



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

**Dip. AGRONOMIA ANIMALI ALIMENTI RISORSE
NATURALI E AMBIENTE**

Dip. TERRITORIO E SISTEMI AGRO-FORESTALI

Corso di laurea in SCIENZE E TECNOLOGIE AGRARIE

**STUDIO E MODELLAZIONE DEL PROCESSO DI
ESSICCAZIONE PER NOCI IN GUSCIO**

RELATORE

Prof. Francesco Marinello

CORRELATORE

Prof. Lorenzo Guerrini

LAUREANDO

Giovanni Pippa

Matricola n. 1138268

ANNO ACCADEMICO 2021-2022

RIASSUNTO

In questo elaborato si affronta il tema dell'essiccamento a bassa temperatura delle noci. In particolare, si valuta la tecnica di essiccazione intermittente su noci, in guscio e sgusciate. Questa tecnica è stata confrontata con il processo essiccazione tradizionale continua, con lo scopo di verificare l'efficienza e la convenienza energetica di questo metodo alternativo. Si vuole verificare se la modalità di essiccazione intermittente è applicabile alla noce in guscio e se questo metodo risulta più o meno efficiente rispetto al metodo di essiccazione continuo. Al fine di compiere queste valutazioni, sono state utilizzate due diverse cultivar di noce, *Lara* e *Chandler*. Le noci sono state caratterizzate dal punto di vista fisico e le diverse cinetiche di essiccamento valutate alla luce delle diverse caratteristiche. Le prove di essiccamento sono state condotte su 2 esperimenti. Nel primo test sono state valutate in 3 repliche, 3 diverse modalità di essiccamento (continuo, 30 min intermittenza, 60 min intermittenza), con temperatura dell'aria di 38 °C, su noci in guscio. Nel secondo test, sono state valutate 2 diverse modalità di essiccamento (continuo e 30 min intermittenza) su noci in guscio e sgusciate. I risultati ottenuti indicano come l'essiccazione intermittente, pur impiegando un tempo maggiore per raggiungere l'umidità finale rispetto a quella continua, può ridurre il consumo di aria calda di circa 30% sia per le noci in guscio sia per le noci sgusciate, aumentando pertanto la sostenibilità del processo.

ABSTRACT

This thesis deals with the energetic issues of low-temperature drying of walnuts. Particularly, the intermittent drying technique on in-shell and shelled walnuts was evaluated. Intermittent drying was compared with the continuous drying process, chosen as benchmark, with the aim of verifying the energy efficiency and convenience of this alternative method. The work aimed to check if the intermittent drying method is suitable for in-shell walnuts evaluating hot air consumption compared to the continuous drying method. In order to make these evaluations, two different walnut cultivars, *Lara* and *Chandler*, were used. The walnuts were characterized for physical features and, following, the different drying kinetics were evaluated. The drying tests were carried out on 2 trials. In the first test, 3 different drying modes were evaluated in 3 replicates (continuous, 30 min intermittency, 60 min intermittency), with an air temperature of 38 ° C, on in-shell walnuts. In the second test, 2 different drying techniques (continuous and 30 min intermittency) were evaluated on in-shell and shelled walnuts. The obtained results indicate that intermittent drying, while taking a longer time to reach the final humidity than continuous drying, can reduce hot air consumption by approximately 30% for both shelled and in-shell walnuts, increasing the sustainability of the process.

SOMMARIO

RIASSUNTO.....	3
ABSTRACT.....	4
SOMMARIO	5
Capitolo 1: INTRODUZIONE.....	7
1.1 Coltivazione del noce in Italia.....	7
1.2 Parametri qualitativi della noce	7
1.3 Processo di trasformazione della noce	8
1.4 Metodi di essiccazione della noce	11
1.5 Essiccamento intermittente	12
Capitolo 2: SCOPO DELLA TESI	13
Capitolo 3: MATERIALI E METODI	14
3.1 Materiali.....	14
3.2 Descrizione dell'esperimento.....	14
Capitolo 4: RISULTATI E DISCUSSIONE	19
4.1 Caratterizzazione noci	19
4.2 Essiccamento intermittente	23
4.3 Considerazioni sull'impianto visitato	29
Capitolo 5: CONCLUSIONI	31
Capitolo 6: RINGRAZIAMENTI	32
Capitolo 7: BIBLIOGRAFIA	33

Capitolo 1: INTRODUZIONE

1.1 Coltivazione del noce in Italia

Il noce da frutto è un prodotto importante nella tradizione italiana grazie alle sue qualità caloriche e nutritive. L'Italia, infatti, presenta territori vocati e diverse varietà uniche, tanto che prima degli anni '70 il nostro paese era autosufficiente e il terzo produttore mondiale. Oggi l'Italia, in seguito all'aumento dei consumi di noci intere o soprattutto sgusciate e alla mancata modernizzazione degli impianti, è il dodicesimo produttore mondiale e un grande importatore di noci: si consumano circa 600 g/anno di gherigli pro-capite, con importazioni che aumentano circa dell'11% ogni anno. (Calcagni, 2019)

La maggior parte dei nuovi impianti segue i progressi ottenuti dagli altri paesi, piantando soprattutto cultivar americane, in quanto presentano rese più elevate, vigoria più contenuta delle piante e maggiore resistenza rispetto alle vecchie varietà locali. Questo permette una completa meccanizzazione del noceto. La varietà più diffusa in Italia è *Chandler*, una cultivar californiana con gemme laterali molto produttive. Altre varietà impiegate sono: *Howard*, *Tulare*, *Lara*, *Franquette*.

1.2 Parametri qualitativi della noce

Il Regolamento (CE) n.175/2001 della Commissione Europea stabilisce degli standard minimi di qualità, calibro, tolleranze, presentazioni e indicazioni presenti sulle confezioni che contengono noci. Sono distinti due tipi di noci: le noci fresche con umidità maggiore del 20%, e le noci secche, adatte a essere conservate, con umidità del gheriglio minore dell'8% (p.u.) o del 12% (p.u.) considerando anche il guscio. Le noci sono poi classificate in tre categorie di qualità: extra, di prima e di seconda categoria. Le noci di qualità extra sono completamente prive di difetti, al contrario della prima categoria in cui vengono

accettati più difetti ma in modo tale da non variare le caratteristiche organolettiche e fisiche del prodotto. Nelle noci di seconda categoria sono contenute tutte quelle al di fuori delle categorie precedenti.

Questi difetti, che determinano la qualità della noce, si possono trovare sul guscio, come alterazioni, danni provocati da parassiti e residui di mallo, o sono localizzati sul gheriglio, come presenza di insetti, attacchi di parassiti, irrancidimenti, aspetto oleoso o presenza di muffe; odori, sapori e colori diversi dalla normalità.

1.3 Processo di trasformazione della noce

Prima della commercializzazione la noce deve subire una serie di trattamenti che le permettono di essere conservata e poter essere facilmente commercializzata. Le noci durante queste lavorazioni transitano attraverso diverse macchine, che le puliscono dalla terra, dai residui di mallo e di vegetazione che vengono portati in azienda insieme al prodotto. Dopo essere passate per un controllo a cura degli operatori che eliminano i rami più grossi, la prima macchina in cui vengono inserite le noci consiste in una lavatrice che le pulisce eliminando terra e residui di vegetazione. Successivamente avviene la smallatura, un'operazione che, tramite attrezzature meccaniche molto aggressive e getti d'acqua, separa le noci dal mallo. Dopo una seconda lavatrice che elimina tutti i residui di mallo, anche quelli più piccoli, avviene una selezione (manuale o elettronica) con lo scopo di eliminare la parte di prodotto con difetti. Infine le noci fresche vengono portate in essiccatoio. (Amirante, 2018).

