



VFARM

Vertical Farming Sostenibile

LINEE GUIDA



Acronimo:	VFARM
Titolo completo:	Vertical Farming sostenibile
Codice progetto:	2020ELWM82
Finanziamento	PRIN
Coordinatore:	Università di Bologna
Inizio del progetto:	8 Maggio, 2022
Durata del progetto:	36 mesi

	Caratteristiche documento
Titolo del documento	Gestione del microclima e strategie di ottimizzazione energetica nella coltivazione dei funghi
Work Package:	WP6
Partner responsabile:	University of Naples Federico II
Autori principali:	Carlo Nicoletto, Paolo Sambo
Altri autori:	
Numero di pagine:	19



Contents

Obiettivi del Progetto.....	Error! Bookmark not defined.
1. Introduzione.....	5
1.1 Requisiti microclimatici lungo il ciclo colturale	5
1.2 Controllo termico: tecnologie e strategie	6
1.3 Umidità relativa: tecniche di regolazione	6
1.4 Ventilazione e controllo della CO ₂	7
1.5 Illuminazione: caratteristiche e funzioni.....	7
1.6 Protocollo operativo per la gestione climatica	7
1.7 Ottimizzazione energetica: approccio integrato.....	8
2. <i>Pleurotus ostreatus</i>	9
2.1 Fattori microclimatici nella coltivazione del <i>Pleurotus</i>	9
2.1.1 Temperatura	10
2.1.2 Umidità relativa	10
2.1.3 Concentrazione di CO ₂	10
2.1.4 Luce.....	11
2.2 Struttura della fungaia e isolamento termico	11
2.3 Sistema di controllo ambientale	11
2.4 Strategie di ottimizzazione energetica.....	12
2.5 Protocollo di gestione climatica della fungaia per <i>Pleurotus</i>	13
3. <i>Cyclocybe aegerita</i>	14
3.1 Requisiti ecologici e fisiologici di <i>Cyclocybe aegerita</i>	14
3.2 Protocollo di gestione climatica della fungaia	15
3.3 Strategie di ottimizzazione energetica.....	16



3.4 Monitoraggio e controllo di qualità.....	17
3.5 Considerazioni finali e prospettive.....	18



1.Introduzione

La coltivazione di funghi commestibili, come *Agaricus bisporus* (champignon), *Pleurotus ostreatus* (pleuroto), *Lentinula edodes* (shiitake) e altre specie ligninolitiche, costituisce un comparto agroindustriale ad elevato valore aggiunto. Tuttavia, affinché la produzione risulti efficiente, sostenibile e di alta qualità, è imprescindibile un controllo rigoroso delle condizioni microclimatiche all'interno della fungaia. La gestione del microclima rappresenta infatti un elemento centrale per sostenere lo sviluppo del micelio, innescare la fruttificazione e favorire l'accrescimento ottimale dei carpofori. Variabili ambientali come temperatura, umidità relativa, concentrazione di anidride carbonica (CO₂), ventilazione e illuminazione devono essere monitorate e regolate con precisione lungo l'intero ciclo colturale. A queste esigenze si affianca la necessità di contenere i consumi energetici attraverso strategie tecniche mirate, essenziali per garantire la sostenibilità economica ed ecologica della produzione.

Questo report intende fornire un quadro integrato delle soluzioni adottabili nella gestione climatica delle fungaie, delineando i requisiti microclimatici specifici per ciascuna fase di sviluppo fungino e illustrando le tecnologie e le pratiche più efficaci per l'ottimizzazione energetica.

1.1 Requisiti microclimatici lungo il ciclo colturale

Il ciclo produttivo dei funghi si articola in tre fasi principali: colonizzazione del substrato, induzione della fruttificazione e accrescimento dei carpofori. Ognuna di queste richiede condizioni ambientali specifiche, calibrate in funzione delle esigenze fisiologiche della specie coltivata.

- Colonizzazione (fase vegetativa)

In questa prima fase, il substrato deve essere mantenuto a temperature comprese tra i 24 e i 27 °C per *A. bisporus* e tra i 20 e i 25 °C per *P. ostreatus*. L'umidità relativa ideale si attesta tra il 90% e il 95%. L'ambiente deve restare in oscurità, con ventilazione ridotta e una concentrazione di CO₂ anche



superiore ai 5000 ppm, per favorire la rapida espansione del micelio nel substrato.

