

Comparazione dell'efficacia di caolino, Farina di Basalto® e zeolite nell'attenuare lo stress termico e nell'aumentare la resa dei mandorli (*Prunus dulcis*) in condizioni di clima mediterraneo

AUTORI

Antonio Dattola *, Gregorio Gullo and Rocco Zappia

Department of AGRARIA, Mediterranean University of Reggio Calabria, 89124 Reggio Calabria, Italy

* Correspondence: antonio.dattola@unirc.it

DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture16020220>

Sommario

Comparazione dell'efficacia di caolino, Farina di Basalto® e zeolite nell'attenuare lo stress termico e nell'aumentare la resa dei mandorli (*Prunus dulcis*) in condizioni di clima mediterraneo..... 1

Sintesi	2
Premessa.....	2
Parole chiave.....	2
1. Introduzione	3
2. Materiali e metodi	4
2.1. Sito sperimentale e materiale vegetale.....	4
2.2. Disegno sperimentale	5
2.3. Misurazioni fisiologiche	6
2.3.1. Scambi gassosi e misurazioni fluorimetriche	6
2.3.2. Indice SPAD	7
2.3.3. Determinazione del contenuto di clorofilla e carotenoidi nelle foglie.....	7
2.4. Determinazione dei parametri morfometrici e qualitativi dei frutti	8
2.4.1. Determinazione del peso fresco della frutta	8
2.4.2. Determinazione del contenuto di sostanza secca dei frutti	8
2.4.3. Estrazione delle sostanze grasse dalla frutta.....	8
2.4.4. Analisi degli esteri metilici degli acidi grassi presenti nella frutta	9
2.4.5. Contenuto totale di polifenoli nella frutta.....	9
2.4.6. Capacità antiossidante totale della frutta	9
2.5. Analisi statistica	9
3. Risultati	10
3.1. Fluorescenza della clorofilla.....	10
3.2. Misurazioni fisiologiche e caratteristiche funzionali delle foglie.....	10
3.3. Parametri morfometrici e qualitativi	12
3.4. Parametri nutraceutici	14
3.5. Analisi della composizione degli acidi grassi	15
3.6. Analisi multivariata: analisi delle componenti principali	16
4. Discussione	20
5. Conclusioni	23
6. Riferimenti	24

Sintesi

Premessa:

Lo stress termico e quello da elevata irradiazione solare minacciano sempre più la produzione di mandorle negli ambienti mediterranei, dove l'aumento delle temperature e le prolungate siccità estive compromettono le prestazioni fotosintetiche e la resa. Questo studio ha valutato l'efficacia di tre materiali schermanti a base minerale: caolino, Farina di Basalto® e zeolite. Partendo dall'ipotesi che l'applicazione fogliare di materiali minerali riflettenti avrebbe ridotto la temperatura fogliare, aumentato l'efficienza fotosintetica e migliorato la resa senza alterare la qualità nutraceutica dei frutti. Abbiamo condotto un esperimento sul campo della durata di due anni (2024–2025) utilizzando un disegno a blocchi randomizzati con quattro tesi (controllo non trattato, caolino, Farina di Basalto® e zeolite). Sono stati valutati i caratteri fisiologici (scambio gassoso, fluorescenza della clorofilla, temperatura fogliare e indice SPAD), i parametri morfobiometrici e biochimici e i componenti della resa. Il caolino e la Farina di Basalto® hanno abbassato significativamente la temperatura fogliare (da $-1,6$ a $-1,8$ °C), aumentato la conduttanza stomatica e la fotosintesi netta e migliorato l'efficienza fotochimica (F_v'/F_m') e le velocità di trasporto degli elettroni. Questi trattamenti hanno inoltre aumentato il peso delle drupe, la sostanza secca del nocciolo e la resa produttiva (fino al +32% rispetto al controllo). La zeolite ha prodotto effetti positivi ma meno evidenti. Non sono state rilevate differenze significative nel profilo degli acidi grassi, nei polifenoli totali o nella capacità antiossidante, indicando che i materiali non hanno influito sulla qualità nutraceutica delle mandorle. L'analisi delle componenti principali ha confermato la forte associazione tra la polvere di caolino e la Farina di Basalto® e il miglioramento delle prestazioni ecofisiologiche. Nel complesso, i materiali minerali di schermatura, in particolare il caolino e la Farina di Basalto®, rappresentano una strategia promettente e sostenibile per migliorare la resilienza dei mandorleti in scenari di cambiamento climatico mediterraneo.

Parole chiave: *Prunus dulcis*; agricoltura mediterranea; materiali riflettenti; foto-inibizione

Data di presentazione: 10 novembre 2025

Data di accettazione: 12 gennaio 2026

DATA DI PUBBLICAZIONE 14 gennaio 2026

1. Introduzione

Il mandorlo (*Prunus dulcis* [Miller] D.A.Webb) è una delle specie frutticole domestiche più antiche del Vecchio Mondo, le cui origini risalgono alle regioni aride e montuose dell'Asia centrale e sud-occidentale. La sua lunga storia di coltivazione è ben documentata dai reperti archeologici e dalla letteratura agronomica classica, che ne descrivono sia le esigenze ecologiche sia il significato simbolico nelle civiltà mediterranee [1–5]. Conosciuto dai Romani come *nux Graeca*, il mandorlo compare frequentemente nelle opere di Plinio il Vecchio, Columella, Virgilio e Orazio, che ne sottolineavano la preferenza per ambienti caldi, secchi e sassosi e ne celebravano la fioritura all'inizio della primavera [5]. I moderni studi molecolari supportano l'ipotesi di un unico evento di domesticazione, seguito da una progressiva diffusione verso ovest facilitata dalle migrazioni umane e dalle rotte commerciali [5]. Dal punto di vista tassonomico, la specie appartiene al sottogenere *Amygdalus* all'interno del genere *Prunus* nella sottofamiglia *Amygdaloideae* della famiglia delle *Rosaceae* [6].

Oggi le mandorle sono ampiamente apprezzate per il loro elevato valore nutrizionale, essendo ricche di acidi grassi insaturi, proteine, vitamine e minerali. Numerosi studi hanno dimostrato le loro proprietà antiossidanti e i potenziali benefici per la salute umana, comprese le funzioni cognitive [7–9]. La domanda globale è cresciuta costantemente, trainata dall'interesse dei consumatori per diete sane e sostenibili. Nel 2023, la produzione mondiale è rimasta altamente concentrata, con Stati Uniti, Spagna e Australia che rappresentavano quasi il 78% della produzione totale [10]. L'Italia contribuisce con una quota minore, circa il 2,6%, ma la coltivazione delle mandorle mantiene un forte significato culturale ed economico, in particolare nelle regioni meridionali. Recenti rapporti indicano che la produzione italiana di mandorle nel 2023 è stata influenzata negativamente da ondate di calore, evidenziando la necessità di strategie di mitigazione nelle regioni climaticamente vulnerabili [11]. Nonostante questa tradizione, il settore deve affrontare sfide strutturali, quali la frammentazione della proprietà fondiaria, la limitata meccanizzazione, la concorrenza di cultivar più produttive e la crescente instabilità climatica. Sebbene i mandorli siano spesso descritti come resistenti alla siccità grazie alla loro capacità di regolare la perdita d'acqua attraverso la chiusura degli stomi [12,13], l'esposizione prolungata a deficit idrici e temperature elevate può ridurre gravemente l'assimilazione del carbonio e la produttività complessiva. Uno studio pluriennale ha dimostrato che l'aumento dello stress idrico influisce negativamente sulla crescita vegetativa e sulla resa [14].

Il cambiamento climatico ha intensificato queste pressioni, esponendo i frutteti a condizioni termiche estreme, episodi di elevata irradiazione solare, andamenti irregolari delle temperature e prolungate siccità estive. In tali condizioni, l'eccessiva irradiazione e il calore possono indurre fotoinibizione, riducendo l'efficienza del fotosistema II e, nei casi più gravi, innescare processi foto-ossidativi guidati dalle specie reattive dell'ossigeno (ROS), danneggiando in ultima analisi le strutture cellulari e riducendo il potenziale di resa [15]. Queste sfide sottolineano la necessità di strategie di mitigazione sostenibili e facilmente applicabili, in grado di ridurre lo stress da calore e

radiazione durante il ciclo vegetativo estivo. Tra gli approcci proposti negli ultimi anni, l'applicazione fogliare di materiali schermanti a base minerale, come caolino, Farina di Basalto® e zeolite, ha suscitato un crescente interesse. Recenti revisioni evidenziano la crescente applicazione di materiali particellari filmogeni, mostrando che una maggiore riflettanza fogliare può mitigare lo stress abiotico (calore e irraggiamento eccessivo) e migliorare le prestazioni fisiologiche in diverse colture (ad esempio, olivo, vite, alberi da frutto), con il caolino e le particelle correlate che inducono effetti simili a quelli dei biostimolanti e una maggiore tolleranza allo stress in condizioni di campo [16–18]. Tuttavia, gli studi comparativi che valutano gli effetti combinati di più materiali minerali in condizioni mediterranee sono ancora pochi. Questi materiali possono aumentare la riflettanza fogliare, ridurre la temperatura della chioma e migliorare le prestazioni fotosintetiche. Però, nonostante il loro potenziale, nessuna ricerca pubblicata ha valutato in modo esaustivo gli effetti del caolino, della Farina di Basalto® e della zeolite sui mandorli all'interno dello stesso quadro sperimentale. Questa lacuna nelle conoscenze costituisce la motivazione alla base del presente studio. Sebbene il caolino sia stato ampiamente testato su diverse colture da frutto, questo studio sarà il primo a valutare contemporaneamente il caolino, la Farina di Basalto® e la zeolite sui mandorli. In particolare, nessuna ricerca pubblicata ha valutato i loro effetti sulle prestazioni fisiologiche, sui tratti morfobiometrici, sulla composizione biochimica e sulla resa nelle stesse condizioni sperimentali. Sulla base di queste considerazioni, lo scopo di questo studio è valutare l'efficacia dell'applicazione fogliare di materiali schermanti a base minerale sui mandorli, con l'obiettivo di ridurre la temperatura fogliare aumentando la riflettanza superficiale, potenziando l'efficienza fotosintetica e l'attività fotochimica e, in ultima analisi, migliorando la resa senza compromettere la qualità nutraceutica delle mandorle. Per raggiungere questo scopo, lo studio si pone quattro obiettivi principali: (i) valutare la risposta fisiologica dei mandorli al caolino, alla Farina di Basalto® e alla zeolite; (ii) valutare i loro effetti sulle caratteristiche morfobiometriche e biochimiche dei frutti; (iii) quantificare la loro influenza sulle componenti della resa; e (iv) esplorare le relazioni multivariate tra i trattamenti attraverso l'analisi delle componenti principali (PCA).

2. Materiali e metodi

2.1. Sito sperimentale e materiale vegetale

La nostra ricerca è stata condotta nell'arco di due anni, dal 2024 al 2025, in un mandorleto [*Prunus dulcis* (Miller) D.A. Webb] di circa un ettaro, situato nel comune di Bianco (38°05'14,8" N, 16°08'24,5" E), in provincia di Reggio Calabria, Italia (UE). Il mandorleto, impiantato nel 1998 presso l'azienda agricola Catanzariti, è costituito da piante della cultivar autofertile "Tuono", innestate su portainnesto GF677 (*Prunus persica* × *Prunus amygdalus*), con una densità di impianto di 4 × 3 m², corrispondente a una densità di 833 piante ha⁻¹. Secondo la Carta Pedologica della Regione Calabria, l'area rientra nella Provincia Pedologica 6, sottosistema pedologico 6.3 [19]. Le caratteristiche fisico-chimiche del terriccio sono riportate nella Tabella 1.

Tabella 1. Proprietà fisico-chimiche del suolo (0–30 cm) nel sito sperimentale.

