

Federica Marandino, <https://orcid.org/0009-0001-4191-0479>  
Department of Architecture, University of Naples Federico II, Italy

[federica.marandino@unina.it](mailto:federica.marandino@unina.it)

**Abstract.** La ricerca indaga i sistemi agrivoltaici come tecnologie innovative per la mitigazione dei rischi ambientali e climatici, con l'obiettivo di elaborare strumenti di supporto alla progettazione *risk e climate oriented*. L'analisi integra scoping review, confronto con stakeholder e dati di monitoraggio, consentendo di individuare rischi prioritari, soluzioni agro-tecnologiche ricorrenti e configurazioni spaziali e funzionali adattive. Le schede comparative elaborate sintetizzano obiettivi, funzioni e capacità di riduzione della vulnerabilità, offrendo strumenti operativi per progettisti e decisori. Il contributo presenta esiti sviluppati in continuità con i risultati del PTR 2022–2024 MASE–ENEA, Linea 2.7 Linee guida per la sostenibilità ambientale del progetto di sistemi agrivoltaici.

**Parole chiave:** Sistemi agrivoltaici; Resilienza climatica; Tecnologie innovative; Progettazione ambientale; Rischi climatici.

## Rischi climatici negli agroecosistemi e ruolo dei sistemi agrivoltaici

Le regioni mediterranee, considerate hotspot climatici, registrano un riscaldamento medio pari a 1,5 volte quello globale e una riduzione delle precipitazioni fino al 20% entro metà secolo (MedECC, 2020). In questo quadro, ridurre la vulnerabilità degli agroecosistemi assume rilievo strategico, poiché essi regolano i cicli idrici, sostengono processi ecologici vitali e garantiscono servizi ecosistemici (FAO, 2021). Lo stress termico, legato all'aumento delle temperature e alla maggiore frequenza delle ondate di calore, determina riduzione di rese e qualità dei prodotti e altera i cicli colturali. La scarsità idrica, amplificata da siccità e incremento dell'evapotraspirazione, accresce fenomeni di desertificazione e salinizzazione con effetti sulla fertilità e sulla stabilità produttiva (FAO, 2021). La degradazione

Secondo il quadro IPCC, il rischio climatico deriva dall'interazione tra pericolosità o *hazard*, esposizione e vulnerabilità.

del suolo, esito combinato di fattori climatici e pratiche agricole intensive, produce erosione, perdita di sostanza organica e riduzione della biodiversità, compromettendo i servizi ecosistemici. Questi processi si sommano generando rischi complessi, che incidono sulla sicurezza alimentare (Pandey *et al.*, 2025), sui redditi agricoli, sulla salute dei lavoratori e sulla resilienza dei territori rurali (Fig. 1) (UNDRR, 2022). In questo scenario, letteratura e linee guida nazionali (MASE, 2022) riconoscono nei sistemi agrivoltaici un'opportunità. L'integrazione tra moduli fotovoltaici e colture consente di attenuare la radiazione solare, ridurre l'evapotraspirazione e migliorare l'efficienza d'uso dell'acqua, con incrementi riportati fino al 30% e una maggiore stabilità delle rese in condizioni siccitose. Rispetto al fotovoltaico convenzionale, tali sistemi riducono il consumo di suolo fino al 70%, mantenendo attive le superfici agricole (Jreich and Mahjoubi, 2023). Accanto ai benefici diretti, emergono vantaggi di sistema: rafforzamento della biodiversità e dei servizi ecosistemici, sostegno a pratiche agroecologiche e rigenerative, valorizzazione dei territori come infrastrutture multifunzionali in grado di integrare dimensioni produttive, ecologiche e sociali (Toledo and Scognamiglio, 2021). Non meno rilevante è la produzione di energia rinnovabile, che consolida l'autosufficienza energetica delle comunità e diversifica le fonti di reddito agricolo. La progettazione tecnologica e ambientale consente di interpretare queste innovazioni non solo in termini tecnici, ma come nuove configurazioni spaziali ed ecologiche, ridefinendo il rapporto tra insediamenti, paesaggi e processi produttivi (Ladiana, 2015; Gangemi, 1972). Alla luce di questa visione, l'agrivoltaico si configura dunque non solo come dispositivo tecnico, ma come opportunità per la

## Design support tools for climate and risk-oriented agrivoltaic systems

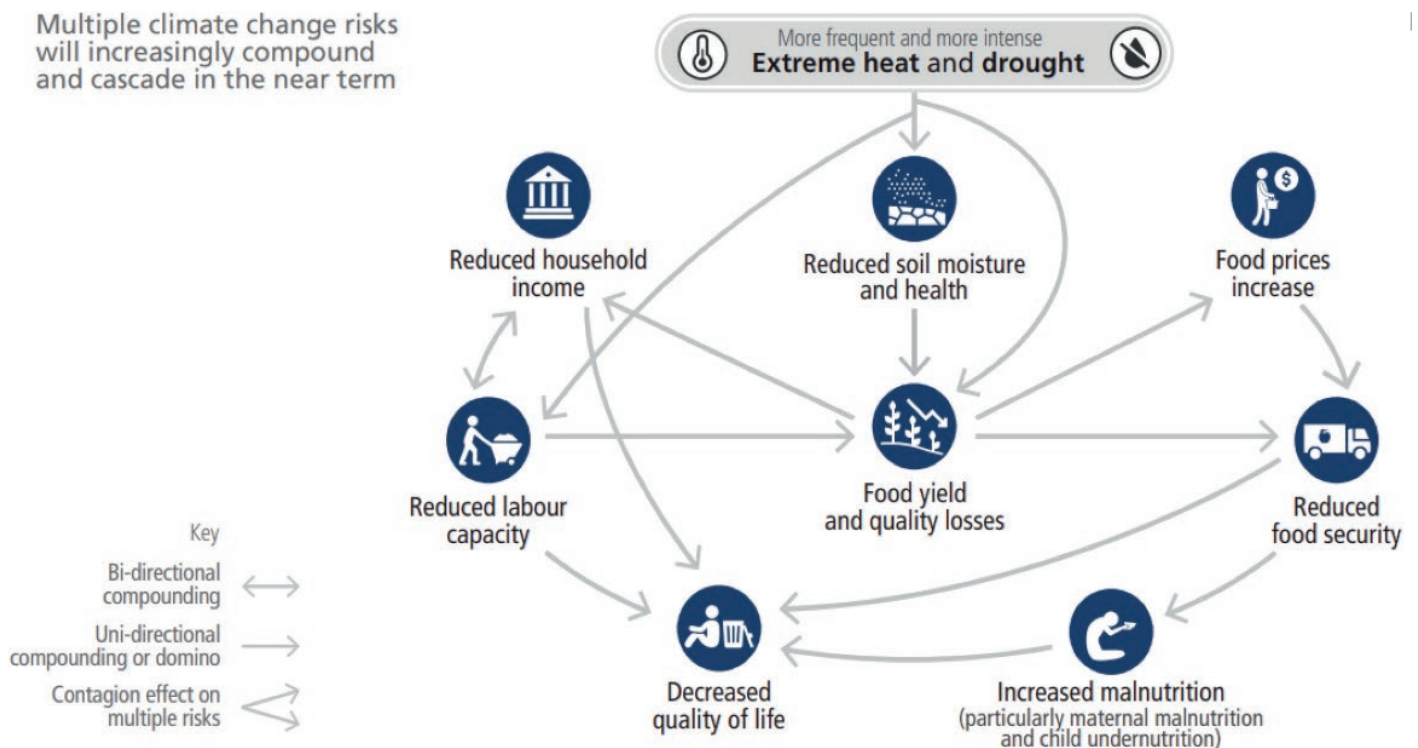
**Abstract.** The research investigates agrivoltaic systems as innovative technologies for mitigating environmental and climate risks with the aim of developing risk and climate-oriented design support tools. The analysis integrates a scoping review, stakeholder consultation, and monitoring data, allowing for the identification of priority risks, recurrent agri-technological solutions, and adaptive spatial and functional configurations. The comparative cards developed summarise objectives, functions, and vulnerability reduction capacities, offering operational tools for designers and decision-makers. The contribution presents outcomes developed in continuity with the results of the PTR 2022–2024 MASE–ENEA, Line 2.7 Guidelines for the environmental sustainability of agrivoltaic system projects.

**Keywords:** Agrivoltaic systems; Climate resilience; Innovative technologies; Environmental design; Climate risks.

## Climate risks in agroecosystems and the role of agrivoltaic systems

According to the IPCC framework, climate risk derives from the interaction between hazard, exposure, and vulnerability. The Mediterranean regions, considered climate hotspots, record an average warming 1.5 times higher than the global rate, and a reduction in precipitation of up to 20% by mid-century (MedECC, 2020). In this context, reducing the vulnerability of agroecosystems assumes strategic importance as they regulate water cycles, sustain vital ecological processes, and ensure ecosystem services (FAO, 2021). Heat stress, linked to rising temperatures and the increased frequency of heatwaves, causes reductions in yields and product quality, and alters crop cycles. Water scarcity, amplified by drought and increased evapotranspiration, intensifies desertification and salinisa-

tion phenomena with effects on soil fertility and production stability (FAO, 2021). Soil degradation, resulting from the combined effect of climatic factors and intensive agricultural practices, produces erosion, loss of organic matter, and reduced biodiversity, compromising ecosystem services. These processes converge to generate complex risks that affect food security (Pandey *et al.*, 2025), agricultural income, workers' health, and the resilience of rural territories (Fig. 1) (UNDRR, 2022). In this scenario, both literature and national guidelines (MASE, 2022) recognise agrivoltaic systems as an opportunity. The integration of photovoltaic modules and crops helps attenuate solar radiation, reduce evapotranspiration, and improve water use efficiency, with reported increases of up to 30% and greater yield stability under drought



gestione integrata dei rischi, capace di connettere mitigazione, innovazione progettuale e salvaguardia ecologica.

