UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA
AGRONOMIA ANIMALI ALIMENTI RISORSE NATURALI E AMBIENTE

Corso di laurea in Scienze e Tecnologie Animali

Tecniche innovative per la valutazione della composizione chimica e della qualità nutrizionale degli alimenti di interesse zootecnico

Relatrice:
Prof.ssa Bailoni Lucia

Laureanda
Manferdini
Francesca
Matricola n.
2032827

Anno Accademico
2024-2025

RIASSUNTO

La valutazione della composizione chimica e della qualità nutrizionale degli alimenti utilizzati in zootecnia è fondamentale per migliorare l'efficienza delle produzioni e garantire il benessere degli animali. Tradizionalmente, queste analisi vengono effettuate attraverso metodi di laboratorio che, sebbene precisi, presentano alcuni svantaggi: tempi di esecuzione lunghi, costi elevati, ed infine la necessità di utilizzare reagenti chimici che aumentano l'impatto ambientale. Negli ultimi anni, tuttavia, sono state sviluppate tecniche innovative, in grado di superare alcune di queste limitazioni ed offrire una valutazione più rapida e sostenibile.

Tra queste, la spettroscopia nel vicino infrarosso (NIRS) rappresenta uno strumento molto versatile, in grado di analizzare diversi parametri di campioni complessi, come foraggi e mangimi, in un'unica misurazione. Un'altra metodologia innovativa è la fluorescenza a raggi X (XRF), che consente di determinare con precisione la presenza di elementi chimici senza danneggiare il campione. Il naso elettronico, poi, è in grado di rilevare composti volatili e di fornire informazioni sullo stato di conservazione e la freschezza degli alimenti. Anche la termografia a infrarossi trova applicazione in questo ambito, permettendo di monitorare la distribuzione del calore nei campioni alimentari e individuare eventuali alterazioni.

Infine, l'utilizzo di strumenti per la misurazione delle emissioni di metano (CH_4) assume un ruolo cruciale nel monitorare e ridurre l'impatto ambientale delle produzioni zootecniche.

In questo elaborato sono state descritte e valutate le diverse tecniche analitiche innovative esaminando la loro efficacia e le loro potenzialità e mettendo in luce i vantaggi e limiti, nonché la possibilità di integrazione con i metodi tradizionali per garantire un'analisi più affidabile e sostenibile.

ABSTRACT

The evaluation of the chemical composition and nutritional quality of feed used in animal husbandry is essential for improving production efficiency and ensuring animal welfare. Traditionally, these analyses have been carried out through laboratory methods which, although precise, present some disadvantages: long execution times, high costs, and finally the need to use chemical reagents that increase environmental impact. In recent years, however, innovative techniques have been developed, capable of overcoming some of these limitations and offering a faster and more sustainable evaluation.

Among these, Near-Infrared Spectroscopy (NIRS) represents a very versatile tool, capable of analyzing various parameters of complex samples, such as forages and feeds, in a single measurement. Another innovative methodology is X-ray Fluorescence (XRF), which allows precise determination of the presence of chemical elements without damaging the sample. The electronic nose, then, is able to detect volatile compounds and provide information on the state of preservation and freshness of food. Infrared thermography also finds application in this field, allowing monitoring of heat distribution in food samples and identifying possible alterations.

Finally, the use of tools for measuring methane (CH_4) emissions plays a crucial role in monitoring and reducing the environmental impact of livestock production.

In this paper, the various innovative analytical techniques have been described and evaluated, examining their effectiveness and potential, highlighting their advantages and limitations, as well as the possibility of integration with traditional methods to ensure a more reliable and sustainable analysis."

