

REGIONE LAZIO
Provincia di VITERBO

PROGETTO:

REALIZZAZIONE DELL' IMPIANTO AGROVOLTAICO "PIANETTI" DA
30.036,6 kWp E DELLE RELATIVE OPERE ED INFRASTRUTTURE
CONNESSE NEL TERRITORIO DEL COMUNE DI NEPI (VT)

Potenza Nominale Impianto: 30.036,6 kWp

Potenza Immissione: 30.139,0 kW

PROGETTO DEFINITIVO

TITOLO:

**RELAZIONE TECNICA SPECIALISTICA:
STUDIO AGRONOMICO DEL SITO**

COMMITTENTE



A Company of ILOS New Energy Italy

INE Pianetti S.r.l.
Piazza di Sant'Anastasia, 7
00186 Roma (RM)
P. IVA 16557891005
P.e.c. inepianettisrl@legalmail.it

INE PIANETTI S.R.L.

a company of ILOS New Energy Italy
P.IVA e C.F.: IT 16557891005

Sede legale: Piazza di Sant'Anastasia 7, 00186 Roma
inepianettisrl@legalmail.it

Firmato Digitalmente

Formato A4	SPAZIO RISERVATO AGLI ENTI	
	Commessa L2204	Documento STUDIO AGRONOMICO DEL SITO
		N. Doc. Rel 06

Prof. Vamerli Teofilo
Viale dell'Università 16
35020 Legnaro (Padova) – Italy

tel +39 049 8272861
teofilo.vamerli@unipd.it

OGGETTO: Relazione agronomica per la coltivazione di terreno agricolo integrato con impianto fotovoltaico ad inseguimento solare in località Nepi - Viterbo

Sommario

1	Descrizione del progetto.....	2
2	Effetti microclimatici sulle piante nel sistema agrivoltaico.....	5
3	Esperienze di coltivazione in condizione di ombreggiamento.....	8
4	Stato attuale della superficie agricola interessata dall'impianto agrivoltaico	9
5	Coltivazione futura.....	11
	5.1 <i>Coltivazione del prato polifita permanente</i>	12
	5.2 <i>Realizzazione del prato polifita e meccanizzazione</i>	15
	5.3 <i>Sostenibilità economica dell'attività agricola</i>	19
	5.4 <i>Integrazione coltura-fotovoltaico</i>	20
	5.5 <i>Monitoraggio delle produzioni agricole nel sistema agrivoltaico</i>	23
6	Analisi multicriterio.....	24
7	Conclusioni.....	27
8	Bibliografia	29

1 Descrizione del progetto

Il progetto agrivoltaico interessa un terreno agricolo situato nel comune di Nepi (Viterbo), che si estende su una superficie catastale complessiva di 43,34 ettari (Fig. 1). Il terreno è attualmente destinato alla produzione di foraggio che si realizza attraverso la semina annuale di erbai autunno-vernini tipicamente costituiti da essenze graminacee.



Figura 1. Visione dall'alto dell'area oggetto di intervento suddivisa in 5 sotto-aree (in blu) a Nepi (VT).

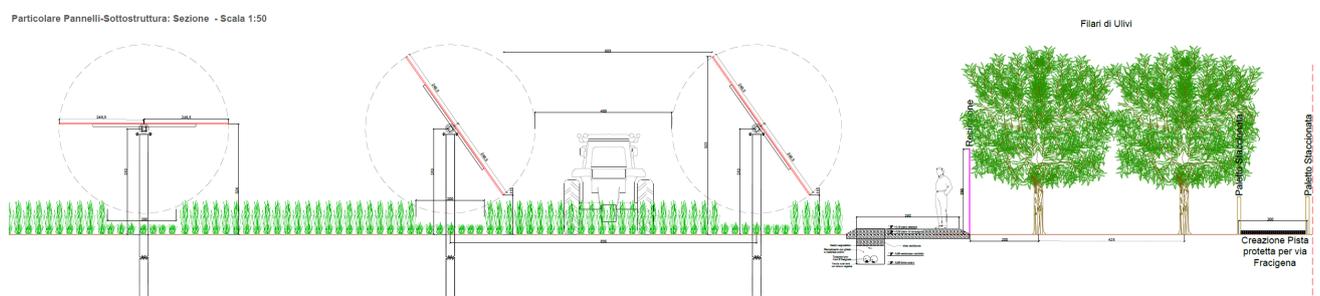
Il progetto prevede di realizzare una superficie captante fotovoltaica (superficie totale di ingombro S_{pv}) di 13,65 ettari circa, che determina un rapporto **LAOR (Land Occupation Ratio) del 31,5%**, valore inferiore al limite massimo del 40% suggerito nelle Linee Guida Nazionali in Materia di Impianti Agrivoltaici (Giugno 2022). Al netto della viabilità aziendale, delle cabine elettriche, della fascia vegetazionale perimetrale e di una eventuale fascia di rispetto inerbita di 2 metri ai lati dei pali tracker che sostengono i pannelli fotovoltaici, **la superficie agricola coltivata** risulta di 31,9 ettari,

pari al **73,6% della superficie totale**. Tale valore rispetta dunque il limite minimo del 70% indicato dalle Linee Guida Nazionali.

Il progetto riguarda la realizzazione di un impianto fotovoltaico a terra con pannelli fotovoltaici monocristallini sopraelevati ad inseguimento solare, organizzato in filari nord-sud con interfila ampia (8,96 m), adeguata alla coltivazione meccanizzata dell'interfilare. **Le ali fotovoltaiche**, che presentano rotazione est-ovest, **sono incernierate a 3,1 m di altezza** (valore superiore a 2,1 m indicato dalle Linee Guida Nazionali quale limite minimo per l'attività agricola di coltivazione) su piloni semplicemente inseriti nel terreno senza alcun manufatto cementizio, non causando in tal modo consumo di suolo. Tali piloni sono agevolmente rimovibili a fine vita dell'impianto e non determinano alcun impatto residuo sul terreno agricolo.

Si tratta di un impianto fotovoltaico di nuova generazione che, per le sue caratteristiche costruttive, consente il contemporaneo esercizio conveniente e sinergico dell'agricoltura e la produzione di energia elettrica rinnovabile. Facendo riferimento alle Linee Guida Nazionali in Materia di impianti Agrivoltaici, sulla base delle caratteristiche progettuali, nonché l'integrazione sinergica dell'attività agricola e la prevista attività di monitoraggio agronomico e ambientale, permette di classificare l'impianto come **agrivoltaico avanzato**.

Considerati i dati progettuali, la copertura fotovoltaica determina tra i filari una zona in proiezione verticale (al suolo) priva di ingombro di larghezza variabile in funzione dell'orario del giorno, da un minimo di circa 4 m (mezzogiorno, ora solare) and un massimo di 6 m (alba e tramonto), ovvero variabile dal 45% al 67% della larghezza interfilare (Fig. 2).



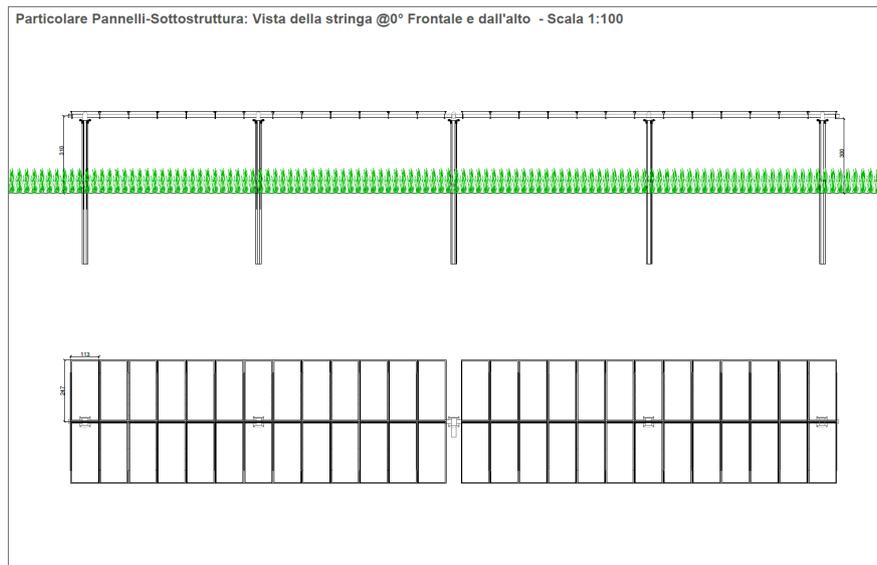


Figura 2. Schema di progettazione dell'impianto agrivoltaico a Nepi (VT).