### Approccio e metodologia della ricerca

La ricerca si pone in continuità con i risultati sviluppati nell’ambito dell’Accordo MASE-ENEA

“Progettazione sostenibile e tecnologie innovative per sistemi agrivoltaici” PTR 22/24, linea 2.7, da cui derivano le Linee guida

per la sostenibilità ambientale e lo strumento EASY-APV tool, concepito per la valutazione dei progetti agrivoltaici rispetto alla loro capacità di integrare produzione agricola ed energetica, garantire la tutela ecosistemica e contribuire alla resilienza climatica (D’Ambrosio *et. al.*, 2024). Le linee guida hanno definito i sistemi agrivoltaici come il risultato della scomposizione in due macro-componenti: il sistema tecnologico, relativo agli aspetti tecnico-costruttivi e il sistema agro-ambientale, che comprende

conditions. Compared to conventional photovoltaics, these systems reduce land consumption by up to 70%, while keeping agricultural surfaces active (Jreich and Mahjoubi, 2023). Alongside direct benefits, system-wide advantages emerge by strengthening biodiversity and ecosystem services, supporting agroecological and regenerative practices, and enhancing territories as multifunctional infrastructures capable of integrating productive, ecological, and social dimensions (Toledo and Scognamiglio, 2021). Equally significant is the production of renewable energy, which consolidates the energy self-sufficiency of communities and diversifies agricultural income sources.

Technological and environmental design allows these innovations to be interpreted not only in technical terms but also as new spatial and ecological

configurations, redefining the relationship between settlements, landscapes, and productive processes (Ladiana, 2015; Gangemi, 1972). In this light, agrivoltaics can be understood not merely as a technical device but as an opportunity for integrated risk management, capable of linking mitigation, design innovation, and ecological safeguarding.

### Approach and research methodology

The research builds on the results developed within the MASE-ENEA Agreement “Sustainable design and innovative technologies for agrivoltaic systems” PTR 22/24, Line 2.7, which produced the Guidelines for Environmental Sustainability and the EASY-APV tool, designed to assess agrivoltaic projects in terms of their ability to integrate agricultural and energy pro-

duction, ensure ecosystem protection, and contribute to climate resilience (D’Ambrosio *et. al.*, 2024). The guidelines defined agrivoltaic systems as the outcome of two macro-components, namely the technological system, concerning technical and construction aspects, and the agri-environmental system, encompassing the functional and spatial organisation of the project and the areas of interaction with the agricultural and territorial ecosystem. This framework made it possible to interpret projects in their complexity, and to highlight how design quality does not depend solely on the configuration of either the photovoltaic component or crop selection, but also on the integration of additional agri-technological solutions. The solutions analysed consist of a set of practices, systems, and devices that combine the principles of Nature-based Solutions<sup>1</sup>

with innovative technologies. For the purposes of the analysis, a corpus of case studies was constructed on the basis of agrivoltaic projects submitted at the national level within authorisation procedures<sup>2</sup>, only selecting those that: (i) were supported by sufficiently detailed technical documentation (plant layout, description of the solutions adopted, cropping and management framework); (ii) reported at least minimum information on the territorial context and pedoclimatic conditions; and (iii) included at least one additional agri-technological solution beyond those strictly related to energy and agricultural production. The selection mainly concerned contexts in central and southern Italy, with one case located in north-western Italy, representative of temperate-Mediterranean and sub-Mediterranean conditions. This study made it possible to identify

l'organizzazione funzionale e spaziale del progetto e le aree di interazione con l'ecosistema agricolo e territoriale.

Questa impostazione ha permesso di interpretare i progetti nella loro complessità e di evidenziare come la qualità progettuale non dipenda unicamente dalla configurazione della componente fotovoltaica o dalla scelta colturale, ma anche dall'integrazione di ulteriori soluzioni agro-tecnologiche. Le soluzioni analizzate costituiscono un insieme di pratiche, sistemi e dispositivi che coniugano principi delle Nature-based Solutions<sup>1</sup> con tecnologie innovative. Ai fini dell'analisi è stato costruito un corpus di casi studio a partire dai progetti agrivoltaici presentati a livello nazionale per le procedure autorizzative<sup>2</sup>, selezionando esclusivamente quelli: (i) disponevano di una documentazione tecnica sufficientemente dettagliata (layout di impianto, descrizione delle soluzioni adottate, inquadramento colturale e gestionale); (ii) riportavano informazioni minime sul contesto territoriale e sulle condizioni pedoclimatiche; (iii) includevano almeno una soluzione agro-tecnologica aggiuntiva rispetto alle sole soluzioni per la produzione energetica e agricola. La selezione ha interessato prevalentemente contesti dell'Italia centro-meridionale, con un caso localizzato nell'Italia nord-occidentale, rappresentativi di condizioni temperato-mediterranee e sub-mediterranee. Tale studio, ha permesso di individuare le soluzioni agro-tecnologiche ricorrenti e di organizzarle in categorie e sottocategorie distinte sulla base delle funzioni svolte e degli obiettivi perseguiti. A queste categorie si aggiungono le coperture agrivoltaiche, declinate nelle tre configurazioni tipologiche definite dal MASE (MASE, 2022).

Successivamente, è stata condotta una *scoping review* sul database Scopus con l'obiettivo di mappare sistematicamente

i principali rischi climatici per il settore agroecologico e di ricostruire i driver di vulnerabilità ricorrenti. L'analisi dei rischi climatici, incentrata sugli effetti di tre hazard prioritari (stress termico, scarsità idrica e degradazione del suolo), è stata condotta con un approccio sistematico volto a evidenziarne gli impatti sull'agricoltura, sulla biodiversità e sulle comunità rurali. Identificati gli impatti, l'attenzione si è concentrata sulla valutazione delle risposte fornite dalle diverse categorie di soluzioni agro-tecnologiche. Ogni soluzione è stata valutata mediante un processo di codifica qualitativa, che ha consentito di organizzare e sintetizzare evidenze eterogenee provenienti da fonti scientifiche, documentazione progettuale e rapporti di sperimentazione. A ciascuna soluzione è stato attribuito un punteggio qualitativo (-1, 0, +1) per esprimere un effetto negativo, neutro o positivo sulla capacità di incidere sul rischio climatico. I valori ottenuti sono stati in seguito normalizzati. Tale procedura si colloca nell'ambito delle pratiche consolidate di analisi qualitativa che fanno ricorso a matrici e sistemi di categorizzazione (Miles, Huberman and Saldaña, 2014). L'intero processo è stato sottoposto a validazione tramite confronto con progettisti e stakeholder dei settori coinvolti, in modo da garantire la pertinenza dei risultati.

Tali risultati sono stati tradotti in schede comparative sintetiche, in grado di restituire funzioni, obiettivi e potenzialità progettuali. Un aspetto originale del lavoro consiste nell'aver collocato le diverse soluzioni all'interno della scomposizione agro-ambientale (D'Ambrosio *et al.*, 2024), restituendo così uno strumento capace di orientare le scelte progettuali in termini operativi. In questo quadro, ciascuna soluzione è stata interpretata non come unità isolata, ma come componente inte-

recurrent agri-technological solutions, and to organise them into distinct categories and subcategories on the basis of the functions performed and the objectives pursued. These categories are complemented by agrivoltaic cover systems, articulated in the three typological configurations defined by MASE (MASE, 2022). A scoping review (Arksey and O'Malley, 2005) was conducted on the Scopus database to systematically map the main climate risks for the agroecological sector, and to reconstruct recurrent vulnerability drivers. The climate risk analysis, focused on the effects of three priority hazards (heat stress, water scarcity, and soil degradation), was carried out using a systematic approach to highlight their impacts on agriculture, biodiversity, and rural communities. Once the impacts were identified, attention turned to evaluating the re-

sponses provided by the different categories of agri-technological solutions. Each solution was assessed through a qualitative coding process, which made it possible to organise and synthesise heterogeneous evidence from scientific sources, project documentation, and experimental reports. Each solution was assigned a qualitative score (-1, 0, +1) to express a negative, neutral, or positive effect on its ability to influence climate risk. The values obtained were then normalised. This procedure falls within consolidated qualitative analysis practices that make use of matrices and categorisation systems (Miles, Huberman and Saldaña, 2014). The entire process was validated through consultation with designers and stakeholders from the relevant sectors to ensure the relevance of the results.

The results were translated into comparative synthetic cards, designed to summarise functions, objectives, and design potential. An original aspect of this work consists in having positioned the various solutions within the agri-environmental framework (D'Ambrosio *et al.*, 2024), thereby providing a tool capable of guiding design choices in operational terms. Within this framework, each solution was interpreted not as an isolated unit but as an integrated and relational component connected to the functional and spatial subsystems of the agrivoltaic project.

#### **Evidence from case studies and recurrent configurations**

The analysis made it possible to evaluate agri-technological solutions (Tab. 1) with respect to their ability to influence climate risk through two com-

plementary modalities, precisely the reduction of vulnerability, understood as the strengthening of structural and ecological conditions that make agroecosystems less susceptible to climate risks, and the mitigation of impact, understood as the limitation of damages when climate events occur. For each category, the cards summarise objectives, prevailing functions, spatial placement, possible integrations with other solutions, and the capacity to reduce vulnerability in response to climate risks (Figs. 2-6). Each factsheet is organised into three levels: (i) a concise two-column header specifying category, subcategories and prevailing function; (ii) a central body that sets out the main positions within the functional/spatial system and the potential synergies with other solutions; and (iii) an evaluation matrix in which qualitative coding and score normali-

grata e relazionale connessa ai sottosistemi funzionali e spaziali del progetto agrivoltaico.

### **Soluzioni agro-tecnologiche integrate nel progetto risk e climate-oriented**

L'analisi condotta ha permesso di valutare le soluzioni agro-tecnologiche (Tab. 1) rispetto alla loro capacità di incidere sul rischio climatico attraverso due modalità complementari: la riduzione della vulnerabilità, intesa come rafforzamento delle condizioni strutturali ed ecologiche che rendono gli agroecosistemi meno suscettibili ai rischi climatici, e la mitigazione degli impatti, intesa come contenimento dei danni nel momento in cui gli eventi climatici si manifestano. Per ciascuna categoria riassumono obiettivi, funzioni prevalenti, collocazioni spaziali, possibili integrazioni con altre soluzioni e capacità di riduzione della vulnerabilità in risposta ai rischi climatici (Fig. da 2 a 6). Ogni scheda è organizzata in tre livelli: (i) una testata descrittiva sintetica in due colonne che specifica categoria e sottocategorie e funzione prevalente; (ii) un corpo centrale che esplicita i principali posizionamenti all'interno del sistema funzionale/spaziale e le possibili sinergie con altre soluzioni; (iii) una matrice di valutazione in cui la codifica qualitativa e la normalizzazione dei punteggi consentono di tradurre in forma grafica la capacità della soluzione di ridurre le vulnerabilità legate a stress termico, scarsità idrica e degradazione del suolo.