Parametri	Valore (media ± SE)	Unità di misura
argilla	31,16 ± 0,65	%
sabbia totale	34,76 ± 1,35	%
pH	7,80 ± 0,05	-
sostanza organica	1,62 ± 0,08	%
conducibilità elettrica	0,30 ± 0,03	mS cm ⁻¹
capacità di scambio cationico (CSC)	20,02 ± 1,68	meq 100 g ⁻¹
densità apparente	1,23 ± 0,03	g cm ⁻³

Il clima della zona è di tipo mediterraneo (Csa secondo la classificazione di Köppen-Geiger), una variante del clima temperato, caratterizzato da estati calde e secche e da precipitazioni concentrate nei mesi invernali. Durante la stagione vegetativa, la temperatura media mensile raggiunge il suo massimo in luglio (28,0 °C) e il suo minimo in gennaio (11,8 °C) [20]. Le precipitazioni si concentrano principalmente nei mesi invernali. È stata effettuata un'analisi termopluviometrica dell'area utilizzando il diagramma di Bagnouls e Gausson, utile per una rappresentazione visiva immediata del regime termopluviometrico mensile. I mesi in cui il diagramma delle precipitazioni si trova al di sotto del diagramma delle temperature sono considerati aridi; in caso contrario, sono considerati umidi (Figura 1).

2.2. Disegno sperimentale

L'area sperimentale è stata suddivisa in blocchi randomizzati, per un totale di quattro blocchi (replicati). Ciascun blocco comprendeva quattro trattamenti: TNT — controllo non trattato; TCL — trattamento con caolino; TPB — trattamento con Farina di Basalto®; TZL — trattamento con zeolite. Ciascun trattamento comprendeva 5 piante per blocco, per un totale di 20 piante per trattamento. I materiali schermanti sono stati applicati utilizzando uno irroratore a pressione alle dosi raccomandate dai rispettivi produttori, assicurando una copertura uniforme: Kaolin Surround WP (Serbios Srl, Rovigo, Italia) alla dose di 5 kg/hL; Farina di Basalto® (Basalti Orvieto Srl, Terni, Italia) a 3 kg/hL; e zeolite (Hydro Fert Srl, Barletta, Italia) a 1,5 kg/hL. La zeolite applicata in questo studio era un prodotto minerale naturale a base di clinoptilolite (0–25 µm), con una capacità di scambio cationico misurata di 161 cmol(+) kg⁻¹. La zeolite è un alluminosilicato presente in natura ampiamente impiegato in agricoltura grazie alla sua elevata capacità di scambio cationico e alla struttura porosa, che migliorano la ritenzione idrica del suolo e la disponibilità di nutrienti. È considerata un materiale sicuro e inerte, senza evidenza di effetti fitotossici o ecotossici se applicata alle dosi agronomiche raccomandate. La sua sicurezza è stata confermata dalle autorità di regolamentazione [21] ed è ben documentata nella letteratura scientifica, che descrive le zeoliti naturali come materiali ecocompatibili con una lunga storia di utilizzo agricolo [22,23].

Le applicazioni sono state effettuate nei seguenti stadi fenologici: BBCH 69, 71 e 73–75.

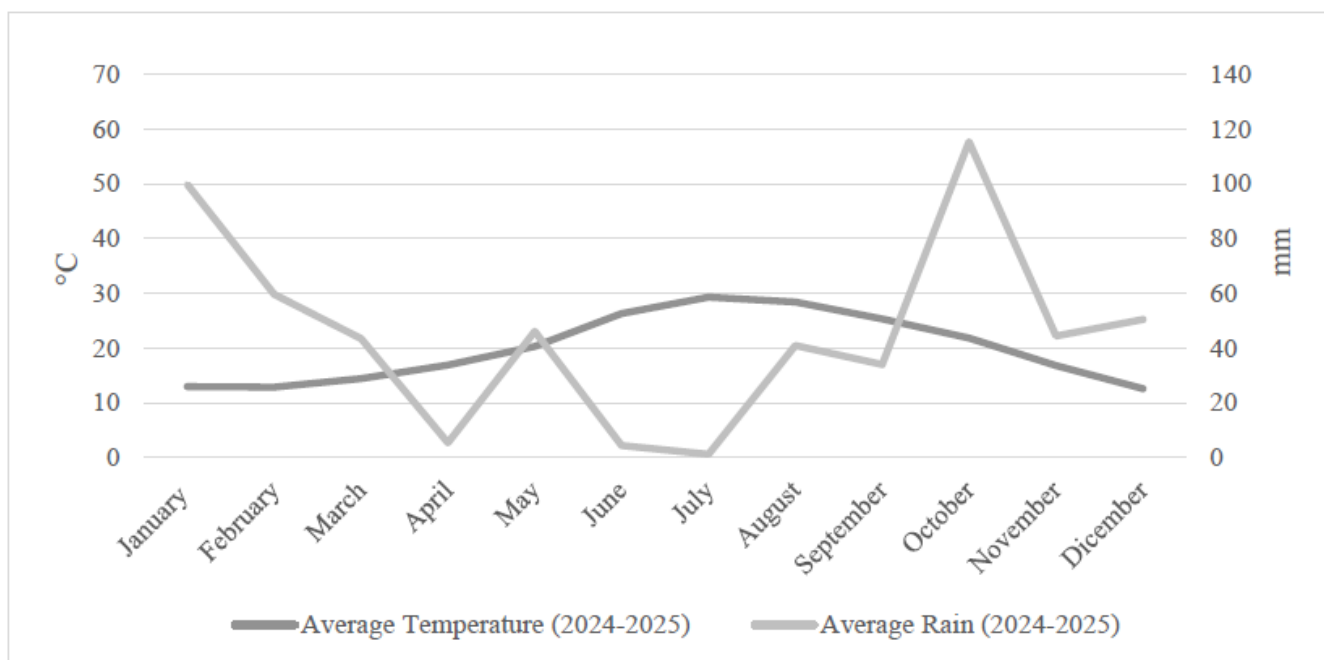


Figura 1 Climogramma di Bagnouls-Gausson relativo al mandorleto situato a Bianco (Italia meridionale) basato sui dati relativi alla temperatura e alle precipitazioni registrati durante la stagione vegetativa 2024-2025 [20].

2.3. Misurazioni fisiologiche

2.3.1. Scambi gassosi e misurazioni fluorimetriche

Le misurazioni fisiologiche sono state effettuate ogni 30 giorni a partire dalla prima applicazione dei trattamenti schermanti. Per ciascun trattamento sperimentale sono state selezionate 3 foglie mature per pianta, per un totale di 15 foglie per trattamento per blocco. Sono state scelte foglie completamente espanse ed esposte al sole, situate nella porzione mediana dei germogli dell'anno in corso, per garantire l'uniformità dello stato fisiologico. Lo scambio gassoso, la temperatura fogliare e la fluorescenza della clorofilla sono stati misurati utilizzando un sistema portatile di scambio gassoso a flusso aperto (LI-COR 6400XT, Lincoln, NE, USA) dotato di una camera fogliare standard e di un fluorimetro integrato (Leaf Chamber Fluorometer 6400-40, Lincoln, NE, USA). La concentrazione di CO₂ di riferimento nella camera è stata mantenuta a 400 ppm, con una portata d'aria di 500 μmol s⁻¹ e una radiazione fotosinteticamente attiva (PAR) di 1500 μmol m⁻² s⁻¹ fornita dalla sorgente LED rosso-blu integrata. Le misurazioni della fluorescenza hanno seguito il protocollo standard, che includeva luce modulata (ML), un impulso di luce saturante, luce attinica (300 μmol m⁻² s⁻¹), un secondo impulso saturante e un impulso di luce nel rosso lontano (30 μmol m⁻² s⁻¹, 720-730 nm), consentendo la determinazione della fluorescenza minima e massima delle foglie adattate alla luce (F₀' e F_m').

Durante le misurazioni della fluorescenza, la radiazione fotosinteticamente attiva (PAR) fornita dal fluorimetro è stata impostata a 1500 μmol m⁻² s⁻¹ per garantire un completo adattamento alla luce.

L'efficienza quantica massima del PSII in condizioni di adattamento alla luce (F_v'/F_m') è stata calcolata secondo i protocolli standard, dove F_v' = F_m' - F', e F_v'/F_m' esprime l'efficienza dei centri di reazione del PSII aperti. Il

coefficiente di quenching fotochimico (qP) è stato determinato come:

$$qP = \frac{F'_m - F'}{F'_m - F'_0}$$

e riflette lo stato redox del plastochinone QA, fornendo informazioni sulla percentuale di centri di reazione del PSII aperti. L'indice di quenching non fotochimico (NPQ) è stato calcolato come:

$$NPQ = \frac{F_m - F'_m}{F'_m}$$

e rappresenta la dissipazione dell'energia in eccesso sotto forma di calore. La velocità di trasporto degli elettroni (ETR) è stata stimata utilizzando la seguente equazione:

$$ETR = \Phi_{PSII} \times PPFD \times \alpha$$

dove Φ_{PSII} è la resa quantica effettiva del PSII, PPFD è la densità del flusso fotonico fotosintetico sulla superficie fogliare e α è il prodotto dell'assorbanza fogliare e della distribuzione dei quanti assorbiti tra PSI e PSII (ipotizzata pari a 0,5). Tutte le misurazioni sono state effettuate tra le 10:00 e le 12:00 in condizioni ambientali stabili per ridurre al minimo la variabilità diurna. Per ogni pianta sono state misurate tre foglie e per l'analisi statistica è stato utilizzato il valore medio. La sorgente luminosa nella camera fogliare era costituita da LED che emettevano a 630 nm (90%) e 470 nm (10%).

2.3.2. Indice SPAD

Il contenuto di clorofilla delle foglie è stato stimato indirettamente misurando l'indice SPAD mediante un clorofillometro SPAD-502 (Konica Minolta, Osaka, Giappone). Le misurazioni SPAD sono state effettuate sulle stesse foglie completamente sviluppate ed esposte al sole utilizzate per le analisi dello scambio gassoso e fluorometriche, immediatamente dopo le misurazioni fotosintetiche, al fine di garantire la coerenza dello stato fisiologico delle foglie e delle condizioni ambientali.

2.3.3. Determinazione del contenuto di clorofilla e carotenoidi nelle foglie

Le analisi dei pigmenti sono state effettuate su 3 foglie completamente sviluppate per pianta, per un totale di 15 foglie per trattamento per blocco (n = 60 foglie per trattamento). Ogni campione è stato analizzato in triplicato in ciascuna data di campionamento corrispondente alle misurazioni fisiologiche.

Le analisi dei pigmenti sono state effettuate sulle stesse foglie completamente sviluppate ed esposte al sole su cui erano state condotte le letture SPAD, le misurazioni dello scambio gassoso e le valutazioni della fluorescenza clorofilliana, garantendo la coerenza tra tutte le valutazioni fisiologiche e biochimiche. I contenuti di clorofilla e carotenoidi sono stati determinati secondo il metodo [24]. Un campione di 0,5 g di tessuto fogliare fresco è stato

omogeneizzato con 10 mL di acetone all'80% (v/v) e filtrato attraverso carta da filtro Whatman. Il volume finale dell'estratto è stato portato a 15 mL. L'assorbanza della soluzione è stata misurata a 470, 646,8 e 663,2 nm utilizzando uno spettrofotometro UV-VIS (Lambda 35, Perkin Elmer, Shelton, CT, USA).

I contenuti di clorofilla a (Chl a), clorofilla b (Chl b), clorofilla totale (TChl) e carotenoidi (Car) sono stati calcolati utilizzando le seguenti equazioni:

$$\text{Chl a} = 12.25 \times A_{663.2} - 2.79 \times A_{646.8}$$

$$\text{Chl b} = 21.50 \times A_{646.8} - 5.10 \times A_{663.2}$$

$$\text{TChl} = \text{Chl a} + \text{Chl b}$$

$$\text{Car} = (1000 \times A_{470} - 1.82 \times \text{Chl a} - 85.02 \times \text{Chl b})/198$$

I risultati sono stati espressi in mg/g di peso fresco.