- Induzione della fruttificazione (fase generativa)

Lo shock termico rappresenta lo stimolo principale per la formazione dei primordi. È quindi necessario ridurre progressivamente la temperatura a valori tra 16 e 20 °C, diminuire la CO₂ sotto i 1000 ppm e introdurre luce diffusa con intensità di circa 10-20 μmol m² s⁻¹. In questa fase, l'umidità resta elevata (85-95%) e la ventilazione deve essere incrementata per favorire il ricambio d'aria (0,5 m s⁻¹).

- Accrescimento dei carpofori: La fase di sviluppo dei frutti richiede condizioni climatiche stabili: temperatura compresa tra 14 e 18 °C, umidità relativa tra l'85% e il 90%, CO₂ mantenuta sotto i 1000 ppm. La ventilazione costante e la luce moderata garantiscono l'uniformità morfologica e la qualità finale del prodotto.

1.2 Controllo termico: tecnologie e strategie

La temperatura rappresenta il parametro più critico nella gestione del microclima. Il suo controllo avviene attraverso impianti HVAC (Heating, Ventilation and Air Conditioning), con sistemi di riscaldamento (es. caldaie a biomassa, radiatori ad acqua) e raffrescamento (es. pompe di calore, condizionatori, cooling systems), gestiti da centraline climatiche automatizzate. Un ruolo fondamentale è giocato dall'isolamento termico, realizzato mediante pannelli sandwich in poliuretano espanso o lana minerale, che limitano le dispersioni e stabilizzano il microclima interno. L'automazione, tramite PLC e sensori ambientali, consente una regolazione dinamica e precisa, migliorando efficienza e riducendo l'intervento umano.

1.3 Umidità relativa: tecniche di regolazione

Il mantenimento di un'elevata umidità relativa è essenziale per l'attività enzimatica del micelio e l'integrità idrica dei carpofori. Tale parametro viene regolato tramite:



- Umidificatori ad ultrasuoni o a nebulizzazione: entrambi producono microgocce d'acqua che saturano l'ambiente in modo uniforme, con basso impatto energetico.
- Deumidificatori, impiegati in caso di eccesso, soprattutto nelle fasi avanzate di fruttificazione.
- Sistemi di controllo automatizzati, basati su igrometri digitali, che attivano i dispositivi in funzione dei valori rilevati.

1.4 Ventilazione e controllo della CO₂

La regolazione della concentrazione di CO₂ è determinante per una fruttificazione corretta. Se nella fase vegetativa è tollerata una CO₂ > 5000 ppm, nelle fasi successive essa deve essere mantenuta < 1000 ppm. La ventilazione forzata, con ventilatori assiali e canalizzazioni, consente un ricambio d'aria regolare, fondamentale anche per la regolazione termica e igrometrica.

Filtri HEPA o G4 prevengono l'ingresso di patogeni, mentre sensori di CO₂ con interfaccia digitale permettono il monitoraggio in continuo e l'integrazione nei sistemi di gestione climatica.

1.5 Illuminazione: caratteristiche e funzioni

In molte specie fungine, la luce svolge un ruolo chiave nella fruttificazione. Essa deve essere diffusa, non diretta, con spettro bianco o blu (400-500 nm), e intensità compresa tra 10-20 $\mu\text{mol m}^2 \text{s}^{-1}$ per 6-12 ore giornaliere.

Per ridurre i consumi e ottimizzare il controllo, sono consigliate lampade LED ad alta efficienza, possibilmente dotate di timer programmabili.

1.6 Protocollo operativo per la gestione climatica

L'intero ciclo colturale può essere standardizzato in un protocollo a cinque fasi:

- Preparazione: sanificazione ambientale, verifica e taratura dei sistemi HVAC e dei sensori.



- Colonizzazione: temperatura a 25 °C, umidità al 95%, oscurità e ventilazione minima.
- Induzione: riduzione graduale della temperatura a 18 °C, aumento della ventilazione, introduzione della luce e contenimento della CO₂.
- Accrescimento: mantenimento delle condizioni ottimali per lo sviluppo del carpoforo.
- Raccolta e post-raccolta: mantenimento del microclima fino al termine del flush e successiva disinfezione

1.7 Ottimizzazione energetica: approccio integrato

Le fungaie sono strutture ad alto consumo energetico. Per migliorarne l'efficienza, si adottano soluzioni mirate:

- Recupero del calore tramite scambiatori aria-aria o aria-acqua.
- Coibentazione avanzata e sigillatura a tenuta d'aria.
- Sistemi HVAC ad alta efficienza, con pompe di calore inverter.
- Illuminazione LED intelligente, regolabile nello spettro e nei tempi.
- Automazione e sensoristica avanzata, anche con l'uso di AI per previsioni climatiche e ottimizzazione predittiva.
- Fonti rinnovabili: impianti fotovoltaici, solare termico e geotermia.