A titolo esemplificativo, la scheda relativa alla categoria SAT 1. Coperture agrivoltaiche (Fig. 2) mostra come le tre sottocategorie (SAT 1.1 Tipo 1 Elevato, SAT 1.2 Tipo 2 Interfilare, SAT 1.3 Tipo 3 Verticale) declinino in modo differenziato il contributo alla riduzione della vulnerabilità. Nelle configurazioni elevate

(SAT 1.1), l'altezza dei moduli e la maggiore distanza dal suolo determinano un'ombreggiatura più diffusa e una ventilazione più efficace, con effetti significativi sul contenimento dello stress termico e sull'efficienza d'uso delle risorse idriche; tali benefici si associano tuttavia a una maggiore complessità strutturale e a specifici requisiti di stabilità e gestione del deflusso superficiale, poiché la concentrazione del ruscellamento in corrispondenza del bordo dei moduli può amplificare i fenomeni erosivi, richiedendo idonei dispositivi di drenaggio e pratiche conservative del suolo (Elamri *et al.*, 2018).

Le configurazioni interfilari (SAT 1.2), che collocano i moduli in alternanza con i filari coltivati, riducono la superficie agricola effettiva e lasciano filtrare una quota maggiore di radiazione verso il suolo; ne deriva una minore efficacia nella mitigazione delle temperature superficiali, a fronte del mantenimento di buone condizioni di accessibilità per le lavorazioni meccanizzate.

Le configurazioni verticali (SAT 1.3) risultano ancora poco diffuse nel contesto nazionale, ma sono oggetto di sperimentazione come sistemi di tipo *wind-breaker*, in cui file di moduli bifacciali disposti in verticale combinano ridotta impronta al suolo e schermatura rispetto ai venti prevalenti, contribuendo a ridurre la vulnerabilità delle colture ai danni da vento e allo stress idrico (Honningdalsnes *et al.*, 2025).

La lettura integrata delle barre di soddisfacimento e delle annotazioni testuali consente di interpretare la categoria non come una soluzione univoca, ma come un ventaglio di assetti progettuali in cui le prestazioni climatiche, agronomiche e spaziali variano in funzione delle configurazioni e delle modalità di combinazione con altre soluzioni agro-tecnologiche.

sation make it possible to graphically represent the capacity of the solution to reduce vulnerabilities related to heat stress, water scarcity and soil degradation.

By way of example, the factsheet for category SAT 1. Agrivoltaic canopies (Fig. 2) illustrates how the three sub-categories (SAT 1.1 Type 1 Elevated, SAT 1.2 Type 2 Inter-row, SAT 1.3 Type 3 Vertical) articulate differentiated contributions to vulnerability reduction. In elevated configurations (SAT 1.1), the height of the modules and their greater distance from the ground generate more diffuse shading and more effective ventilation, with significant effects both on the mitigation of heat stress, and on the efficiency of water use. However, these benefits are associated with greater structural complexity and specific requirements in terms of stability and management

of surface runoff, since the concentration of overland flow at the edge of the modules can amplify erosion processes and, therefore, requires appropriate drainage devices and soil conservation practices (Elamri *et al.*, 2018). Inter-row configurations (SAT 1.2), in which the modules are placed alternately with the cultivated rows, reduce the effective agricultural surface area, and allow a larger share of radiation to reach the ground. This results in lower effectiveness in mitigating surface temperatures, while preserving good accessibility conditions for mechanised operations. Vertical configurations (SAT 1.3) are still relatively uncommon in the national context, but are being tested as wind-breaker systems in which rows of vertically mounted bifacial modules combine a reduced land take with shielding from prevailing winds, thereby helping

to reduce crop vulnerability to wind damage and water stress (Honningdalsnes *et al.*, 2025).

The integrated reading of the performance bars and textual annotations enables the category to be interpreted not as a single solution, but as a spectrum of design configurations in which climatic, agronomic and spatial performances vary according to the layouts adopted, and the ways in which they are combined with other agri-technological solutions. In this sense, the factsheets do not merely perform a descriptive function. They operate as critical devices that explicitly present the evaluation criteria and their links with the methodological pathway. Indeed, they refer back to the phases of qualitative coding and score assignment, while also supporting comparison between design alternatives. The result is a tool that is useful not only

for synthesising research outcomes, but also for transparently guiding decision-making in the preliminary stages of agrivoltaic system design.

Graphical representation through satisfaction bars provides concise visualisation of the scores assigned to the different solutions, allowing immediate comparison between categories and highlighting strengths, weaknesses, and potential synergies.

The configurations observed in the case studies<sup>2</sup> show how the solution categories identified in the comparative cards find application in recurrent functional and spatial layouts (Fig. 7), contributing to the reduction of vulnerabilities and the construction of integrated, adaptive, and multifunctional agrivoltaic systems. In particular, the presence of vegetated screening strips (C1) along at least one side of the layout emerges as a constant.

| AGRO-TECHNOLOGICAL SOLUTIONS (SAT)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>1. Agrivoltaic canopies</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| 1.1. Type 1 - Elevated                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| 1.2. Type 2 – Inter-row                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| 1.3. Type 3 - Vertical                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| <b>Vulnerability reduction</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| <b>Heat stress</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| The literature shows that high-elevation agrivoltaic canopies (Type 1) ensure a significant reduction in the physiological stress of crops, thanks to more homogeneous shading and regular ventilation, which stabilise microclimatic conditions and agricultural productivity (Barron-Gafford <i>et al.</i> , 2019). Inter-row systems (Type 2) generate localised benefits, mainly in the areas close to the module rows, but are nevertheless effective in reducing crop exposure to thermal peaks (Elamri <i>et al.</i> , 2018; Wahid, 2007). Vertical configurations (Type 3), which are still underexplored, show variable results but offer potential for crop diversification. Overall, the different typologies converge in their ability to mitigate the effects of heatwaves and to enhance the physiological resilience of plants.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| <b>Water scarcity</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| Under water deficit conditions, high-elevation systems (Type 1) stand out for their capacity to reduce evapotranspiration and irrigation requirements, thereby stabilising yields even during prolonged drought periods (Elamri <i>et al.</i> , 2018). Inter-row (Type 2) and vertical (Type 3) systems are less performant from a water perspective, yet they still contribute to strengthening productive resilience and crop diversification, especially when implemented in complex agro-ecological contexts (Altieri <i>et al.</i> , 2015). All configurations also help mitigate surface salinisation processes, with positive effects on soil quality and production continuity (Blanco-Canqui, 2018).                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| <b>Soil degradation</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| Agrivoltaic canopies, regardless of configuration, have proven effective in limiting erosion and loss of fertility by attenuating the impact of solar and rainfall energy and improving infiltration processes (Blanco-Canqui, 2018). Several studies further highlight their contribution to strengthening soil biodiversity and pollinator presence, with positive implications for ecological connectivity and the stability of ecosystem services (Lal, 2020). Although effects are more pronounced in high-elevation systems (Type 1), significant benefits also emerge in inter-row (Type 2) and vertical (Type 3) configurations, confirming the importance of agrivoltaic canopies in enhancing agro-ecological resilience.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| References: Altieri, M.A., Nicholls, C.I., Henao, A. and Lana, M.A. (2015), "Agroecology and the design of climate change-resilient farming systems", <i>Agronomy for Sustainable Development</i> , Vol. 35, pp. 869–890. Available at: <a href="https://doi.org/10.1007/s13593-015-0285-2">https://doi.org/10.1007/s13593-015-0285-2</a> (Accessed on 13/09/2025); Barron-Gafford, G.A., Pavao-Zuckerman, M.A., Minor, R.L., Sutter, L.F., Barnett-Moreno, I., Blackett, D.T., Thompson, M., Dimond, K., Gerlak, A.K., Nabhan, G.P. and Macknick, J.E. (2019), "Agrivoltaics provide mutual benefits across the food–energy–water nexus in drylands", <i>Nature Sustainability</i> , Vol. 2 No. 11, pp. 848–855. Available at: <a href="https://doi.org/10.1038/s41893-019-0364-5">https://doi.org/10.1038/s41893-019-0364-5</a> (Accessed on 13/09/2025); Blanco-Canqui, H. (2018), "Cover crops and water quality: Grass cover crops increase time to runoff start and reduce runoff sediment loss", <i>Agronomy Journal</i> , Vol. 110 No. 6, pp. 1633–1644. Available at: <a href="https://doi.org/10.2134/agronj2018.02.0077">https://doi.org/10.2134/agronj2018.02.0077</a> (Accessed on 13/09/2025); Elamri, Y., Cheviron, B., Lopez, J.-M., Dejean, C. and Belaud, G. (2018), "Water budget and crop modelling for agrivoltaic systems: Application to irrigated lettuces", <i>Agricultural Water Management</i> , Vol. 208, pp. 440–453. Available at: <a href="https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.07.001">https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.07.001</a> ; Lal, R. (2020), "Regenerative agriculture for food and climate", <i>Journal of Soil and Water Conservation</i> , Vol. 75 No. 5, pp. 123A–124A. Available at: <a href="https://doi.org/10.2489/jswc.2020.0620A">https://doi.org/10.2489/jswc.2020.0620A</a> (Accessed on 13/09/2025); Wahid, A., Gelani, S., Ashraf, M. and Foolad, M.R. (2007), "Heat tolerance in plants: An overview", <i>Environmental and Experimental Botany</i> , Vol. 61 No. 3, pp. 199–223. Available at: <a href="https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2007.05.011">https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2007.05.011</a> (Accessed on 13/09/2025). |
| <b>2. Eco-compatible strips and barriers</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| 2.1. Vegetated / ecological areas                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| 2.2. Artificial systems and barriers                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| <b>Vulnerability reduction</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| <b>Heat stress</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| Vegetative barriers act as effective microclimate mitigation measures, as they reduce wind speed and generate localised shaded areas, with positive effects on crop physiology and yield stability. The creation of ecological corridors characterised by melliferous and bioindicator species further contributes to strengthening pollination processes and crop resilience, and is particularly relevant in polycultural contexts (Altieri <i>et al.</i> , 2015). Shrub belts and hedgerows also provide sheltered spaces along paths and work areas, enhancing operational comfort and reducing health risks associated with prolonged heat exposure (Flouris <i>et al.</i> , 2018).                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| <b>Water scarcity</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| Under water deficit scenarios, vegetative strips play a significant role in limiting evapotranspiration and improving the soil's water retention capacity. The shading canopy reduces evaporative losses, while shrub and tree root systems promote infiltration processes and limit surface runoff, thereby improving overall water availability and supporting productive resilience (Blanco-Canqui, 2018). The indirect effect on crop diversity manifests primarily through the increase in auxiliary and melliferous species rather than in terms of direct agricultural yields.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| <b>Soil degradation</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| With regard to soil degradation processes, hedgerows and buffer strips are effective in limiting surface erosion and nutrient loss, while permeable artificial barriers contribute to reducing runoff and strengthening soil stability (Santangeli <i>et al.</i> , 2016). Vegetative strips characterised by deep root systems increase soil porosity and infiltration capacity, with beneficial effects also on biodiversity and functional entomofauna (Marzelli and Lintzmeyer, 2024). Moreover, the presence of ecological corridors and eco-compatible fencing ensures habitat continuity, reducing the ecological fragmentation often associated with photovoltaic infrastructures.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| References: Altieri, M.A., Nicholls, C.I., Henao, A. and Lana, M.A. (2015), "Agroecology and the design of climate change-resilient farming systems", <i>Agronomy for Sustainable Development</i> , Vol. 35, pp. 869–890. Available at: <a href="https://doi.org/10.1007/s13593-015-0285-2">https://doi.org/10.1007/s13593-015-0285-2</a> (Accessed on 15/09/2025); Blanco-Canqui, H. (2018), "Cover crops and water quality: Grass cover crops increase time to runoff start and reduce runoff sediment loss", <i>Agronomy Journal</i> , Vol. 110 No. 6, pp. 1633–1644. Available at: <a href="https://doi.org/10.2134/agronj2018.02.0077">https://doi.org/10.2134/agronj2018.02.0077</a> (Accessed on 13/09/2025); Flouris, A.D., Dinas, P.C., Ioannou, L.G., Nybo, L., Havenith, G., Kenny, G.P. and Kjellstrom, T. (2018), "Workers' health and productivity under occupational heat strain: a systematic review and meta-analysis", <i>Lancet Planetary Health</i> , Vol. 2 No. 12, pp. e521–e531. Available at: <a href="https://doi.org/10.1016/S2542-5196(18)30237-7">https://doi.org/10.1016/S2542-5196(18)30237-7</a> (Accessed on 15/09/2025); Marzelli, M. and Lintzmeyer, F. (2024), Threats report on alpine ecological connectivity, renewable energies and upcoming spatial needs (Deliverable D.1.3.1, PlanToConnect Project), ifuplan – Institute for Environmental Planning and Spatial Development GmbH & Co.KG, Munich. Available at: <a href="https://plan2connect.eu">https://plan2connect.eu</a> (Accessed on 13/09/2025); Santangeli, A., Di Minin, E., Toivonen, T., Pogson, M., Hastings, A., Smith, P. and Moilanen, A. (2016), "Synergies and trade-offs between renewable energy expansion and biodiversity conservation – a cross-national multi-factor analysis", <i>GCB Bioenergy</i> , Vol. 8 No. 6, pp. 941–951. Available at: <a href="https://doi.org/10.1111/gcb.12337">https://doi.org/10.1111/gcb.12337</a> (Accessed on 13/09/2025).                                                                                                                                                                                                                      |

