, issue 1, pp. 19-32. [Online] Available at: doi.org/10.1080/1364557032000119616 [Accessed 10 September 2025].

Biró-Varga, K., Simik, I. and Stremke, S. (2024), "Landscape user experiences of interspace and overhead agrivoltaics – A comparative analysis of two novel types of solar landscapes in the Netherlands", in *Energy Research and Social Science*, vol. 109, article 103408, pp. 1-16. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.erss.2023.103408 [Accessed 10 September 2025].

Cammerino, A. R. B., Ingaramo, M., Piacquadio, L. and Monteleone, M. (2025), "How Much Longer Can We Tolerate Further Loss of Farmland Without Proper Planning? – The Agrivoltaic Case in the Apulia Region (Italy)", in *Agronomy*, vol. 15, issue 5, article 1177, pp. 1-24. [Online] Available at: doi.org/10.3390/agronomy15051177 [Accessed 10 September 2025].

Chevallier, R. (1961), "La centuriation et les problèmes de la colonisation romaine", in *Études rurales*, vol. 3, pp. 54-80. [Online] Available at: doi.org/10.3406/rural.1961.987 [Accessed 10 September 2025].

Coluccia, S., Ruocco, M., Della Porta, D. and Langella, G. (2025), "Agrivoltaic systems – State of the art and potential field applications", in *Energy Reports*, vol. 14, pp. 1606-1633. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.egy.2025.07.038 [Accessed 10 September 2025].

D'Alessandro, F., Sevagian, F., Massulli, A. R., Nardecchia, F. and Pompei, L. (2023), "Smart Cities and Communities – A case study of agrovoltaic systems applied to an Italian urban periphery", in *2023 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2023 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC/I&CPS Europe)*, Madrid, Spain, June 6-9, 2023, IEEE, pp. 1-6. [Online] Available at: doi.org/10.1109/EEEIC/ICPSEurope57605.2023.10194641 [Accessed 10 September 2025].

De Francesco, C., Centorame, L., Toscano, G. and Duca, D. (2025), "Opportunities, Technological Challenges and Monitoring Approaches in Agrivoltaic Systems for Sustainable Management", in *Sustainability*, vol. 17, issue 2, article 634, pp. 1-27. [Online] Available at: doi.org/10.3390/su17020634 [Accessed 10 September 2025].