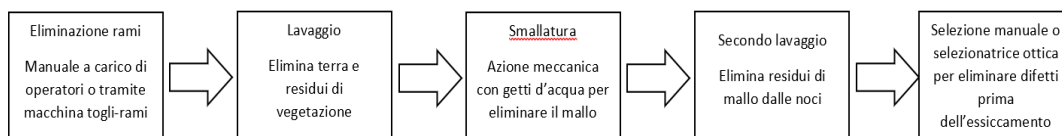


Figura 1: schema del processo di prima trasformazione della noce.

Durante la mia attività di tesi ho avuto il piacere di visitare la Società Agricola Porto Felloni (Lagosanto – FE), una realtà all'avanguardia, sia dal punto di vista dell'agricoltura di precisione sia dal punto di vista di impianto di lavorazione delle noci. In questa azienda l'impianto di lavaggio è costruito cercando il più possibile di ridurre gli sprechi (sia di acqua, sia di frutti), controllare il processo e rispettare la qualità del prodotto lavorato (fig. 2). Le noci attraversano diverse macchine, iniziando la lavorazione con una macchina togli-rami. Questa parte del percorso fa passare le noci attraverso una serie di palette che impediscono l'ingresso dei rami nell'impianto di lavaggio. Le noci entrano poi in una prima lavatrice, un cilindro a barre rotanti che separa il prodotto da residui di terra e dal mallo aperto, facilmente separabile. La velocità di rotazione del cilindro è regolabile, per gestire diverse quantità di flusso, ed è molto importante per la qualità della noce perché va a danneggiare l'integrità del guscio, favorendo in caso di rottura i fenomeni degradativi a carico del gheriglio, l'ingresso di insetti e declassando il frutto secondo il Regolamento (CE) n.175/2001. Da questa prima lavatrice escono noci con mallo ben attaccato e noci libere dal mallo. Un pre-calibro (con griglia da 39 mm), basandosi sulla differenza di diametro tra noci con e senza mallo, le divide e permette alle noci senza mallo di continuare il percorso, attraverso un salto ad aria per eliminare le pietre. Le noci con il mallo ben chiuso vengono lasciate riposare un paio di giorni prima di essere reinserite nella lavatrice precedentemente descritta, per permettere al mallo di maturare e di aprirsi. Successivamente le noci entrano in una lavatrice a spazzole controrotanti, che pulisce completamente il prodotto da residui che sono rimasti attaccati al guscio (fig.3). All'interno di questa seconda lavatrice le noci passano fra due spazzole, senza entrare in contatto con parti metalliche in movimento. Questo sistema di setole è stato studiato appositamente per evitare danni meccanici al guscio e alle noci. Prima di entrare in essiccatoio la noce passa su un tavolo di cernita a rulli che permette a degli operatori di effettuare un controllo ed eliminare i frutti che presentano difetti.



Figura 2: Impianto di lavaggio della Società Agricola Porto Felloni. Da destra a sinistra si possono notare la tramoggia di scarico delle noci, la prima lavatrice, il pre-calibro che estrae le noci con mallo, il salto ad aria, la seconda lavatrice a spazzole controrotanti e il tavolo a rulli su cui viene effettuato l'ultimo controllo da parte degli operatori.



Figura 3: Lavatrice a spazzole controrotanti. In questa macchina le noci non hanno contatti con parti metalliche per impedire che si rovini o che si rompa il guscio.

Dopo l'essiccazione le noci vengono calibrate una calibratrice a cilindri rotanti che si allargano (Sieve style). Sono già state eseguite delle analisi su questa macchina (fig. 4) e si tratta della migliore dal punto di vista della percentuale di danni e della peggiore per quanto riguarda l'accuratezza. I problemi relativi all'accuratezza sono determinati dalla noce stessa, non è rotonda ma ovale e un posizionamento scorretto sui cilindri non consente una calibratura accurata. (Liu et al, 2021).

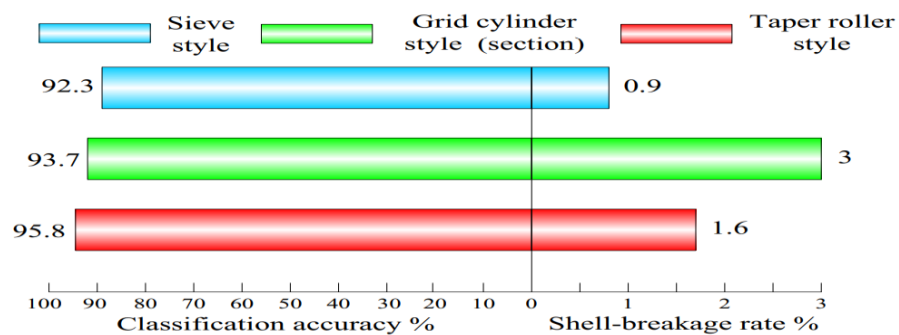


Figura 4 : Effetti di diverse tipologie di macchine per la calibratura sulle noci. (Liu et al, 2021)

1.4 Metodi di essiccazione della noce

Per la conservazione della noce è necessaria l'essiccazione. In passato, questo processo era effettuato in maniera naturale, lasciando i frutti ad essiccare al sole. Progressivamente questa modalità di essiccazione è stata abbandonata in quanto molto onerosa dal punto di vista dell'impiego di manodopera, rischiosa per la qualità del prodotto e non in grado di portare il gheriglio all'8% di umidità (p.u.) richiesta dal regolamento. Infatti, con questa modalità si riescono a raggiungere, nell'areale oggetto di studio (delta del Po), umidità del 15-16% (p.u.). In questa fase della lavorazione vengono impiegate temperature comprese fra i 32 ed i 40 °C per non rovinare le qualità del prodotto, tali temperature implicano un periodo di tempo di essiccamento di circa 45-60 ore. Occorre puntualizzare che questi dati sono stati forniti dalla già citata Società Agricola Porto Felloni, in quanto la letteratura scientifica, anche se sono presenti articoli che parlano di queste temperature (Hassan-

Beygi et al., 2009), si concentra invece su temperature di essiccamento ben superiori. Il problema principale di questa fase è avere un controllo accurato e in tempo reale dell'umidità anche se sono presenti sensori all'interno dell'essiccatoio, considerando che tra le noci ci sono spazi vuoti e che l'umidità ricercata è quella del gheriglio, protetto dal guscio.

Durante questa fase sono utilizzate diverse varianti di essiccatoio a silo: con o senza coclea (la prima soluzione va a danneggiare l'integrità del gheriglio, ma evita la formazione di un fronte di essiccazione nel silo), a strato singolo, poco efficienti, o a più strati che sfruttano il calore utilizzato nell'essicare il primo strato per iniziare il processo degli strati successivi. Solitamente negli essiccatoi, a temperatura e portata d'aria regolabile, sono presenti anche delle sonde che misurano la temperatura dello strato di noci.