### 3. Solutions for climate and soil protection

- 3.1. Soil protection and enhancement systems
- 3.2. Agricultural protection systems

#### Vulnerability reduction

##### Heat stress

Permeable surfaces, biodegradable mulches and anti-compaction mats help stabilise soil microclimatic conditions. These solutions reduce the reflection of solar radiation and the transfer of heat to the root zone, maintaining lower temperatures and improving crop resilience to heatwaves (Lal, 2015).

##### Water scarcity

Geotextiles and soil covers promote water infiltration and reduce evaporative losses, thereby increasing the availability of usable water. The use of permeable pavements and controlled drainage systems also allows for better groundwater recharge and stormwater management, with positive effects on the overall water-use efficiency of agricultural systems (Apollonio *et al.*, 2021).

##### Soil degradation

Geogrids and geosynthetic products mitigate erosion processes, with experimental results showing reductions in soil loss of up to 98–99% compared with unprotected surfaces. The use of anti-compaction mats and nature-based engineering solutions also limits the physical degradation of soil, preserving its fertility, structure and ecological functionality (Mohawesh *et al.*, 2022; Lal, 2015).

*References:* Apollonio, C., Masi, F., Bacci, D., Ranieri, E. and Piro, P. (2021), "Hillslope Erosion Mitigation: An Experimental Proof of a Nature-Based Solution", *Sustainability*, Vol. 13 No. 11, 6058. Available at: <https://doi.org/10.3390/su13116058> (Accessed on 13/09/2025); Kotilainen, T., Robson, T.M. and Hernández, R. (2018), "Light quality characterization under climate screens and shade nets for controlled-environment agriculture", *PLoS ONE*, Vol. 13 No. 6, e0199628. Available at: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0199628> (Accessed on 13/09/2025); Lal, R. (2015), "Restoring soil quality to mitigate soil degradation", *Sustainability*, Vol. 7, pp. 5875–5895. Available at: <https://doi.org/10.3390/su7055875> (Accessed on 13/09/2025); Mohawesh, O., Al-Abdallat, A., Al-Bakri, J. and Qrunfleh, M. (2022), "Effects of colored shading nets on air temperature and light intensity", *HortTechnology*, Vol. 32 No. 1, pp. 21–30. Available at: <https://doi.org/10.21273/HORTECH04895-21> (Accessed on 13/09/2025).

### 4. Resources management solutions

- 4.1. Precision irrigation systems
- 4.2. Devices for the collection, treatment and reuse of rainwater and wastewater/brackish water

#### Vulnerability reduction

##### Heat stress

The adoption of precision irrigation systems makes it possible to modulate irrigation volumes with high accuracy according to microclimatic and phenological conditions, thereby reducing the negative effects of heatwaves on crop physiology. Targeted water supply to the root zone helps maintain a balanced water status and higher photosynthetic efficiency, mitigating heat stress and preserving productivity even under critical conditions (Lakhari *et al.*, 2024).

##### Water scarcity

Technologies for the collection, treatment and reuse of rainwater, wastewater and brackish water expand the availability of non-conventional resources. These measures reduce dependence on traditional water sources, support productive resilience during prolonged droughts and enhance water-use efficiency (Al-Addous *et al.*, 2024; Olufisayo and Olanrewaju, 2024).

##### Soil degradation

Integrated water resource management, through precision irrigation and the controlled reuse of treated wastewater, helps mitigate salinisation and nutrient leaching processes. Phytoremediation and constructed wetland techniques, in addition to treating agricultural and urban effluents, make it possible to recover water resources suitable for irrigation, thus safeguarding soil fertility and ecological quality. Such practices counteract degradation processes and strengthen the long-term functionality of agroecological systems (Lakhari *et al.*, 2024).

*References:* Al-Addous, M., Bdour, M., Rabaiah, S., Boubakri, A., Schweimanns, N., Barbana, N. and Wellmann, J. (2024), "Innovations in Solar-Powered Desalination: A Comprehensive Review of Sustainable Solutions for Water Scarcity in the Middle East and North Africa (MENA) Region", *Water*, Vol. 16 No. 13, 1877. Available at: <https://doi.org/10.3390/w16131877> (Accessed on 13/09/2025); Lakhari, I.A., Yan, H., Zhang, C., Wang, G., He, B., Hao, B., Han, Y., Bao, R., Syed, T.N. *et al.* (2024), "A Review of Precision Irrigation Water-Saving Technology under Changing Climate for Enhancing Water Use Efficiency, Crop Yield, and Environmental Footprints", *Agriculture*, Vol. 14 No. 7, 1141. Available at: <https://doi.org/10.3390/agriculture14071141> (Accessed on 13/09/2025); Olufisayo, O.E. and Olanrewaju, O. (2024), "A Review of Renewable Energy Powered Seawater Desalination Treatment Process for Zero Waste", *Water*, Vol. 16 No. 19, 2804. Available at: <https://doi.org/10.3390/w16192804> (Accessed on 13/09/2025).

### 5. Solutions for climate and crop management

- 5.1. Digital and monitoring tools
- 5.2. Crop management practices
- 5.3. Regenerative agriculture practices

#### Vulnerability reduction

##### Heat stress

Digital monitoring tools such as IoT sensors, drones and decision-support systems make it possible to detect microclimatic and crop physiological conditions in real time, enabling targeted interventions to reduce the effects of heatwaves. This adaptive capacity helps mitigate physiological stress and stabilise yields (Zhuang *et al.*, 2022).

##### Water scarcity

Crop practices based on cover crops, crop rotations and intercropping strengthen agroecological diversification and increase water-use efficiency, thanks to enhanced infiltration and reduced evaporative losses (Altieri *et al.*, 2015). These approaches are particularly effective in supporting agricultural resilience under prolonged drought conditions.

##### Soil degradation

Regenerative practices, including the application of biochar, carbon farming and soil health management programmes, help improve soil structure and fertility, increase water retention and promote functional biodiversity (Schmidt *et al.*, 2021). Recent studies show that biochar increases yields, water-use efficiency and carbon sequestration while simultaneously reducing the risks of erosion and salinisation (Han *et al.*, 2023; Gross *et al.*, 2021).