2.4. Determinazione dei parametri morfometrici e qualitativi dei frutti

Sono state effettuate analisi morfometriche e qualitative su 15 frutti per trattamento per blocco (n = 60 frutti per trattamento). Ogni frutto è stato misurato singolarmente e tutte le analisi sono state condotte in triplicato alla data della raccolta.

2.4.1. Determinazione del peso fresco della frutta

Il peso fresco (FW) è stato determinato utilizzando una bilancia elettronica (Mettler-Toledo GmbH, Greifensee, Svizzera), e la buccia, l'epicarpo e il seme sono stati pesati separatamente. La resa in semi è stata calcolata come rapporto tra il peso dei semi e il peso del frutto intero ed espressa in percentuale.

2.4.2. Determinazione del contenuto di sostanza secca dei frutti

Il contenuto di sostanza secca è stato determinato ponendo campioni dei vari trattamenti (circa 10 g) in un forno (Binder EED240, Tuttlingen, Germania) a una temperatura costante di 70 °C fino al raggiungimento del peso costante. Il contenuto di sostanza secca è stato espresso in percentuale e calcolato utilizzando il seguente rapporto:

$$\% \text{ ss} = (\text{Peso secco})/(\text{Peso fresco}) \times 100$$

2.4.3. Estrazione delle sostanze grasse dalla frutta

Il contenuto di grassi dal frutto è stato determinato utilizzando un estrattore Soxhlet (modello E-812/816, BUCHI Corporation, Flawil, Svizzera) con etere di petrolio come solvente di estrazione. Circa 10 g di nocciolo macinato sono stati sottoposti a 6 cicli di estrazione (1 ora), seguiti da una fase di lavaggio di 15 minuti e da una fase di essiccazione di 5 minuti. L'olio recuperato è stato quantificato gravimetricamente ed espresso in percentuale del peso del nocciolo secco.

2.4.4. Analisi degli esteri metilici degli acidi grassi presenti nella frutta

Gli esteri metilici degli acidi grassi sono stati determinati su campioni di olio estratti secondo la procedura descritta nella Sezione 2.4.3 [25]. In breve, un'aliquota dell'olio estratto è stata sottoposta a transesterificazione alcalina utilizzando una soluzione metanolica di idrossido di potassio. Dopo la separazione delle fasi, lo strato superiore di esano contenente gli esteri metilici degli acidi grassi (FAME) è stato raccolto, essiccato e trasferito in fiale per la successiva analisi gascromatografica.

2.4.5. Contenuto totale di polifenoli nella frutta

Le analisi nutraceutiche (TPC) sono state effettuate su 15 frutti per trattamento per blocco (n = 60 frutti per trattamento). I frutti sono stati omogeneizzati per ottenere un campione composito per ciascuna replica e tutte le analisi sono state eseguite in triplicato alla data di raccolta. I campioni sono stati omogeneizzati utilizzando un frullatore Ultraturrax (20.000 giri/min; T 25 Basic, IKA Werke, Staufen, Germania). Prima della misurazione, è stata preparata una curva di calibrazione standard. Il TPC è stato determinato utilizzando il metodo Folin-Ciocalteu [26] ed espresso in milligrammi di equivalenti di acido gallico per grammo di peso fresco (mg GAE g⁻¹ FW). Le letture spettrofotometriche sono state effettuate utilizzando uno spettrofotometro Lambda 35 (Perkin Elmer Corporation, Waltham, MA, USA).

2.4.6. Capacità antiossidante totale della frutta

La capacità antiossidante totale (TAC) è stata valutata sugli stessi campioni di frutta utilizzati per l'analisi del TPC. Dopo l'omogeneizzazione, la TAC è stata misurata utilizzando il test modificato della capacità antiossidante equivalente al Trolox (TEAC) [27,28]. I risultati sono stati espressi in micromoli di equivalenti di Trolox per grammo di peso fresco ($\mu\text{mol TE g}^{-1}$ FW). Il test TEAC ha tenuto conto sia del contributo degli antiossidanti idrofili che di quelli lipofili [29]. Le misurazioni sono state effettuate utilizzando uno spettrofotometro Lambda 35 (Perkin Elmer Corporation, USA), con curve standard preparate per ogni analisi. Per ogni ciclo analitico è stata preparata una curva di calibrazione del Trolox diluendo in serie una soluzione madre di Trolox per ottenere standard compresi nell'intervallo 0–1000 μM . Ciascuno standard è stato fatto reagire con il reagente ABTS•+, e l'assorbanza è stata registrata a 734 nm per generare una curva di calibrazione lineare, che è stata successivamente utilizzata per interpolare i valori dei campioni.

2.5. Analisi statistica

Tutti i dati sono stati analizzati mediante analisi della varianza a due vie (ANOVA) per valutare gli effetti del trattamento (controllo non trattato, caolino, Farina di Basalto® e zeolite), dell'anno (2024 e 2025) e della loro interazione (Trattamento \times Anno). Quando sono stati rilevati effetti significativi ($p \leq 0,05$), è stata eseguita la separazione delle medie utilizzando il test HSD (Honest Significant Difference) di Tukey. Le analisi statistiche sono state condotte utilizzando SPSS v.22.0 (IBM Corp., Armonk, NY, USA). È stata eseguita un'analisi delle componenti

principali (PCA) per esplorare le relazioni multivariate tra i trattamenti e per identificare le variabili che contribuiscono maggiormente alla differenziazione del trattamento. L'analisi si è basata sulla matrice di correlazione delle variabili standardizzate (punteggi z). Sono state mantenute le componenti con autovalori > 1 e sono state considerate influenti le variabili con carichi $\geq |0,60|$. La distribuzione dei trattamenti e i contributi delle variabili sono stati interpretati utilizzando grafici dei punteggi e dei carichi. La PCA è stata eseguita utilizzando XLSTAT 2014 (Addinsoft, New York, NY, USA).

3. Risultati

3.1. Fluorescenza della clorofilla

L'efficienza quantica massima, espressa come rapporto Fv'/Fm' , era più elevata nel gruppo sperimentale trattato con Farina di Basalto® e caolino (rispettivamente $0,648 \pm 0,02$ e $0,647 \pm 0,01$), mentre le piante trattate con zeolite hanno mostrato valori vicini a $0,578 \pm 0,01$ e le piante non trattate hanno mostrato i valori più bassi ($0,491 \pm 0,02$) (Tabella 2). Anche per questo indice fluorometrico le differenze erano statisticamente significative, con il trattamento di controllo che mostrava i valori più bassi ($0,145 \pm 0,13$) (Tabella 2). Il gruppo sperimentale trattato con materiali schermanti ha mostrato le migliori prestazioni, con valori pari a $0,161 \pm 0,15$ (TCL), $0,162 \pm 0,14$ (TPB) e $0,158 \pm 0,09$ (TZL) (Tabella 2). Il trattamento TPB ha mostrato i valori di qP più elevati ($0,267 \pm 0,01$), mentre le piante non trattate hanno mostrato i valori più bassi ($0,231 \pm 0,02$). Valori meno marcati sono stati registrati per i trattamenti TCL ($0,253 \pm 0,01$) e TZL ($0,261 \pm 0,02$) (Tabella 2); nel test condotto, questo indice non ha mostrato differenze statisticamente significative tra i diversi gruppi sperimentali (Tabella 2). I valori di ETR ottenuti hanno mostrato differenze statisticamente significative tra i gruppi sperimentali. Infatti, le piante della varietà Tuono, protette con caolino ($153.441 \mu\text{mol elettroni m}^{-2} \text{s}^{-1} \pm 3,78$), così come la Farina di Basalto® ($156.705 \mu\text{mol di elettroni m}^{-2} \text{s}^{-1} \pm 2,17$) e la zeolite, hanno mostrato valori significativamente più elevati rispetto al trattamento di controllo ($99.567 \mu\text{mol di elettroni m}^{-2} \text{s}^{-1} \pm 2,54$) (Tabella 2).

3.2. Misurazioni fisiologiche e caratteristiche funzionali delle foglie

Durante le misurazioni fisiologiche, tutti i trattamenti hanno mostrato valori di An superiori rispetto al controllo. I valori più elevati sono stati registrati per il trattamento TCL (Tabella 3), che erano superiori del 25% rispetto al TCN; tuttavia, non sono state osservate differenze significative per questo parametro tra il TCL e gli altri trattamenti. Una tendenza simile è stata osservata per un altro importante parametro fisiologico misurato: la conduttanza stomatica (gs). Infatti, il gs era circa due volte superiore negli alberi trattati rispetto al TCN; in particolare, i valori vanno dal valore più alto di circa $0,100 \mu\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1} \pm 0,01$ (TCL) al valore più basso di circa $0,082 \mu\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1} \pm 0,01$ (TPB) (Tabella 3), ma erano significativamente più alti rispetto al controllo, che presentava un valore di circa $0,060 \mu\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (Tabella 3). L'applicazione di prodotti riflettenti ha avuto una chiara influenza sulla temperatura fogliare dei mandorli. Le foglie non trattate (controllo) hanno mostrato la temperatura più alta, raggiungendo i $34,31 \text{ }^\circ\text{C}$, indicando un maggiore assorbimento della radiazione solare e una minore capacità di riflessione. Al

contrario, i trattamenti con caolino e Farina di Basalto® hanno determinato una significativa riduzione della temperatura fogliare (Tabella 3). Anche il trattamento con zeolite ha prodotto una leggera diminuzione della temperatura fogliare (33,78 °C), sebbene l'effetto fosse meno pronunciato rispetto a quello osservato con il caolino e la Farina di Basalto® (Tabella 3), suggerendo una minore efficienza riflettente. I parametri sopra citati sono stati influenzati dall'anno dell'esperimento, con conseguenti valori più bassi; non sono state osservate differenze significative solo per il Ci. Non è stata rilevata alcuna interazione anno × trattamento. L'indice SPAD ha mostrato valori più elevati nelle piante trattate rispetto a quelle non trattate. Inoltre, non è stato osservato alcun effetto dell'anno (Tabella 3).

Tabella 2 Effetti dei trattamenti fogliari con materiali schermanti a base minerale sugli indici di fluorescenza del *Prunus dulcis*. Fv'/Fm' = efficienza massima del PSII allo stato di adattamento alla luce; qP = quenching fotochimico; PhiPS2 = resa quantica effettiva del PSII; NPQ = quenching non fotochimico; ETR = velocità di trasporto degli elettroni.

Treatment	Fv'/Fm'	qP	PhiPS2	NPQ	ETR ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)
TNT	0.49 ^c	0.23 ^c	0.14 ^b	2.37 ^{n.s.}	99.57 ^b
TCL	0.65 ^a	0.25 ^b	0.16 ^a	2.31	153.44 ^a
TPB	0.65 ^a	0.27 ^a	0.16 ^a	2.30	156.70 ^a
TZL	0.58 ^b	0.26 ^b	0.16 ^a	2.20	150.89 ^a
Mean ± SD	0.59 ± 0.07	0.25 ± 0.02	0.15 ± 0.01	2.30 ± 0.07	140.15 ± 24.03
T	***	**	**	n.s.	***
Y	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
T × Y	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.

Le diverse lettere minuscole all'interno di una colonna indicano differenze significative tra i trattamenti (test di Tukey, $p \leq 0,05$). «n.s.» = non significativo. T = effetto del trattamento; Y = effetto dell'anno; T × Y = effetto di interazione. Livelli di significatività: ** $p \leq 0,01$; *** $p \leq 0,001$.

Tabella 3 Effetti dei trattamenti fogliari con materiali schermanti a base minerale sui parametri di scambio gassoso del *Prunus dulcis*. An = Tasso di assimilazione netta ($\mu\text{mol CO}_2 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$); gs = conduttanza stomatica ($\mu\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$); Ci = concentrazione intercellulare di CO₂ (ppm); E = tasso di traspirazione ($\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$); LT = temperatura fogliare (°C); SPAD = indice di clorofilla.