La gestione del microclima nella coltivazione fungina non può prescindere da un approccio integrato, tecnologicamente evoluto e scientificamente fondato. L'adozione di protocolli climatici rigorosi e sistemi energetici ottimizzati permette di incrementare le rese, migliorare la qualità del prodotto e contenere l'impronta ambientale. Le prospettive future, legate all'uso di intelligenza artificiale, Internet of Things (IoT) e strategie di riciclo energetico, aprono nuovi scenari di innovazione per una fungicoltura sempre più resiliente e sostenibile.



2. *Pleurotus ostreatus*

La coltivazione dei funghi *Pleurotus* spp., comunemente noti come funghi ostrica, rappresenta una delle attività micologiche più diffuse e sostenibili, grazie alla capacità di questi organismi di crescere su substrati lignocellulosici di scarto. Tuttavia, per garantire rese elevate, qualità ottimale e sostenibilità economica e ambientale, è fondamentale gestire in modo rigoroso il microclima delle strutture di coltivazione, note come fungaie. Le condizioni microclimatiche influenzano direttamente lo sviluppo miceliare, la fruttificazione, la qualità del carpoforo e la sanità dell'ambiente di produzione. In parallelo, la crescente attenzione alla sostenibilità energetica impone l'adozione di strategie di ottimizzazione dell'uso dell'energia all'interno della fungaia.

2.1 Fattori microclimatici nella coltivazione del *Pleurotus*

La crescita e fruttificazione dei funghi *Pleurotus* è fortemente influenzata da quattro parametri microclimatici principali:

- Temperatura: regola il metabolismo del micelio e la formazione dei corpi fruttiferi. Temperature troppo alte accelerano lo sviluppo vegetativo ma possono impedire la fruttificazione. Temperature troppo basse rallentano l'attività enzimatica e la crescita complessiva.
- Umidità relativa: fondamentale per prevenire la disidratazione dei carpofori e mantenere l'attività fisiologica del micelio. L'umidità favorisce anche la dispersione delle spore e il mantenimento dell'integrità dei tessuti fungini.
- Concentrazione di CO₂: un parametro chiave per la morfogenesi. Elevate concentrazioni di anidride carbonica inibiscono la formazione di strutture differenziate, provocando allungamenti anomali dei gambi e deformazioni nei cappelli. Una gestione accurata permette una fruttificazione regolare e abbondante.
- Luce: sebbene i funghi non effettuino fotosintesi, la luce è uno stimolo importante per l'induzione e lo sviluppo dei carpofori. È necessario garantire



una distribuzione uniforme della luce per ottenere fruttificazioni omogenee e ben conformate.

2.1.1 Temperatura

Le diverse fasi della crescita del *Pleurotus* richiedono condizioni termiche differenti:

- Incubazione del micelio (fase vegetativa): 24-28°C. Queste temperature favoriscono la rapida colonizzazione del substrato da parte del micelio. Un buon controllo in questa fase riduce il rischio di contaminazioni e accelera il passaggio alla fruttificazione.
- Induzione della fruttificazione: 12-18°C. Uno shock termico verso temperature più basse stimola il micelio a differenziarsi in primordi, l'inizio dello sviluppo del carpoforo.
- Crescita dei carpofori: 15-20°C. Una temperatura stabile in questo intervallo permette un accrescimento lento e costante, favorendo carpofori ben formati e carnosì.

2.1.2 Umidità relativa

- Durante l'incubazione, l'umidità deve essere moderata (70-75%) per evitare la condensazione e la crescita di muffe contaminanti. Si utilizza un'umidificazione indiretta o una copertura parziale del substrato.
- Durante la fruttificazione, l'umidità deve aumentare (85-95%) per prevenire il disseccamento dei primordi e garantire una superficie liscia e turgida nei carpofori. L'umidificazione deve essere fine e distribuita, evitando eccessi localizzati.

2.1.3 Concentrazione di CO₂

- In fase vegetativa, livelli >1000 ppm non sono problematici e possono persino accelerare la colonizzazione.



- Durante la fruttificazione, è essenziale ridurre la concentrazione di CO₂ sotto gli 800 ppm per promuovere lo sviluppo corretto dei corpi fruttiferi. Una ventilazione efficace e continua è necessaria per garantire il ricambio d'aria.