La zona libera tra i filari fotovoltaici consente quindi la necessaria movimentazione dei mezzi meccanici per la gestione delle ordinarie attività di coltivazione del terreno. Il progetto prevede, infatti, la **coltivazione di un prato polifita permanente**, di durata illimitata, che risulta ben adatto alle condizioni microclimatiche che si vengono a realizzare all'interno dell'impianto e per la conservazione della fertilità del terreno. Tale scelta, che verrà di seguito descritta, ha notevoli vantaggi in termini di conservazione della qualità e fertilità del suolo (accumulo di sostanza organica), favorendo lo sviluppo di organismi terricoli in ambiente indisturbato/non lavorato, l'incremento della biodiversità, la diffusione e la protezione delle api selvatiche, il popolamento della fauna selvatica e dei predatori e antagonisti di malattie parassitarie delle piante coltivate. La produttività del prato polifita non risulterebbe alterata dalla presenza della copertura fotovoltaica ma, al contrario, si intravede un effetto sinergico, con la possibilità di aumentare la produttività e la conseguente marginalità rispetto alle condizioni di pieno sole, soprattutto nelle annate più calde e siccitose, per l'effetto di contenimento dell'evapotraspirazione ad opera dei pannelli fotovoltaici, come dimostrato dalla letteratura internazionale ed europea di settore. La coltivazione del prato consentirebbe anche un'agevole conversione al metodo di coltivazione biologico per il ridotto apporto di input colturali.

2 Effetti microclimatici sulle piante nel sistema agrivoltaico

La presenza dei pannelli fotovoltaici determina alcune modificazioni microclimatiche riferibili alla disponibilità di radiazione solare, alla temperatura, e all'umidità dell'atmosfera e del suolo, che possono avere effetti positivi, nulli o negativi, in funzione delle specifiche esigenze della specie vegetale coltivata.

Radiazione solare

La radiazione solare è un fattore essenziale per le piante, garantendo lo svolgimento della fotosintesi clorofilliana, l'accrescimento e la produzione dei prodotti agricoli. Le piante tuttavia, utilizzano una minima parte della radiazione solare, dal 2% al 5%, ed in particolare possono impiegare per la fotosintesi solo la frazione visibile, definita PAR (radiazione fotosinteticamente attiva), compresa nell'intervallo tra 400 e 700 nm di lunghezza d'onda, frazione dello spettro solare che rappresenta circa il 40% dell'energia della radiazione globale. Le piante peraltro riflettono alla superficie delle foglie il 25% della radiazione globale, e 10% della componente utile (PAR).

In condizioni normali di pieno sole, la radiazione globale che raggiunge la superficie del terreno si compone per metà di radiazione diretta e per metà di radiazione diffusa, quest'ultima essendo priva di direzione prevalente. La presenza di pannelli fotovoltaici riduce la percentuale di radiazione diretta, ovvero quella che raggiunge direttamente il suolo, con intensità variabile in funzione della distanza dal filare fotovoltaico, del momento del giorno e del periodo dell'anno, mentre si ha un aumento della quantità di radiazione diffusa, molto più favorevole alla fotosintesi rispetto alla radiazione diretta.

Nel presente impianto si stima che la riduzione **media annua** della **radiazione diretta** sia dell'80% nelle zone immediatamente adiacenti al filare (fino a circa 1 m di distanza), mentre nella zona centrale dell'interfilare sia del 30-35%. In realtà, queste riduzioni medie devono considerarsi meno marcate nel periodo primaverile-estivo (periodo nel quale si realizza il ciclo di sviluppo delle maggior parte delle piante coltivate) per effetto del maggior angolo di elevazione solare. Inoltre, la tipologia mobile del pannello fotovoltaico adottata in progetto, per effetto di riflessione consente alle piante coltivate di sfruttare sia la radiazione riflessa che quella diffusa dai pannelli.

Considerando il livello di saturazione della fotosintesi per l'intensità luminosa, le piante vengono classificate in eliofile e sciafile. Le specie eliofile richiedono una elevata quantità di radiazione, mentre le sciafile soffrono per un eccesso di illuminazione. La maggior parte delle piante coltivate sono considerate sciafile facoltative in quanto nelle normali condizioni di coltivazione l'elevata fittezza di semina comporta sempre l'instaurarsi di un ambiente sub-ottimale per l'illuminazione per effetto del reciproco ombreggiamento. In generale, si considerano piante con elevate esigenze di intensità di radiazione i cereali estivi, le piante da zucchero, le specie oleaginose, da fiore e da frutto. Sono invece considerate sciafile, con basse esigenze luminose, le specie da fibra, le piante foraggere e alcune piante orticole, nelle quali l'ombreggiamento è considerato condizione favorevole e realizzata agronomicamente, ad esempio aumentando la densità di semina o trapianto, per accentuare l'allungamento dei fusti e quindi la produzione di fibra, foraggio e foglie. Nell'insalata o nel basilico, ad esempio, un leggero ombreggiamento aumenta la dimensione e riduce lo spessore delle foglie, rendendo il prodotto di migliore qualità commerciale.

Temperatura

In riferimento alla temperatura dell'aria, questa rappresenta la diretta conseguenza della radiazione solare. Normalmente l'ombreggiamento non determina una riduzione della temperatura dell'aria in un sistema aperto qual è un impianto agrivoltaico, ma piuttosto uno sfasamento, con un ritardo termico al mattino in fase di riscaldamento dell'atmosfera, e un rallentamento del raffreddamento serale (Panozzo et al., 2019). Al di sotto dell'impianto fotovoltaico inoltre, è lecito attendersi una maggiore umidità relativa dell'aria al mattino, e minore nel tardo pomeriggio-sera rispetto alle zone in pieno sole.

L'ombreggiamento delle colture è una pratica agricola molto utilizzata, ad esempio nelle serre per ridurre le temperature nel periodo estivo tramite reti ombreggianti (dal 30 al 50% di ombreggiamento); l'ombreggiamento in questo modo riduce ad esempio la percentuale di nicotina nel tabacco e favorisce la colorazione rossa del pomodoro che sarebbe ostacolata da temperature troppo elevate.

Ogni specie vegetale necessita di una specifica temperatura minima per accrescersi, il cosiddetto *zero di vegetazione*. Superata questa soglia termica, l'accrescimento incrementa di velocità all'aumentare della temperatura fino ad una temperatura ottimale, oltre la quale esso rallenta fino

ad arrestarsi alla cosiddetta *temperatura massima* (anche questo valore è specifico per ogni specie vegetale). Le elevate temperature estive, superiori alla temperatura massima, possono quindi ridurre l'accrescimento delle piante, condizione attentamente monitorata nell'attuale contesto di cambiamento climatico, e dell'annata 2022 in particolare. Per mitigare questi effetti, numerosi studi scientifici sono concordi oggi nel suggerire l'introduzione di filari alberati e siepi a distanza regolare nei sistemi agricoli, proprio per attenuare l'impatto negativo delle elevate temperature e della carenza idrica nel periodo primaverile-estivo, soprattutto in ambiente Mediterraneo. Una funzione analoga è svolta dai pannelli fotovoltaici, così come dimostrano alcuni studi tedeschi condotti in impianti agrivoltaici pilota (Fraunhofer ISE, 2020).

In funzione delle esigenze termiche, le piante vengono raggruppate in **microterme**, generalmente a ciclo autunno-primaverile, aventi modeste esigenze termiche; e **macroterme**, ovvero piante estive che necessitano di temperature più elevate. I cereali microtermi (grano, orzo, avena, segale), molte specie foraggere graminacee (erba mazzolina in particolare, ma anche loiessa, loietto perenne, poa, festuca arundinacea, coda di topo, etc.), e alcune leguminose (es. veccia, pisello), che hanno zero di vegetazione relativamente basso, traggono vantaggio dalla condizione di parziale ombreggiamento che si viene a creare negli impianti agrivoltaici (Mercier et al., 2020). Ne sarebbero comunque avvantaggiate anche le specie vegetali macroterme per effetto dell'attenuazione degli effetti negativi derivanti dagli eccessi termici estivi, riducendo l'evapotraspirazione ed il fabbisogno irriguo. Studi recenti sugli effetti dell'ombreggiamento dovuto ad alberature di pioppo, ad esempio, evidenziano un miglioramento del contenuto di clorofilla fogliare ed una maggiore espansione fogliare in grano tenero e soia, che in qualche caso si traduce in un incremento di produzione (Mezzalana et al., 2021).