Treatment	An ($\mu\text{mol CO}_2 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	gs ($\mu\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	Ci (ppm)	E ($\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	LT (°C)	SPAD
TNT	8.00 ^b	0.05 ^b	190.17 ^{n.s.}	0.88 ^b	34.31 ^a	47.76 ^b
TCL	10.00 ^a	0.10 ^a	192.73	1.99 ^a	32.70 ^b	48.78 ^a
TPB	9.87 ^a	0.08 ^a	189.34	1.98 ^a	32.52 ^b	49.67 ^a
TZL	9.65 ^a	0.09 ^a	188.34	1.88 ^a	33.78 ^b	48.54 ^a
Mean ± SD	9.38 ± 0.82	0.08 ± 0.02	190.15 ± 1.83	1.43 ± 0.55	33.33 ± 0.82	48.69 ± 0.79
T	*	*	n.s.	*	*	*
Y	*	*	n.s.	*	*	n.s.
T × Y	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.

Le lettere minuscole diverse all'interno di una colonna indicano differenze significative tra i trattamenti (test di Tukey, $p \leq 0,05$). «n.s.» = non significativo. T = effetto del trattamento; Y = effetto dell'anno; T × Y = effetto di interazione. Livelli di significatività: * $p \leq 0,05$.

I dati presentati nella tabella 4 evidenziano l'effetto dei diversi materiali di schermatura sul contenuto fogliare dei pigmenti fotosintetici, tra cui la clorofilla a, la clorofilla b, la clorofilla totale e i carotenoidi. Il controllo non trattato (TNT) ha costantemente mostrato i valori più bassi per tutti i parametri, confermando il ruolo protettivo dei materiali di schermatura contro lo stress foto-ossidativo indotto dall'eccessiva radiazione solare. I trattamenti con caolino (TCL) e Farina di Basalto® (TPB) si sono rivelati particolarmente efficaci nel preservare l'integrità dell'apparato fotosintetico. Entrambi i trattamenti hanno determinato tenori significativamente più elevati di clorofilla a (rispettivamente $7,919 \pm 0,13$ e $8,011 \pm 0,29$ mg g⁻¹ di peso fresco) e clorofilla b ($8,111 \pm 0,09$ e $7,993 \pm 0,11$ mg g⁻¹ di peso fresco), superiori di circa il 25% rispetto al controllo. Il trattamento con zeolite (TZL) è risultato significativamente meno efficace rispetto a TCL e TPB, sebbene abbia comunque aumentato i contenuti di clorofilla a e b rispettivamente del 7% e del 14% rispetto al controllo (Tabella 4).

Il contenuto totale di clorofilla ha raggiunto valori massimi simili nei campioni TCL e TPB (rispettivamente $16,131 \pm 0,14$ e $16,124 \pm 0,88$ mg g⁻¹ di peso fresco), confermando un effetto complessivamente benefico sul sistema fotosintetico. Il contenuto totale di carotenoidi ha seguito un andamento coerente con quello delle clorofille, con valori significativamente più elevati in TCL ($2,223 \pm 0,21$ mg g⁻¹ FW) e TPB ($2,172 \pm 0,23$ mg g⁻¹ FW), che rappresentano un aumento del 24% rispetto a TNT. Anche la zeolite ha mostrato valori inferiori rispetto a TCL e TPB, ma era comunque superiore dell'11% rispetto al controllo (Tabella 4).

Tabella 4 Effetti dei trattamenti fogliari con materiali schermanti a base minerale sulla composizione pigmentaria delle foglie di mandorlo (*Prunus dulcis*). Chl a = clorofilla a; Chl b = clorofilla b; TChl = clorofilla totale; Car = carotenoidi totali. Tutti i valori sono espressi in mg g⁻¹ di peso fresco.

Treatment	Chlorophyll a (mg g ⁻¹ FW)	Chlorophyll b (mg g ⁻¹ FW)	Total Chlorophyll (mg g ⁻¹ FW)	Total Carotenoids (mg g ⁻¹ FW)
TNT	6.53 ^c	6.13 ^c	12.47 ^c	1.79 ^c
TCL	7.92 ^a	8.11 ^a	16.13 ^a	2.22 ^a
TPB	8.01 ^a	7.99 ^a	16.12 ^a	2.17 ^a
TZL	7.13 ^b	6.97 ^b	14.1 ^b	1.99 ^b
Mean ± SD	7.40 ± 0.67	7.30 ± 0.86	14.71 ± 1.63	2.04 ± 0.18
T	*	*	*	*
Y	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
T × Y	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.

Le diverse lettere minuscole all'interno di una colonna indicano differenze significative tra i trattamenti (test di Tukey, $p \leq 0,05$). «n.s.» = non significativo. T = effetto del trattamento; Y = effetto dell'anno; T × Y = effetto di interazione. Livelli di significatività: * $p \leq 0,05$.

3.3. Parametri morfometrici e qualitativi

I risultati presentati nella tabella 5 dimostrano l'influenza significativa dei trattamenti di schermatura a base di caolino, Farina di Basalto® e zeolite sui principali parametri morfometrici e qualitativi delle drupe di *Prunus dulcis* rispetto al controllo non trattato. I trattamenti con caolino e Farina di Basalto® hanno determinato un aumento

simile e statisticamente significativo di circa il 30% nel peso delle drupe rispetto al controllo. Anche la zeolite ha indotto un effetto positivo, sebbene relativamente modesto, con un aumento del 12% del peso fresco rispetto al controllo. L'analisi delle tre frazioni del frutto, mallo, guscio e seme, ci ha permesso di identificare quale componente abbia risposto maggiormente ai trattamenti.

Per quanto riguarda il peso fresco dei semi, nei frutti trattati è stata osservata una tendenza generale all'aumento, con differenze statisticamente significative rispetto al controllo. I trattamenti con caolino e Farina di Basalto®, che hanno mostrato valori statisticamente simili, hanno determinato un aumento del 21–22% del peso fresco medio dei semi rispetto al controllo. Anche la zeolite ha prodotto un aumento significativo del peso fresco dei semi, sebbene inferiore rispetto agli altri due trattamenti, con un incremento del 12% rispetto al controllo (Tabella 5). Una tendenza simile è stata osservata per il guscio. Sia il caolino che la Farina di Basalto® hanno aumentato il peso del guscio in modo simile, con un aumento del 14% rispetto al controllo. Il trattamento con zeolite ha determinato un aumento statisticamente inferiore rispetto agli altri due trattamenti, ma comunque superiore del 5% rispetto al controllo (Tabella 5). Infine, è stata osservata una chiara differenziazione per quanto riguarda il mallo. I trattamenti con caolino e Farina di Basalto® hanno mostrato aumenti di peso statisticamente simili, con il caolino che ha determinato un aumento del 14% e la Farina di Basalto® del 12% rispetto al controllo. Il trattamento con zeolite ha determinato un aumento più modesto di circa il 7% (Tabella 5).

Tabella 5 Effetti dei trattamenti fogliari con materiali schermanti a base minerale sui principali caratteri morfobiometrici dei frutti di *Prunus dulcis*. ADW = peso medio fresco della drupa; AHW = peso medio fresco del guscio; ASW = peso medio fresco del guscio esterno; AKW = peso medio fresco del nocciolo; KY = resa in nocciolo; DM = sostanza secca; OY = resa in olio; PY = resa produttiva.

Treatment	ADW (g)	AHW (g)	ASW (g)	AKW (g)	KY (%)	DM (%)	OY (%)	PY (Kg)
TNT	17.74 ^c	10.39 ^c	8.33 ^c	2.58 ^c	30.97 ^b	54.66 ^b	42.53 ^b	7.13 ^c
TCL	23.40 ^a	13.59 ^a	9.49 ^a	3.15 ^a	33.17 ^a	59.71 ^a	44.78 ^a	9.45 ^a
TPB	22.14 ^a	13.05 ^a	9.17 ^a	3.00 ^a	32.74 ^a	57.68 ^a	45.88 ^a	9.11 ^a
TZL	19.96 ^b	12.16 ^b	8.83 ^b	2.88 ^b	32.64 ^a	56.28 ^a	43.99 ^a	8.33 ^b
Mean ± SD	20.81 ± 2.42	12.30 ± 1.32	8.96 ± 0.49	2.90 ± 0.24	32.38 ± 0.94	57.08 ± 2.14	44.30 ± 1.43	8.51 ± 0.97
T	***	***	***	***	n.s.	**	**	*
Y	*	n.s.	*	n.s.	n.s.	*	*	*
T × Y	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.

Le diverse lettere minuscole all'interno di una colonna indicano differenze significative tra i trattamenti (test di Tukey, $p \leq 0,05$). «n.s.» = non significativo. T = effetto del trattamento; Y = effetto dell'anno; T × Y = effetto di interazione. Livelli di significatività: * $p \leq 0,05$; ** $p \leq 0,01$; *** $p \leq 0,001$.

Un indicatore chiave per la valutazione della qualità produttiva è la resa in nocciolo, che ha mostrato un miglioramento statisticamente significativo in tutti i trattamenti rispetto al controllo. Il valore massimo è stato registrato con il trattamento al caolino (33,175%), statisticamente simile a quello ottenuto con la Farina di Basalto®, sebbene quest'ultima abbia mostrato un valore medio leggermente inferiore.

Il trattamento alla zeolite ha registrato la resa in nocciolo più bassa tra i trattamenti, sebbene fosse comunque significativamente superiore a quella del controllo. Particolarmente degni di nota sono i risultati ottenuti per il contenuto di sostanza secca e la resa in olio nel nocciolo, due parametri cruciali per la trasformazione industriale. Il contenuto di sostanza secca nel nocciolo era significativamente più elevato nei frutti trattati, con un aumento fino a circa 5 punti percentuali rispetto al controllo. Il trattamento con caolino ha registrato il valore più alto (59,71%), seguito dalla Farina di Basalto®, che ha mostrato un valore leggermente inferiore ma statisticamente simile. Anche la zeolite ha determinato un aumento della percentuale di sostanza secca rispetto al controllo; sebbene il valore ottenuto fosse significativamente inferiore rispetto agli altri due trattamenti, era comunque statisticamente superiore al controllo (Tabella 5).

Una tendenza simile è stata osservata per la resa in olio, con i valori più elevati nel trattamento con caolino, seguito dalla Farina di Basalto® e dalla zeolite, tutti con valori statisticamente superiori al controllo, sebbene senza differenze significative tra i trattamenti (Tabella 5).

L'analisi dei dati produttivi evidenzia differenze significative tra i vari trattamenti applicati ai mandorli. Il controllo non trattato (TNT) ha registrato la resa più bassa, pari a 7,132 kg per albero, rappresentando il livello di riferimento per la valutazione dell'efficacia dei materiali minerali utilizzati. Tutti i trattamenti a base di polveri minerali hanno mostrato un aumento della resa rispetto al controllo, con intensità variabile a seconda del tipo di materiale applicato (Tabella 5). Il trattamento con caolino (TCL) ha raggiunto la resa più elevata, pari a 9,451 kg per albero, dimostrandosi il più efficace nel migliorare la produzione. Una tendenza simile è stata osservata con la Farina di Basalto® (TPB), che ha raggiunto una resa di 9,332 kg per albero, molto vicina a quella del caolino. Il trattamento con zeolite (TZL) ha prodotto una resa meno marcata di 8,332 kg per albero, superiore al controllo ma inferiore a quella del caolino e della Farina di Basalto® (Tabella 5). Nel complesso, i risultati indicano che i trattamenti minerali hanno portato a un aumento della resa rispetto al controllo, compreso tra il 17% e il 32% circa. Tuttavia, non è stata registrata alcuna interazione significativa ($Y \times T$) per nessun parametro (Tabella 5).