Diekmann, L., Zitzmann, F., Schaarschmidt, F. and Reich,

- M. (2025), "Habitat use of birds on a high-mounted agrivoltaic trial plot", in *Ecology and Evolution*, vol. 15, issue 8, article e71864, pp. 1-11. [Online] Available at: doi.org/10.1002/ec.71864 [Accessed 10 September 2025].
- Disciglio, G., Stasi, A., Tarantino, A. and Frabboni, L. (2025), "Microclimate Modification, Evapotranspiration, Growth and Essential Oil Yield of Six Medicinal Plants Cultivated Beneath a Dynamic Agrivoltaic System in Southern Italy", in *Plants*, vol. 14, issue 15, article 2428, pp. 1-17. [Online] Available at: doi.org/10.3390/plants14152428 [Accessed 10 September 2025].
- Doubleday, K., Oleskewicz, K., Ovatt, S., Hickey, T., Herbert, S. J. and Macknick, J. (2025), "Impacts of year-to-year weather variability and inter-panel spacing on agrivoltaic crop yields in Massachusetts", in *Agroforestry Systems*, vol. 99, article 152, pp. 1-16. [Online] Available at: doi.org/10.1007/s10457-025-01248-y [Accessed 10 September 2025].
- Elamri, Y., Cheviron, B., Lopez, J.-M., Dejean, C. and Belaud, G. (2018), "Water budget and crop modelling for agrivoltaic systems – Application to irrigated lettuce", in *Agricultural Water Management*, vol. 208, pp. 440-453. [Online] Available at: sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378377418309545 [Accessed 10 September 2025].
- Ember (2024), *European Electricity Review 2024*. [Online] Available at: ember-climate.org/app/uploads/2024/02/European-Electricity-Review-2024.pdf [Accessed 10 September 2025].
- European Commission (n.d.), "Energy communities", in *energy.ec.eu*. [Online] Available at: energy.ec.europa.eu/topics/markets-and-consumers/energy-consumers-and-prosumers/energy-communities_en [Accessed 10 September 2025].
- European Parliament and Council (2024), *Regulation (EU) 2021/2115 of the European Parliament and of the Council of 2 December 2021 establishing rules on support for strategic plans to be drawn up by Member States under the common agricultural policy (CAP Strategic Plans) and financed by the European Agricultural Guarantee Fund (EAGF) and by the European Agricultural Fund for Rural Development (EAFRD) and repealing Regulations (EU) No 1305/2013 and (EU) No 1307/2013*, document 02021R2115-20240525. [Online] Available at: eur-lex.europa.eu/eli/reg/2021/2115/2024-05-25 [Accessed 10 September 2025].
- Flunker, J. C., Spector, J. T., Blancas, M., Briggs, N. L., Flores, M., Reeb-Whitaker, C., Schoonover, T. and Cardoso, T. (2024), "Farmworker-Relevant Heat Exposure in Different Crop and Shade Conditions", in *Journal of Agromedicine*, vol. 29, issue 4, pp. 547-560. [Online] Available at: doi.org/10.1080/1059924X.2024.2365647 [Accessed 10 September 2025].
- Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE (2024), *Agrivoltaics – Opportunities for Agriculture and the Energy Transition – A Guideline for Germany*. [Online] Available at: ise.fraunhofer.de/en/publications/studies/agrivoltaics-opportunities-for-agriculture-and-the-energy-transition.html [Accessed 10 September 2025].
- Ginelli, E. and Daglio, L. (2016), "Le infrastrutture per le energie rinnovabili nel paesaggio – Strumenti di progetto e traiettorie dell'innovazione | Infrastructures for renewable energies in landscape – Design tools and innovation trends", in *Techne | Journal of Technology for Architecture and Environment*, vol. 11, pp. 162-170. [Online] Available at: doi.org/10.13128/Techne-18410 [Accessed 10 September 2025].
- Grigg, D. (1995), *An Introduction to Agricultural Geography*, Routledge, London. [Online] Available at: doi.org/10.4324/9780203419274 [Accessed 10 September 2025].
- IEA – International Energy Agency (2025), *Dual Land Use for Agriculture and Solar Power Production – Overview and Performance of Agrivoltaic Systems*. [Online] Available at: iea-pvps.org/wp-content/uploads/2025/03/IEA-PVPS-T13-29-2025-REPORT-Dual-Land-Use.pdf [Accessed 10 September 2025].
- IEA – International Energy Agency (2022), *World Energy Outlook 2022*. [Online] Available at: iea.org/reports/world-energy-outlook-2022 [Accessed 10 September 2025].