D'estate il parziale ombreggiamento riduce il riscaldamento del suolo con effetti positivi sull'accrescimento delle radici, che possiedono un ottimo di temperatura (16°C in molti cereali autunno-primaverili) inferiore rispetto alla parte epigea della pianta. In tali condizioni le radici possono accrescersi maggiormente anche grazie alla maggiore umidità e minore tenacità del terreno. Nel periodo invernale, invece, la presenza della copertura fotovoltaica mantiene la temperatura del suolo leggermente più elevata rispetto al pieno sole poiché i pannelli riflettono le radiazioni infrarosse (raggi caloriferi) emesse dalla terra durante il raffreddamento notturno, permettendo un miglioramento sensibile dell'accrescimento delle piante microterme anche nei

periodi più freddi dell'anno. Ne trarrebbero vantaggio in particolare le piante foraggere microterme, ma anche i cereali vernini come grano ed orzo e leguminose a ciclo autunno-primaverile come pisello e favino.

Evapotraspirazione

L'evapotraspirazione è definita come somma delle perdite di acqua per evaporazione dal terreno e per traspirazione fogliare da parte delle piante. Delle due, solo il flusso dai vegetali (traspirazione) è utile all'accrescimento poiché mantiene aperti gli stomi, e quindi consente gli scambi gassosi necessari per la fotosintesi (ingresso di anidride carbonica nella foglia). In condizioni di ombreggiamento si rileva una riduzione della traspirazione fogliare ed una più marcata riduzione dell'evaporazione dal terreno, determinando un aumento dell'efficienza d'uso delle riserve idriche del suolo.

Ad esempio in grano, è stato stimato che un ombreggiamento del 50% determina una riduzione del 30-35% dell'evapotraspirazione (Marrou et al., 2013a), con un risparmio di circa 200 mm di acqua rispetto ai 600 mm complessivamente richiesti dalla coltura in pieno sole. Poiché la carenza idrica in fase di riempimento della granella ha conseguenze negative marcate sulla resa e sulla qualità del grano (la ben nota "stretta") e delle farine, il parziale ombreggiamento che si realizza nel sistema agrivoltaico deve essere considerato positivamente anche per i cereali vernini.

3 Esperienze di coltivazione in condizione di ombreggiamento

Allo stato attuale esistono informazioni scientifiche documentate in merito agli effetti dell'ombreggiamento per varie specie erbacee coltivate, ed i dati disponibili derivano sia da studi di consociazione di specie erbacee con piante arboree organizzate in filari, che da veri e propri impianti agrivoltaici sperimentali, sia fissi che ad inseguimento solare.

Le colture meno penalizzate dalla presenza dei pannelli fotovoltaici sono quelle microterme e sciafile. Il grano può fornire rese simili o leggermente inferiori (-20% circa; Dupraz et al., 2011) a quelle ottenibili in pieno sole, subendo un parziale ritardo dell'epoca di maturazione (Marrou et al., 2013b). Il mais, invece pianta estiva di origine tropicale, alle normali densità di semina riduce

notevolmente lo sviluppo della pianta sia in diametro che in altezza, a discapito della resa (Dupraz et al., 2011).

Gli studi più avanzati in questo settore provengono dalla Germania, a latitudini quindi più svantaggiate rispetto all'Italia in termini di disponibilità complessiva di radiazione solare; l'Istituto Fraunhofer (2020) di Friburgo documenta perdite di resa del 18-20% in patata, grano e altri cereali vernini (es. orzo, segale e triticale) se i pannelli fotovoltaici sono disposti verticalmente e fissi (barriere), ma le perdite risultano notevolmente inferiori nel caso di pannelli a inseguimento solare e con adeguata progettazione (distanza tra i filari) dell'impianto agrivoltaico. Interessanti sono, tuttavia, gli aumenti di resa registrati in patata, grano e orzo in annate particolarmente siccitose (es. 2018). È stato inoltre documentato che le specie foraggere (graminacee e trifoglio) subiscono perdite di produzione modeste, del 5-8%, mentre è stato confermato che il mais, non risulta adatto alla coltivazione in presenza di fotovoltaico a causa della compromissione dell'accrescimento, della robustezza e la fertilità della pianta.

Questi risultati sono in linea con gli studi italiani (Amaducci et al., 2018) che hanno simulato in un impianto agrivoltaico a Piacenza, sulla base dei dati climatici storici degli ultimi 40 anni, rese di grano analoghe o superiori al pieno sole. Tali risultati vanno ascritti alle migliori condizioni microclimatiche nel periodo di maturazione della coltura, ovvero una maggiore umidità del terreno, una minore evapo-traspirazione e l'effetto frangivento che riduce l'allettamento delle piante. Va ritenuto interessante anche il parziale effetto antigrandine dovuto alla copertura fotovoltaica.

Risultati produttivi interessanti in condizioni di ombreggiamento elevato sono stati ottenuti anche in pomodoro, che non risente di una riduzione della radiazione fino al 60% (Callejòn-Ferre et al., 2009).

4 Stato attuale della superficie agricola interessata dall'impianto agrivoltaico

Il terreno dell'area di progetto è attualmente coltivato con essenze foraggere graminacee a ciclo annuale. Si tratta di colture a ciclo autunno-primaverile di breve durata (erbaio) che producono un

unico sfalcio di foraggio abbondante a inizio maggio (Fig. 3). Dopo 3-4 giorni di permanenza in campo dell'erba falciata, e sfruttando i rivoltamenti giornalieri del prodotto, è possibile raccogliere il fieno in rotoballe che vengono vendute per l'alimentazione del bestiame.



Figura 3. Aspetto del terreno dopo la raccolta del fieno derivante dall'erbaio di graminacee a Nepi (Viterbo).

Considerando la produttività degli erbai di graminacee su Viterbo, da fonte ISTAT si ricava un valore medio nel biennio 2020 e 2021 di 80 quintali per ettaro che, al prezzo di 12 €/quintale, concorre a determinare una produzione lorda vendibile (PLV) annua di 960 €/ha, a cui sottrarre i costi di coltivazione. Viene riportato di seguito un bilancio semplificato della coltivazione attuale (Tabella 1).

Ricorrendo al contoterzismo per le diverse operazioni meccaniche di lavorazione del terreno e di raccolta del foraggio, il margine netto della coltivazione attuale risulta di 159 € ad ettaro.

Tabella 1. Bilancio semplificato dell'attuale coltivazione foraggera (erbaio di graminacee) a Nepi (Viterbo).

Operazione	€/ha	Note
Lavorazioni del terreno	209	Aratura leggera + erpicatura
Concimazione	173	Incluso il concime
Semente e semina	120	35 kg/ha semente a 2 €/kg

Falciatura erba	65	1 sfalcio
Spandivoltafieno	74	1 sfalcio
Pressatura	160	2 € al quintale (80 quintali totali)
Totale costi	801	
PLV	960	Si ipotizza 12 € al quintale
Margine netto	159	

Per quanto riguarda la delimitazione dell'area di intervento, non risulta presenta una vera e propria siepe perimetrale, pur se a tratti vi è una vegetazione arbustiva di schermo, che verrà affiancata da alberature di nuova piantumazione.

5 Coltivazione futura

Il progetto ingegneristico prevede di installare inseguitori solari mono-assiali nei quali, contrariamente a quanto avveniva con il fotovoltaico tradizionale (pannelli fissi rivolti verso sud) che presenta una zona d'ombra concentrata in corrispondenza dell'area coperta dai pannelli stessi, vi è una fascia d'ombra che si sposta con gradualità durante il giorno da ovest verso est sull'intera superficie del terreno. Come conseguenza non si vengono a creare zone costantemente ombreggiate o costantemente soleggiate, e questo consente una adeguata coltivazione agraria del terreno.

Date le premesse su esposte in merito alla risposta delle piante all'ombreggiamento, nell'impianto agrivoltaico in oggetto si **prevede di coltivare un prato polifita permanente destinato alla produzione di foraggio, mantenendo quindi l'ordinamento colturale attuale, ma evitando le operazioni annuali di lavorazione del terreno.** Tale scelta incontra un elevato livello di naturalità e di rispetto ambientale per effetto del limitato impiego di input colturali richiesti, consente di attirare e dare protezione alla fauna e all'entomofauna selvatica, in particolare le api, e rappresenta la migliore soluzione per coltivare l'intera superficie di terreno e ottenere produzioni analoghe a quelle che si raggiungerebbero in pieno sole. Va evidenziato, infatti, che negli impianti agrivoltaici ad inseguimento solare esistenti viene coltivato solamente la fascia centrale dell'interfilare, corrispondente a circa il 70% della superficie, mentre vengono mantenute inerbite le fasce di rispetto immediatamente adiacenti al filare fotovoltaico. Nella fattispecie, si intende coltivare tutta

la superficie a disposizione a foraggio, limitando gli interventi di sfalcio e fienagione nelle immediate vicinanze dei pali tracker (2 m di larghezza a cavallo del filare), per motivi di sicurezza.