3.4. Parametri nutraceutici

L'analisi dei dati riportati nella tabella 5 ci ha permesso di valutare l'effetto di diversi prodotti di protezione sul contenuto totale di polifenoli (TPC) e sulla capacità antiossidante totale (TAC) delle mandorle. I risultati relativi al contenuto totale di polifenoli hanno mostrato valori molto simili per tutti i trattamenti, con fluttuazioni che vanno da $83.444 \pm 0,11$ mg GAE 100 g^{-1} (TZL) a $85.901 \pm 0,38$ mg GAE 100 g^{-1} (TPB) (Tabella 6). Le analisi statistiche non hanno evidenziato differenze significative tra i gruppi. Ciò suggerisce che i prodotti di protezione testati non hanno indotto cambiamenti apprezzabili nell'accumulo di polifenoli totali all'interno dei semi di mandorla in queste specifiche condizioni sperimentali. Analogamente, l'esame della capacità antiossidante totale ha rivelato comportamenti simili. I valori registrati variavano da $3998 \pm 0,91$ $\mu\text{mol Trolox g FW}$ (TPB) a $4745 \pm 0,88$ $\mu\text{mol Trolox g FW}$ (TCL). Sia per la TAC che per la TPC, sono stati osservati valori più bassi durante il primo anno; tuttavia, non è stata rilevata alcuna interazione anno \times trattamento (Tabella 6).

Tabella 6 Effetti dei trattamenti fogliari con sostanze protettive a base minerale sul contenuto totale di polifenoli (TPC) e sulla capacità antiossidante totale (TAC) nei semi di mandorla (*Prunus dulcis*). TPC = contenuto totale di polifenoli (mg GAE per 100 g di peso fresco); TAC = capacità antiossidante totale (μmol di Trolox per g di peso fresco).

Treatment	TPC (mg GAE 100 g ⁻¹)	TAC (μmol Trolox g FW)
TNT	84.33 n.s.	4.22 n.s.
TCL	85.23	4.74
TPB	85.90	3.99
TZL	83.44	4.56
Mean ± SD	84.73 ± 1.03	4.38 ± 0.32
T	n.s.	n.s.
Y	n.s.	n.s.
T × Y	n.s.	n.s.

3.5. Analisi della composizione degli acidi grassi

L'analisi rivela un profilo lipidico estremamente omogeneo in tutti i campioni esaminati.

La caratteristica dominante di questo olio è l'altissima concentrazione di acidi grassi insaturi, in particolare acido oleico e acido linoleico (Tabella 7). L'acido oleico è il componente principale, rappresentando oltre i due terzi della composizione totale. Le percentuali sono notevolmente stabili, oscillando tra il 71,28% (TCL) e il 71,32% (TPB) (Tabella 7). Subito dopo l'acido oleico in termini di concentrazione si trova l'acido linoleico, un acido grasso polinsaturo. La sua concentrazione rimane costantemente intorno al 19%, variando dal 19,24% (TZL) al 19,34% (TNT) (Tabella 7). Tra gli altri acidi grassi insaturi, è degno di nota l'acido palmitoleico, con percentuali comprese tra lo 0,54% e lo 0,58%. L'acido eptadecenoico e l'acido eicosenoico sono presenti in tracce, rispettivamente intorno allo 0,08–0,09% e allo 0,07–0,08%. Gli acidi grassi saturi occupano una porzione minore, ma significativa, del profilo totale. Il più abbondante è l'acido palmitico, con valori che si attestano intorno al 6%, variando dal 6,00% (TNT) al 6,15% (TZL) (Tabella 7).

Diversi acidi grassi sono presenti in concentrazioni molto basse, spesso inferiori allo 0,10%. Tra questi vi è l'acido miristico, che è costantemente presente in tutti i campioni allo 0,02%. L'acido eptadecanoico viene rilevato stabilmente allo 0,05%. L'acido arachidico varia tra lo 0,02 e lo 0,04%. L'acido gamma-linolenico si trova tra lo 0,07% e lo 0,10%. Infine, gli acidi a catena lunga come l'acido behenico e l'acido lignoceric sono presenti in quantità minime, rispettivamente allo 0,01% e tra lo 0,02% e lo 0,03% (Tabella 7).

Tabella 7 Profilo degli acidi grassi, espresso come composizione percentuale degli esteri metilici degli acidi grassi, per quattro diversi campioni di olio di mandorle (TCL, TZL, TPB e TNT).

Methyl Esters of Fatty Acids (%)	Treatment			
	TCL	TZL	TPB	TNT
C14:0—Miristic acid	0.02 ± 0.01	0.02 ± 0.01	0.02 ± 0.01	0.02 ± 0.01
C16:0—Palmitic acid	6.04 ± 0.48	6.15 ± 0.48	6.05 ± 0.48	6.00 ± 0.48
C16:1—Palmitoleic acid	0.55 ± 0.07	0.58 ± 0.07	0.54 ± 0.07	0.54 ± 0.07
C17:0—Heptadecanoic acid	0.05 ± 0.01	0.05 ± 0.01	0.05 ± 0.01	0.05 ± 0.01
C17:1—Heptadecenoic acid	0.09 ± 0.02	0.08 ± 0.02	0.09 ± 0.02	0.08 ± 0.02
C18:0—Stearic acid	2.43 ± 0.12	2.42 ± 0.12	2.43 ± 0.12	2.46 ± 0.12
C18:1—Oleic acid 71	71.28 ± 0.98	71.24 ± 0.98	71.32 ± 0.98	71.29 ± 0.98
C18:2—Linoleic acid omega 6	19.31 ± 0.24	19.24 ± 0.24	19.27 ± 0.24	19.34 ± 0.24
C20:0—Arachidic acid	0.02 ± 0.06	0.04 ± 0.06	0.04 ± 0.06	0.04 ± 0.06
C18:3—Gamma-linoleic acid	0.10 ± 0.06	0.07 ± 0.06	0.07 ± 0.06	0.07 ± 0.06
C20:1—Eicosenoic acid	0.08 ± 0.06	0.07 ± 0.06	0.08 ± 0.06	0.07 ± 0.06
C22:0—Behenic acid	0.01 ± 0.03	0.01 ± 0.03	0.01 ± 0.03	0.01 ± 0.03
C22:1—Erucic acid	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
C24:0—Lignoceric acid	0.02 ± 0.04	0.03 ± 0.04	0.02 ± 0.04	0.03 ± 0.04
C18:1T—Total trans-oleic isomers	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
C18:2T+C18:3T—Total trans-linoleic + trans-linolenic isomers	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01

L'analisi statistica non ha evidenziato differenze significative per gli effetti principali del trattamento (T) e dell'anno (Y) né per la loro interazione (T × Y) in tutte le composizioni di acidi grassi. Ciò indica che le variazioni osservate tra i quattro trattamenti, o tra i due anni di analisi, sono minime e non statisticamente significative.

3.6. Analisi multivariata: analisi delle componenti principali

I dati sono stati sottoposti ad analisi delle componenti principali (PCA), con l'obiettivo di studiare le relazioni tra le variabili originali al fine di individuare un nuovo insieme, più ridotto, che esprimesse i tratti comuni tra gli elementi originari. La distribuzione degli autovalori illustrata nella Figura 2 fornisce un ulteriore supporto alla solidità della struttura della PCA. Il forte calo osservato tra la prima e la seconda componente, seguito da un chiaro punto di flesso, indica che solo le prime due componenti principali hanno un potere esplicativo sostanziale, mentre le componenti rimanenti contribuiscono marginalmente alla varianza totale.

Questo andamento è coerente con un set di dati ben strutturato in cui le principali fonti di variabilità sono concentrate in un numero limitato di dimensioni ortogonali. Il fatto che PC1 e PC2 insieme rappresentino una grande proporzione della varianza conferma che la risposta multivariata dei mandorli ai trattamenti minerali è dominata da cambiamenti coordinati nell'efficienza fotosintetica, nella regolazione termica e nei tratti legati alla resa. I valori di \cos^2 riportati nella tabella 8 chiariscono ulteriormente il contributo e l'affidabilità di ciascuna variabile all'interno dello spazio PCA. I valori elevati di \cos^2 per Fv'/Fm', PhiPS2, ETR, conduttanza stomatica e temperatura fogliare indicano che queste variabili sono fortemente correlate alle componenti principali e sono, pertanto, ben rappresentate nella dimensione ridotta della PCA. Ciò conferma che i parametri fotosintetici e termici

sono i fattori principali alla base della separazione tra i trattamenti.

Al contrario, le variabili con valori di \cos^2 inferiori contribuiscono in misura minore alla definizione degli assi PCA, suggerendo che la loro variabilità sia più diffusa o meno direttamente influenzata dai trattamenti minerali. La forte rappresentazione di tratti sia fisiologici che produttivi nelle prime due componenti rafforza l'interpretazione secondo cui gli effetti del caolino e della Farina di Basalto® sono multidimensionali e coerenti tra i domini funzionali. I valori di \cos^2 riportati nella Tabella 9 forniscono informazioni importanti sulla qualità della rappresentazione di ciascun trattamento all'interno dello spazio PCA. Valori elevati di \cos^2 indicano che la posizione di un trattamento su una data componente principale è affidabile e fortemente associata alla struttura sottostante dei dati. Nella nostra analisi, TCL e TPB hanno mostrato i valori \cos^2 più elevati su PC1 e PC2, confermando che questi trattamenti sono ben spiegati dalle principali fonti di varianza e sono fortemente associati ai miglioramenti fisiologici e morfobiometrici rilevati dalle prime due componenti. Ciò è coerente con le loro prestazioni superiori in termini di efficienza fotosintetica, riduzione della temperatura fogliare e caratteristiche di resa.

Il TZL ha mostrato valori di \cos^2 intermedi, suggerendo che il suo profilo multivariato sia solo parzialmente allineato con la struttura di varianza dominante. Ciò riflette la sua influenza moderata ma positiva su diverse variabili, senza la risposta forte e coordinata osservata per il caolino e la Farina di Basalto®. Al contrario, il controllo non trattato (TNT) ha mostrato valori di \cos^2 inferiori sulle prime componenti, indicando un'associazione più debole con i principali gradienti fisiologici e produttivi identificati dalla PCA. Questo andamento è prevedibile, poiché il controllo non presenta gli effetti riflettenti o termoregolatori indotti dai trattamenti minerali e, pertanto, occupa una posizione più periferica nello spazio multivariato.

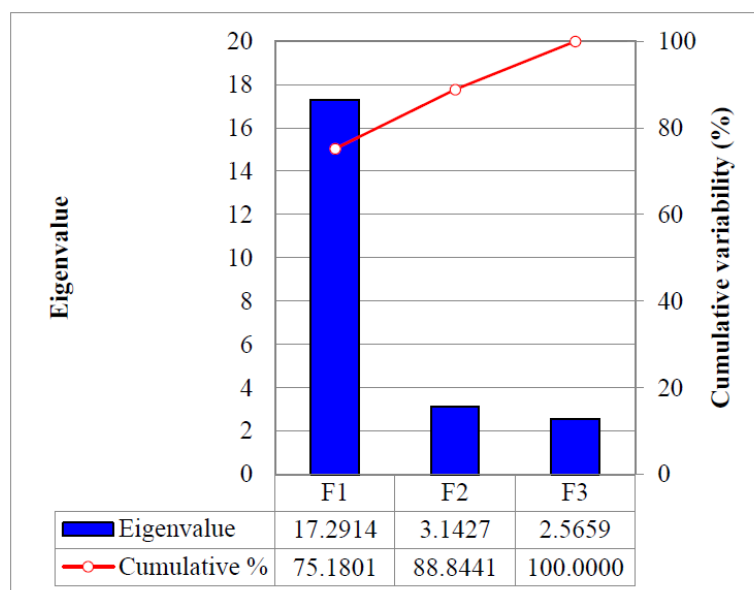


Figura 2. Autovalori e percentuale di varianza spiegata dalle componenti principali ricavate da variabili fisiologiche, morfometriche e biochimiche nei mandorli sottoposti a trattamenti di schermatura minerale.