2.1.4 Luce

- Durante la fruttificazione, una luce diffusa tra 5 e 10 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, con uno spettro bianco-neutro, simula le condizioni del sottobosco. L'intensità e la durata della luce (10-12 ore al giorno) sono sufficienti a stimolare lo sviluppo morfologico senza provocare stress.

2.2 Struttura della fungaia e isolamento termico

Le fungaie possono essere realizzate in locali interrati, container coibentati o serre adattate. Un buon isolamento termico è cruciale per ridurre i fabbisogni energetici per il riscaldamento e il raffrescamento. Materiali isolanti ad alta efficienza possono apportare notevoli vantaggi nel risparmio energetico. Alcuni esempi possono essere costituiti da:

- poliuretano espanso - eccellente capacità isolante, facilità di applicazione su superfici irregolari.
- pannelli sandwich - composizione a strati con isolamento interno in poliuretano o polistirene espanso.
- lana di roccia - ottimo isolamento termico e acustico, resistenza al fuoco, adatta a pareti verticali e soffitti.

La progettazione deve favorire la compartimentazione degli spazi per permettere la gestione differenziata delle fasi di coltivazione, riducendo interferenze e facilitando la manutenzione.

2.3 Sistema di controllo ambientale

Un sistema di controllo ambientale automatizzato consente di monitorare e regolare i parametri microclimatici. I principali componenti includono:

- sensori ambientali: rilevano temperatura, umidità relativa, concentrazione di CO₂ e intensità luminosa in tempo reale.



- unità di ventilazione con scambiatori di calore: gestiscono il ricambio d'aria mantenendo l'efficienza energetica (cooling system).
- umidificatori ad ultrasuoni o fog systems: permettono un controllo preciso dell'umidità senza bagnare il substrato.
- riscaldatori elettrici o a pompa di calore: modulano la temperatura ambiente in modo efficiente, adattandosi rapidamente alle variazioni dei parametri ambientali.
- sistemi di raffrescamento evaporativo o a compressione: essenziali per abbassare la temperatura nelle stagioni calde (cooling system).
- unità di controllo PLC o computerizzata: programmabili e integrabili con sensori e attuatori, consentono una gestione automatizzata dell'ambiente di coltivazione.

2.4 Strategie di ottimizzazione energetica

- Recupero di calore

Installando scambiatori di calore sull'aria in uscita, è possibile trasferire energia termica all'aria in ingresso, migliorando l'efficienza del sistema di riscaldamento, soprattutto in inverno.

- Utilizzo di energie rinnovabili
 - fotovoltaico: fornisce energia elettrica per i sistemi di ventilazione, illuminazione e controllo.
 - solare termico: produce acqua calda utile per il riscaldamento ambientale e la sanificazione degli ambienti.
 - geotermia a bassa entalpia: offre una fonte continua e stabile di energia termica per climatizzare le fungaie.
- Automazione e gestione intelligente

Software dedicati permettono la programmazione e il monitoraggio remoto delle condizioni ambientali, riducendo gli sprechi e migliorando la tempestività degli interventi correttivi.

- Isolamento e tenuta all'aria



Sigillare correttamente le strutture ed evitare infiltrazioni o perdite d'aria riduce il fabbisogno di energia per mantenere condizioni stabili, aumentando l'efficienza complessiva.

- Deumidificazione passiva e gestione dell'umidità

L'uso di materiali porosi (ad es. argilla espansa, pannelli in fibra di legno) e la ventilazione controllata notturna possono contribuire alla regolazione naturale dell'umidità, riducendo il ricorso a impianti meccanici.

2.5 Protocollo di gestione climatica della fungaia per *Pleurotus*

2.5.1 Fase di incubazione (giorni 0-20)

- Temperatura: 24-28°C, costante, per stimolare la crescita del micelio nel substrato.
- Umidità relativa: 70-75%, evitando gocciolamento e muffe.
- CO₂: Elevata, >1000 ppm, poiché non si richiede formazione di carpofori.
- Luce: assente, ambiente completamente buio.
- Ventilazione: minima, ricambio d'aria ogni 6-8 ore, sufficiente a prevenire anaerobiosi.