INDICE

RIASSUNTO **3**

ABSTRACT **5**

INTRODUZIONE **8**

OBIETTIVO **11**

CAPITOLO 1: METODOLOGIA INNOVATIVA **12**

1.1 NIRS 12
1.1.1 Descrizione dello strumento *13*
1.1.2 Descrizione della procedura *15*
1.1.3 Possibilità di utilizzo *17*
1.1.4 Analisi unifeed *17*
1.1.5 Analisi silomais *19*
1.1.6 Analisi delle feci *21*
1.1.7 Analisi per la certificazione del formaggio *23*
1.1.8 Vantaggi e limiti *25*
1.2 XRF REPORT 28
1.2.1 Descrizione dello strumento *29*
1.2.2 Descrizione della procedura *30*
1.2.3 Possibilità di utilizzo *32*
1.2.4 Vantaggi e limiti *33*
1.3 NASO ELETTRONICO 36
1.3.1 Descrizione dello strumento e del procedimento analitico *37*
1.3.2 Possibilità di utilizzo *39*
1.3.3 Vantaggi e limiti *40*
1.4 TERMOGRAFIA A INFRAROSSO 42
1.4.1 Descrizione dello strumento *43*
1.4.2 Descrizione della procedura *43*
1.4.3 Possibilità di utilizzo *44*
1.4.4 Vantaggi e limiti *45*
1.5 STRUMENTI PER LA DETERMINAZIONE DELLE EMISSIONI DI METANO 47
1.5.1 Descrizione degli strumenti e della loro procedura *48*
1.5.2 Possibilità di utilizzo *50*
1.5.3 Vantaggi e limiti *51*

CAPITOLO 2: CONCLUSIONI **53**

BIBLIOGRAFIA **56**

INTRODUZIONE

La valutazione della composizione chimica e della qualità nutrizionale degli alimenti di interesse zootecnico rappresenta un aspetto fondamentale per garantire la salute e la produttività degli animali allevati. Un'accurata analisi degli alimenti permette non solo di ottimizzare le diete, ma anche di assicurare che gli standard qualitativi e di sicurezza alimentare siano rispettati. In un contesto produttivo in continua evoluzione, il settore zootecnico necessita di strumenti all'avanguardia, affidabili e rapidi, per prendere decisioni cruciali in tempi brevi (Ronchi B., 2020).

I metodi tradizionali di analisi degli alimenti, nei laboratori chimici sono altamente precisi, ma in alcuni contesti presentano diversi limiti che ne ostacolano l'efficacia. Tra questi, i principali sono il tempo necessario per eseguire le analisi, il quale può essere prolungato e incompatibile con le esigenze operative di molte aziende; inoltre, l'alto costo associato sia ai reagenti chimici che alle sofisticate attrezzature impiegate influisce sulle spese di produzione dell'azienda. In aggiunta, i costi operativi crescono ulteriormente poiché questi metodi richiedono del personale altamente specializzato, per preparare ed eseguire correttamente le analisi.

Un ulteriore aspetto critico è rappresentato dalla produzione di residui chimici. Essi, derivanti dai processi di laboratorio, devono essere correttamente gestiti e smaltiti secondo normative specifiche: ciò complica ulteriormente il processo, ed aumenta l'impatto ambientale. In un'epoca in cui la sostenibilità è una priorità crescente, la ricerca di metodi alternativi che riducano l'uso di reagenti chimici e minimizzino la produzione di rifiuti è fondamentale.
In risposta a tutte queste limitazioni, sono state sviluppate tecniche innovative, basate su principi fisici e chimici differenti, che offrono numerosi vantaggi rispetto ai metodi tradizionali. Tra queste, la spettroscopia nel vicino infrarosso (NIRS) è ampiamente adottata grazie alla sua capacità di fornire informazioni rapide e accurate sulla composizione degli alimenti. Essa si basa sull'assorbimento della luce infrarossa da parte delle molecole presenti nei campioni, permettendo di determinare diversi parametri come il contenuto di proteine, grassi e fibre.

Un'altra tecnica innovativa è la fluorescenza a raggi X (XRF), che consente una rapida determinazione della presenza di elementi chimici come calcio, potassio e magnesio nei campioni, senza richiedere preparazioni complesse.

Il naso elettronico, un dispositivo in grado di rilevare e analizzare composti volatili presenti negli alimenti, si sta rivelando promettente per monitorare la qualità e la freschezza degli alimenti zootecnici, basandosi su sensori capaci di imitare l'olfatto umano.

Anche la termografia a infrarossi è impiegata per la rilevazione di differenze di temperatura nei campioni, e questo è utile per identificare anomalie termiche legate alla qualità del prodotto.

Infine, la crescente attenzione verso la sostenibilità ambientale ha portato all'implementazione di strumenti che misurano le emissioni di metano (CH_4) prodotte dagli animali durante la digestione. Questi dispositivi offrono un contributo importante non solo per migliorare la qualità dell'alimentazione animale, ma anche per ridurre l'impatto ambientale della produzione zootecnica.