L'analisi PCA multivariata ha fornito una visione d'insieme delle relazioni tra le variabili fisiologiche, morfobiometriche e biochimiche, consentendo un'interpretazione più chiara degli effetti del trattamento al di là dei confronti univariati. Nel nostro studio, le prime due componenti principali hanno spiegato una parte sostanziale della varianza totale, indicando che il set di dati era fortemente strutturato e che i trattamenti hanno generato modelli multivariati coerenti. La PC1 era associata principalmente a variabili legate alle prestazioni fotosintetiche e alla regolazione termica, quali F_v'/F_m' , PhiPS2, ETR, conduttanza stomatica e temperatura fogliare, evidenziando il forte contributo del caolino e della Farina di Basalto® al miglioramento dell'efficienza fotochimica e alla riduzione del carico termico della chioma. La PC2 era determinata principalmente da tratti morfobiometrici, tra cui il peso della drupa, la sostanza secca del nocciolo e la resa produttiva, separando ulteriormente i trattamenti ad alte prestazioni (caolino e Farina di Basalto®) dal controllo. La zeolite occupava una posizione intermedia nello spazio PCA, riflettendo la sua influenza moderata ma positiva sia sui parametri fisiologici che su quelli produttivi. Il chiaro raggruppamento dei trattamenti e i forti carichi delle variabili chiave confermano che i materiali a base minerale esercitano effetti coordinati sulla fisiologia delle piante e sulla formazione della resa, a sostegno dell'interpretazione secondo cui i loro benefici sono sistemici piuttosto che limitati a tratti isolati. Questi risultati sono in linea con studi precedenti secondo cui l'analisi delle componenti principali (PCA) è particolarmente efficace nel distinguere le risposte fisiologiche indotte dal trattamento in condizioni di stress abiotico. Nel complesso, i risultati della PCA confermano la conclusione secondo cui il caolino e la Farina di Basalto® apportano i miglioramenti più consistenti in molteplici aspetti funzionali delle prestazioni dei mandorli sotto stress termico mediterraneo (Figura 3).

Tabella 8 Valori Cos^2 delle variabili fisiologiche, morfometriche e biochimiche relative alle prime tre componenti principali (F1, F2 e F3) ottenute dall'analisi PCA effettuata su mandorli sottoposti a trattamenti di schermatura minerale.

Variables	F1	F2	F3
AN	0.9472	0.0356	0.0172
gs	0.7817	0.1864	0.0319
Ci	0.0863	0.0254	0.8882
E	0.8930	0.0571	0.0499
SPAD	0.1628	0.6973	0.1398
Fv'/Fm'	0.9876	0.0118	0.0006
qP	0.6825	0.0084	0.3091
PhiPS2	0.9577	0.0056	0.0367
NPQ	0.1624	0.5304	0.3072
ETR	0.8963	0.0370	0.0667
ADW	0.9583	0.0050	0.0367
AHW	0.9920	0.0003	0.0077
ASW	0.9424	0.0000	0.0576
AKW	0.9668	0.0060	0.0272
KY	0.9419	0.0579	0.0003
DM	0.8509	0.0002	0.1488
Oil yield	0.8389	0.0879	0.0732
Chl a	0.9672	0.0320	0.0009
Chl b	0.9597	0.0325	0.0078
Tot Chl	0.9608	0.0378	0.0015
Tot Car	0.9798	0.0100	0.0103
TPC	0.3063	0.6689	0.0249
TAC	0.0689	0.6092	0.3219

Tabella 9 Valori Cos^2 dei trattamenti (TNT, TCL, TPB e TZL) per le prime tre componenti principali ottenute dall'analisi PCA effettuata sulle variabili fisiologiche, morfometriche e biochimiche dei mandorli sottoposti a trattamenti di schermatura minerale.

Treatment	F1	F2	F3
TNT	0.0158	0.9735	0.0106
TCL	0.7355	0.0092	0.2553
TPB	0.5626	0.2930	0.1444
TZL	0.0080	0.7575	0.2345

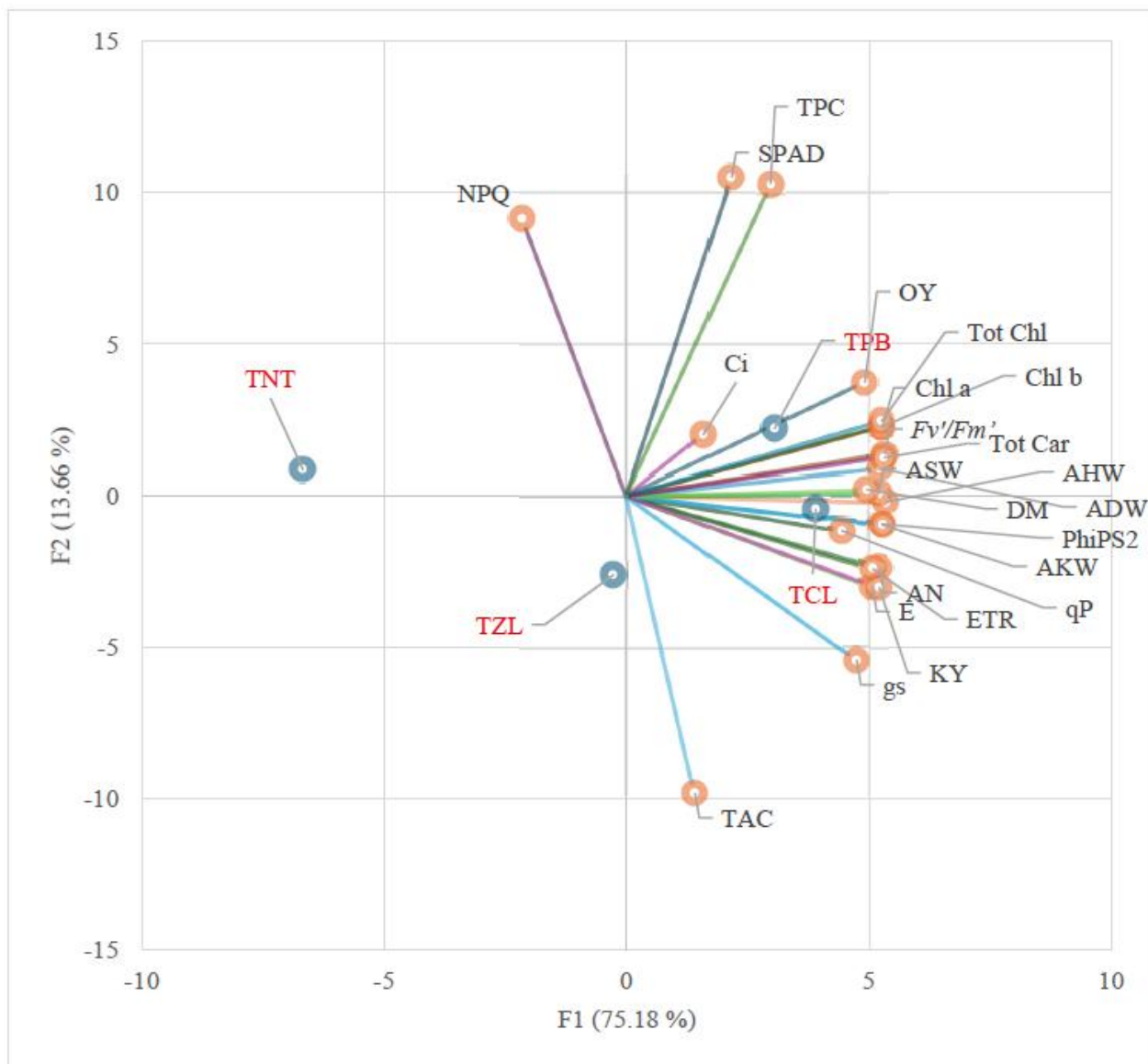


Figura 2 Analisi delle componenti principali (PCA) delle variabili fisiologiche, morfometriche e biochimiche nei mandorli sottoposti a trattamenti di schermatura minerale

4. Discussione

L'applicazione di materiali schermanti quali caolino, Farina di Basalto® e zeolite ha influenzato in modo significativo le prestazioni fisiologiche e produttive del *Prunus dulcis* in condizioni climatiche mediterranee. Questi risultati sono in linea con un numero crescente di evidenze che dimostrano come i film di particelle riflettenti attenuino gli effetti negativi del calore eccessivo e dell'irraggiamento solare sul metabolismo delle piante, migliorando così il bilancio idrico e l'efficienza fotosintetica [30–32]. Risposte positive simili all'applicazione del caolino sono state riportate in climi di tipo mediterraneo, inclusi studi condotti in Portogallo [33] e in California [34], dove i mandorli trattati con caolino hanno mostrato un aumento delle rese cumulative di noccioli (316–545 kg ha⁻¹) e una riduzione della caduta dei germogli rispetto ai controlli non trattati. Nel presente studio, il trattamento con caolino ha determinato un aumento della resa del 30% rispetto al controllo, leggermente superiore a quello riportato in California,

riflettendo probabilmente le differenze nelle condizioni climatiche locali e nell'intensità dello stress.

È stata osservata una riduzione della temperatura fogliare nelle piante trattate con caolino e Farina di Basalto® (fino a -1,8 °C rispetto al controllo), a indicare un minore assorbimento della radiazione solare dovuto alla maggiore riflettanza nelle regioni del visibile e del vicino infrarosso (NIR) [35]. Questo effetto termoregolatorio è coerente con i risultati precedentemente riportati per la vite (*Vitis vinifera* L.), l'olivo (*Olea europaea* L.), il melo (*Malus domestica* L.) e le specie di agrumi [15,36–41]. Riducendo il carico di energia termica sui tessuti fogliari, i materiali riflettenti contribuiscono a mantenere un'attività enzimatica ottimale e a ritardare l'insorgenza della fotoinibizione indotta dal calore [42]. Inoltre, l'applicazione di polvere di caolino e Farina di Basalto® ha favorito un aumento dei tassi fotosintetici netti (An) e della conduttanza stomatica (gs), suggerendo una maggiore capacità di scambio gassoso in condizioni di stress. Queste risposte avvalorano l'ipotesi secondo cui i rivestimenti riflettenti migliorano la regolazione stomatica e l'assimilazione di CO₂ quando le piante sono esposte a un'elevata intensità luminosa e a temperature elevate [43]. I miglioramenti nell'efficienza del PSII (Fv'/Fm') e nella velocità di trasporto degli elettroni (ETR) indicano ulteriormente il mantenimento della stabilità fotochimica, rafforzando il ruolo protettivo dei materiali schermanti contro lo stress foto-ossidativo. Le concentrazioni più elevate di pigmenti fotosintetici (clorofilla a, clorofilla b e carotenoidi) rilevate nelle piante trattate con caolino e basalto confermano ulteriormente la conservazione dell'apparato fotosintetico. Il mantenimento del contenuto di clorofilla sotto un'intensa radiazione solare suggerisce che questi rivestimenti riducano efficacemente la degradazione dei pigmenti causata dalle specie reattive dell'ossigeno (ROS), come osservato in precedenza nell'olivo e nella vite [44,45]. Inoltre, i carotenoidi hanno probabilmente svolto un ruolo chiave nella fotoprotezione dissipando l'energia di eccitazione in eccesso attraverso il quenching non fotochimico (NPQ), prevenendo così il foto-danno indotto dalla luce [46,47].

Questi benefici fisiologici si sono tradotti in un aumento della produttività, con incrementi significativi del peso fresco dei frutti, della resa in polpa e del contenuto di olio osservati nei trattamenti con caolino e Farina di Basalto®, a riprova della loro efficacia nel sostenere la produttività in condizioni di stress ambientale. Il miglioramento della resa, che ha raggiunto fino al +32% rispetto al controllo, può essere attribuito alla stabilizzazione dei processi fotosintetici e a una più efficiente allocazione degli assimilati, in accordo con precedenti studi condotti sull'olivo [44] e sulla vite [48,49].