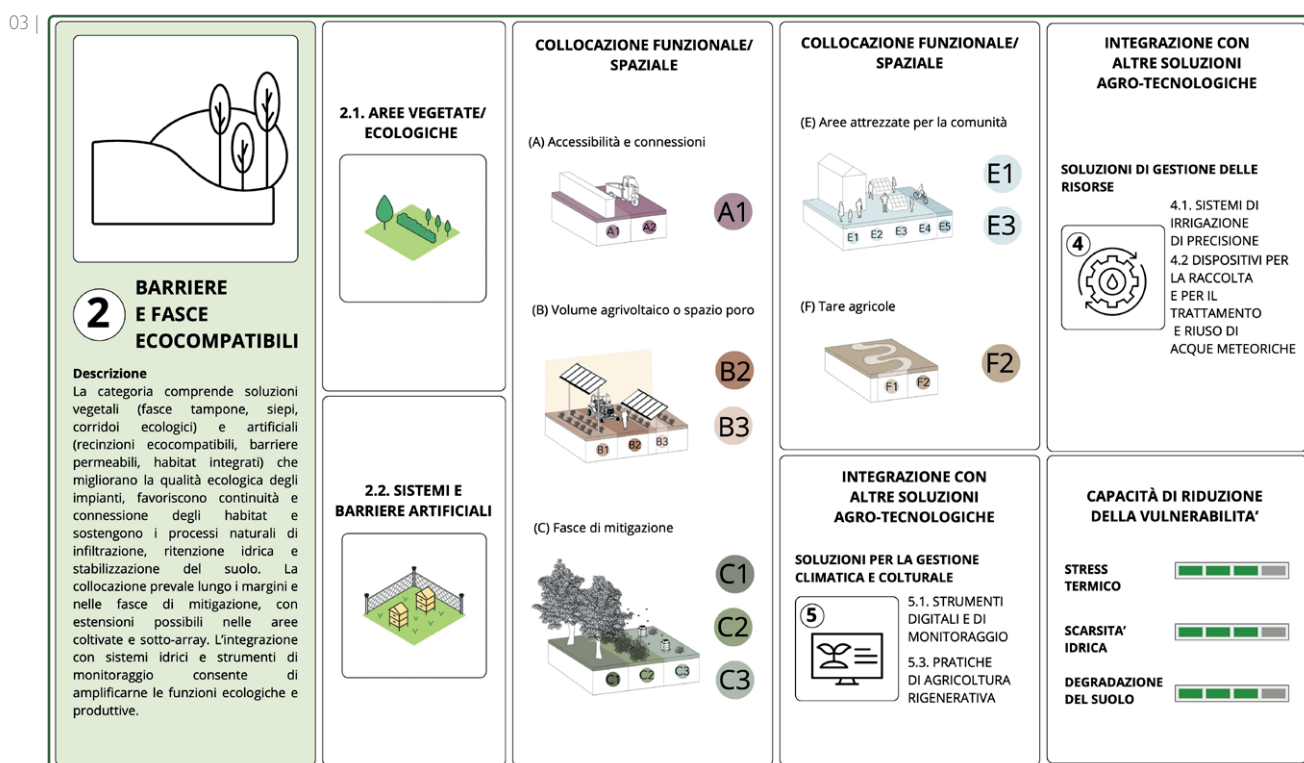
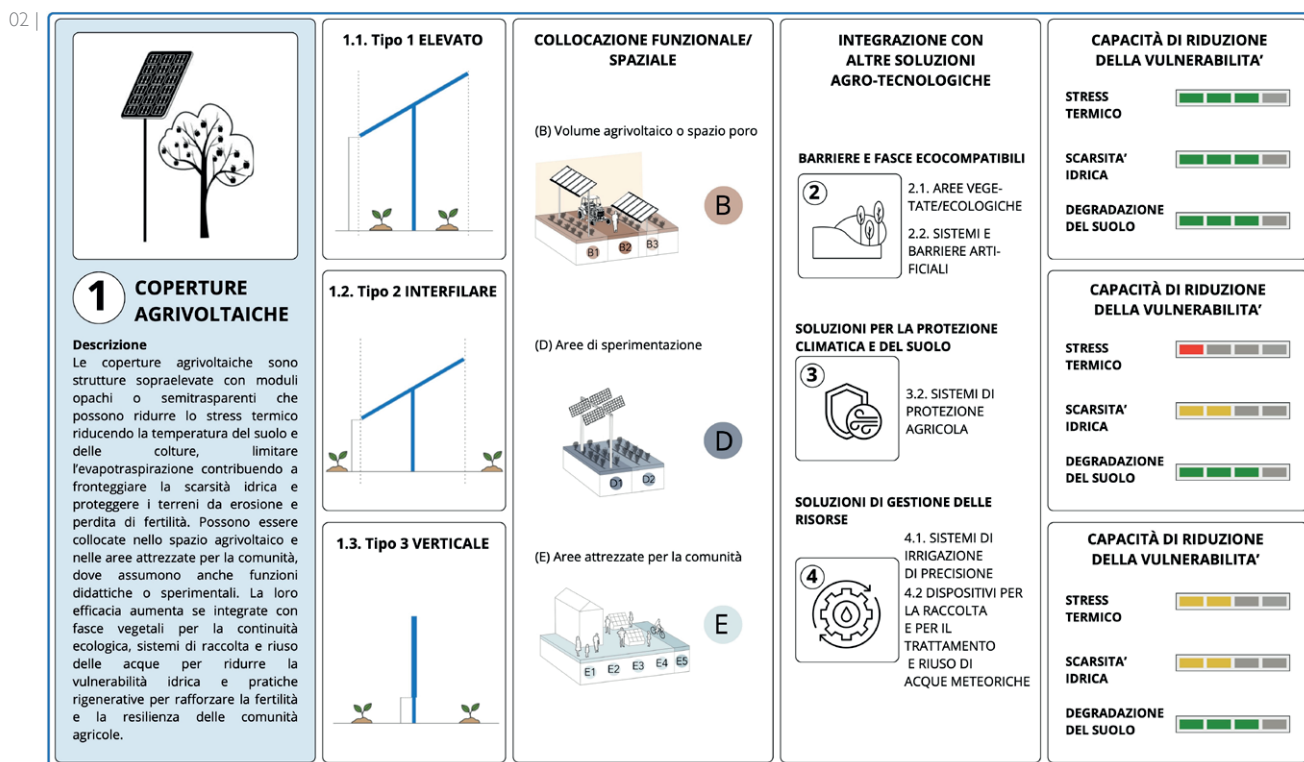
*References:* Altieri, M.A., Nicholls, C.I., Henao, A. and Lana, M.A. (2015), "Agroecology and the design of climate change-resilient farming systems", *Agronomy for Sustainable Development*, Vol. 35, pp. 869–890. Available at: <https://doi.org/10.1007/s13593-015-0285-2> (Accessed on 13/09/2025); Gross, A., Glaser, B. and Bird, M. (2021), "Soil Organic Carbon Sequestration after Biochar Application: A Global Meta-Analysis", *Agronomy*, Vol. 11 No. 12, 2474. Available at: <https://doi.org/10.3390/agronomy11122474> (Accessed on 13/09/2025); Han, X., Xu, C., Fu, Q., Wang, G., Wang, X., Song, X. and Zhang, Y. (2023), "Effects of biochar on crop yield, water use efficiency and nitrogen use efficiency: A global meta-analysis", *Journal of Cleaner Production*, Vol. 403, 136782. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136782> (Accessed on 13/09/2025); Schmidt, H.P., Anca-Couce, A., Hagemann, N., Werner, C., Gerten, D., Lucht, W., Aust, C. *et al.* (2021), "Biochar in agriculture – A systematic review of 26 global meta-analyses", *Global Change Biology Bioenergy*, Vol. 13 No. 11, pp. 1708–1730. Available at: <https://doi.org/10.1111/gcbb.12889> (Accessed on 13/09/2025); Zhuang, J., Yang, P., Tang, J., Fu, P., Gao, Y. and Xu, D. (2022), "Applications of UAV and sensor-based technologies in agriculture for climate-smart farming: A review", *Computers and Electronics in Agriculture*, Vol. 198, 107091. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.107091> (Accessed on 13/09/2025).

02 | Scheda sintetica della categoria di soluzione agro-tecnologica SAT 1. Coperture agrivoltaiche, articolata nelle sottocategorie SAT 1.1 Tipo 1 Elevato, SAT 1.2 Tipo 2 Interfilare e SAT 1.3 Tipo 3 Verticale, con indicazioni relative a collocazione spaziale, integrazione con altre soluzioni e capacità di riduzione della vulnerabilità rispetto a stress termico, scarsità idrica e degradazione del suolo

*Synthetic card of the agri-technological solution category SAT 1. Agrivoltaic coverings, articulated in subcategories SAT 1.1 Type 1 Elevated, SAT 1.2 Type 2 Inter-row, and SAT 1.3 Type 3 Vertical, with indications on spatial placement, integration with other solutions, and vulnerability reduction capacity against heat stress, water scarcity, and soil degradation*

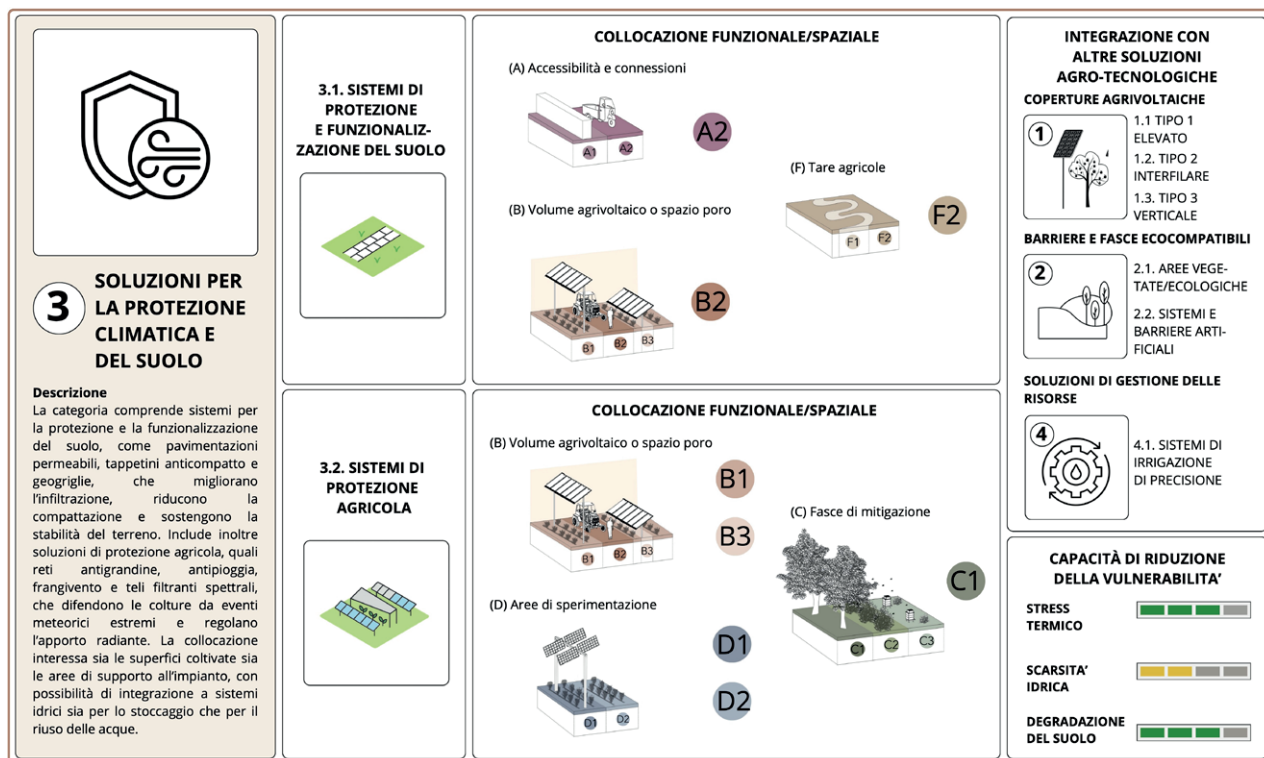
03 | Scheda sintetica della categoria di soluzione agro-tecnologica SAT 2. Barriere e fasce ecocompatibili, articolata nelle sottocategorie SAT 2.1 Aree vegetate/ecologiche e SAT 2.2 Sistemi e barriere artificiali