5.1 Coltivazione del prato polifita permanente

Facendo riferimento alle rilevazioni meteorologiche di Viterbo, il sito si caratterizza per una piovosità media annua storica abbastanza elevata, di 898 mm, ed una temperatura media annua di 13,8 °C (media storica trentennale 1991-2021). La piovosità è maggiormente concentrata nel periodo autunno-primaverile con valori mensili non inferiori a 66 mm, mentre nei mesi di giugno, luglio e agosto le precipitazioni sono modeste, di circa 34-45 mm al mese. Le temperature medie mensili oscillano tra 5 °C di gennaio e 23,7 °C di agosto (Fig. 4; Tabella 2). Va rilevato che il numero di giorni piovosi nell'anno è elevato, ben 82 e ben distribuiti anche nei mesi estivi, condizione che rende favorevole la coltivazione del prato polifita.

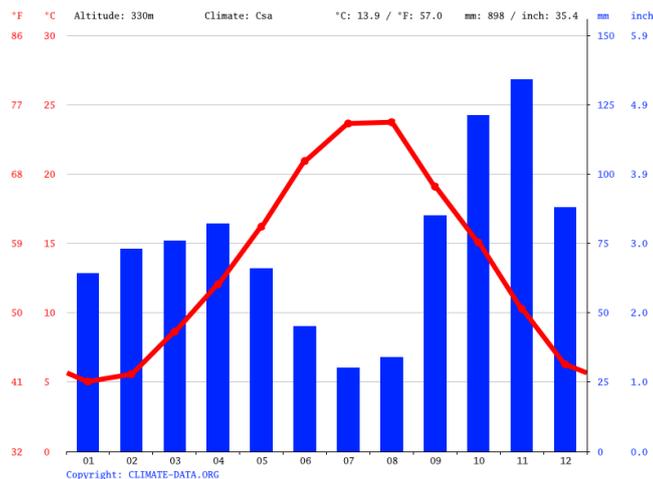


Figura 4. Andamento termo-pluviometrico di Viterbo (media storica).

Tabella 2. Parametri climatici di Viterbo (media storica 1991-2021).

	Gen.	Feb.	Marz.	Apr.	Mag.	Giu.	Lug.	Ago.	Sett.	Ott.	Nov.	Dic.
Medie Temp. (°C)	5	5,6	8,6	12,1	16,2	20,9	23,6	23,7	19,1	15,1	10,3	6,3
Temp. minima (°C)	1,7	1,7	4,2	7,2	11,1	15,4	17,9	18,3	14,8	11,4	7,1	3,2
Temp. massima (°C)	9,1	10	13,5	17,1	21,4	26,5	29,5	29,6	24,1	19,5	14,1	10
Precipitazioni (mm)	64	73	76	82	66	45	30	34	85	121	134	88
Umidità(%)	83%	79%	77%	74%	71%	64%	59%	60%	70%	80%	84%	84%

	Gen.	Feb.	Marz.	Apr.	Mag.	Giu.	Lug.	Ago.	Sett.	Ott.	Nov.	Dic.
Giorni di pioggia (g.)	6	7	7	9	7	5	4	5	7	8	9	8
Ore di sole (ore)	5,3	6,2	7,3	9,2	10,6	12,1	12,3	11,3	9,1	6,8	5,5	5,2

L'eliofania è quella tipica della latitudine, con una durata giornaliera del soleggiamento che oscilla tra 5,3 ore di gennaio a 12,3 ore di luglio (Fig. 5).

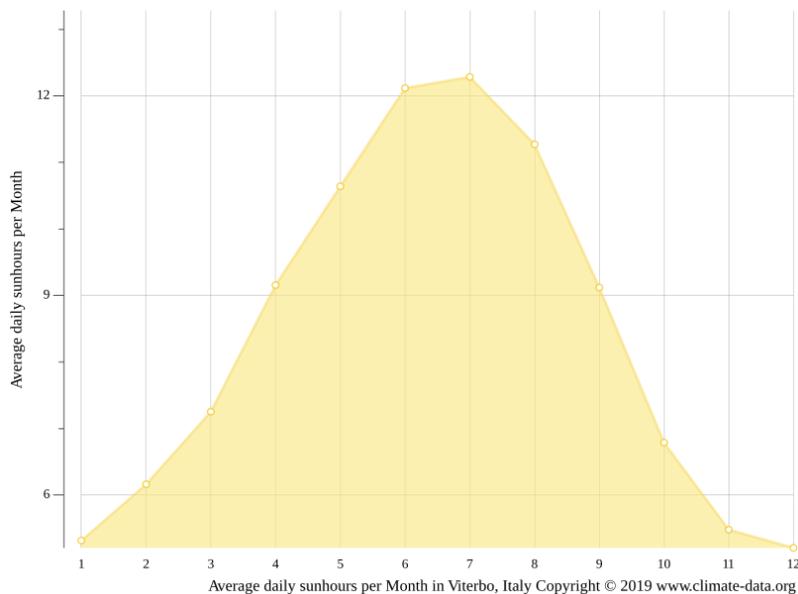


Figura 5. Eliofofania (numero di ore di luce) medio mensile a Viterbo.

Considerate le condizioni climatiche della zona, la **produzione di foraggio attraverso la realizzazione di un prato permanente (detto anche prato stabile) risulta ben adattata**. Tale coltivazione beneficia della naturale piovosità autunno-primaverile, e ben si adatta alle condizioni di parziale e variabile ombreggiamento creato dai pannelli fotovoltaici. Va ricordato che **il sito non dispone di prese o pozzi di acqua irrigua e la coltivazione del prato avverrà in asciutta senza l'ausilio dell'irrigazione**. Il prato permanente è coltura molto diffusa in Italia (691.733 ettari nel 2021), utilizzata per la produzione di foraggio destinato all'allevamento degli animali, essenzialmente ruminanti, equini e cunicoli. **Nel 2021 in Lazio erano presenti 69.620 ettari di prato permanente (Fonte ISTAT), con una produzione media di foraggio molto elevata, circa 96 quintali per ettaro.**

La produzione foraggera può essere realizzata in vario modo, con prati monofiti (formati da una sola essenza foraggera), prati oligofiti (formati da due o tre foraggere) e prati polifiti, che prevedono la coltivazione contemporanea di molte specie foraggere. In base alla durata si distinguono: erbai, di durata inferiore all'anno; prati avvicendati, di durata pluriennale, solitamente 2-4 anni; e permanenti, di durata di alcuni decenni o illimitata. **Per garantirne una durata prolungata, la**

stabilità della composizione floristica e una elevata produttività, i prati permanenti vengono periodicamente (ogni 3-4 anni) traseminati nel periodo autunnale senza alcun intervento di lavorazione del terreno (semina diretta).

Il prato polifita permanente si caratterizza per la presenza sinergica di molte specie foraggere, generalmente appartenenti alle due famiglie botaniche più importanti, graminacee e leguminose, permettendo così la massima espressione di biodiversità vegetale, a cui si aggiunge la biodiversità microbica e della mesofauna del terreno, e quella della fauna selvatica che trova rifugio nel prato. Molte leguminose foraggere, come il trifoglio pratense, il trifoglio bianco ed il trifoglio incarnato, ed il ginestrino, sono anche piante mellifere, potendo fornire un ambiente edafico e di protezione idoneo alle api selvatiche e all'ape domestica. In merito al potere mellifero, il trifoglio pratense è classificato come specie di classe III, ed il ginestrino di classe II, potendo fornire rispettivamente da 51 a 100 kg miele, e da 25 a 50 kg di miele per ettaro all'anno.

Il prato polifita permanente non necessita di alcuna rotazione colturale e quindi non deve essere annualmente lavorato come avviene per l'attuale erbaio e gli altri seminativi, condizione che favorisce la stabilità del biota e la conservazione (ma anche l'aumento) della sostanza organica del terreno, e allo stesso tempo la produzione e la raccolta del foraggio. Diversamente da quello che si potrebbe pensare, questa condizione mantiene un ecosistema strutturato e solido del cotico erboso con conseguente arricchimento sia in termini di biodiversità che di quantità della biofase del terreno. Il cotico erboso permanente consente anche un agevole passaggio dei mezzi meccanici utilizzati per la pulizia periodica dei pannelli fotovoltaici anche con terreno umido.

Le piante che costituiscono il prato permanente variano in base al tipo di terreno e alle condizioni climatiche e saranno individuate dopo analisi pedologica e chimica. Verrà impiegato un **miscuglio di graminacee e di leguminose**:

- le graminacee, a rapido accrescimento dopo lo sfalcio, sono ricche di energia e di fibra;
- le leguminose sono molto importanti perché fissano l'azoto atmosferico, in parte cedendolo alle graminacee e fornendo una ottimale concimazione azotata del terreno, e offrono un foraggio di elevato valore nutritivo grazie alla abbondante presenza di proteine.