Le differenze tra i materiali schermanti possono essere in parte spiegate dalle loro proprietà ottiche e strutturali. Il caolino presenta un'elevata riflettanza nelle regioni spettrali del visibile e del NIR grazie al suo colore chiaro, al basso contenuto di ossido di ferro e alla granulometria fine, caratteristiche ampiamente documentate per i film particellari a base di caolinite [50]. Al contrario, le zeoliti naturali mostrano generalmente un'efficienza di riflettanza inferiore [51], principalmente a causa della loro struttura cristallina microporosa e delle caratteristiche di assorbimento associate all'acqua strutturale e alle impurità ferrosi [52]. La Farina di Basalto®, nonostante il suo albedo intrinsecamente più basso legato alla sua composizione mafica e ricca di ferro, è caratterizzata da un

comportamento di diffusione stabile e diffuso, come riportato per le superfici basaltiche [53], che può comunque fornire una parziale schermatura dalle radiazioni quando applicata come rivestimento superficiale. Queste differenze spiegano probabilmente perché gli effetti benefici della zeolite osservati in questo studio sono stati relativamente più lievi rispetto a quelli ottenuti con il caolino e la Farina di Basalto®.

È interessante notare che non sono state rilevate variazioni significative nella composizione biochimica dei noccioli di mandorla, inclusi i polifenoli totali, la capacità antiossidante e il profilo degli acidi grassi. Ciò indica che, sebbene i trattamenti di schermatura migliorino la crescita vegetativa e le prestazioni fisiologiche, non alterano la qualità nutraceutica intrinseca dei frutti. Risultati analoghi sono stati riportati per il mango [54] e l'oliva [44], dove le pellicole riflettenti hanno migliorato la funzionalità fogliare senza influire sulla composizione chimica dei prodotti raccolti.

Oltre alle risposte fisiologiche e produttive, nella valutazione dell'idoneità dei materiali schermanti per la gestione dei frutteti sono fondamentali considerazioni di ordine pratico. Il caolino è tra i materiali minerali più utilizzati nelle colture da frutto grazie alla sua ampia disponibilità in commercio, alla facilità di applicazione, al costo relativamente contenuto e al profilo di sicurezza ben documentato. La sua efficacia nel ridurre il carico termico della chioma e nel migliorare le condizioni microclimatiche è stata dimostrata in numerosi studi agronomici [30,36,37]. La Farina di Basalto®, sempre più utilizzata come ammendante a base di polvere di roccia, è generalmente accessibile nelle regioni con un'industria estrattiva attiva ed è considerata conveniente, sebbene la sua disponibilità e il suo prezzo possano variare a seconda della zona. Inoltre, il suo impatto ambientale è minimo, poiché deriva da rocce silicatiche naturali e contribuisce ai processi di remineralizzazione del suolo [55]. La zeolite, pur essendo ecocompatibile e caratterizzata da un'elevata capacità di scambio cationico, è in genere più costosa per unità di massa e può richiedere una micronizzazione più dispendiosa in termini energetici, il che può limitarne l'applicazione su larga scala [21,22].

Infine, l'analisi multivariata delle componenti principali (PCA) ha fornito una panoramica integrata delle relazioni tra variabili ecofisiologiche e produttive. I trattamenti con caolino e Farina di Basalto® sono risultati strettamente associati a parametri indicativi di elevata efficienza fotosintetica (Fv'/Fm' , ETR, An) e produttività (resa in cariossidi e resa in olio). La netta separazione di questi trattamenti dal controllo nel biplot della PCA supporta la conclusione che i materiali riflettenti migliorano la resilienza dei mandorli allo stress combinato da calore e irradiazione elevata, mantenendo un equilibrio funzionale tra intercettazione della luce, dissipazione del calore e assimilazione del carbonio.

Una valutazione economica preliminare indica che l'utilizzo di materiali di protezione minerale potrebbe rappresentare una valida opzione di gestione per i mandorleti in condizioni mediterranee. Sulla base dei dosaggi di applicazione adottati in questo studio e dell'aumento di resa osservato, pari a circa il 30% rispetto agli alberi non trattati, i costi stimati sono stati di circa 80-90 euro per ettaro per il caolino e di 100-120 euro per ettaro per la

Farina di Basalto®, includendo sia i costi dei materiali che quelli di applicazione. In base a queste ipotesi, i ricavi aggiuntivi derivanti dall'aumento di resa consentirebbero di recuperare l'investimento entro una singola stagione di crescita. Tuttavia, queste stime derivano da un esperimento su scala pilota condotto in condizioni del Mediterraneo meridionale e la loro affidabilità economica a lungo termine dovrebbe essere convalidata su più stagioni. Studi futuri dovrebbero inoltre valutare l'efficacia di questi materiali in scenari di siccità estrema e valutare la fattibilità tecnica ed economica di un sistema di irrorazione meccanizzato su larga scala.

5. Conclusioni

Questo studio dimostra che il caolino e la Farina di Basalto® sono i materiali minerali più efficaci e a basso impatto ambientale per mitigare lo stress da calore e radiazione nei mandorleti in condizioni mediterranee. Entrambi i trattamenti hanno costantemente migliorato l'efficienza fotosintetica, ridotto la temperatura fogliare e favorito lo sviluppo di drupe e gherigli, determinando in definitiva i maggiori incrementi di resa produttiva. Anche la zeolite ha esercitato effetti positivi, seppur in misura minore, confermando il suo potenziale ma evidenziandone la relativa bassa efficacia.

La novità di questo lavoro risiede nella prima valutazione comparativa integrata, della durata di due anni, di caolino, Farina di Basalto® e zeolite applicati a mandorli, combinando analisi fisiologiche, morfobiometriche, biochimiche e multivariate all'interno di un unico quadro sperimentale. Dimostrando che i materiali di schermatura possono migliorare la resilienza del mandorleto senza alterare la qualità nutraceutica dei frutti, questo studio fornisce nuove prove a supporto dell'utilizzo di materiali sostenibili e a basso impatto per contrastare lo stress indotto dal clima nei sistemi di produzione di frutta secca mediterranei. Da un punto di vista pratico, il caolino è da preferire nelle zone con terreni argillosi, mentre la Farina di Basalto® è consigliata per i terreni sabbiosi. Questi materiali dovrebbero essere applicati prima dell'inizio della stagione delle piogge per massimizzare l'efficacia in condizioni di stress termico moderato. Questi risultati contribuiscono alle conoscenze attuali chiarendo le prestazioni relative dei diversi materiali minerali e identificando il caolino e la Farina di Basalto® come gli strumenti più promettenti per migliorare la produttività delle mandorle in condizioni ambientali sempre più difficili.

Contributi degli autori: Ideazione, G.G. e A.D.; metodologia, G.G. e A.D.; software, G.G. e A.D.; validazione, G.G., A.D. e R.Z.; analisi formale, G.G. e A.D.; indagine, G.G. e A.D.; risorse, R.Z.; cura dei dati, G.G. e A.D.; stesura della bozza originale, G.G. e A.D.; revisione e modifica, G.G. e A.D.; visualizzazione, G.G. e A.D.; supervisione, R.Z.; amministrazione del progetto, R.Z.; acquisizione dei finanziamenti, R.Z. Tutti gli autori hanno letto e approvato la versione pubblicata del manoscritto.

Finanziamento: Questo studio è stato realizzato con il supporto finanziario del Programma di Sviluppo Rurale (PSR) Calabria 2014-2020, Misura 16 – “Cooperazione”, Sottomisura 16.2.1 – “Sostegno a progetti pilota e allo sviluppo di nuovi prodotti, pratiche, processi e tecnologie nei settori agroalimentare e forestale”. Codice progetto: CUP E37H24001820009.

Dichiarazione sulla disponibilità dei dati: I contributi originali presentati in questo studio sono inclusi nell'articolo. Ulteriori richieste possono essere indirizzate all'autore corrispondente.

Ringraziamenti: Desideriamo ringraziare l'azienda agricola CR FARM di Teresa Catanzariti per la disponibilità e il supporto forniti durante le attività di ricerca, nonché la GAL Terre Locridee.

Conflitti di interesse: Gli autori dichiarano di non avere conflitti di interesse.

6. Riferimenti

- [1]. Velasco, D.; Hough, J.; Aradhya, M.; Ross-Ibarra, J. Evolutionary Genomics of Peach and Almond Domestication. *G3 Genes | Genomes | Genet.* 2016, 6, 3985–3993. [CrossRef] [PubMed]
- [2]. Sanchez-Perez, R.; Pavan, S.; Mazzeo, R.; Moldovan, C.; Cigliano, R.A.; Del Cueto, J.; Ricciardi, F.; Lotti, C.; Ricciardi, L.; Dicenta, F.; et al. Mutation of a bHLH Transcription Factor Allowed Almond Domestication. *Science* 2019, 364, 1095–1098. [CrossRef]
- [3]. Zohary, D.; Hopf, M. *Domestication of Plants in the Old World: The Origin and Spread of Cultivated Plants in West Asia, Europe and the Nile Valley*, 3rd ed.; Oxford University Press: Oxford, UK, 2000.
- [4]. Perez de los Cobos, F.; Coindre, E.; Dlahah, N.; Quilot-Turion, B.; Batlle, I.; Arus, P.; Eduardo, I.; Duval, H. Almond Population Genomics and Non-Additive GWAS Reveal New Insights into Almond Dissemination History and Candidate Genes for Nut Traits and Blooming Time. *Hortic. Res.* 2023, 10, uhad193. [CrossRef]
- [5]. Delplancke, M.; Alvarez, N.; Benoit, L.; Espindola, A.H.I.J.; Joly, H.I.; Neuenschwander, S.; Arrigo, N. Evolutionary History of Almond Tree Domestication in the Mediterranean Basin. *Mol. Ecol.* 2013, 22, 1092–1104. [CrossRef]
- [6]. Yazbek, M.M.; Oh, S.-H. Peaches and Almonds: Phylogeny of *Prunus* subg. *Amygdalus* (Rosaceae) Based on DNA Sequences and Morphology. *Plant Syst. Evol.* 2013, 299, 1403–1418. [CrossRef]
- [7]. Barreca, D.; Nabavi, S.M.; Sureda, A.; Rasekhian, M.; Raciti, R.; Silva, A.S.; Annunziata, G.; Arnone, A.; Tenore, G.C.; Sutar, I.; et al. Almonds (*Prunus Dulcis* Mill. D. A. Webb): A Source of Nutrients and Health-Promoting Compounds. *Nutrients* 2020, 12, 672. [CrossRef] [PubMed]
- [8]. Angelova, L. Bioavailability and Metabolism of Almond Components. *J. Food Sci. Nutr.* 2023, 7, 112–125. Available online: <https://www.alliedacademies.org/articles/bioavailability-and-metabolism-of-almond-components.pdf> (accessed on 8 January 2026).
- [9]. Singar, S.; Kadyan, S.; Patoine, C.; Park, G.; Arjmandi, B.; Nagpal, R. The Effects of Almond Consumption on Cardiovascular Health and Gut Microbiome: A Comprehensive Review. *Nutrients* 2024, 16, 1964. [CrossRef]
- [10]. FAOSTAT. Food and Agriculture Organization of the United Nations; FAOSTAT: Rome, Italy, 2023.
- [11]. CREA. Yearbook of Italian Agriculture 2023; Council for Agricultural Research and Agricultural Economics Analysis: Rome, Italy, 2024.
- [12]. Castel, J.R.; Fereres, E. Responses of Young Almond Trees to Two Drought Periods in the Field. *J. Hortic. Sci.* 1982, 57, 175–187. [CrossRef]
- [13]. Chaves, M.M.; Pereira, J.S.; Maroco, J.; Rodrigues, M.L.; Ricardo, C.P.P.; Osorio, M.L.; Carvalho, I.; Faria, T.; Pinheiro, C. How Plants Cope with Water Stress in the Field? Photosynthesis and Growth. *Ann. Bot.* 2002, 89, 907–916. [CrossRef]
- [14]. Egea, G.; Nortes, P.A.; Gonzalez-Real, M.M.; Baille, A.; Domingo, R. Agronomic Response and Water Productivity of Almond Trees under Contrasted Deficit Irrigation Regimes. *Agric. Water Manag.* 2010, 97, 171–181. [CrossRef]