*Synthetic card of the agri-technological solution category SAT 2. Eco-compatible barriers and strips articulated in subcategories SAT 2.1 Vegetated/ecological areas and SAT 2.2 Artificial systems and barriers*

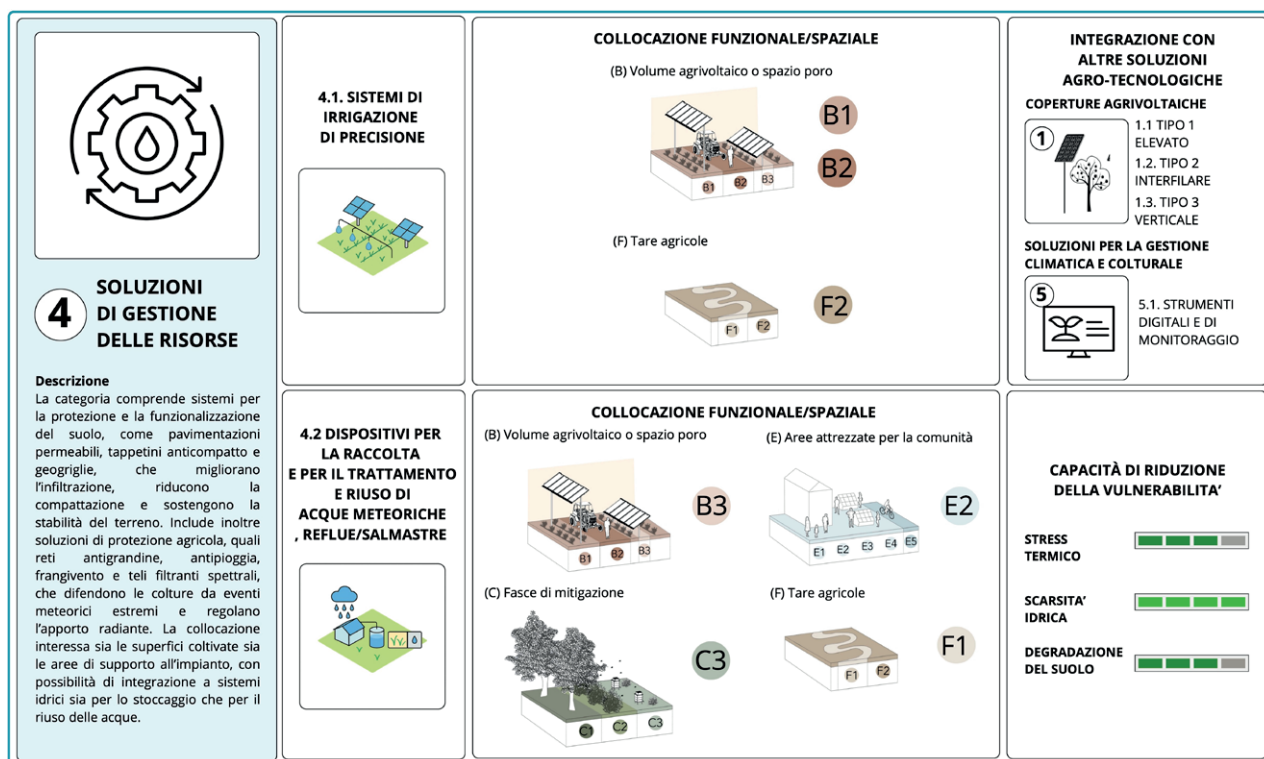


- 04 | Scheda sintetica della categoria di soluzione agro-tecnologica SAT 3. Soluzioni per la protezione climatica e del suolo, articolata nelle sottocategorie SAT 3.1 Sistemi di protezione e funzionalizzazione del suolo e SAT 3.2 Sistemi di protezione agricola  
*Synthetic card of the agri-technological solution category SAT 3. Climate and soil protection solutions, articulated in subcategories SAT 3.1 Soil protection and functionalisation systems, and SAT 3.2 Agricultural protection systems*
- 05 | Scheda sintetica della categoria di soluzione agro-tecnologica SAT 4. Soluzioni di gestione delle risorse, articolata nelle sottocategorie SAT 4.1 Sistemi di irrigazione di precisione e SAT 4.2 Dispositivi per la raccolta e il riuso di acque meteoriche, reflue e salmastre  
*Synthetic card of the agri-technological solution category SAT 4. Resource management solutions, articulated in subcategories SAT 4.1 Precision irrigation systems and SAT 4.2 Devices for collection and reuse of rainwater, wastewater, and brackish water*

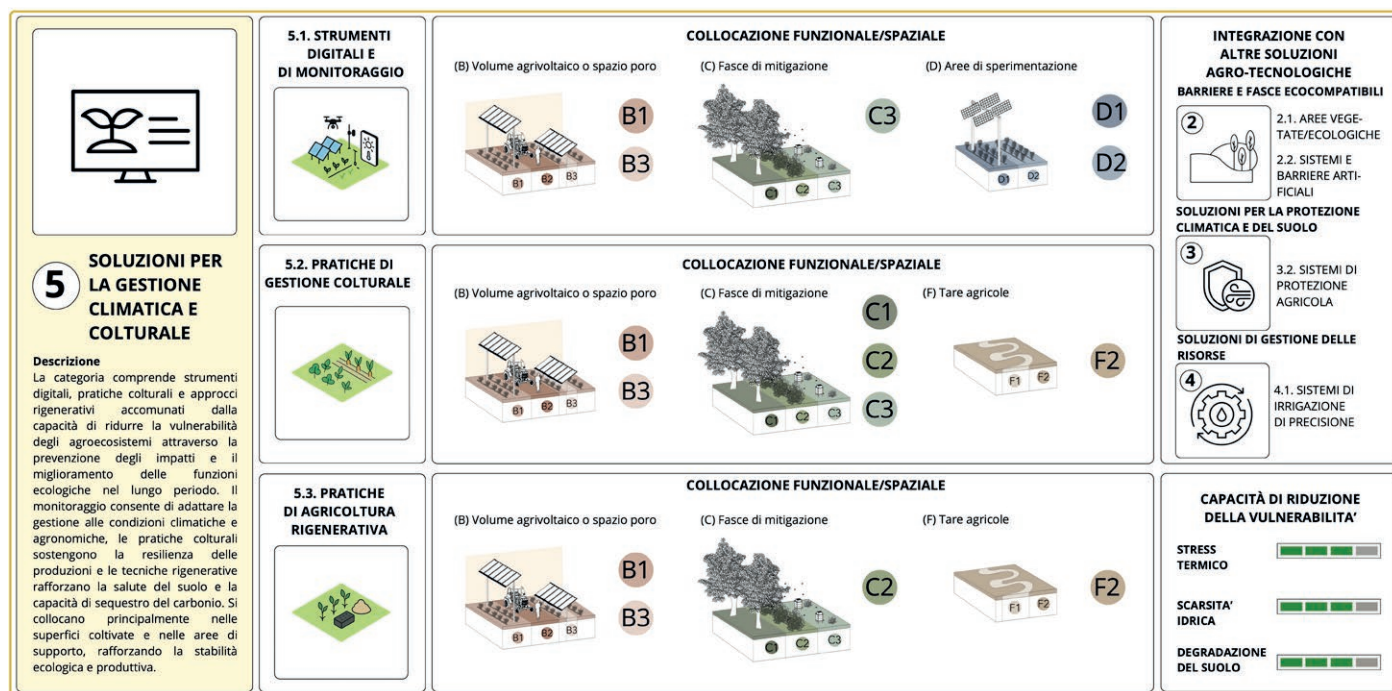
| 04



| 05



06 |



In questo senso, le schede non svolgono solo una funzione descrittiva, ma operano come dispositivi critici che rendono espliciti i criteri di valutazione e i nessi con il percorso metodologico: da un lato, rimandano alle fasi di codifica qualitativa e di attribuzione dei punteggi; dall'altro, supportano la comparazione tra alternative progettuali. Ne deriva uno strumento utile non solo per sintetizzare esiti di ricerca, ma per guidare le scelte nelle fasi preliminari di impostazione progettuale di sistemi agrivoltaici.

These strips provide not only visual mitigation but also environmental protection by shielding against wind and enhancing soil stability through root systems (Polacchi *et al.*, 2024). Perimeter fences (A1) present diversified layouts, which can be continuous (CS01 – SB), partial (CS02 – CP), or absent (CS05 – SG). Where fencing is continuous, it is often complemented by openings for wildlife (SAT 2.2), facilitating ecological corridors and reducing habitat fragmentation (Marzelli and Lintzmeyer, 2024). Vegetated strips (C2, C3), positioned within the layout, can further increase functional biodiversity, improve soil water retention, reduce erosion and compaction, and foster ecological regeneration (Polacchi *et al.*, 2024). In some cases, such strips are integrated beneath photovoltaic modules to con-

tain erosion caused by surface runoff during intense rainfall. The use of pollinator-friendly species and artificial nesting (SAT 2.2), either in internal strips (C3) or incorporated in screening elements (A1), strengthens ecosystem services and reduces reliance on chemical inputs. Another significant recurrence is precision irrigation systems (SAT 1), integrated within the productive space (B). These systems are often supported by water collection tanks, configured as underground basins or ponds with phytoremediation, located both along the margins (C1, C2) and within naturalised areas. In arid contexts, the reuse of brackish water is also tested, expanding irrigation resources and reinforcing the water resilience of agroecosystems (Polacchi *et al.*, 2024). Experimental areas (D), located at the margins or ad-

## Evidenze dai casi studio e configurazioni ricorrenti

Le configurazioni riscontrate nei casi studio2 mostrano come le categorie di soluzioni individuate nelle schede comparative trovino applicazione in assetti funzionali e spaziali ricorrenti (Fig. 7), contribuendo alla riduzione delle vulnerabilità e alla costruzione di sistemi agrivoltaici integrati, adattivi e multifunzionali.