2.5.2 Induzione della fruttificazione (giorni 21-23)

- Temperatura: 12-18°C, realizzando uno shock termico per stimolare la fruttificazione.
- Umidità relativa: 90-95%, favorendo la formazione dei primordi.
- CO₂: <800 ppm, garantendo una ventilazione attiva per favorire lo sviluppo dei carpofori.
- Luce: 5 e 10 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, diffusa e uniforme.
- Ventilazione: ricambio continuo, fino a 3-4 volumi d'aria per ora.

2.5.3 Crescita e maturazione dei carpofori (giorni 24-35)

- Temperatura: 15-20°C, stabile, per consentire l'ingrossamento dei carpofori.



- Umidità relativa: 85-90%, per evitare disseccamenti.
- CO₂: <800 ppm, mantenuta tramite ventilazione continua.
- Luce: 3 e10 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, per mantenere lo sviluppo morfologico.
- Ventilazione: continua e moderata, per mantenere l'equilibrio gassoso e termico.

2.5.4 Raccolta e post-raccolta

- Dopo la raccolta della prima volata si sospendono temporaneamente irrigazione e illuminazione per 3-5 giorni. Si effettua una leggera irrigazione per reidratare il substrato e si reinnesca il ciclo. Al termine di un ciclo è necessaria la sanificazione degli ambienti e delle attrezzature con prodotti fungicidi a basso impatto ambientale.

3. *Cyclocybe aegerita*

Cyclocybe aegerita (sin. *Agrocybe aegerita*, noto anche come pioppino) è una specie lignivora ampiamente apprezzata per le sue qualità organolettiche, la sua adattabilità e la sua capacità produttiva in ambienti controllati. La gestione ottimale del microclima all'interno delle strutture di coltivazione (fungaie) è fondamentale per garantire alte rese, qualità del prodotto e sostenibilità energetica dell'intero processo.

3.1 Requisiti ecologici e fisiologici di *Cyclocybe aegerita*

Cyclocybe aegerita è un fungo saprofito che cresce in natura su legni duri in decomposizione, in ambienti umidi e ombrosi. La sua crescita miceliale e la fruttificazione richiedono condizioni ambientali ben definite:

- Temperatura miceliale ottimale: il micelio si sviluppa al meglio in un intervallo termico compreso tra 24 e 28°C, temperatura che favorisce la colonizzazione rapida del substrato e l'attività metabolica.



- Temperatura di fruttificazione: per stimolare la formazione dei carpofori è necessario abbassare la temperatura ad un intervallo tra 14 e 20°C, simulando il cambiamento stagionale che avviene in natura.
- Umidità relativa: durante la fruttificazione, un'umidità elevata (85–95%) previene la disidratazione dei primordi e favorisce lo sviluppo corretto dei corpi fruttiferi.
- CO₂: concentrazioni inferiori a 800 ppm sono ideali per prevenire la deformazione nei funghi; concentrazioni più elevate durante la fase vegetativa non influenzano negativamente la crescita miceliale, ma devono essere ridotte in fase di fruttificazione.
- Luce: essenziale nella fase di fruttificazione per l'induzione e lo sviluppo morfologico dei carpofori; l'intensità raccomandata varia tra 3 e 20 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, con un fotoperiodo di almeno 8 ore al giorno.

Le strutture e tecnologie per il controllo del microclima sono quelle già richiamate per la coltivazione del *Pleurotus ostreatus*.

3.2 Protocollo di gestione climatica della fungaia

3.2.1 Fase di incubazione (colonizzazione del substrato)

- Durata: tra 15 e 25 giorni, in funzione della qualità del substrato e delle condizioni climatiche.
- Temperatura: mantenuta tra 25 e 28°C per stimolare l'attività enzimatica del micelio.
- Umidità relativa: mantenuta al 70–75% per evitare la formazione di condensa e la crescita di patogeni.
- CO₂: mantenuta a livelli elevati (>3000 ppm) per favorire la crescita vegetativa e ridurre la precocità della fruttificazione.
- Luce: assenza totale, in quanto la luce può innescare prematuramente la formazione dei primordi.

3.2.2 Fase di induzione della fruttificazione



- Durata: generalmente compresa tra 3 e 7 giorni, fase sensibile alle variazioni ambientali.
- Temperatura: ridotta a 16–18°C per simulare un cambiamento stagionale che stimoli la fruttificazione.
- Umidità relativa: elevata al 90–95% per supportare l'emergere dei primordi.
- CO₂: abbassata drasticamente a meno di 800 ppm attraverso la ventilazione attiva.
- Luce: introdotta con una intensità tra 3 e 10 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, per almeno 8 ore giornaliere, attivando la morfogenesi.