OBIETTIVO

La seguente tesi esplora nel dettaglio alcune tecniche innovative, ne evidenzia vantaggi e svantaggi, ed analizza come esse possano integrarsi con i metodi tradizionali per migliorare l'efficienza delle analisi alimentari. Nello specifico, per ogni tecnica verrà presentato lo strumento utilizzato, illustrando il suo funzionamento e i principi scientifici alla base. Inoltre, sarà descritta la procedura operativa, includendo le modalità di utilizzo e le condizioni ottimali per l'applicazione nei diversi contesti zootecnici. Particolare attenzione sarà dedicata alla versatilità di ciascun metodo, ovvero alla possibilità di impiego su differenti tipologie di alimenti e in vari scenari produttivi. Verranno poi analizzati i principali vantaggi, come la rapidità, la riduzione dei costi ed il minor impatto ambientale, ma anche i limiti, tra cui eventuali restrizioni nell'applicazione o margini di errore rispetto ai metodi tradizionali. Questo approccio permetterà di evidenziare, per ogni metodologia, il potenziale utilizzo pratico e i contributi che ciascuna tecnica può offrire per migliorare la gestione della qualità nutrizionale e l'efficienza delle produzioni zootecniche.

CAPITOLO 1: METODOLOGIA INNOVATIVA

1.1 **NIRS**

La spettroscopia nel vicino infrarosso (NIRS) rappresenta una metodologia analitica di grande rilievo, poiché è in grado di valutare la composizione chimica dei materiali organici e inorganici attraverso l'interazione della materia con le radiazioni elettromagnetiche. Nello specifico, questa tecnica sfrutta la capacità di alcune molecole di assorbire radiazioni nella regione del vicino infrarosso (NIR), la quale si estende tra i 780 nm e i 2526 nm all'interno dello spettro elettromagnetico (Ronchi B., 2020). Le molecole contenenti legami C-H, O-H e N-H, che sono molto comuni nei composti organici, assorbono proprio in questa regione spettrale, fornendo così informazioni dettagliate sulla loro struttura chimica.

Il contesto storico della NIRS risale ai primi del XIX secolo, quando William Herschel scoprì la regione del vicino infrarosso. Tuttavia, fu solo nel corso del XX secolo che questa tecnica iniziò ad avere applicazioni pratiche, grazie agli studi di Karl Norris, condotti nel 1973. Infatti, quest' ultimo, presso il Dipartimento dell'Agricoltura degli Stati Uniti, riuscì a utilizzare la tecnica NIRS per determinare il contenuto di umidità e proteine di vari cereali e leguminose. A partire da quel momento, questo metodo innovativo ha trovato una crescente diffusione in vari settori, tra cui quello zootecnico, agroalimentare e farmaceutico, grazie alla sua capacità di fornire risultati accurati, rapidi e senza la necessità di modificare in modo distruttivo il campione (Ronchi B., 2020).

Un aspetto fondamentale che ha favorito l'adozione su larga scala della NIRS è la possibilità di superare molti dei limiti delle tecniche analitiche tradizionali, come la cromatografia e la spettrofotometria, che richiedono tempi lunghi di esecuzione, costi elevati e l'utilizzo di reagenti chimici potenzialmente pericolosi. La NIRS, al contrario, consente di effettuare analisi rapide, non distruttive e senza necessità di particolari preparazioni del campione, rendendola di fatto una tecnologia estremamente versatile e accessibile (Ronchi B., 2020).

1.1.1 *Descrizione dello strumento*

Un sistema di spettroscopia NIRS si compone di vari elementi essenziali, tra cui la sorgente di luce, il monocromatore, il campionatore e il rivelatore. Ciascun componente ha un ruolo preciso e critico nell'ottenere dati accurati sulla composizione chimica del campione.

La sorgente luminosa utilizzata nei sistemi NIRS è generalmente una lampada alogena al tungsteno, in grado di emettere radiazioni continue nell'intervallo del vicino infrarosso. Questa luce, una volta prodotta, deve essere dispersa e selezionata per consentire l'analisi spettrale del campione. A questo scopo, interviene il monocromatore, un dispositivo che suddivide il fascio di luce nelle sue componenti spettrali. Il monocromatore può essere realizzato mediante prismi o reticoli di diffrazione, i quali permettono di selezionare una specifica lunghezza d'onda della luce da dirigere verso il campione (Ronchi B., 2020).