1.5 Essiccamento intermittente

Il metodo tradizionale di essiccazione utilizza aria in ingresso all'interno dell'impianto con caratteristiche di temperatura e velocità costanti al fine di rimuovere l'umidità dal prodotto. Durante l'essiccamento l'umidità evapora dalla superficie del prodotto a una velocità maggiore rispetto a quella di movimento all'interno del campione (Chang et al., 2020). Durante le fasi finali dell'essiccazione la velocità diminuisce perché non c'è abbastanza umidità da rimuovere e la superficie del prodotto risulta secca. Quindi fornire la stessa quantità di energia, anche durante le fasi finali, degrada e danneggia le superfici dei campioni da essicare. L'essiccazione intermittente si basa sul variare una delle precedenti costanti (temperatura, flusso d'aria) per ottenere degli intervalli durante l'asciugamento con lo scopo di ridurre lo spreco di energia mentre l'umidità interna del prodotto migra per diffusione fino alla sua superficie. Questo processo aumenta la qualità del prodotto finale, in quanto la superficie non risulta danneggiata perché è sempre presente dell'umidità. Inoltre andando a diminuire il tempo effettivo di essiccamento e l'utilizzo d'aria viene ridotto il consumo di energia (Kumar et Al., 2013).

Capitolo 2: SCOPO DELLA TESI

Questa tesi analizza, inizialmente, un impianto di lavorazione delle noci all'avanguardia e ne identifica aspetti positivi e criticità. Fra le criticità evidenziate, emerge una bassa efficienza di utilizzo del calore contenuto nell'aria utilizzata nel processo. Scopo del lavoro di tesi è la valutazione di metodi di essiccamento alternativo, più efficienti dal punto di vista energetico. Nel lavoro si vuole verificare l'effetto di diverse modalità di essiccazione sulla durata del processo e sul consumo di aria calda. In particolare, si vuole testare se la modalità di essiccazione intermittente, con intervalli di 30 e 60 minuti, è applicabile alla noce e se questo metodo risulta più o meno efficiente rispetto all'essiccamento tradizionale continuo. Al fine di valutare questa modalità di essiccamento in maniera robusta, 2 diverse cultivar di noce (*Lara* e *Chandler*) provenienti da aziende differenti sul territorio del nord Italia, sono state essiccate sia in guscio, sia sgusciate. Le noci sono state caratterizzate dal punto di vista fisico e le diverse cinetiche di essiccamento valutate alla luce delle caratteristiche di guscio e gheriglio. Obiettivo di questo lavoro è inoltre comprendere se, in un regime di essiccamento continuo, la differente velocità di disidratazione di gheriglio e guscio, limita l'efficienza dell'impiego di aria calda negli essiccatori.

I risultati di questo studio potrebbero essere utili per migliorare l'attuale metodo di essiccazione della noce, ed eventualmente stabilire delle linee guida per il miglioramento e l'ottimizzazione dei sistemi di essiccamento delle noci.

Capitolo 3: MATERIALI E METODI

3.1 Materiali

Per le analisi condotte e studiate in questo elaborato sono state utilizzate noci fresche, con e senza guscio. Le noci sono state raccolte in tre aziende: Società Agricola Porto Felloni (Lagosanto – FE), in cui sono state raccolte noci della varietà *Chandler*, Azienda Tenuta La Spiga (Eraclea – VE) e Azienda Agricola Bellombra (Adria – RO), che hanno fornito noci di varietà *Lara* e di varietà *Chandler*. Queste noci sono state raccolte all'uscita dell'impianto di lavaggio, prima dell'essiccamento. Per ottenere le noci sgusciate, i gusci degli stessi lotti sono stati rimossi manualmente.

Le vaschette di alluminio (32 cm x 21 cm) utilizzate come contenitori dei campioni e i sacchetti di plastica per conservarli sono state acquistati in un supermercato locale. Le prove sono state eseguite di giorno, conservando, durante la notte, i campioni in sacchetti di plastica sigillati all'interno di un frigorifero. È stato notato che in questo modo i campioni non ottengono o perdono umidità durante la notte.

3.2 Descrizione dell'esperimento

Ciascun lotto di noci è stato campionato per creare i campioni usati durante le prove (A, B, C, D, E, F). I campioni pesavano circa 1 kg l'uno e sono stati assegnati casualmente ad uno dei trattamenti (modalità di essiccazione). I diversi campioni sono stati caratterizzati selezionando casualmente 15 noci da ogni vaschetta, pesandole intere e poi sgusciate dopo l'essiccazione con una bilancia di sensibilità 0,001 g, calibrandole con un calibro elettronico di sensibilità 0,01 mm lungo il diametro maggiore e fotografando ogni singola noce (fig.5-6, tab.1).



Figura 5: Caratterizzazione del campione A2, proveniente dalla Società Agricola Porto Felloni. Noci intere.



Figura 6 : Caratterizzazione del campione A2, proveniente dalla Società Agricola Porto Felloni. Noci sgusciate.

Tabella 1: Caratterizzazione delle noci del campione A2, proveniente dalla Società Agricola Porto Felloni.
Le noci pesate sono quelle delle fig. 5-6.

Numero noce	Calibro	Peso intero	Peso gheriglio	Peso guscio
1	34,44	14,148	6,277	7,871
2	34,89	14,791	6,657	8,134
3	35,71	14,053	6,543	7,510
4	34,02	12,478	5,322	7,156
5	36,45	13,661	6,515	7,146
6	35,99	14,103	6,493	7,610
7	33,54	11,719	5,571	6,148
8	32,8	10,411	5,003	5,408
9	38,04	15,636	7,332	8,304
10	37,66	17,689	8,281	9,408
11	39,52	18,070	8,026	10,044
12	33,83	14,117	6,447	7,670
13	36,13	15,849	7,312	8,537
14	38,16	15,509	7,042	8,467
15	34,53	8,838	2,798	6,040

I campioni sono stati poi inseriti all'interno di una stufa da laboratorio impostata ad una temperatura di 38° C per l'essiccazione. Uno di questi campioni (F) è stato mantenuto sempre fuori dalla stufa, a temperatura ambiente, un altro (A) sempre all'interno della stufa in essiccazione tradizionale continua. Questi due campioni sono stati utilizzati per confrontare i risultati con l'essiccamento tradizionale e l'assenza di essiccazione. Gli altri, invece, hanno subito un essiccamento intermittente, B e C con intervalli di 30 minuti mentre D ed E con

intervalli di 60 minuti. Tutti i campioni sono stati pesati ogni 30 o 60 minuti per determinare la perdita di umidità nel tempo, calcolando l'umidità su base secca, utilizzando la formula:

$$U_x = 100 * ((P_i - P_f) / P_f)$$

Eq. (1)

Dove:

U_x è uguale all'umidità su base secca,

P_f è uguale alla massa finale del campione, ovvero dopo l'essiccamento in stufa,

P_i è uguale alla massa iniziale del campione umido.

Al termine degli esperimenti le noci sono state essiccate completamente, tenendo i campioni in stufa a 105°C per 12 ore, per poter risalire all'umidità iniziale. Alcuni campioni (A, B, E, F) sono stati dotati di sonde per la misurazione e la registrazione della temperatura e dell'umidità dell'aria con lo scopo di tenere traccia delle differenze tra esterno e interno della stufa.

Durante la seconda prova, in base ai risultati ottenuti dalla prima, è stato deciso di mantenere soltanto la frequenza di intermittenza da 30 minuti e di utilizzare anche noci sgusciate. Alcune delle noci utilizzate in questa seconda prova sono state sgusciate manualmente, caratterizzate ed essiccate con le stesse metodologie e intermittenze. I campioni di noci sgusciate che sono stati creati per questa prova pesavano circa 0.4 kg.