In particolare, la presenza di fasce vegetate di schermatura (C1) lungo almeno un lato del layout si configura come una costante. Tali fasce, non svolgono solo una funzione di mitigazio-

Le configurazioni riscontrate nei casi studio2 mostrano come le categorie di soluzioni individuate nelle schede comparative trovino applicazione in assetti funzionali e spaziali ricorrenti (Fig. 7), contribuendo alla riduzione delle vulnerabilità e alla costruzione di sistemi agrivoltaici integrati, adattivi e multifunzionali.

## Conclusions, limitations and perspectives

The research positions agrivoltaic systems within integrated management strategies, highlighting their potential in reducing vulnerabilities linked to heat stress, water scarcity, and soil degradation. Its innovative contribution lies in the development of comparative tools capable of organising heterogeneous design solutions within a unified framework of technical, ecological and management criteria, thereby making the interrelationships between technological components, agronomic practices and ecosystem quality more legible. The tools are thus able to orient ex-ante design choices, and facilitate comparison between projects. However, limitations remain due to empirical availability. Indeed, the limited number of operational plants, the still short monitoring periods, and the frag-

ne visiva ma anche ambientale, fornendo protezione dal vento e aumentando tramite l'apparato radicale la stabilità del suolo (Polacchi *et. al.*, 2024). Le recinzioni perimetrali (A1) presentano assetti diversificati: continue (CS01 – SB), parziali (CS02 – CP) o assenti (CS05 – SG). Laddove la recinzione è continua, questa è spesso compensata da varchi per la fauna selvatica (SAT 2.2), che favoriscono la creazione di corridoi ecologici, riducendo gli effetti di frammentazione degli habitat (Marzelli and Lintzmeyer, 2024). Le fasce vegetate (C2, C3), inoltre, collocate all'interno del layout, possono incrementare la biodiversità funzionale, migliorare la capacità dei suoli di assorbire e trattenere acqua piovana, ridurre erosione e compattazione e favorire processi di rigenerazione ecologica (Polacchi *et. al.*, 2024). In alcuni casi, tali fasce sono integrate sotto i moduli fotovoltaici per contenere l'erosione dovuta al deflusso idrico superficiale durante piogge intense. L'impiego di specie mellifere e impollinatori, anche attraverso nidi artificiali (SAT 2.2) in tali aree (C3) o integrate negli elementi di schermatura (A1), contribuisce inoltre a rafforzare i servizi ecosistemici e a ridurre la dipendenza da input chimici. Un'altra ricorrenza significativa è rappresentata dai sistemi di irrigazione di precisione (SAT 1), integrati nello spazio produttivo (B). Questi sistemi sono spesso coadiuvati da vasche di raccolta idrica, configurate come bacini artificiali interrati o stagni con fitodepurazione, collocati sia lungo i margini (C1, C2) sia nelle aree naturalizza-

te. In contesti aridi si sperimenta anche il riuso delle acque salmastre, strategia che consente di ampliare le risorse disponibili per l'irrigazione e rafforzare la resilienza idrica degli agroecosistemi (Polacchi *et. al.*, 2024). Le aree sperimentali (D), poste al margine o in adiacenza agli spazi produttivi (B), svolgono una funzione di monitoraggio delle prestazioni colturali, generando dati utili per la gestione adattiva.

La ricerca evidenzia come l'efficacia delle soluzioni agro-tecnologiche non risieda nell'applicazione isolata di singoli interventi, ma nella capacità di essere combinate e integrate all'interno di configurazioni progettuali complesse. La messa a sistema di componenti eterogenee, ecologiche, tecnologiche e gestionali, permette di agire simultaneamente su più dimensioni del rischio, amplificando i benefici e riducendo i potenziali trade-off. Ne risulta che la resilienza degli agroecosistemi non dipende soltanto dalla presenza di determinate soluzioni, ma dal modo in cui esse sono aggregate e articolate in relazione alle funzioni produttive, ambientali e sociali del progetto.

**Conclusioni, limiti e prospettive**

La ricerca colloca i sistemi agri-voltaici nelle strategie di gestione integrata, evidenziandone il potenziale nel ridurre vulnerabilità legate a stress termico, scarsità idrica e degradazione dei suoli. L'elemento innovativo risiede nell'elaborazione di strumenti comparativi capaci di orga-

| Caso Studio | Localizzazione                                  | Sistema APV | Configurazione in sistemi agro-ambientali | Soluzioni agro-tecnologiche |
|-------------|-------------------------------------------------|-------------|-------------------------------------------|-----------------------------|
| CS 01 - SB  | Ruvo di Puglia, Località Lama Pagliara (BA)     | T1          | A1 C3 B C3 A2 C3 B C3 C2 C1 A1            |                             |
| CS 02 - CP  | Barengo e Briona, Località Cascina Pomogno (NO) | T1          | A1 C1 A2 B A2 D A2                        |                             |
| CS 03 - TS  | Giugliano in Campania, Comune di Napoli (NA)    | T1          | A1 C1 C2 A2 B A2 C3 E C3 C1 A1            |                             |
| CS 04 - FA  | Troia, Comune di Foggia (FG)                    | T2          | A1 C1 C2 A2 B D C3 C1 A1                  |                             |
| CS 05 - SG  | Acquapendente, Provincia di Viterbo (VT)        | T2          | C1 C2 C3 A2 B A2 B A2 C3 C2 C1            |                             |
| CS 06 - LP  | Castrovillari (CS), Calabria                    | T1          | A1 C1 A2 C2 C3 B C2 C3 B A2 C1 A1         |                             |

| LEGENDA SISTEMA AGRO-AMBIENTALE                                   |                                                                        |                                                          |                                                                   |
|-------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|
| <b>(A) Accessibilità e connessioni</b>                            | <b>(C) Fasce di mitigazione</b>                                        | <b>(E) Aree attrezzate per la comunità</b>               | <b>(F) Tare agricole</b>                                          |
| <b>A1</b> Recinzione perimetrale                                  | <b>C1</b> Schermature visuali                                          | <b>E1</b> Aree attrezzate a scopo didattico              | <b>F1</b> Superfici occupate da elementi naturali e/o artificiali |
| <b>A2</b> Accessibilità e passaggio carrabile                     | <b>C2</b> Aree di rinaturalizzazione e salvaguardia della biodiversità | <b>E2</b> Aree per la trasformazione o consumo in loco   | <b>F2</b> Aree di buffer                                          |
| <b>(B) Volume agrivoltaico o spazio poro</b>                      | <b>C3</b> Aree di inserimento di specie vegetali e animali funzionali  | <b>E3</b> Aree attrezzate a scopo ricreativo             |                                                                   |
| <b>B1</b> Aree per la coltivazione agricola e attività zootecnica | <b>(D) Aree di sperimentazione</b>                                     | <b>E4</b> Aree per la vendita diretta                    |                                                                   |
| <b>B2</b> Accessibilità e passaggio per mezzi agricoli e persone  | <b>D1</b> Aree di sperimentazione tecnologica                          | <b>E5</b> Accessibilità e percorsi per la mobilità lenta |                                                                   |
| <b>B3</b> Area di ingombro dell'impianto                          | <b>D2</b> Terreno di controllo                                         |                                                          |                                                                   |

nizzare soluzioni progettuali eterogenee in un quadro unitario di criteri tecnici, ecologici e gestionali, rendendo più leggibili le interrelazioni tra componenti tecnologiche, pratiche agronomiche e qualità ecosistemica, in grado di orientare in fase ex-ante le scelte progettuali e facilitare la comparazione tra progetti.

Permangono tuttavia limiti legati alla disponibilità empirica: il numero ridotto di impianti in esercizio, i tempi di monitoraggio ancora troppo brevi e la frammentarietà dei dati rendono complessa la validazione delle valutazioni e ne limitano la comparabilità tra contesti.

Le prospettive future riguardano l'ampliamento della base empirica attraverso l'inclusione di progetti in differenti aree geografiche e la raccolta di dati di lungo periodo, da integrare con modelli predittivi che considerino anche scenari climatici specifici. L'adozione di indicatori multidimensionali potrà consentire di valutare congiuntamente i fattori agricoli, ecologici e socio-economici, rafforzando la capacità di lettura sistemica dei progetti. In questa direzione, la ricerca si rivolge a progettisti, fornendo strumenti per l'impostazione delle fasi preliminari, dalla lettura dei profili di rischio climatico sito-specifici alla scelta delle combinazioni agrivoltaiche e delle soluzioni agro-tecnologiche più coerenti con gli obiettivi di adattamento e mitigazione climatica, e a decisori e valutatori, offrendo criteri per l'analisi e la comparazione dei progetti, la definizione di condizioni e prescrizioni progettuali, con l'obiettivo di orientare le scelte verso configurazioni climaticamente adattive, resilienti e multifunzionali e di fornire, nel medio periodo, una base per linee guida operative e protocolli valutativi condivisi tra amministrazioni, enti di ricerca e operatori del settore. Le

prospettive di sviluppo richiedono, in particolare, di affrontare i sistemi agrivoltaici in una chiave più marcatamente ambientale e tecnologica, nel senso di ragionamento sul loro inserimento nel "paesaggio ambientale" inteso come luogo del cambiamento e dell'evoluzione delle relazioni tra natura e artificio (Vittoria, 1975). In questa prospettiva, tali progetti possono essere concepiti come forme di antropizzazione "leggera" dell'ambiente naturale e agricolo, capaci di generare nuovi habitat produttivi a bassa intensità infrastrutturale nei quali campi coltivati, infrastrutture idrauliche e insediamenti rurali concorrono a definire un unico ambiente di vita strutturato dal rapporto tra lavoro agricolo, forme insediative e organizzazione del suolo (Gangemi, 1979). Ciò consente di rispondere in modo più articolato alle critiche sugli impatti ambientali emerse nei procedimenti VIA/VAS, che risultano particolarmente rilevanti quando l'agrivoltaico è valutato solo in termini tecnico-prestazionali: il tema diventa allora l'individuazione di punti di equilibrio tra efficienza energetica e contenimento dell'impatto, definendo configurazioni "conformi" rispetto alla superficie occupata, alla potenza installata, alla quota di superficie agricola effettivamente produttiva e alla qualità dei nuovi habitat che si vengono a creare. Su questo bilanciamento tra prestazioni, impatti e capacità generativa di nuovi paesaggi agro-energetici si collocano le principali prospettive di lavoro di ricerca, in particolare per gli architetti e per la disciplina della progettazione ambientale, chiamati a tradurre tali equilibri in criteri e dispositivi spaziali capaci di tenere insieme produzione, efficienza energetica e mitigazione della vulnerabilità ai rischi.