Per massimizzare la produzione e l'adattamento del prato alle condizioni di parziale ombreggiamento sarà opportuno impiegare due diversi miscugli, uno per la zona centrale dell'interfilare e uno, più adatto alla maggior riduzione di radiazione solare per le fasce adiacenti il filare fotovoltaico. Pur tuttavia, l'impiego di un unico miscuglio con un elevato numero di specie

consentirà la selezione naturale di quelle più adatte alle diverse distanze dal filare fotovoltaico in funzione del gradiente di soleggiamento/ombreggiamento che si viene a creare.

I prati stabili gestiti in regime non irriguo possono fornire 2-3 sfalci all'anno con produzioni medie pari a 80-100 quintali per ettaro di fieno (96 quintali in media nel Lazio), derivanti principalmente dal primo sfalcio (50% del totale annuo), e fino a 4-5 sfalci, con una produzione complessiva di 120-140 quintali, in irriguo. Tradizionalmente gli sfalci vengono denominati, in ordine cronologico, maggengo, agostano, terzuolo e quartiolo. Il maggengo, come detto, è il primo e viene ottenuto a inizio maggio. Gli altri cadono a intervalli variabili di 35-40 giorni per i prati irrigui e fino a 50-60 giorni per quelli asciutti, anche in funzione dell'andamento pluviometrico. Il primo e l'ultimo sfalcio forniscono un foraggio ricco di graminacee (microterme), mentre le leguminose (macroterme) prevalgono nei mesi estivi.

Date le parziali condizioni di ombreggiamento nel sistema agrivoltaico, si prevede di sottoporre il foraggio a insilamento oppure a fienagione in due tempi: dopo un breve appassimento dell'erba in campo, si procederà alla raccolta del prodotto da insilare, oppure al completamento dell'essiccazione in fienile (fienagione in due tempi). Entrambi questi sistemi di raccolta consentono di ridurre notevolmente le perdite meccaniche di foraggio causate dalle operazioni di rivoltamento e di raccolta, e forniscono un prodotto di qualità superiore, per la maggiore abbondanza di proteine dovuta alla minor perdita di foglie, rispetto alla fienagione tradizionale. Non si esclude tuttavia la possibilità di essiccare completamente il foraggio del secondo e terzo sfalcio, in piena estate, risparmiando così il costo dell'insilamento o dell'essiccazione artificiale.

I prati stabili presentano una varietà di specie molto più elevata rispetto ai prati avvicendati, nei quali in genere si coltiva erba medica, i trifogli e il loietto. Per questo motivo, i prati stabili divengono oggetto di tutela normativa dopo 5 anni di permanenza continuativa, allo scopo di proteggerne la biodiversità floristica e faunistica.

5.2 Realizzazione del prato polifita e meccanizzazione

Il prato polifita verrà seminato in autunno (settembre-ottobre) al termine della messa in opera dell'impianto fotovoltaico, comprensivo di piloni e ali fotovoltaiche, previa lavorazione meccanica del terreno con ripuntatura ed erpicatura. La semina verrà realizzata con seminatrici a file o a spaglio al dosaggio di 35-40 kg/ha di semente con miscugli costituiti da 8-12 specie e varietà di foraggiere

graminacee e leguminose. Si adotterà una elevata biodiversità nella composizione del miscuglio, utilizzando specie graminacee (loietto italico e loietto perenne, erba fienarola, festuca, erba mazzolina, fleolo) e leguminose (trifoglio pratense, trifoglio bianco, trifoglio incarnato, trifoglio alessandrino, lupolina e ginestrino).

Le operazioni meccaniche di fienagione saranno realizzate con trattori di medio-bassa potenza (40-60 CV) di piccole dimensioni, facilmente manovrabili all'interno degli interfilari. L'impiego di barre falcianti frontali o laterali consentiranno di svolgere le operazioni di sfalcio fino a ridosso del filare fotovoltaico. Le successive fasi di rivoltamento e andatura del foraggio, da svolgere rispettivamente con macchine spandivoltafieno e andatori sono agevolate dalla modesta altezza di tali attrezzature (massimo 75-80 cm), che possono compiere il lavoro anche sotto i pannelli fotovoltaici. La permanenza del foraggio in campo e il numero di rivoltamenti sarà contenuto, in quanto si intende valorizzare la qualità del foraggio attraverso l'insilamento o la fienagione in due tempi in sostituzione della fienagione tradizionale, con un breve periodo (1-2 giorni) di pre-appassimento in campo; non si esclude comunque il ricorso alla fienagione tradizionale, in piena estate, qualora le condizioni climatiche lo consentissero. Rispetto alla fienagione tradizionale, in questo caso il foraggio sarà di maggiore quantità per effetto della minimizzazione delle perdite meccaniche, e di migliore qualità (contenuto proteico) potendo preservare da rotture e perdite le parti del foraggio più nobili e ricche di proteine.

Le macchine per la raccolta, essenzialmente rotoimballatrici, sono comunemente di larghezza e dimensioni contenute, la cui movimentazione in campo è compatibile con i dati progettuali dell'impianto fotovoltaico (larghezza interfilare, altezza delle ali fotovoltaiche e loro rotazione). Va tenuto comunque in considerazione che eventuali particolari necessità di passaggio di attrezzature di dimensioni maggiori, ad esempio il sistema di carico e trasporto delle rotoballe di fieno, è possibile attraverso il bloccaggio delle ali fotovoltaiche in posizione completamente a Est o ad Ovest, per singoli filari indipendenti. Tale posizione verrà adottata per effettuare le periodiche pulizie dei pannelli fotovoltaici (lavaggio annuale), ma può essere utilizzata anche per agevolare il passaggio delle macchine operatrici dedite alla gestione agronomica, e durante eventi piovosi per favorire una omogenea distribuzione delle piogge al terreno.

Verrà considerata inoltre l'opportunità di sostituire i trattori diesel con trattori ad alimentazione elettrica per il miglioramento della sostenibilità ambientale dell'intero sistema produttivo, soluzione ingegneristica oggi disponibile soprattutto per piccole e medie potenze.

Considerato che i pannelli sono ad inseguimento solare, che i filari dei pali tracker sono ben distanziati (circa 9 m), lo spazio libero tra le ali fotovoltaiche utile al passaggio delle macchine operatrici dedite alle operazioni agricole è ampio. Pur modificandosi in funzione dell'orario del giorno, la zona libera da ingombri varia da un minimo di 4 m a mezzogiorno, ad un massimo di 6 m all'alba e al tramonto. Anche l'altezza dei pannelli fotovoltaici varia con la rivoluzione giornaliera, da un minimo di 1,15 m (su un lato, mentre l'altro è 5,23 m) all'alba e al tramonto, a 3,10 m a mezzogiorno quando assumono posizione orizzontale.

Anche considerando la distanza minima tra le ali fotovoltaiche (4 m), il passaggio di tutte le trattrici agricole è possibile poiché la larghezza massima per la libera circolazione stradale è di 2,50 m, oltre la quale i mezzi agricoli vengono classificati "speciali". La maggior parte delle trattrici agricole possiede larghezze "fuori tutto" (pneumatici compresi) inferiori a 2 m, in grado quindi di transitare facilmente al centro dell'interfilare di progetto anche con la minima distanza tra le ali fotovoltaiche. Questo consente l'esecuzione di tutte le operazioni meccaniche senza interferire con la funzionalità e l'integrità dei pannelli fotovoltaici.

L'ingresso dei macchinari (trattore+attrezzatura) avverrà dalle vie di accesso (capezzagne o strade sterrate) attuali e quelle di nuova realizzazione. Inoltre, la suddivisione dell'area fotovoltaica in 6 sotto-campi agevolerà l'ingresso dei macchinari, ed il trasporto del foraggio (Fig. 6).



Figura 6. Area di progetto a fotovoltaico suddivisa in 5 sotto-campi (in blu i filari di pannelli fotovoltaici; in rosso l'area testimone/controllo per il monitoraggio della produttività agricola fuori impianto).

Si riportano di seguito i tempi di lavoro indicativi delle principali operazioni meccaniche (Tabella 3).

Tabella 3. Tempi di esecuzione delle principali operazioni agricole per la coltivazione del prato polifita.