Figura 7: Prima prova, foto della stufa. I diversi contenitori di noci sono: A, A1, A2 in essiccazione continua; B, B1 e B2 in essiccazione intermittente con intervalli da 30 minuti e D, D1, D2 in essiccazione intermittente con intervalli da 60 minuti. Si possono anche notare le sonde di temperatura e umidità nelle vaschette A, B e B2.

Capitolo 4: RISULTATI E DISCUSSIONE

4.1 Caratterizzazione noci

Dal grafico 1 si nota come sia presente una differenza di calibro tra le noci *Chandler* (C) e le noci *Lara* (L). Questa differenza è influenzata dalla forma diversa delle varietà: i frutti di *Chandler* sono quasi ovali, mentre le *Lara* sono caratterizzate da una forma quasi sferica. Il calibro è inoltre influenzato dall'età del noceto, in quanto un noceto più giovane presenta calibri più grossi.

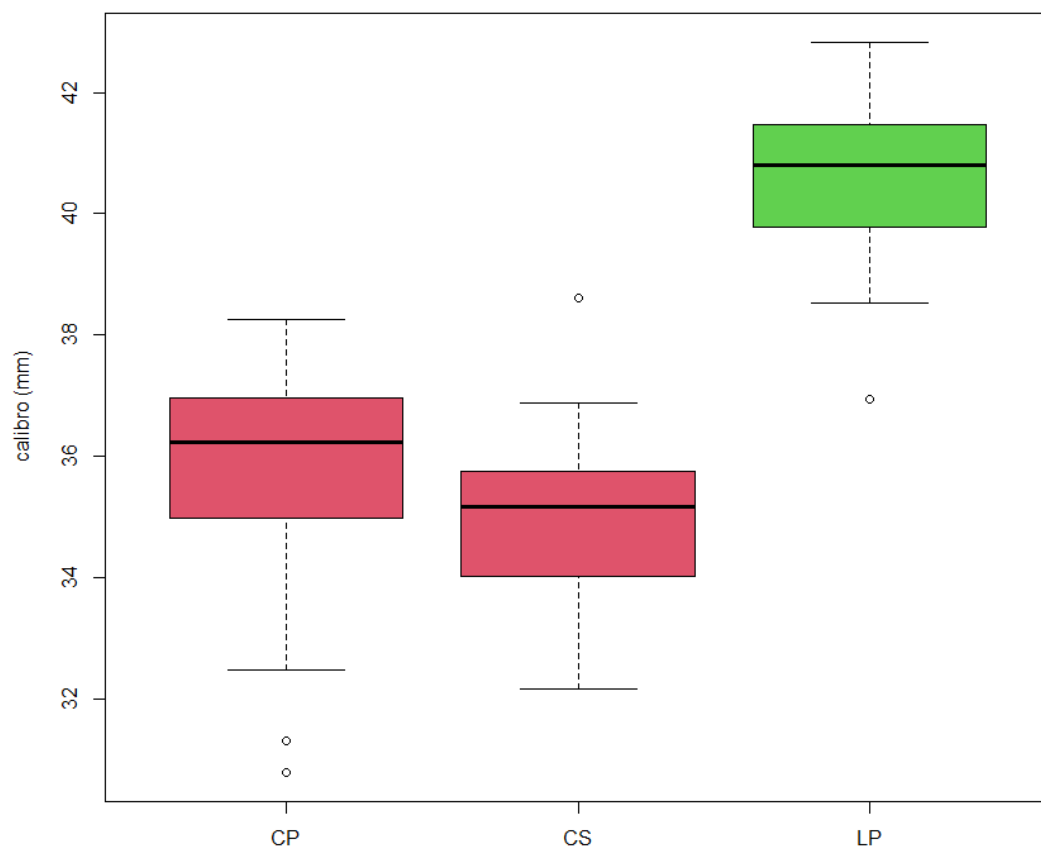


Figura 8: Calibro delle noci di varietà Chandler (CP, CS) e Lara (LP) utilizzate nella prima prova.

Dai grafici seguenti, che mettono a confronto peso della noce, peso del gheriglio e rapporto gheriglio/guscio delle noci utilizzate, si nota come la differenza di calibro è collegata a un'effettiva differenza di peso tra *Lara* e *Chandler*, in tutti e tre i componenti. In particolare il grafico della fig.11 indica come le noci *Lara* abbiano più gheriglio rispetto al guscio delle noci *Chandler*.

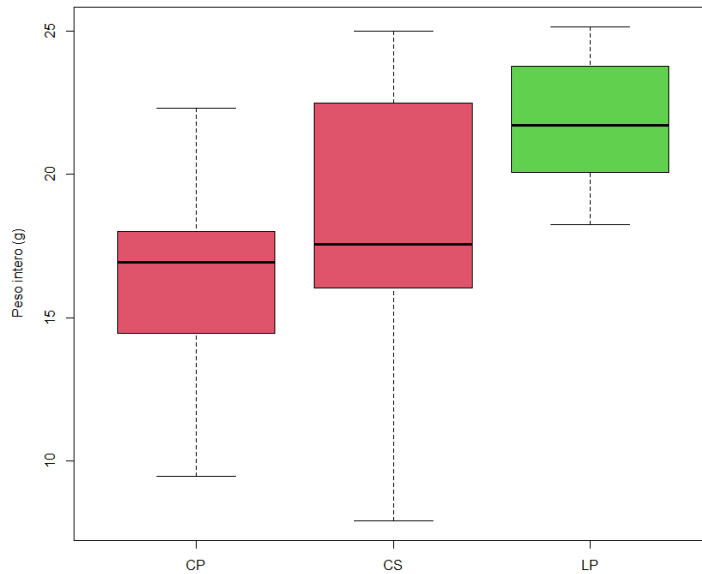


Figura 9: Peso noci Chandler (CP, CS) e Lara (LP) intere utilizzate nella prima prova.

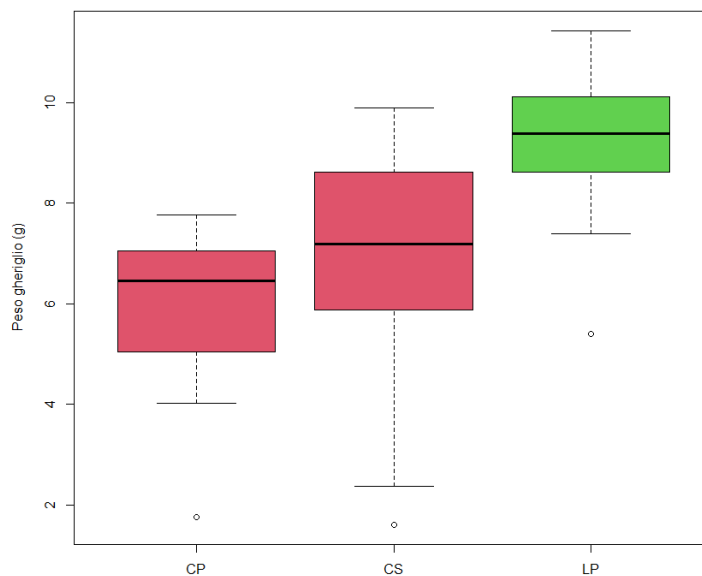


Figura 10: Peso gheriglio delle noci Chandler (CP, CS) e Lara (LP) utilizzate nella prima prova.