mentation of available data make it difficult to validate assessments and limit comparability across different contexts. Future perspectives concern the expansion of the empirical base through the inclusion of projects in other geographical areas, and the collection of long-term data, to be integrated with predictive models that also consider specific climate scenarios. The adoption of multidimensional indicators will make it possible to jointly assess agricultural, ecological, and socioeconomic factors, strengthening the systemic understanding of projects. In this perspective, the research addresses designers by providing tools for the set-up of preliminary phases, from the analysis of site-specific climate risk profiles to the selection of agrivoltaic configurations and agri-technological solutions that are most consistent with adaptation and mitigation objectives,

and with policy-makers and evaluators. They offer criteria for project analysis and comparison, for the definition of design conditions and prescriptions, with the aim of steering decisions towards climate-adaptive, resilient and multifunctional configurations. In the medium term, this approach may provide a basis for operational guidelines and shared assessment protocols among public administrations, research institutions, and sector operators. The development perspectives particularly call for agrivoltaic systems to be addressed from a more explicitly environmental and technological standpoint, that is, through reflection on their integration into the "environmental landscape", the locus of change and of the evolving relationships between nature and artefact (Vittoria, 1975). From this standpoint, such projects can be conceived as forms of "light" an-

thropisation of natural and agricultural environments, capable of generating new productive habitats with low infrastructural intensity, in which cultivated fields, hydraulic infrastructures and rural settlements contribute to defining a single living environment structured by the relationship between agricultural work, settlement forms, and soil organisation (Gangemi, 1979). This makes it possible to provide a more articulated response to criticisms concerning environmental impacts that have emerged in EIA/SEA procedures, which become particularly significant when agrivoltaics are assessed solely in technical-performance terms. The key issue then becomes the identification of points of balance between energy efficiency and impact mitigation, defining configurations that are "conforming" in relation to the land take, installed capacity, share of effectively productive

agricultural surface, and the quality of the new habitats generated. The main future research directions lie in this balance between performance, impacts and the generative capacity of new agro-energetic landscapes, particularly for architects and for the field of environmental design. The latter are called upon to translate these equilibria into spatial criteria and devices capable of holding together production, energy efficiency and the mitigation of vulnerability to risks.

#### NOTES

<sup>1</sup> European Environment Agency (EEA), 2021.

<sup>2</sup> The case studies considered were selected from the MASE VIA/VAS portal, consistently with the MASE Guidelines (2022) and validated as good practices in the EASY-APV testing (D'Ambrosio *et al.*, 2024).

## NOTE

<sup>1</sup> European Environment Agency (EEA), 2021.

<sup>2</sup> I casi studio considerati sono stati selezionati dal portale VIA/VAS del MASE, conformi alle Linee guida MASE (2022) e validati come buone pratiche nel testing di EASY-APV (D'Ambrosio et. al., 2024).

## REFERENCES

- Barron-Gafford, G.A., Pavao-Zuckerman, M.A., Minor, R.L., Sutter, L.F., Barnett-Moreno, I., Blackett, D.T., Thompson, M., Dimond, K., Gerlak, A.K., Nabhan, G.P. and Macknick, J.E. (2019), "Agrivoltaics provide mutual benefits across the food-energy-water nexus in drylands", *Nature Sustainability*, Vol. 2, pp. 848-855. Available at: <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0364-5> (Accessed on 13/09/2025).
- D'Ambrosio, V., Tersigni, E., Scognamiglio, A., Cervelli, E., Losasso, M., Pindozzi, S., Rigillo, M., Castaldi, F., Girardi, C., Marandino, F., Mokrane, S., Recchi, P.F. and Santomartino, G. (2024), *Linee guida per la sostenibilità ambientale del progetto di sistemi agrivoltaici*, ENEA – DiARC, Roma. Available at: <https://www.ricercasistematica.enea.it/archivio-documenti.html?task=download.send&id=5420:sistemi-agrivoltaici-indirizzi-per-la-sostenibilità-ambientale-del-progetto-la2-7&catid=585> (Accessed on 13/09/2025).
- EEA (2021), *Nature-based solutions in Europe: policy, knowledge and practice for climate change adaptation and disaster risk reduction*, EEA Report No 1/2021, European Environment Agency, Copenhagen. Available at: <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/nature-based-solutions-in-europe> (Accessed on 13/09/2025).
- Elamri, Y., Cheviron, B., Lopez, J.-M., Dejean, C. and Belaud, G. (2018), "Rain concentration and sheltering effect of solar panels on pasture growth in a Mediterranean climate", *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 22, pp. 1285-1298. Available at: <https://doi.org/10.5194/hess-22-1285-2018> (Accessed on 29/11/2025).
- Gangemi, V. (Ed.) (1972), *Tecnologia e Ambiente*, Istituto di Tecnologia dell'Architettura, Napoli.
- Gangemi, V. (Ed.) (1979), *L'habitat agricolo del Basso Volturno*, Istituto di Tecnologia dell'Architettura, Facolt  di Architettura dell'Universit  di Napoli, Napoli.
- Honningdalsnes, E.H., Marstein, E.S., Lindholm, D., Bonesmo, H. and Rise, H.N. (2025), "Wind sheltering in vertical agrivoltaics can increase crop yields: a modeling study for Northern Europe", *Energy Nexus*, Vol. 19, pp. 100516. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2025.100516> (Accessed on 29/11/2025).
- IPCC (2023), *Climate change 2023: synthesis report*. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC, Geneva. Available at: <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647> (Accessed on 13/09/2025).
- Jreich, R. and Mahjoubi, C. (2023), *Agrivoltaics: harvesting solar energy in the Mediterranean. Morocco, Algeria, Tunisia, Egypt, Jordan, Lebanon*, RES4Africa Foundation, Rome. Available at: <https://res4africa.org/wp-content/uploads/2023/06/Agrivoltaics-harvesting-solar-energy-in-the-Med-Online-Verison.pdf> (Accessed on 13/09/2025).
- Ladiana, D. (2015), "Degraded or everyday landscapes. Vulnerability vs. resilience. I paesaggi degradati o del quotidiano. Vulnerabilit  vs resilienza", in Angelucci, F., Braz Afonso, R., Di Sivo, M. and Ladiana, D. (Eds.), *The technological design of resilience landscape. Il progetto tecnologico del paesaggio resiliente*, FrancoAngeli, Milano, pp. 207-224. Available at: <https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/162764/2/695406.pdf> (Accessed on 13/09/2025).
- MASE (2022), *Linee guida in materia di impianti agrivoltaici*, Ministero della Transizione Ecologica, Roma. Available at: [https://www.mase.gov.it/portale/documents/d/guest/linee\\_guida\\_impianti\\_agrivoltaici-pdf](https://www.mase.gov.it/portale/documents/d/guest/linee_guida_impianti_agrivoltaici-pdf) (Accessed on 13/09/2025).
- Marzelli, M. and Lintzmeyer, F. (2024), *Threats report on alpine ecological connectivity, renewable energies and upcoming spatial needs*, Deliverable D.1.3.1, PlanToConnect Project, ifuplan – Institute for Environmental Planning and Spatial Development GmbH & Co.KG, Munich. Available at: [https://www.alpine-space.eu/wp-content/uploads/2025/04/D.1.3.1\\_threats\\_report\\_ifuplan\\_202410\\_2.pdf](https://www.alpine-space.eu/wp-content/uploads/2025/04/D.1.3.1_threats_report_ifuplan_202410_2.pdf) (Accessed on 13/09/2025).
- MedECC (2020), *Climate and environmental change in the Mediterranean basin – current situation and risks for the future. First Mediterranean Assessment Report*, Cramer, W., Guiot, J. and Marini, K. (Eds.), Union for the Mediterranean, Plan Bleu, UNEP/MAP, Marseille. Available at: <https://doi.org/10.5281/zenodo.4768833> (Accessed on 13/09/2025).
- Miles, M.B., Huberman, A.M. and Saldaña, J. (2014), *Qualitative data analysis: a methods sourcebook*, 3rd ed., Sage, Thousand Oaks, CA. Available at: <https://www.metodos.work/wp-content/uploads/2024/01/Qualitative-Data-Analysis.pdf> (Accessed on 13/09/2025).
- Pandey, G., Lyden, S., Franklin, E., Millar, B. and Harrison, M.T. (2025), "A systematic review of agrivoltaics: productivity, profitability, and environmental co-benefits", *Sustainable Production and Consumption*, Vol. 56, pp. 13-36. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.spc.2025.03.006> (Accessed on 13/09/2025).
- Polacchi, C., Cornella, A., Louwen, A., Borz, G. and Moser, D. (2024), *Eco-design requirements and guidelines for agri-PV*, Deliverable D4.1, SYMBIOSYST Project, EURAC Research, Bolzano. Available at: [https://www.symbiosyst.eu/wp-content/uploads/2026/03/SYMBIOSYST\\_D4.1-final-7.12.2025.pdf](https://www.symbiosyst.eu/wp-content/uploads/2026/03/SYMBIOSYST_D4.1-final-7.12.2025.pdf) (Accessed on 13/09/2025).
- Toledo, C. and Scognamiglio, A. (2021), "Agrivoltaic systems design and assessment: a critical review, and a descriptive model towards a sustainable landscape vision (three-dimensional agrivoltaic patterns)", *Sustainability*, Vol. 13, pp. 6871. Available at: <https://doi.org/10.3390/su13126871> (Accessed on 13/09/2025).
- UNDRR (2023), *Annual report 2022*, United Nations Office for Disaster Risk Reduction, Geneva. Available at: <https://www.undrr.org/annual-report/2022> (Accessed on 13/09/2025).
- Vittoria, E. (1975), "Abitabilit  del territorio", in *Argomenti per un corso in Tecnologia dell'architettura*, Multigrafica Brunetti, Roma.