Operazione	Ettari/ora	Ore complessive (circa 31,5 ettari)	Note
Ripuntatura ed erpicatura	1,5	(21)	Operazione una tantum alla semina del prato
Semina	2	(15,7)	Operazione una tantum alla semina del prato
Concimazione	4	7,9	Operazione di fine inverno
Sfalcio, rivoltamento, andanatura, e raccolta	0,5	63	Tempo richiesto ad ogni sfalcio

5.3 Sostenibilità economica dell'attività agricola

Per verificare la sostenibilità economica dell'attività agricola nell'impianto fotovoltaico si è fatto riferimento alla determinazione del MARGINE LORDO unitario (per ettaro), calcolato con la seguente formula:

Margine Lordo (ML, espresso in €/ha) = PLT – CV

Dove:

- PLT = produzione lorda totale come sommatoria della produzione lorda vendibile (PLV) e della eventuale produzione reimpiegata e/o trasformata in azienda;
- CV = costi variabili = SS (spese dirette) + ASP (Altre spese) + RA (Reimpieghi).

I CV possono essere calcolati anche come somma delle seguenti voci: anticipazioni, acqua, assicurazioni, energia, concimi, contoterzismo, commercializzazione, difesa, sementi, altri costi, reimpieghi.

Ipotizzando di ricorrere completamente al contoterzismo, ed escludendo quindi l'acquisto e l'ammortamento di macchine e attrezzature agricole, il Margine lordo corrisponde al MARGINE NETTO operativo.

Facendo riferimento alla produttività dei prati polifiti della regione Lazio (96 quintali per ettaro di foraggio secco, dati ISTAT) ottenibili con almeno 3 sfalci annuali, e considerando un prezzo medio del foraggio di 13 € al quintale rilevabile alla borsa merci di Roma nel mese di metà Luglio 2022 (si fa riferimento al prezzo di un foraggio di prato naturale), se ne ricava una PLV di 1.248 € ad ettaro. A questa devono essere sottratte le voci di costo, incluso la quota annuale di ammortamento delle spese una tantum per la semina/impianto del prato polifita (Tabella 4).

Di seguito si riporta un bilancio analitico previsionale, tenuto conto del prezzario delle opere agricole della Regione Lazio - Assessorato all'Agricoltura, del 2015, qui aggiornato al 2022 sulla base dell'inflazione ISTAT avvenuta dal 2015 al 2021 (aumento del 4,6%). Ove non presenti, si fa riferimento al listino prezzi A.P.I.M.A. – Associazione provinciale Imprese di meccanizzazione Agricola di Reggio Emilia.

Tabella 4. Calcolo dei costi di impianto del prato polifita.

Operazione	Costo €/ha	Note
Ripuntatura	188	Profondità 40-50 cm
Erpicatura (2 passaggi)	84	Profondità 10-15 cm
Semina	52	Seminatrice meccanica
Semente	184	40 kg/ha di semente a 4,6 €/kg
Costo Totale	508	
Costo medio annuo impianto	25	Durata 20 anni

Tabella 5. Calcolo dei costi di coltivazione/raccolta, della Produzione Lorda vendibile (PLV) e del margine netto per ettaro di prato polifita.

Operazione/Macchinario	€/ha	Note
Falcia condizionatrice	195	Per 3 sfalci
Spandivoltafieno	222	Per 3 sfalci
Pressatura	192	2 € al quintale (96 quintali totali)
Insilamento (fasciatura con film plastico)	219	8 € al ballone (1 ballone = 3,5 quintali)
Concimazione di fine inverno	173	Incluso il concime
Quota annuale costo impianto	25	
Totale costi	1026	
PLV	1248	Si ipotizza 13 € al quintale (96 quintali totali)
Margine netto operativo	222	

Il totale dei costi di coltivazione risulta pari a 1026 € ad ettaro, determinando un margine netto operativo di 222 € ad ettaro (Tabella 5). Tale valore, pur non molto elevato, potrà aumentare nel caso di ricorso alla fienagione tradizionale rispetto all'insilamento qui ipotizzato, che incide per il 21% sui costi totali, e nell'ipotesi di miglioramento della produttività del prato grazie all'effetto di schermatura dei pannelli fotovoltaici. Tale valore risulta comunque leggermente superiore alla stima del reddito netto derivante dall'attuale coltivazione dell'erbaio, di 159 €/ha.

5.4 Integrazione coltura-fotovoltaico

L'impianto di pannelli fotovoltaici si integra perfettamente nella coltivazione del prato stabile, come sopra evidenziato, potendo anche far aumentare la resa in foraggio grazie agli effetti di schermatura e protezione con parziale ombreggiamento nelle ore più assolate e calde delle giornate estive ed il mantenimento di condizioni ottimali di umidità del terreno per un tempo più prolungato. Questa

condizione è particolarmente utile dopo lo sfalcio, quando l'assenza di copertura vegetale causerebbe un rapido essiccamento del terreno nel periodo estivo, a discapito della capacità di ricaccio delle essenze foraggere.

L'ampio interasse tra i filari fotovoltaici (9 m), unitamente alla possibilità di reclinare completamente i pannelli con appositi automatismi, consente l'accesso dei mezzi meccanici comunemente impiegati nella fienagione, che consistono in trattrici di potenza medio-bassa, e piccole e medie attrezzature agricole (barre falcianti, spandi-voltafieno, giro-andanatori, rotoimballatrici).

In riferimento ai dati progettuali, la superficie captante dei pannelli fotovoltaici (13,65 ettari) insiste per il 31,5% circa sull'intera area del sito di Nepi (43,34 ettari), valore inferiore al limite massimo del 40% indicato dalle Linee Guida Nazionali in materia di Impianti Agrivoltaici (Giugno 2022). La superficie agricola coltivata sarà di 31,98 ettari, ovvero occuperà il 73,8% della superficie catastale totale, nel rispetto del valore minimo del 70% indicato dalle Linee Guida Nazionali. All'interno del sito si prevede di mantenere la viabilità esistente, mentre **verranno realizzate le alberature perimetrali, anche ricorrendo ad alberi di ulivo disposti sfalsati su doppio filare.**

Va inoltre ribadito che la combinazione tra fotovoltaico ad inseguimento monoassiale e prato polifita permanente consente **l'utilizzo dell'intera superficie al suolo per scopi agricoli**, a differenza ad esempio delle colture cerealicole che non svilupperebbero adeguatamente in prossimità del filare.

Nell'analisi dell'interazione coltura-sistema fotovoltaico vanno considerati i seguenti elementi:

- I filari fotovoltaici, posti ad interasse di 9 m, consentono un agevole accesso per le lavorazioni agricole ai mezzi meccanici utilizzati per la coltivazione;
- È prevista la posizione di blocco dei pannelli in totale rotazione Est o Ovest, in questo modo è agevole svolgere tutte le operazioni meccaniche legate alla fienagione;
- L'assenza di elettrodotti interrati (con esclusione di quelli concentrati esternamente, dalle cassette stringhe alla cabina elettrica che saranno posati sulle strutture o sulla viabilità interna) consente le normali lavorazioni del terreno per la semina del prato, ma anche eventuali operazioni di scarificazione/arieggiamento del terreno;

- I supporti dei pannelli fotovoltaici sono costituiti da pali in acciaio infissi nel terreno e di facile rimozione a fine vita operativa;
- Il prato polifita permanente arricchisce progressivamente di sostanza organica e di biodiversità il terreno, mantiene un ecosistema strutturato e solido del cotico erboso, le leguminose presenti nel miscuglio fissano l'azoto atmosferico fornendo una ottimale concimazione azotata del terreno, e producono un foraggio di elevato valore nutritivo ricco di proteine;
- Il tipo di coltivazione proposta è compatibile con la possibilità di convertire il terreno in agricoltura biologica, in virtù dei bassi input di concimazione richiesti dal prato e dall'assenza di malattie o parassiti da controllare.

L'impatto del sistema fotovoltaico sul suolo è ritenuto minimo, in quanto non interessato in modo significativo da infrastrutture inamovibili:

- I pali dei Tracker sono semplicemente infissi nel terreno per battitura o avvitamento e possono essere rimossi con facilità per semplice estrazione;
- I cavidotti sono minimi e saranno posizionati unicamente ai margini dell'area dei pannelli fotovoltaici, e anch'essi sono facilmente rimovibili a fine vita operativa dell'impianto fotovoltaico;
- le linee di bassa tensione in corrente continua saranno posate su canaline esterne, fissate alle strutture stesse dei tracker, senza interessare il terreno con cavidotti.

Relativamente all'impatto paesaggistico e la gestione del sistema agrivoltaico, si evidenzia quanto segue:

- Il prato permanente è una coltura pluriennale la cui durata è dell'ordine di decenni e più che, offrendo una copertura vegetale verde costante nel tempo, anche nel periodo invernale, mitiga efficacemente l'impatto paesaggistico del sistema fotovoltaico;
- Le attività di impianto del prato polifita, che consistono in ripuntatura, erpicatura e semina, non interferiscono con il Fotovoltaico in quanto sono attività una-tantum propedeutiche e preliminari all'attivazione dell'impianto stesso;

- L'attività di manutenzione ordinaria del fotovoltaico, che consiste in sostanza nell'annuale lavaggio dei pannelli, avviene con mezzi leggeri che non arrecano danno al prato, al contrario, vi è un impatto positivo del prato sulla transitabilità del terreno;
- Il lavaggio dei pannelli avviene con l'uso di roto-spazzoloni, utilizzando acqua pura, senza alcun detergente che possa inquinare la coltivazione e le falde;
- Le attività di manutenzione degli ulivi perimetrali, assimilabili per tipologia alle attività agricole, possono rappresentare una integrazione al reddito del personale impiegato, e attenuano l'impatto visivo dell'intero impianto fotovoltaico.