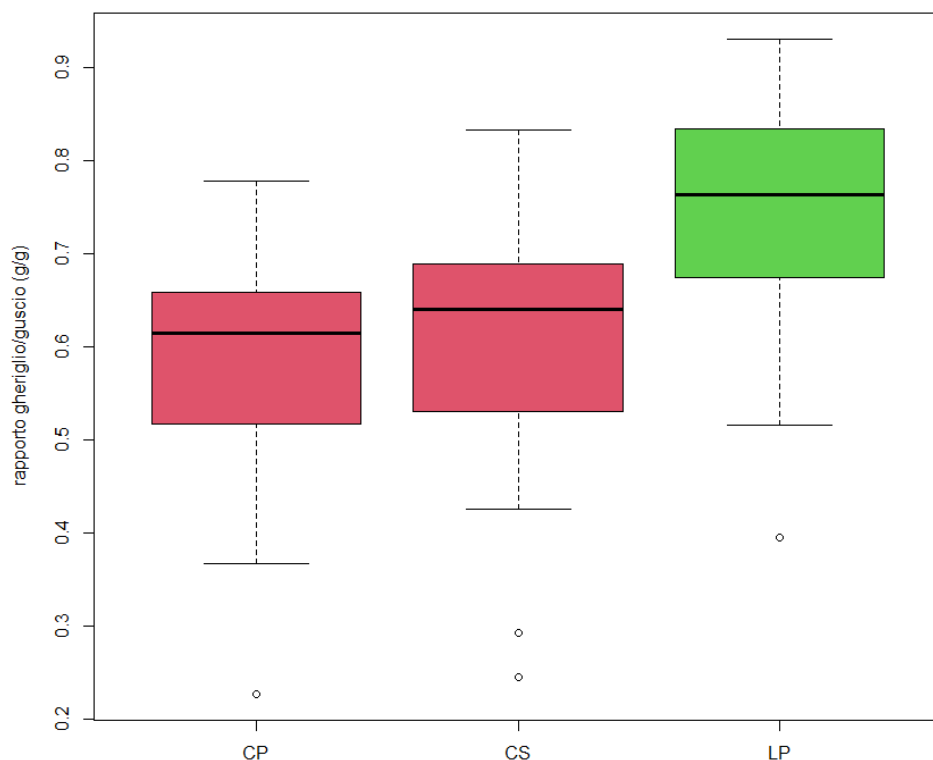


Figura 11: Rapporto gheriglio/guscio delle noci Chandler (CP, CS) e Lara (LP) utilizzate durante la prima prova.

Dai dati raccolti caratterizzando le noci essiccate non si sono notate differenze sul calibro dovute alla tipologia di trattamento.

Durante l'essiccamento si nota una lieve diminuzione del calibro dovuta alla perdita di acqua. Si nota anche un calo di peso (in media di 3.96 g), distribuito maggiormente nel guscio (2.88 g). Questo indica che la maggior parte dell'acqua persa dalla noce è localizzata nel guscio e di conseguenza il rapporto gheriglio/guscio aumenta di circa 0.095 dopo l'essiccazione. Il fattore che limita la velocità di essiccazione resta comunque l'acqua presente nel gheriglio.

Tabella 2: Caratterizzazione noci umide del lotto LP.

Numero noce	Calibro	Peso intero	Peso gheriglio	Peso guscio
1	41,02	24,074	10,019	14,055
2	38,57	18,256	8,684	9,572
3	41,44	23,656	10,298	13,358
4	41,51	19,628	8,801	10,827
5	36,94	18,867	7,761	11,106
6	42,53	24,060	10,513	13,547
7	40,58	21,710	9,884	11,826
8	41,88	25,127	11,420	13,707
9	42,82	21,222	9,681	11,541
10	41,31	20,239	8,717	11,522
11	39,81	19,068	5,400	13,668
12	38,52	22,659	9,142	13,517
13	39,75	23,868	9,300	14,568
14	40,59	19,898	8,567	11,331
15	41,10	23,545	11,253	12,292

Tabella 3: Caratterizzazione noci secche del lotto LP.

Numero noce	Calibro	Peso intero	Peso gheriglio	Peso guscio
1	40,09	14,420	5,555	8,865
2	41,32	17,165	7,436	9,729
3	35,80	13,298	6,390	6,908
4	40,10	18,548	8,342	10,206
5	40,96	17,349	6,394	10,955
6	39,77	18,224	7,808	10,416
7	40,57	18,430	7,813	10,617
8	39,76	16,996	7,851	9,145
9	41,56	18,497	7,800	10,697
10	37,64	16,500	7,405	9,095
11	39,87	16,403	7,365	9,038
12	38,40	15,937	7,822	8,115
13	39,65	17,130	6,885	10,245
14	39,02	14,578	7,432	7,146
15	39,13	14,763	6,590	8,173

4.2 Essiccamento intermittente

L'equazione che meglio descrive la variazione di umidità delle noci durante l'essiccamento è quella delle cinetiche di primo ordine (Friso, 2018), ovvero:

$$X_t = X_0 e^{-kt}$$

Eq. (2)

Dove X_t è l'umidità della noce su base secca al tempo t , X_0 l'umidità iniziale, k la costante rappresentativa della velocità di essiccamento e t il tempo trascorso in minuti. I risultati ottenuti sono raccolti nella tabella 4.

Tabella 4: Coefficienti ricavati dal modello di essiccazione durante la prova n.1. X_0 rappresenta l'umidità iniziale, k la costante rappresentativa della velocità di essiccamento. Nell'ultima colonna è indicato il tempo richiesto per arrivare all'umidità commerciale dell'8%(p.u.).

Metodo di essiccazione	Lotto	X_0	k (min ⁻¹)	R^2	t per $Y=0.08$ (min)
Continua	LP	0.36	$7.4 \cdot 10^{-4}$	0.999	1913
Intermittente (30')	LP	0.35	$6.3 \cdot 10^{-4}$	0.995	2215
Intermittente (30')	LP	0.35	$6.1 \cdot 10^{-4}$	0.996	2250
Intermittente (60')	LP	0.37	$5.1 \cdot 10^{-4}$	0.993	2825
Intermittente (60')	LP	0.36	$5.7 \cdot 10^{-4}$	0.999	2503
Continua	CP	0.41	$8.3 \cdot 10^{-4}$	0.996	1861
Intermittente (30')	CP	0.45	$5.3 \cdot 10^{-4}$	0.986	3061
Intermittente (30')	CP	0.45	$5.3 \cdot 10^{-4}$	0.994	3085
Intermittente (60')	CP	0.46	$5.0 \cdot 10^{-4}$	0.987	3324
Intermittente (60')	CP	0.42	$5.9 \cdot 10^{-4}$	0.994	2687

Gli elevati valori di R^2 , sempre maggiori di 0.993, dimostrano come il fenomeno dell'essiccamento delle noci sia descritto bene dalla cinetica di primo ordine (equazione 1). Da questa tabella si nota come le noci in essiccazione continua siano state le più veloci a raggiungere l'umidità ricercata, in quanto in media, hanno richiesto un tempo inferiore del 32% rispetto alle soluzioni intermittenti. È però necessario considerare che l'essiccamento tramite i due metodi intermittenti utilizza aria calda per la metà del tempo. Si può ricavare quindi un indicatore relativo all'impiego di tale aria per essiccare il batch di noci preso in esame. Questo indicatore prende il nome in letteratura di *effective heating ratio* (Cheng et al., 2020). In figura 9 è confrontato il tempo effettivo di utilizzo dell'aria calda per le diverse soluzioni testate.