In Figura 1 è visibile la configurazione dello strumento NIRS, con le componenti descritte e il loro funzionamento integrato.

Figura 1. Immagine strumento NIRS (LabCNX).

Il campionatore rappresenta il punto in cui viene collocato il campione da analizzare. A seconda della natura del campione (solido, liquido o gassoso), esso può assumere diverse configurazioni: cuvette per liquidi, piastre riflettenti per solidi, o celle specializzate per campioni in polvere. Durante l'analisi, il campione viene irradiato dalla luce infrarossa emessa dalla sorgente e dispersa dal monocromatore. Le molecole del campione interagiscono con questa radiazione, assorbendo o riflettendo la luce in base alla loro composizione chimica (Ronchi B., 2020).

Dopo aver attraversato o essere stato riflesso dal campione, il segnale luminoso arriva al rivelatore, o detector. I rivelatori comunemente impiegati nei sistemi NIRS sono fotodiodi al silicio, solfuro di piombo o arseniuro di indio e gallio (InGaAs), poiché sono i più sensibili alle lunghezze d'onda del vicino infrarosso. Questi rivelatori hanno il compito di convertire l'energia luminosa in segnali elettrici, che vengono successivamente analizzati dal software di elaborazione. Inoltre, la misura può essere effettuata in due modalità: per trasmissione (NIT), dove il rivelatore si trova sul lato opposto alla sorgente luminosa rispetto al campione, o per riflessione (NIR), dove il rivelatore si trova dallo stesso lato della sorgente luminosa. Nella prima, il campione trasmette la radiazione attraverso la sua struttura, mentre nella modalità NIR il campione riflette la radiazione verso il rivelatore (Ronchi B., 2020).

Infine, il segnale elettrico generato dal rivelatore viene processato da un computer collegato allo strumento. Il software analizza il segnale e lo confronta con modelli matematici di riferimento, consentendo di determinare con precisione la composizione chimica del campione. Questo processo permette di identificare rapidamente tutte le diverse componenti come proteine, umidità, fibre e grassi presenti nel campione (Ronchi B., 2020).

In Figura 2 è riportato un grafico di dispersione dei dati ottenuti da un'analisi NIRS. Questo tipo di rappresentazione permette di visualizzare la distribuzione dei campioni nello spazio in funzione delle loro proprietà spettrali, facilitando l'identificazione di somiglianze o differenze tra i vari campioni.