5.5 Monitoraggio delle produzioni agricole nel sistema agrivoltaico

Al fine di verificare la sostenibilità della coltivazione agraria nel sistema agrivoltaico si prevede il monitoraggio continuo e annuale dei parametri climatici e la produttività delle piante coltivate a fini statistici e per la corretta formulazione di linee di indirizzo per nuovi impianti agrivoltaici.

La disponibilità di un'ampia area agricola esterna alla recinzione di progetto di 3,02 ettari, suddivisa in 4 aree (Fig. 6), con la stessa tipologia e fertilità del suolo, da utilizzare come controllo/testimone per la coltivazione del prato polifita con la stessa composizione floristica di quello presente nell'impianto agrivoltaico, consentirà il confronto efficace e preciso degli effetti della presenza dei pannelli fotovoltaici rispetto al pieno sole.

D1: Monitoraggio del risparmio idrico:

Trattandosi di terreno non irriguo non potrà essere svolto il monitoraggio sul diverso consumo di acqua d'irrigazione rispetto all'area di controllo, in allineamento con le banche dati SIGRIAN. Tuttavia sarà possibile calcolare le variazioni di evapotraspirazione tra l'area occupata dal sistema agrivoltaico e quella esterna di controllo sulla base dei dati climatici giornalieri.

D2: Monitoraggio della continuità dell'attività agricola:

Attraverso la rilevazione annuale delle produzioni di foraggio sarà possibile redigere una relazione agronomica asseverata, con cadenza triennale, che riporti la produttività del prato nel sistema agrivoltaico e nel controllo, corredata dalle informazioni sulla tecnica di coltivazione e le condizioni di accrescimento della coltura. La produttività del prato polifita verrà monitorata ad ogni sfalcio, ponendo in raffronto il sistema agrivoltaico al testimone. In questo modo sarà possibile ottenere la

dinamica delle produzioni stagionali e inter-annuali, anche in funzione del variabile andamento climatico nel corso degli anni. L'azienda proponente aderirà alla rilevazione dei dati con metodologia RICA (Rete di Informazione Contabile Agricola).

E1. Monitoraggio del recupero della fertilità del suolo:

Attraverso l'analisi della produttività temporale nel corso del poliennio (20 anni di durata attesa dell'impianto) sarà possibile valutare la dinamica produttiva, eventualmente corroborata dall'analisi del contenuto di sostanza organica del terreno. I dati verranno inseriti nella relazione agronomica triennale.

E2: Monitoraggio del microclima:

Nell'impianto agrivoltaico verranno posizionati i sensori dei parametri ambientali di: *i*) temperatura (sensore PT 100); *ii*) umidità dell'aria (igrometro), e *iii*) velocità del vento (anemometro), sia nel retro-modulo fotovoltaico che nell'ambiente esterno di controllo. Saranno inoltre installati sensori di rilevazione di: *iv*) radiazione globale, e *v*) radiazione fotosinteticamente attiva (PAR) sia sotto i moduli fotovoltaici in raffronto a zone immediatamente limitrofe non coperte dall'impianto.

Pur se variabili nell'intervallo di rilevazione, verrà prevista una acquisizione al minuto e una registrazione dei dati ogni 15 minuti. Sfruttando le nuove tecnologie digitali sarà possibile monitorare in modo automatizzato i parametri climatici. La rilevazione avverrà da remoto sfruttando la connessione alla rete POE e internet, con registrazione in continuo. Sarà così possibile quantificare con precisione l'impatto del fotovoltaico sui parametri microclimatici nell'andamento giornaliero, stagionale, annuale e interannuale.

6 Analisi multicriterio

Quando la scelta di una opzione progettuale interessa più criteri di valutazione (es. economico, ambientale, sociale, etc.), e non solo quelli economici, è opportuno utilizzare una metodologia di analisi multicriterio (AMC). L'analisi multicriterio prevede che il confronto fra le alternative di intervento venga effettuato tramite l'utilizzo della cosiddetta matrice di valutazione: una matrice in cui ogni alternativa è messa a confronto per una serie di criteri di valutazione, che possono essere obiettivi del progetto o dei portatori di interesse, criteri tecnici, sociali, etc. Le alternative vengono elencate nelle colonne della matrice, mentre i criteri di valutazione sono descritti nelle righe. Il grado di raggiungimento di ogni obiettivo (o di soddisfacimento del criterio di valutazione) da parte delle

alternative considerate è indicato tramite un indice che, che ad esempio può variare tra 0 (obiettivo non raggiunto o criterio non soddisfatto) e 5 (obiettivo raggiunto), passando per valori intermedi che indicano un obiettivo raggiunto parzialmente. Nel caso di criteri che possono avere un significato negativo o positivo (ad esempio gli impatti ambientali) si può ricorrere anche a valori indice che variano da negativi (impatto negativo) a positivi (impatto completamente positivo), ove 0 assume il significato di impatto nullo.

Ad ogni criterio di valutazione viene assegnato un peso (valore compreso tra 0 e 1) moltiplicativo degli indici assegnati ad ogni criterio. Tale peso viene in genere assegnato tenendo conto anche di quanto espresso dai portatori di interesse. I valori degli indici per ogni alternativa (moltiplicati per i pesi) vengono sommati, cosicché ad ogni alternativa di intervento corrisponde un punteggio totale, confrontabile con quello delle diverse opzioni/alternative. Può essere inoltre condotta un'analisi di sensibilità dei punteggi finali ai valori dei pesi, così da verificare quanto robusta sia la scelta della soluzione migliore.

L'AMC viene utilizzata per arrivare alla scelta della soluzione preferibile, in quanto permette di tener conto di tutti i benefici e gli impatti, inclusi quelli di difficile quantificazione (per esempio alcuni impatti ambientali e sociali) e permette, inoltre, di coinvolgere i portatori di interesse mostrando in maniera trasparente il processo decisore.

Per un'analisi oggettiva tra le due situazioni a confronto (agrivoltaico con prato polifita vs. attuale coltivazione a erbaio), si è costruita una matrice che assegna punteggi compresi tra -5 (minimo) e +5 (massimo) ad alcuni indicatori socio-economici ed ambientali, nonché quelli tecnico-energetici così importanti in questo momento di elevato costo dell'energia (Tabella 6).

Poiché si è voluto pesare in egual misura tutti i criteri, si è deciso di assegnare a ciascuno di essi un peso eguale e pari a 1.

Tabella 4. Matrice dei principali effetti socio-economici e ambientali delle coltivazioni a confronto.