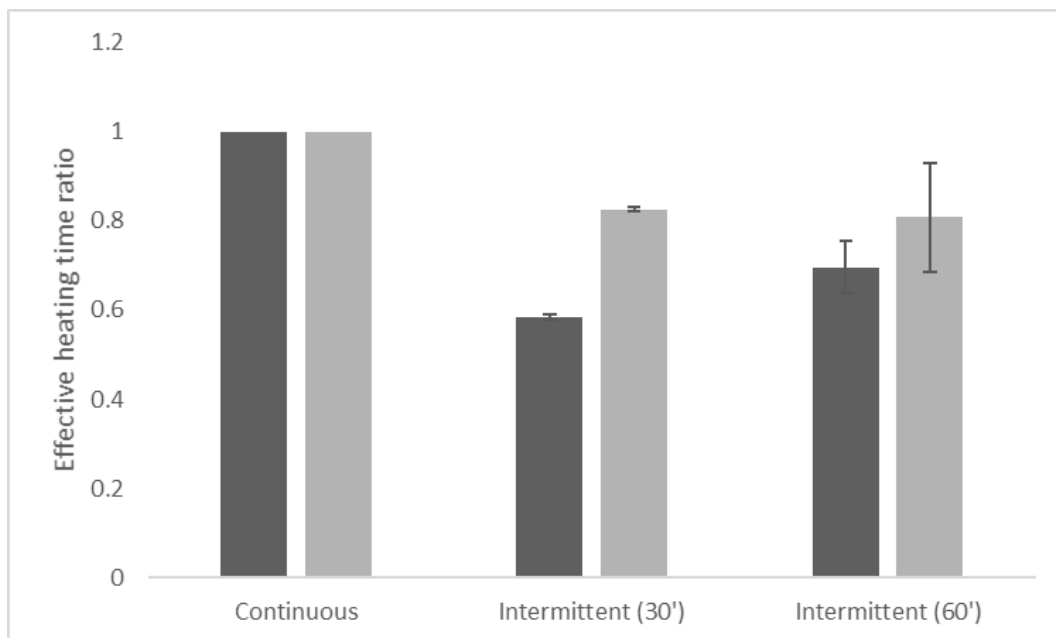


Figura 12 : Tempo effettivo di essiccazione nella prova 1. Nel grafico le colonne grigio scuro rappresentano LP, quelle grigio chiaro CP. La deviazione standard è indicata dalle barre di errore.

L'essiccamento intermittente ha permesso di ridurre l'utilizzo di aria calda per entrambe le cultivar utilizzate. In particolare nelle noci LP (*Lara*), il tempo di riscaldamento è stato ridotto del 41.6% nell'essiccamento intermittente da 30 minuti mentre è stato ridotto del 30.4% con l'intermittenza da 60 minuti. I vantaggi dell'essiccamento intermittente sono stati meno evidenti nelle noci CP (*Chandler*), riducendo l'utilizzo di aria calda del 18.3% senza differenze significative dovute alle due diverse frequenze di intermittenza impiegate.

I dati raccolti in laboratorio permettono anche di calcolare la velocità di movimento dell'acqua in ogni momento del processo di essiccamento (G_{ev} [g_{acqua}/min]), grazie alla formula:

$$G_{ev} = \frac{X_t - X_{t+1}}{TI}$$

Eq. (3)

Dove X_t è l'umidità misurata al tempo t [g_{acqua}/g_{ss}], X_{t+1} rappresenta l'umidità alla misurazione successiva a t [g_{acqua}/g_{ss}], e TI l'intervallo di tempo in minuti.

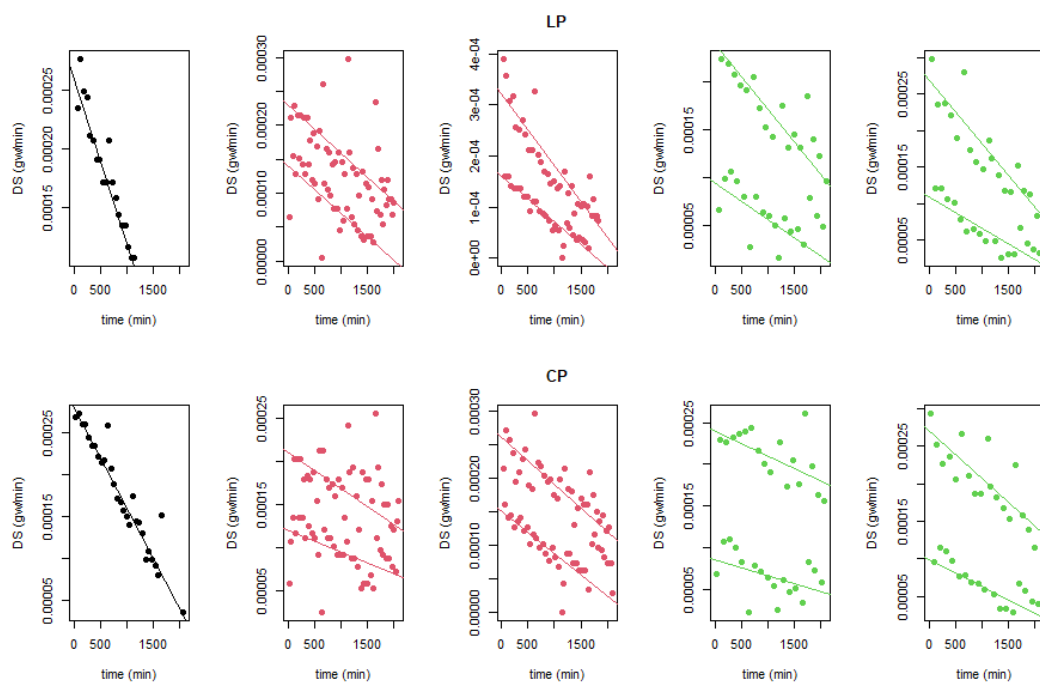


Figura 13 Cambiamenti della velocità di essiccamento. I grafici superiori sono riferiti al lotto LP, quelli inferiori al lotto CP. I punti neri si riferiscono all'essiccamento continuo, quelli rossi all'essiccamento intermittente con frequenza da 30 min e quelli verdi all'essiccamento intermittente con frequenza da 60 min.

La figura 13 riporta la variazione della velocità di evaporazione dell'acqua nelle diverse tesi. Le linee rappresentano i modelli lineari ottenuti. È importante osservare che, coerentemente con la letteratura, in nessuno dei nostri campioni si è osservata la fase di essiccamento a velocità costante descritta dalla letteratura per i prodotti molto umidi (Friso, 2018), mentre tutti i campioni sono stati essiccati in regime di velocità decrescente. Nei grafici relativi all'essiccamento continuo (colore nero) si nota una singola retta di regressione

della velocità in funzione del tempo di essiccamento. La velocità assume inizialmente il valore più elevato e rapidamente diminuisce. Nei grafici relativi all'essiccamento intermittente (colore rosso e verde) si notano invece due diverse rette di regressione. La retta superiore è relativa al periodo in cui il prodotto è investito da aria calda, mentre quella inferiore al periodo in cui questo non avviene. La velocità iniziale è inizialmente inferiore alla soluzione continua, ma in questo caso la diminuzione della velocità avviene più lentamente. Complessivamente, la velocità media di essiccamento risulta essere più elevate per le soluzioni discontinue rispetto a quelle continue, comportando il risparmio energetico e l'aumento contenuto del tempo di essiccazione.