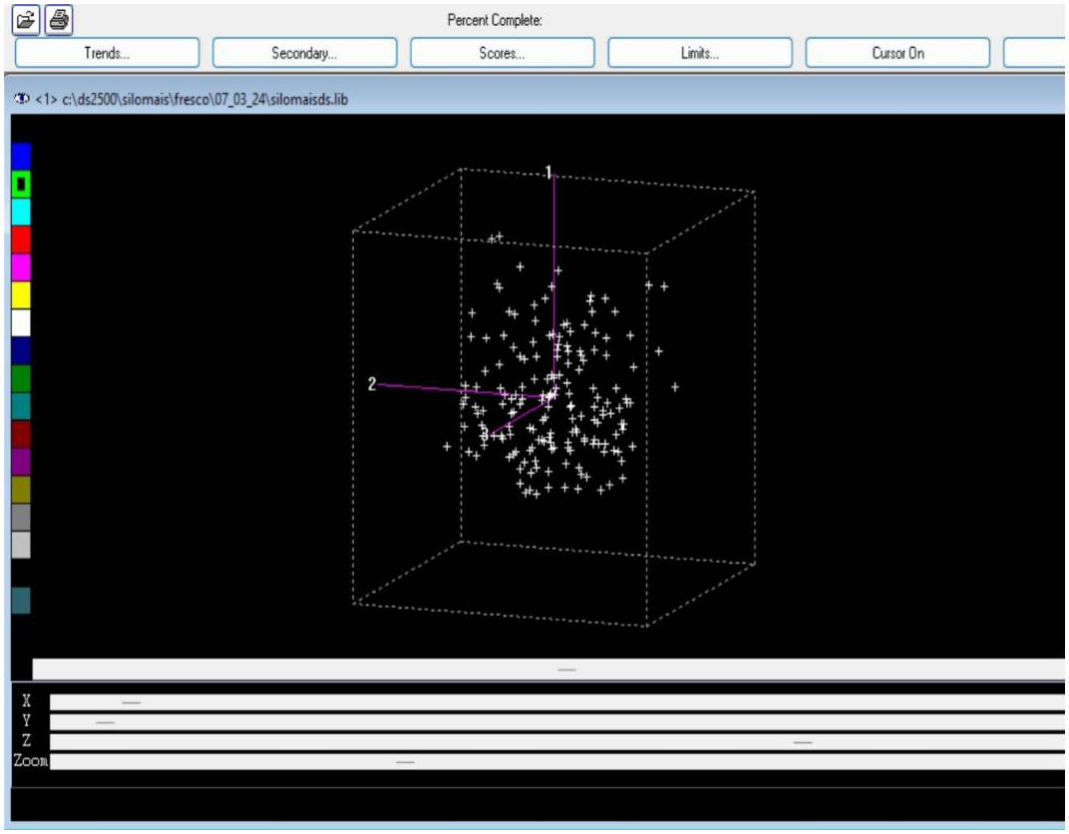

Figura 2. Grafico di dispersione tridimensionale dei dati spettrali NIRS (LabCNX)**.**

Nello specifico, il grafico evidenzia: i punti bianchi, gli assi tridimensionali, la dispersione dei dati ed infine le linee e vettori. Ogni punto bianco (+) rappresenta un singolo campione (in questo caso silomais): essi vengono posizionati nello spazio tridimensionale in base ai loro valori spettrali rilevati dall'analisi NIR. Gli assi cartesiani (X,Y,Z) rappresentano le componenti principali (PCA - Principal Component Analysis) o altri fattori statistici derivati dall'analisi spettrale, che riducono i dati a tre dimensioni principali. Ciò permette di visualizzare in modo semplificato le differenze tra i campioni. La dispersione dei dati è rappresentata dalla posizione dei punti nel grafico: campioni vicini tra loro nello spazio tridimensionale sono simili in termini di proprietà spettrali, mentre campioni più distanti indicano differenze nelle loro caratteristiche chimiche o fisiche. Infine, le linee in viola rappresentano le direzioni di varianza massima, ossia le componenti principali.
Inoltre, grafici come questo utilizzano la distanza di Mahalanobis (d) o il Hotteling's T^2 (h) per misurare quanto un campione si discosta dal gruppo centrale o dal modello di riferimento: la prima misurala distanza di un campione dal centro del gruppo tenendo conto delle correlazioni tra le variabili. È utile per identificare outlier o campioni anomali. Mentre, la seconda indica la distanza di un campione dal centroide del gruppo: valori elevati suggeriscono che il campione è più distante dagli altri, il che potrebbe indicare una differenza significativa nelle sue proprietà.

1.1.2 *Descrizione della procedura*

La procedura analitica di NIRS è un processo articolato che richiede diverse fasi operative per garantire risultati affidabili e rappresentativi della composizione chimica del campione analizzato.
La prima fase consiste nella raccolta e acquisizione spettrale dei campioni: è fondamentale raccogliere un numero sufficiente di campioni, che siano rappresentativi della variabilità in termini di composizione chimica e caratteristiche fisiche del materiale in esame; si raccomanda, per ogni componente chimico da analizzare, di raccogliere almeno 30 campioni e di effettuare le analisi anche in condizioni non ideali, al fine di ampliare il set di dati utilizzabili per la calibrazione dello strumento. Inoltre, è consigliabile replicare almeno due volte l'acquisizione spettrale di ciascun campione per minimizzare gli errori casuali dovuti a una distribuzione disomogenea del campione stesso (Ronchi B., 2020).
In Figura 3 è mostrata in dettaglio la fase di preparazione del campione, un passaggio fondamentale per garantire che il materiale sia adeguatamente trattato, al fine di ottenere un'acquisizione spettrale accurata, riproducibile e rappresentativa della reale composizione chimica del campione.

Figura 3. Preparazione del campione (LabCNX).

Una volta ottenuti gli spettri di assorbimento necessari, si procede con la calibrazione dello strumento. Questa fase consiste nell'associare una composizione chimica specifica a ciascun spettro registrato. La chemometria gioca un ruolo cruciale in questo processo, poiché applica modelli matematici e statistici per stabilire correlazioni tra gli spettri di assorbimento (variabile X) e i dati chimici ottenuti tramite metodi analitici tradizionali (variabile Y). Nonostante non esista un modello universale applicabile a tutti i casi, i modelli di regressione multivariata, come la regressione delle componenti principali (PCR) e la regressione a minimi quadrati parziali (PLS), sono tra i più comunemente utilizzati.