- IRENA – International Renewable Energy Agency (2024), *World Energy Transitions Outlook 2024 – 1.5 °C Pathway*. [Online] Available at: irena.org/Publications/2024/Nov/World-Energy-Transitions-Outlook-2024 [Accessed 10 September 2025].
- IRENA – International Renewable Energy Agency and ILO – International Labour Organization (2024), *Renewable Energy and Jobs – Annual Review 2024*. [Online] Available at: irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2024/Oct/IRENA_Renewable_energy_and_jobs_2024.pdf [Accessed 10 September 2025].
- Jarčuška, B., Gálffyová, M., Schnürmacher, R., Baláz, M., Mišik, M., Repel, M., Fulín, M., Kerestúr, D., Lackovičová, Z., Mojžiš, M., Zámečník, M., Kaňuch, P. and Krištin, A. (2024), "Solar parks can enhance bird diversity in agricultural landscape", in *Journal of Environmental Management*, vol. 351, article 119902, pp. 1-11. [Online] Available at: sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479723026907 [Accessed 10 September 2025].
- Ludzuweit, A., Paterson, J., Wydra, K., Pump, C., Müller, K. and Miller, Y. (2025), "Enhancing ecosystem services and biodiversity in agrivoltaics through habitat-enhancing strategies", in *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 212, article 115380, pp. 1-17. [Online] Available at: sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S136403212500053X [Accessed 10 September 2025].
- MASE – Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica (2022), *Linee Guida in materia di Impianti Agrivoltaici*. [Online] Available at: mase.gov.it/sites/default/files/archivio/allegati/PNRR/linee_guida_impianti_agrivoltaici.pdf [Accessed 10 September 2025].
- Mazoyer, M. and Roudart, L. (2006), *A History of World Agriculture – From the Neolithic Age to the Current Crisis*, Routledge, London.
- Merheb, C., Macknick, J., Davatzes, N. and Ravi, S. (2025), "Synergies and trade-offs of multi-use solar landscapes", in *Nature Sustainability*, vol. 8, pp. 857-870. [Online] Available at: doi.org/10.1038/s41893-025-01600-1 [Accessed 10 September 2025].
- MIMIT – Ministero delle Imprese e del Made in Italy (2023), *Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza*. [Online] Available at: mimit.gov.it/images/stories/documenti/PNRR_Aggiornato.pdf [Accessed 10 September 2025].
- National Renewable Energy Laboratory (2025), *International Jobs and Economic Development Impacts (I-JEDI) Model*. [Online] Available at: nrel.gov/analysis/jedi/international [Accessed 10 September 2025].
- Neesham-McTiernan, T. H. and Barron-Gafford, G. A. (2025), "The long-term suitability of agrivoltaics as a climate adaptation strategy in the southwestern United States", in *Global Environmental Change Advances*, vol. 5, article 100021, pp. 1-14. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.gecadv.2025.100021 [Accessed 10 September 2025].
- OECD (2024), *OECD Economic Outlook*, vol. 2024, issue 2, OECD Publishing, Paris. [Online] Available at: doi.org/10.1787/d8814e8b-en [Accessed 10 September 2025].
- Omer, A. A. A., Li, M., Zhang, F., Hassaan, M. M. E., El Kolaly, W., Zhang, X., Lan, H., Liu, J. and Liu, W. (2025), "Impacts of agrivoltaic systems on microclimate, water use efficiency, and crop yield – A systematic review", in *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 221, article 115930, pp. 1-15. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.rser.2025.115930 [Accessed 10 September 2025].
- Pandey, R., Lyden, S., Franklin, E., Millar, B. and Harrison, M. T. (2025), "A systematic review of agrivoltaics – Productivity, profitability, and environmental co-benefits", in *Sustainable Production and Consumption*, vol. 56, pp. 13-36. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.spc.2025.03.006 [Accessed 10 September 2025].
- Peghin, G. (2024), "Verso una transizione culturale dei paesaggi energetici – Tra responsabilità e necessità | Towards a cultural transition of energy landscapes – Between responsibility and necessity", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 15, pp. 18-29. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/1512024 [Accessed 10 September 2025].
- Peters, M. D. J., Godfrey, C., McInerney, P., Munn, Z., Tricco, A. C. and Khalil, H. (2020), "Chapter 11 – Scoping Reviews", in Aromataris, E. and Munn, Z. (eds), *JBI Manual for Evidence Synthesis*, pp. 407-452. [Online] Available at: doi.org/10.46658/JBIMES-20-12 [Accessed 10 September 2025].