Durante la seconda prova sono stati ottenuti dei risultati in linea con quelli della prima. Sulla base dei risultati della prima prova abbiamo mantenuto solamente la frequenza di 30 minuti di intermittenza ed abbiamo introdotto le noci sgusciate a fianco di quelle in guscio. I risultati per le noci in guscio confermano quanto osservato nel corso della prima prova. Il coefficiente di determinazione R^2 si è dimostrato maggiore di 0.957. Le noci essiccate in modo continuo hanno raggiunto per prime l'umidità commerciale, però le noci di entrambi i lotti essiccati, con intermittenza di 30 minuti, LG e LP2, hanno impiegato rispettivamente 30.1% e 34.4% aria calda in meno.

Tabella 5: Coefficienti ricavati dal modello di essiccazione durante la prova n.2. X_0 rappresenta l'umidità iniziale, k è la costante rappresentativa della velocità di essiccazione. Nell'ultima colonna è indicato il tempo richiesto per arrivare all'umidità commerciale dell'8%.

Metodo di essiccazione	Lotto	X_0	k (min ⁻¹)	R ²	t per Y=0.08 (min)
Continua	LP2	0.25	$6.6 \cdot 10^{-4}$	0.999	1606
Intermittente (30')	LP2	0.25	$5.1 \cdot 10^{-4}$	0.996	2040
Intermittente (30')	LP2	0.25	$4.8 \cdot 10^{-4}$	0.957	2176
Continua	LG	0.30	$7.4 \cdot 10^{-4}$	0.987	1678
Intermittente (30')	LG	0.38	$6.2 \cdot 10^{-4}$	0.998	2382
Intermittente (30')	LG	0.33	$5.7 \cdot 10^{-4}$	0.999	2310

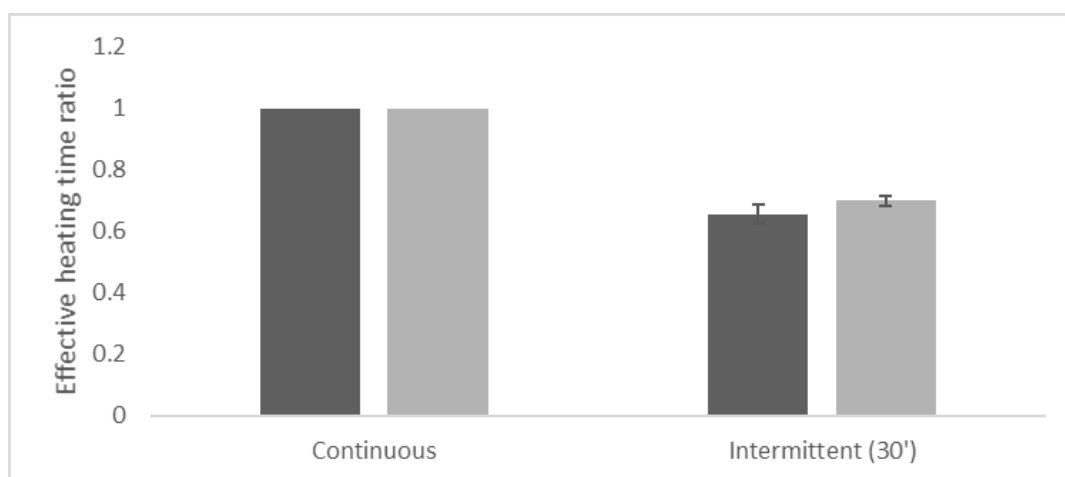


Figura 14: Tempo effettivo di essiccazione nella prova 2. Nel grafico le colonne grigio scuro rappresentano il lotto LP2, quelle grigio chiaro il lotto LG. La deviazione standard è indicata dalle barre di errore.

Per quanto riguarda le noci sgusciate è stato possibile costruire modelli basati su cinetiche di prim'ordine allo stesso modo di quanto fatto con le noci in guscio. Il coefficiente di determinazione è sempre maggiore di 0.964, ma in questo caso si notano dei coefficienti k superiori rispetto alle tesi in guscio. Infatti, in queste tesi abbiamo stimato dei k dell'ordine di 10^{-3} min^{-1} , mentre nel caso precedente di 10^{-4} min^{-1} . Le noci essiccate in modo continuo raggiungono l'umidità commerciale dell'8% (p.u.) più velocemente ma con un consumo di aria calda maggiore, anche in questo caso compreso fra il 30 e il 40%.

Tabella 6: Coefficienti ricavati dal modello di essiccazione durante la prova con noci sgusciate. X_0 rappresenta l'umidità iniziale, k è la costante rappresentativa della velocità di essiccamento. Nell'ultima colonna è indicato il tempo richiesto per arrivare all'umidità commerciale dell'8% (p.u.).

Metodo di essiccazione	Lotto	X_0	k	R2	t per Y=0.08 (min)
Continua	LP	0.21	$1.4 \cdot 10^{-3}$	0.977	628
Intermittente (30')	LP	0.20	$1.1 \cdot 10^{-3}$	0.990	749
Intermittente (30')	LP	0.22	$9.7 \cdot 10^{-4}$	0.992	958
Continua	LG	0.28	$1.3 \cdot 10^{-3}$	0.964	895
Intermittente (30')	LG	0.29	$1.4 \cdot 10^{-3}$	0.986	848
Intermittente (30')	LG	0.28	$8.8 \cdot 10^{-4}$	0.990	1329

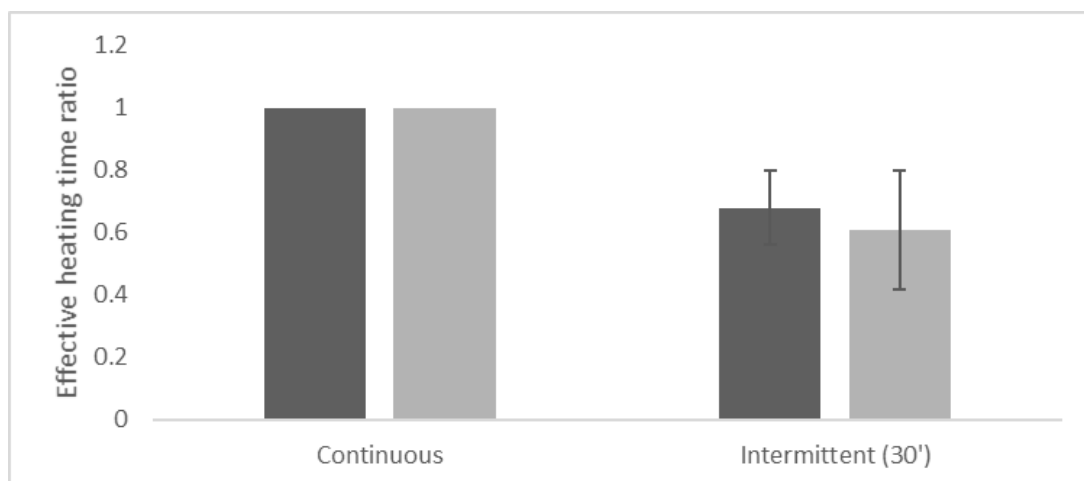


Figura 15: Tempo effettivo di essiccazione nella prova con noci sgusciate. Nel grafico le colonne grigio scuro rappresentano il lotto LP, quelle grigio chiaro il lotto LG. La deviazione standard è indicata dalle barre di errore.