Prima dell'analisi chemometrica, è possibile correggere gli spettri di assorbimento in base alla granulometria del campione o amplificarli per migliorarne l'interpretazione. Inoltre, tecniche come le distanze di Mahalanobis possono essere impiegate per selezionare solo gli spettri più significativi, escludendo outliers o campioni ripetitivi dal dataset (Ronchi B., 2020).

Infine, la fase di validazione è essenziale per valutare l'accuratezza del modello di calibrazione sviluppato. Essa può avvenire in modo interno, utilizzando gli stessi campioni impiegati per la calibrazione, oppure attraverso metodi esterni o incrociati. Quest' ultima prevede la suddivisione del set di campioni in gruppi, escludendo a turno ciascun gruppo per testare il modello basato sugli altri campioni, fornendo così una valutazione robusta delle capacità predittive del modello. Questo approccio garantisce una validazione affidabile e consente di

verificare la performance del modello su campioni non utilizzati precedentemente (Ronchi B., 2020).

1.1.3 *Possibilità di utilizzo*

La seguente tecnica trova ampie applicazioni nel settore degli alimenti zootecnici, risultando dunque uno strumento importante e versatile per il controllo della qualità delle materie prime e dei mangimi. La sua rapidità di analisi consente di processare un gran numero di campioni in tempi brevi, soddisfando così le esigenze dell'industria mangimistica. Nella pratica, NIRS viene utilizzata per analizzare singole materie prime e mangimi composti, consentendo di determinare parametri chimici chiave quali umidità, proteine, lipidi, cellulosa grezza e frazioni fibrose (NDF, ADF e ADL). Inoltre, è possibile valutare il valore energetico, il contenuto di amminoacidi e il profilo acido, comprendente gli acidi grassi saturi e insaturi.

Negli ultimi anni, inoltre, si è assistito ad un aumento nell'uso di strumenti NIRS portatili, che consentono di ottenere informazioni rapide e precise direttamente in azienda, senza la necessità di lunghe attese per i risultati di laboratorio. Questa capacità di analisi on-line e in-line migliora la gestione della nutrizione e della produzione, riducendo sprechi, costi e impatti negativi sull'ambiente, e garantendo il benessere degli animali (Goi A., 2024). NIRS ha la possibilità di valutare la struttura fisica dell'unifeed, stimando l'omogeneità e l'indice di selezione, fornendo così un controllo puntuale sulle razioni somministrate agli animali. Inoltre, la determinazione della composizione chimica delle feci consente di stimare la digeribilità della dieta. L'applicazione della spettroscopia NIRS in sala mungitura è altrettanto efficace, permettendo di monitorare parametri come progesterone, cellule somatiche, grassi e proteine durante la mungitura, per una gestione ottimale della salute, della riproduzione e della nutrizione a livello individuale o di mandria (Evangelista C., 2021).

1.1.4 *Analisi unifeed*

La tecnica NIRS è un elemento fondamentale anche nei sistemi di Precision Livestock Farming (PLF), con applicazioni particolarmente efficaci negli allevamenti di bovini da latte. Grazie alla sua capacità di monitorare la composizione chimica dell'unifeed, e di valutare la digeribilità della dieta in tempo reale, essa ottimizza l'alimentazione del bestiame, sia aumentando l'efficienza produttiva, sia garantendo il benessere degli animali.
La NIRS permette inoltre un monitoraggio continuo e non invasivo, consentendo dunque una gestione più precisa e sostenibile degli allevamenti. Grazie a queste caratteristiche, la NIRS si

dimostra una tecnologia chiave nell'allevamento di precisione, migliorando la redditività e riducendo l'impatto ambientale (Evangelista C., 2021).
Un esempio di analisi unifeed è presentato nella Tabella 1.