3.2.3 Fase di fruttificazione e raccolta

- Durata: dai 5 ai 10 giorni per ciascun ciclo produttivo o flush.
- Temperatura: mantenuta tra 14 e 18°C per una fruttificazione omogenea e di alta qualità.
- Umidità relativa: tra 85 e 90%, per evitare sia la disseccazione che l'eccesso di umidità che favorisce muffe.
- CO₂: mantenuta bassa (<600 ppm) per garantire la corretta formazione degli stipiti e delle cappelle.
- Luce: aumentata fino a 1000 lux, con esposizione diurna di 10–12 ore per favorire uno sviluppo armonico.

3.2.4 Raccolte successive

Il ciclo produttivo prevede tipicamente 2–3 raccolte (volate), intervallati da un periodo di riposo e reidratazione del substrato. Dopo la raccolta, è utile nebulizzare acqua sterile e ristabilire i parametri di induzione per stimolare nuovi primordi. L'efficienza dei flush successivi dipende dalla qualità del substrato, dalla corretta gestione dell'umidità e dalla tempestiva rimozione dei residui.

3.3 Strategie di ottimizzazione energetica

3.3.1 Isolamento termico ed efficienza strutturale



- Utilizzo di materiali isolanti a bassa trasmittanza termica: l'impiego di pannelli in poliuretano espanso o lana di roccia riduce le perdite termiche e limita i costi di riscaldamento e raffrescamento.
- Eliminazione dei ponti termici: progettazione attenta dei giunti e degli angoli per evitare dispersioni localizzate di calore e formazione di condensa.
- Progettazione modulare delle camere: compartimentare la fungaia in moduli consente di ottimizzare la climatizzazione in base alla fase colturale e ridurre gli sprechi energetici.

3.3.2 Recupero e gestione dell'energia

- Sistemi di recupero di calore sull'aria espulsa: attraverso scambiatori aria-aria si recupera parte dell'energia termica presente nell'aria esausta, riducendo il carico sui sistemi di climatizzazione.
- Integrazione con impianti fotovoltaici o solari termici: consente la copertura parziale o totale del fabbisogno elettrico e termico della struttura, migliorando la sostenibilità.
- Utilizzo di pompe di calore ad alta efficienza ($COP > 4$): permettono di riscaldare o raffrescare grandi volumi con consumi energetici ridotti.

3.3.3 Automazione e gestione intelligente dei cicli

- Impiego di software di gestione climatica integrata (es. SCADA): sistemi avanzati per il controllo remoto e l'ottimizzazione automatica delle condizioni ambientali.
- Sensori IoT per il monitoraggio in tempo reale: dispositivi intelligenti che trasmettono dati ambientali in continuo, consentendo interventi tempestivi.
- Algoritmi predittivi per la programmazione delle fasi climatiche: modelli matematici che anticipano le necessità energetiche e regolano i parametri in funzione della fase produttiva.

3.4 Monitoraggio e controllo di qualità

Il mantenimento costante dei parametri ambientali è fondamentale per prevenire:



- Malformazioni dei carpofori: causate da oscillazioni termiche, carenza di luce o eccessiva concentrazione di CO₂.
- Contaminazioni da muffe (es. Trichoderma): favorite da umidità eccessiva e ventilazione insufficiente.
- Perdita di resa: legata a un'errata gestione delle fasi climatiche o a un substrato non correttamente sterilizzato.

Si consiglia l'utilizzo di:

- Logger ambientali con registrazione continua: strumenti di monitoraggio che raccolgono dati h24 su temperatura, umidità e CO₂.
- Report giornalieri automatizzati: utili per tracciare l'andamento climatico e intervenire con modifiche puntuali.
- Controlli periodici visivi e analisi microbiologiche: per verificare lo stato dei substrati, la presenza di contaminazioni e la qualità dei carpofori.

3.5 Considerazioni finali e prospettive

La gestione ottimale del microclima nella coltivazione dei funghi permette non solo di massimizzare la resa produttiva, ma anche di ridurre sensibilmente i consumi energetici e l'impatto ambientale. L'integrazione tra scienze agronomiche, ingegneria ambientale e tecnologie digitali apre nuove prospettive per una fungicoltura resiliente, tracciabile e adattata ai futuri scenari climatici.

La definizione di protocolli climatici standardizzati, ma flessibili, unita all'adozione di soluzioni energetiche rinnovabili e a basso impatto, costituisce la base per una produzione sostenibile e scalabile in diverse aree geografiche.