Dal grafico si nota come, anche nel caso di noci sgusciate, il tempo effettivo di utilizzo dell'aria calda è circa il 35% inferiore rispetto a quello di essiccazione continua.

4.3 Considerazioni sull'impianto visitato

L'impianto di lavorazione visitato presenta delle caratteristiche molto interessanti per quanto riguarda l'efficienza, la riduzione degli sprechi e il rispetto della qualità della noce. In particolare utilizza molta meno acqua rispetto ad altre tipologie di impianto di lavorazione e l'assenza di smallatrici, unita alla presenza di lavatrici con spazzole di materiale plastico, permette di rovinare o rompere meno noci. È comunque migliorabile, in quanto necessita di una regolazione del flusso del prodotto iniziale maggiore: la tramoggia che permette l'ingresso delle noci nell'impianto non è in grado di mantenere un flusso costante, facendo entrare troppe o troppo poche noci per permettere una regolazione adeguata della velocità di rotazione delle lavatrici e della velocità dei nastri.

L'essiccatoio presenta temperatura e portata d'aria regolabili ed è strutturato in modo tale da riutilizzare più calore possibile per iniziare l'essiccazione dei lotti successivi. Manca di un metodo per individuare l'umidità del prodotto in

modo rapido e costante, fondamentale durante il processo di essiccamento in quanto necessario per stabilire la durata dell'essiccazione, interrompere il processo a una determinata umidità e non essiccare troppo o troppo poco il prodotto.

Capitolo 5: CONCLUSIONI

In questa tesi sono state studiate due diverse frequenze di essiccamento intermittente e confrontate con l'essiccazione tradizionale continua di noci di varietà *Lara* e *Chandler*. Dopo una prima prova con entrambe le frequenze, 30 e 60 minuti, è stato deciso di continuare le prove utilizzando soltanto la frequenza di intermittenza da 30 minuti. Lo scopo dell'essiccamento intermittente è di mantenere la superficie del prodotto a qualità elevata risparmiando allo stesso tempo energia, sotto forma di calore.

Dalle visite aziendali è stato possibile mettere in evidenza come, su noce, la qualità del prodotto è influenzato dall'integrità del guscio, che a sua volta è influenzata soprattutto dagli stress meccanici a cui è sottoposta durante il lavaggio, l'essiccamento e la calibratura. È possibile mantenere una qualità elevata di guscio e gheriglio utilizzando macchine per la lavorazione non aggressive, con la quantità minima necessaria di elementi metallici e che non sottopongono la noce a stress meccanici. In particolare i passaggi più dannosi per l'integrità di guscio e gheriglio sono la smallatrice, l'essiccatoio con coclea per muovere il prodotto e la calibratrice a cilindro rotante. In essiccatoio risulta molto importante tenere l'umidità del prodotto sotto controllo e al momento mancano sistemi efficaci per farlo, in modo rapido, su noce. Questo perché il prodotto è essiccato senza essere diviso per calibro prima, sono presenti spazi vuoti tra le noci e il gheriglio, che si cerca di portare all'8% di umidità (p.u.), è protetto dal guscio.

È stato inoltre verificato che, anche se l'essiccazione intermittente è più lunga di quella continua la quantità di aria calda utilizzata durante l'essiccamento viene ridotta del 30-40% per le noci della varietà *Lara* e di circa il 20% su noci della varietà *Chandler*. È stato anche notato che avviene una riduzione del tempo effettivo di utilizzo dell'aria calda circa del 35% anche essiccando delle noci sgusciate. La tecnica dell'essiccamento intermittente, opportunamente ottimizzata e con tecnologie adattate all'uso su scala industriale, appare molto promettente per ridurre i consumi energetici e l'impatto ambientale della trasformazione delle noci.

Capitolo 6: RINGRAZIAMENTI

Ringrazio il Prof. Francesco Marinello per avermi aiutato a rendere questa tesi possibile e per l'eccezionale lavoro da relatore.

Un sentito grazie al Prof. Lorenzo Guerrini per la disponibilità a ogni ora del giorno e per la guida che è stato durante la scrittura e l'attività in laboratorio, necessarie per questa tesi.

Ringrazio anche calorosamente il personale tecnico di laboratorio, per la pazienza dimostrata nei miei confronti e per l'aiuto durante l'attività di tesi.

Ringrazio la Società Agricola Porto Felloni che mi ha dato la possibilità di studiare un impianto di lavorazione ed essiccazione veramente interessante e che mi ha fornito noci da essiccare in laboratorio.

Ringrazio anche l'Azienda Agricola Tenuta La Spiga e l'Azienda Agricola Bellombra che mi hanno fornito noci da utilizzare durante la mia attività di tesi.

Ringrazio inoltre il dott. Eugenio Cozzolino, per avermi incoraggiato e aiutato concretamente in alcuni aspetti della ricerca e delle prove in laboratorio.

Un grande grazie alla mia famiglia per il sostegno e la pazienza che hanno dimostrato nei miei confronti.

Infine un ringraziamento particolare va a Chiara, per esserci stata sempre e avermi aiutato in questi anni di università.

Capitolo 7: BIBLIOGRAFIA

Liu, M., Li, C., Cao, C., Wang, L., Li, X., Che, J., ... & Liu, X. (2021). Walnut fruit processing equipment: academic insights and perspectives. *Food Engineering Reviews*, 1-36

G. Calcagni, Situazione internazionale, prospettive e potenzialità della nocicoltura. *Nocicoltura da frutto: Innovazione e Sostenibilità. Atti delle Giornate tecniche nazionali SOI NOCE 2019*. (Bologna, 20-21 settembre 2019) a cura di: Sorrenti, Giovambattista (2019), Bologna: Dipartimento di Scienze e Tecnologie Agro-Alimentari, Università di Bologna, p.9-14.

D. Giovannini, E. Cozzolino, F. Stagno, S. Sirri, D.Neri, Materiali vivaistici e performance vegetative nei nuovi noceti specializzati da frutto, *Nocicoltura da frutto: Innovazione e Sostenibilità. Atti delle Giornate tecniche nazionali SOI NOCE 2019*. (Bologna, 20-21 settembre 2019) a cura di: Sorrenti, Giovambattista (2019), Bologna: Dipartimento di Scienze e Tecnologie Agro-Alimentari, Università di Bologna, p.27-46.

C. Kumar, M.A. Karim, M.U.H. Joardder, (2013). Intermittent drying of food products: A critical review. *Journal of Food Engineering* 121, 48-57

P. Amirante, (2018), *Macchine e impianti per la coltivazione delle noci e per l'industria dei derivati*

Regolamento (CE) n. 175/2001 della Commissione del 26 gennaio 2001 che stabilisce la norma di commercializzazione applicabile alle noci comuni con guscio

C. Chen, C. Venkitasamy, W. Zhang, et al (2020). Effective moisture diffusivity and drying simulation of walnuts under hot air. "*International Journal of Heat and Mass Transfer* 150 (2020)", 119283

D. Friso, 2018, *Ingegneria dell'industria agroalimentare. Vol.2: Teoria, applicazioni e dimensionamento delle macchine e impianti per le operazioni unitarie*, CLEUP Editore

Hassan-Beygi, S. R., et al. "Drying characteristics of walnut [*Juglans regia* L.] during convection drying." *International Agrophysics* 23.2 (2009): 129-135.

D. Doder, D. Đaković,, (2019). "Modeling of intermittent convective drying of walnuts in single layer and its influence on deep bed drying simulation", *Thermal Science*, 23- 6 part A