- Rutovitz, J., Langdon, R., Briggs, C., Mey, F., Dominish, E. and Nagrath, K. (2025), "Updated Employment Factors and Occupational Shares for the Energy Transition", in *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 212, article 115339, pp. 1-13. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.rser.2025.115339 [Accessed 10 September 2025].
- Scaramellini, G. and Varotto, M. (eds) (2008), *Paesaggi terrazzati dell'arco alpino – Atlante*, Marsilio, Venezia.
- Scognamiglio, A. (2016), "Photovoltaic Landscapes – Design and assessment – A critical review for a new transdisciplinary design vision", in *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 55, pp. 629-661. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.072 [Accessed 10 September 2025].
- Scudo, G. (ed.) (2017), *Architetture e paesaggi – Rigenerazione di sistemi agricoli locali*, Mimesis Edizioni, Milano.
- Seay-Fleming, C., Swanson, T. and Gerlak, A. (2025), "For what and for whom? A political ecology of agrivoltaics in the Southwestern United States", in *Sustainability Science*, vol. 20, pp. 1467-1481. [Online] Available at: doi.org/10.1007/s11625-025-01653-3 [Accessed 10 September 2025].
- Seay-Fleming, C., Swanson, T., Gerlak, A. K., Pavao-Zuckerman, M. A., Andrews, H., Moore, K. and Barron-Gafford, G. A. (2025), "Cultivating engagement – Public participation in agrivoltaics planning and design", in *Energy Research & Social Science*, vol. 127, article 104273, pp. 1-11. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.erss.2025.104273 [Accessed 10 September 2025].
- Sereni, E. (1961), *Storia del Paesaggio Agrario italiano*, Laterza, Bari.
- Solar Energy UK (2025), *Solar Habitat 2025 – Ecological trends on solar farms in the UK*. [Online] Available at: solarenergyuk.org/wp-content/uploads/2025/04/SEUK-Solar-Habitat-2025-3.pdf [Accessed 10 September 2025].
- Steren, A., Slater, Y., Rubin, O. D., Fleischer, A. and Kan, I. (2025), "Toward sustainable practices in photovoltaic and agricultural greenhouse systems – An ecosystem services framework", in *Energy Economics*, vol. 144, article 108364, pp. 1-15. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.eneco.2025.108364 [Accessed 10 September 2025].
- Torma, G. and Aschemann-Witzel, J. (2023), "Social acceptance of dual land use approaches – Stakeholders' perceptions of the drivers and barriers confronting agrivoltaics diffusion", in *Journal of Rural Studies*, vol. 97, pp. 610-625. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.jrurstud.2023.01.014 [Accessed 10 September 2025].
- UN – United Nations (2015), *Transforming Our World – The 2030 Agenda for Sustainable Development – A/RES/70/1*. [Online] Available at: sdgs.un.org/2030agenda [Accessed 10 September 2025].
- Vacanti, A. and Leonardi, C. (2024), "Tecnologia, energia e tempo – Percorsi sperimentali per il design di tecnologie appropriate | Technology, energy, and time – Experimental paths for the design of appropriate technology", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 15, pp. 316-323. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/15262024 [Accessed 10 September 2025].
- van Eck, N. J. and Waltman, L. (2010), "Software survey – VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping", in *Scientometrics*, vol. 84, issue 2, pp. 523-538. [Online] Available at: doi.org/10.1007/s11192-009-0146-3 [Accessed 10 September 2025].
- Widmer, J., Christ, B., Grenz, J. and Norgrove, L. (2024), "Agrivoltaics, a promising new tool for electricity and food production – A systematic review", in *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 192, article 114277, pp. 1-24. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.rser.2023.114277 [Accessed 10 September 2025].
- Witwit, I. M. T., Al-agele, H. A. and Higgins, C. W. (2025), "The effect of agrivoltaic system on nutrient content, yield, and water productivity of potatoes", in *Frontiers in Horticulture*, vol. 4, article 1624013, pp. 1-14. [Online] Available at: doi.org/10.3389/fhort.2025.1624013 [Accessed 10 September 2025].