Voce	Coltivazione attuale (Foraggio da erbaio)	Coltivazione futura (Prato Polifita Permanente+FV)
1. Occupazione (impiego di personale)	(+2) Medio-basso, in conseguenza della parziale meccanizzazione delle operazioni di semina e raccolta, con 1 solo sfalcio all'anno.	(+4) Medio, per le operazioni di sfalcio e raccolta del foraggio ripetute 2-3 volte all'anno. Impiego addizionale di maestranze agricole per la manutenzione delle siepi perimetrali e raccolta delle olive su piante mature. Medio-alto, per l'impiego di tecnici specializzati impiegati nella costruzione e manutenzione dell'impianto foto-voltaico.
2. Fertilità agronomica dei terreni (contenuto di sostanza organica)	(+1) Modesto, a causa delle ripetute lavorazioni del terreno e l'ossidazione della sostanza organica. Viene coltivata una sola o poche specie graminacee.	(+3) La lavorazione del terreno è necessaria solo nel primo anno di impianto del prato polifita. Le specie leguminose presenti nel miscuglio fissano l'azoto atmosferico, fornendo una naturale concimazione del terreno, e le piante arricchiscono di sostanza organica il terreno.
3. Effetti sul sistema idrico (consumo di acqua e qualità)	(+2) La coltivazione viene condotta in asciutto, utilizzando pochi fertilizzanti, e senza ricorrere ad antiparassitari. La coltivazione è autunno-primaverile, con terreno non coltivato d'estate.	(+3) Moderate necessità di acqua di irrigazione per l'ombreggiamento del FV. Limitato l'utilizzo di fertilizzanti. Nessun utilizzo di antiparassitari.
4. Utilizzo di carburanti fossili per le macchine agricole	(+2) Elevato impiego di carburanti per le operazioni di lavorazione del terreno.	(+3) La coltivazione del prato polifita richiede l'uso di mezzi agricoli leggeri e consumi ridotti di carburante per la fienagione, mentre la lavorazione del terreno è un-tantum all'impianto. È possibile usare mezzi elettrici di bassa potenza.
5. Biodiversità floristica e faunistica	(+2) Effetti di riparo di fauna e insetti utili forniti dall'erbaio, ma per un periodo limitato nel tempo (autunno-primavera).	(+4) I miscugli polifiti generalmente prevedono la coltivazione di numerose specie foraggere contemporaneamente (8-12 specie). Molte specie attraggono insetti impollinatori (api), ed il prato crea rifugio per fauna selvatica e nemici naturali (parassitoidi) dei parassiti delle piante durante tutto l'anno.
6. Margine lordo (valore economico del prodotto agricolo)	(+1) La coltivazione genera una marginalità molto bassa.	(+1) Il prato polifita produce una marginalità medio-bassa.
7. Produzione di Energia Rinnovabile	(+1) Si stima una produzione di circa 8 t/ha/anno di foraggio, che ha una resa energetica in combustione di 5,14 MWh/t, per un totale di circa: 41^(*) MWh/ha <small>(*) valore medio del Potere Calorifero Inferiore Anidro di una biomassa erbacea.</small>	(+5) La produzione dell'associato impianto fotovoltaico raggiunge annualmente per ogni ettaro di superficie circa: 767 MWh/ha L'intera produzione di foraggio è inoltre destinata all'alimentazione animale per la produzione di alimenti per l'uomo.
PUNTEGGIO TOTALE	11	23

La matrice AMC evidenzia un **punteggio molto maggiore del sistema agrivoltaico**, rispetto alla coltivazione attuale, anche ipotizzando per quest'ultima una destinazione energetica.

Con questa soluzione il terreno agricolo oggetto di intervento garantirà un reddito aggiuntivo al reddito caratteristico della sola produzione agricola grazie alla produzione di energia rinnovabile.

È quindi evidente come l'obiettivo di coniugare la coltivazione agricola con un razionale, sinergico e conveniente uso del terreno, sia efficacemente raggiunto con il sistema agrivoltaico.

7 Conclusioni

L'esigenza di produrre energia rinnovabile è oggi quanto mai sentita per ridurre gli effetti negativi dell'inquinamento e del cambiamento climatico legati all'utilizzo di energie fossili, e per calmierare l'attuale prezzo dell'energia oggetto di forti tensioni internazionali a seguito dell'incremento dei costi delle materie prime, incluse quelle energetiche e cerealicole. L'associazione tra impianto fotovoltaico di nuova generazione (ad inseguimento solare) e l'attività agricola rappresenta una soluzione innovativa dell'impiego del territorio che trova giustificazione nel maggiore output energetico (LER, *Land Equivalent Ratio*) complessivamente ottenuto dai due sistemi combinati rispetto alla loro realizzazione individuale separata.

Attraverso la scelta di idonee colture, tolleranti al parziale ombreggiamento generato dai pannelli fotovoltaici, è possibile migliorare la produttività agricola e la conseguente marginalità e sfruttare efficacemente per scopi agricoli la superficie di terreno posta tra i pannelli fotovoltaici. A differenza delle coltivazioni cerealicole, e di cereali microtermini in particolare (es. frumento), che sono possibili solo nella zona più centrale dell'interfilare fotovoltaico, **la scelta di coltivare specie foraggere all'interno di un miscuglio di prato polifita consente di sfruttare l'intera superficie del terreno.** La presenza inoltre di molte specie nel miscuglio foraggero, garantisce l'instaurarsi di un perfetto equilibrio e l'adattamento del prato alle specifiche e variabili condizioni di illuminamento, favorendo l'una o l'altra essenza foraggera in funzione delle condizioni microclimatiche che si vengono a realizzare a diverse distanze dal filare fotovoltaico.

Sebbene siano diverse le colture realizzabili all'interno di un impianto agrivoltaico, e con marginalità spesso comparabile, **la scelta del prato polifita permanente consente di raggiungere contemporaneamente più obiettivi, oltre alla convenienza economica:** conservazione della qualità dei corpi idrici, aumento della sostanza organica dei terreni, minor inquinamento ambientale da fitofarmaci, minor consumo di carburanti fossili, aumento della biodiversità vegetale e animale,

creando, in particolare, un ambiente idoneo alla protezione delle api, raggiungendosi così il massimo dei benefici, come indicato dall'analisi costi-benefici multicriterio.

L'Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (ISPRA) documenta che la maggior parte dei terreni coltivati sta perdendo progressivamente di fertilità a causa della coltivazione intensiva e della frequenza e profondità delle lavorazioni. È oggi assai frequente rilevare valori di sostanza organica del terreno inferiori a 1,5%, e in molti casi anche inferiori all'1%, condizione che agronomicamente viene definita di terreno "povero", inferiore alla soglia ideale del 2%. La situazione viene efficacemente migliorata con il mantenimento prolungato dell'inerbimento, come conferma l'elevato contenuto di sostanza dei terreni destinati a prato permanente, che presentano anche 3-4% di humus. A tale riguardo, va rilevato che il terreno è uno dei sink di carbonio più importanti per la sua fissazione, dopo le foreste e gli oceani, e riveste quindi un ruolo fondamentale nella mitigazione climatica.

Durante il periodo estivo l'impianto fotovoltaico offre protezione dal vento, contro l'allettamento delle colture, riduce il consumo di acqua e riduce gli eccessi di calore sempre più frequenti in un contesto di cambiamento climatico, agendo da moderno sistema di ombreggiamento, analogamente a quanto svolto dalle siepi e dalle alberature campestri. **L'adozione del sistema fotovoltaico può anche aumentare la produttività del prato permanente nelle annate più calde e siccitose, attraverso il mantenimento di una più elevata umidità del terreno, facilitando il ricaccio dopo lo sfalcio e riducendo gli apporti idrici artificiali.** Dal punto di vista paesaggistico, inoltre, la superficie a prato mitiga efficacemente la presenza dell'impianto fotovoltaico anche nel periodo invernale, fornendo una superficie stabilmente verde.

La realizzazione delle alberature perimetrali con piante di olivo consentirà infine di migliorare l'impatto visivo dell'impianto fotovoltaico, e nel medio termine, con il raggiungimento della maturità delle piante, ottenere una fonte di reddito aggiuntiva derivante dalla raccolta delle olive.

8 Bibliografia

- Amaducci S., Xinyou, Colauzzi M., 2018. Agrivoltaic systems to optimise land use for electric energy production. *Applied Energy* 220: 545-561.
- Callejón-Ferre A.J., Manzano-Agugliaro F., Díaz-Pérez, Carreño-Ortega A., Pérez-Alonso J., 2009. Effect of shading with aluminised screens on fruit production and quality in tomato (*Solanum lycopersicum* L.) under greenhouse conditions. *Spanish Journal of Agricultural Research* 7: 41-49.
- Dupraz C., Marrou H., Talbot G., Dufur L., Nogier A., Ferard Y., 2011. Combining solar photovoltaic panels and food crops for optimising land use: towards new agrivoltaic schemes. *Renewable Energy* 36: 2725-2732.
- Fraunhofer ISE, 2020. Agrivoltaics: opportunities for agriculture and the energy transition. A Guideline for Germany. 56 pp.
- Marrou H., Dufur L., Wery J., 2013b. How does a shelter of solar paners influence water flows in a soil-crop system? *European Journal of Agronomy* 50: 38-51.
- Marrou H., Guilioni L., Dufur L., Dupraz C., Wery J., 2013a. Microclimate under agrivoltaic systems: is crop growth rate affected in the partial shade of solar panels? *Agricultural & Forest Meteorology* 177: 117-132.
- Mercier KM, Teutsch CD, Fike JH, Munsell JF, Tracy BF, Strahm BD., 2020. Impact of increasing shade levels on the dry-matter yield and botanical composition of multispecies forage stands. *Grass Forage Science*, 00: 1-12.

Mezzalana G., Panozzo A., Vamerali T., 2021. L'agroforestazione è un pilastro fondamentale del farming for future. *Biogas Informa*, 36: 34-41.

Panozzo A., Bernazeau B., Dal Cortivo C., Desclaux D., Vamerali T., 2019. Microclimate modification and yield responses of different varieties of durum wheat within an olive orchard agroforestry system. *Società Italiana di Agronomia, Atti del XLVIII Convegno Nazionale "Evoluzione e adattamento dei sistemi colturali"*, Perugia 18-20 Settembre 2019: 72-73.

Prof. Teofilo Vamerali