- [15]. Glenn, D.M.; Cooley, N.; Walker, R.; Clingeffer, P.; Shellie, K. Impact of kaolin particle film and water deficit on wine grape water use efficiency and plant water relations. *HortScience* 2010, 45, 1178-1187. [CrossRef]
- [16]. Sharma, N.; Nagar, S.; Thakur, M.; Suriyakumar, P.; Kataria, S.; Shanker, A.K.; Landi, M.; Anand, A. Photosystems under High Light Stress: Throwing Light on Mechanism and Adaptation. *Photosynthetica* 2023, 61, 250-263. [CrossRef]
- [17]. Zandalinas, S.I.; Mittler, R. Vascular and nonvascular transmission of systemic reactive oxygen signals during wounding and heat stress. *Plant Physiol.* 2021, 186, 1721-1733. [CrossRef] [PubMed]
- [18]. Boari, F.; Donadio, A.; Schiattone, M.I.; Cantore, V. Particle film technology: A supplemental tool to save water. *Agric. Water Manag.* 2015, 147, 154-162. [CrossRef]
- [19]. ARSAC—Regional Agency for the Development of Calabrian Agriculture. SoilMap of the Calabria Region; ARSAC: Calabria, Italy, 2003.
- [20]. ARPACAL—Regional Agency for Environmental Protection of Calabria. Environmental Reports and Data of the Calabria Region; ARPACAL: Catanzaro, Italy, 2024.
- [21]. EFSA FEEDAP Panel. Scientific opinion on the safety and efficacy of clinoptilolite of sedimentary origin for all animal species. *EFSA J.* 2013, 11, 3107. [CrossRef]
- [22]. Mumpton, F.A. La roca magica: Uses of natural zeolites in agriculture and industry. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 1999, 96, 3463-3470. [CrossRef]
- [23]. Polat, E.; Karaca, M.; Demir, H.; Onus, A.N. Use of natural zeolite (clinoptilolite) in agriculture. *J. Fruit Ornam. Plant Res.* 2004, 12, 183-189.
- [24]. Lichtenthaler, H.K.; Wellburn, A.R. Determinations of Total Carotenoids and Chlorophylls a and b of Leaf Extracts in Different Solvents. *Biochem. Soc. Trans.* 1983, 11, 591-592. [CrossRef]
- [25]. International Olive Council (IOC). Method for the Determination of Oil Content in Olive Paste (Method: 0049 00/COI/T.20/Doc. No. 33/Rev. 1); IOC: Madrid, Spain, 2017.
- [26]. Slinkard, K.; Singleton, V.L. Total Phenol Analysis: Automation and Comparison with Manual Methods. *Am. J. Enol. Vitic.* 1997, 28, 49-55. [CrossRef]
- [27]. Pellegrini, N.; Re, R.; Yang, M.; Rice-Evans, C. Screening of Dietary Carotenoids and Carotenoid-Rich Fruit Extracts for Antioxidant Activities Applying the ABTS+ Radical Cation Decolorization Assay. *Methods Enzymol.* 1999, 299, 378-379. [CrossRef]
- [28]. Re, R.; Pellegrini, N.; Proteggente, A.; Pannala, A.; Yang, M.; Rice-Evans, C. Antioxidant Activity Applying an Improved ABTS Radical Cation Decolorization Assay. *Free Radic. Biol. Med.* 1999, 26, 1231-1237. [CrossRef]
- [29]. Scalzo, J.; Politi, A.; Pellegrini, N.; Mezzetti, B.; Battino, M. Plant genotype affects total antioxidant capacity and phenolic contents in fruit. *Nutrition* 2005, 21, 207-213. [CrossRef]
- [30]. Glenn, D.M.; Puterka, G.J. Particle Films: A New Technology for Agriculture. *Hortic. Rev.* 2005, 31, 1-44. [CrossRef]
- [31]. Cantore, V.; Pace, B.; Albrizio, R. Kaolin-Based Particle Film Technology Affects Tomato Physiology, Yield and Quality. *Environ. Exp. Bot.* 2009, 66, 279-288. [CrossRef]
- [32]. Brito, C.; Goncalves, A.; Silva, E.; Martins, S.; Pinto, L.; Rocha, L.; Arrobas, M.; Rodrigues, M.Â.; Moutinho-Pereira, J.; Correia, C.M. Kaolin foliar spray improves olive tree performance and yield under sustained deficit irrigation. *Sci. Hortic.* 2021, 277, 109795. [CrossRef]
- [33]. Barreales, D.; Capit.o, S.; Bento, A.A.; Casquero, P.A.; Ribeiro, A.C. Adapting Almond Production to Climate Change through Deficit Irrigation and Foliar Kaolin Application in a Mediterranean Climate. *Atmosphere* 2023, 14, 1593. [CrossRef]
- [34]. Holtz, B.A.; Martin-Duvall, T. Processed-kaolin particle film on almond and the effect on tree water status, growth, yield, and bud failure. *Acta Hortic.* 2012, 940, 257-261. [CrossRef]
- [35]. Rosati, A.; Metcalf, S.G.; Buchner, R.P.; Fulton, A.E.; Lampinen, B.D. Physiological Effects of Kaolin Applications in Well-Irrigated and Water-Stressed Walnut and Almond Trees. *Ann. Bot.* 2006, 98, 267-275. [CrossRef] [PubMed]
- [36]. Glenn, D.M. The Mechanisms of Plant Stress Mitigation by Kaolin-Based Particle Films and Applications in Horticultural and Agricultural Crops. *HortScience* 2012, 47, 710-711. [CrossRef]

- [37]. Jifon, J.L.; Syvertsen, J.P. Kaolin Particle Film Applications Can Increase Photosynthesis and Water Use Efficiency of 'Ruby Red' Grapefruit Leaves. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* 2003, 128, 107-112. [CrossRef]
- [38]. Valentini, G.; Pastore, C.; Allegro, G.; Muzzi, E.; Seghetti, L.; Filippetti, I. Application of Kaolin and Italian Natural Cha-basite-Rich Zeolite to Mitigate the Effect of Global Warming in *Vitis vinifera* L. cv. Sangiovese. *Agronomy* 2021, 11, 1035. [CrossRef]
- [39]. Gullo, G.; Dattola, A.; Vonella, V.; Zappia, R. Effects of Two Reflective Materials on Gas Exchange, Yield, and Fruit Quality of Sweet Orange Tree (*Citrus sinensis* L. Osb.). *Eur. J. Agron.* 2020, 118, 126071. [CrossRef]
- [40]. Gullo, G.; Dattola, A.; Vonella, V.; Zappia, R. The Improvement of Productive Performances of Clementine Trees (*Citrus clementina* Hort. Ex Tan.) Sprayed with Reflective Material. *Int. J. Fruit Sci.* 2020, 20, S1681-S1695. [CrossRef]
- [41]. Dattola, A.; Gullo, G. Effect of Two Reflective Materials on the Physiological and Production Behaviour of Bergamot (*Citrus bergamia* Risso et Poiteau) Plants. *Sci. Hortic.* 2024, 338, 113636. [CrossRef]
- [42]. Wunsche, J.N.; Lombardini, L.; Greer, D.H. 'Surround' Particle Film Applications-Effects on Whole Canopy Physiology of Apple. *Acta Hort.* 2002, 636, 565-571. [CrossRef]
- [43]. Dinis, L.T.; Malheiro, A.; Luzio, A.; Fraga, H.; Ferreira, H.; Goncalves, I.; Pinto, G.; Correia, C.; Moutinho-Pereira, J. Improvement of grapevine physiology and yield under summer stress by kaolin-foliar application: Water relations, photosynthesis and oxidative damage. *Photosynthetica* 2018, 56, 641-651. [CrossRef]
- [44]. Maletsika, P.A.; Nanos, G.D. Leaf and Fruit Responses to Kaolin Particle Film Applied onto Mature Olive Trees. *J. Biol. Agric. Healthc.* 2015, 7, 17-28.
- [45]. Garrido, A.; Serôdio, J.; De Vos, R.; Conde, A.; Cunha, A. Influence of Foliar Kaolin Application and Irrigation on Photosynthetic Activity of Grape Berries. *Agronomy* 2019, 9, 685. [CrossRef]
- [46]. Choudhury, N.K.; Behera, R.K. Photoinhibition of photosynthesis: Role of carotenoids in photoprotection of chloroplast constituents. *Photosynthetica* 2001, 39, 481-488. [CrossRef]
- [47]. Simkin, A.J.; Kapoor, L.; Doss, C.G.P.; Hofmann, T.A.; Lawson, T.; Ramamoorthy, S. The Role of Photosynthesis Related Pigments in Light Harvesting, Photoprotection and Enhancement of Photosynthetic Yield in Planta. *Photosynth. Res.* 2022, 152, 23-42. [CrossRef]
- [48]. Bernardo, S.; Dinis, L.-T.; Luzio, A.; Pinto, G.; Meijon, M.; Villedor, L.; Conde, A.; Geros, H.; Correia, C.M.; Moutinho-Pereira, J. Kaolin particle film application lowers oxidative damage and DNA methylation on grapevine (*Vitis vinifera* L.). *Environ. Exp. Bot.* 2017, 139, 39-47. [CrossRef]
- [49]. Brillante, L.; Belfiore, N.; Gaiotti, F.; Lovat, L.; Sansone, L.; Poni, S.; Tomasi, D. Comparing Kaolin and Pinolene to Improve Sustainable Grapevine Production during Drought. *PLoS ONE* 2016, 11, e0156631. [CrossRef]
- [50]. Glenn, D.M.; Puterka, G.J.; Drake, S.R.; Unruh, T.R.; Knight, A.L.; Baherle, P.; Prado, E.; Baugher, T.A. Particle film application influences apple leaf physiology, fruit yield, and fruit quality. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* 2001, 126, 175-181. [CrossRef]
- [51]. Rotondi, A.; Morrone, L.; Facini, O.; Faccini, B.; Ferretti, G.; Coltorti, M. Distinct particle films impacts on olive leaf optical properties and plant physiology. *Foods* 2021, 10, 1291. [CrossRef]
- [52]. Cloutis, E.A.; Asher, P.M.; Mertzman, S.A. Spectral reflectance properties of zeolites and remote sensing implications. *J. Geophys. Res.* 2002, 107, 5-1-5-19. [CrossRef]
- [53]. Adams, J.B. Interpretation of visible and near-infrared diffuse reflectance spectra of pyroxenes and other rock-forming minerals. In *Infrared and Raman Spectroscopy of Lunar and Terrestrial Minerals*; Academic Press: New York, NY, USA, 1975; pp. 91-116.
- [54]. Chamchaiyaporn, T.; Jutamanee, K.; Kasemsap, P.; Vaithanomsat, P.; Henpitak, C. Effects of Kaolin Clay Coating on Mango Leaf Gas Exchange, Fruit Yield and Quality. *Kasetsart J. Nat. Sci.* 2013, 47, 479-491.
- [55]. Luchese, A.V.; Pivetta, L.A.; Batista, M.A.; Steiner, F.; Giaretta, A.D.S.; Curtis, J.C.D. Agronomic feasibility of using basalt powder as soil nutrient remineralizer. *Afr. J. Agric. Res.* 2021, 17, 487-497. [CrossRef]

Dichiarazione di non responsabilità/Nota dell'editore: Le affermazioni, le opinioni e i dati contenuti in tutte le pubblicazioni sono esclusivamente quelli dei singoli autori e collaboratori e non di MDPI e/o dei redattori. MDPI

Comparazione dell'efficacia di caolino, Farina di Basalto® e zeolite nell'attenuare lo stress termico e nell'aumentare la resa dei mandorli (*Prunus dulcis*) in condizioni di clima mediterraneo

Pubblicato su *Agriculture* **2026**, 16(2), 220; <https://doi.org/10.3390/agriculture16020220>

e/o i redattori declinano ogni responsabilità per eventuali danni a persone o cose derivanti da idee, metodi, istruzioni o prodotti citati nel contenuto.