Parametro	Valore (% SS)
Umidità	55,0
Proteine Grezze	16,5
Lipidi	4,2
Cellulosa Grezza	21,3
NDF (Fibra Detergente Neutra)	44,8
ADF (Fibra Detergente Acida)	26,2
ADL (Lignina Detergente Acida)	6,5

Tabella 1. Esempio di analisi unifeed (LabCNX)**.**

Nello specifico, l'analisi rappresenta una panoramica completa delle principali componenti chimiche di un campione di unifeed, riportate come percentuale della sostanza secca (% SS). L'umidità al 55,0 % indica che oltre la metà del campione è costituito da acqua: questo risultato è tipico delle analisi unifeed, poiché contiene una parte significativa di foraggi freschi o insilati. Per quanto riguarda le proteine Grezze, la percentuale è essenziale per valutare la qualità nutrizionale del campione in termini di apporto proteico per l'animale. La frazione lipidica, o grassi, è relativamente bassa (4,2 %), ma rappresenta una parte importante per il bilancio energetico della razione. La Cellulosa Grezza al 21,3% misura la frazione fibrosa più indigeribile del campione: tale valore contribuisce alla struttura della razione e favorisce la ruminazione. Inoltre, la NDF (Fibra Detergente Neutra) rappresenta la quantità di fibra totale nel campione, includendo emicellulosa, cellulosa e lignina. È un indicatore chiave della digeribilità e del consumo di foraggio. Mentre, la ADF (Fibra Detergente Acida) è una sottofrazione della NDF e misura le fibre meno digeribili, come cellulosa e lignina. Valori più alti indicano una minore digeribilità. Infine, la percentuale di ADL (Lignina Detergente Acida) è del 6,5%. Essa rappresenta la frazione indigeribile della fibra: un valore elevato riduce la qualità della fibra, poiché la lignina limita la digeribilità di cellulosa e emicellulosa (LabCNX).

1.1.5 *Analisi silomais*

I vantaggi della NIRS non si limitano alla gestione alimentare, ma anche nel miglioramento della qualità e sicurezza: infatti essa rappresenta una metodologia analitica sempre più impiegata per il controllo della qualità e la sicurezza degli alimenti destinati all'allevamento. Recentemente, è stata testata per la classificazione dell'insilato di mais in base alla contaminazione da micotossine, composti tossici prodotti da funghi appartenenti ai generi Aspergillus, Fusarium, Alternaria e Penicillium: questo tipo di contaminazione può avvenire sia prima che dopo la raccolta del prodotto, e risulta particolarmente pericolosa poiché le micotossine possono compromettere la salute e la riproduzione degli animali alimentati con insilato contaminato.

Uno studio recente ha analizzato 115 campioni di insilato di mais, raccolti da aziende italiane situate nella Pianura Padana e in Sardegna tra il 2017 e il 2019. Gli autori hanno impiegato uno spettrometro NIR (Foss NIRSystem 5000) per esaminare i campioni e misurare i livelli di contaminazione da micotossine. I risultati sono stati confrontati con dati ottenuti tramite cromatografia liquida accoppiata a spettrometria di massa (LC-MS/MS), che ha permesso di identificare più di 500 composti secondari, comprese le micotossine regolamentate ed emergenti prodotte da Fusarium.

Per garantire una classificazione accurata, i campioni sono stati suddivisi in due classi in base ai livelli di contaminazione: alta o bassa contaminazione. I modelli predittivi sviluppati mediante Random Forest hanno dimostrato un'elevata accuratezza, con il miglior modello che ha raggiunto il 96% di precisione per la somma totale delle micotossine (cut-off di 10.000 µg/kg di sostanza secca) e il 97,1% per il conteggio totale delle micotossine.

Questo studio testimonia che la NIRS è una tecnologia promettente per il controllo rapido e non distruttivo della contaminazione da micotossine negli alimenti zootecnici, riducendo tempi e costi rispetto ai metodi cromatografici tradizionali. Tuttavia, è importante considerare che la NIRS ha ancora limiti nella quantificazione di singole micotossine a bassa concentrazione. In definitiva, l'utilizzo del NIRS in questo contesto consente di effettuare una prima classificazione rapida e affidabile degli insilati, contribuendo a migliorare la sicurezza alimentare e a prevenire rischi per la salute degli animali in allevamento (Conte G., 2022)

Un esempio di analisi silomais è presentato nella Tabella 2.

Parametro	Valore (% SS)
Umidità	70,0
Proteine Grezze	8,1
Lipidi	3,5
Cellulosa Grezza	24,0
NDF (Fibra Detergente Neutra)	40,0
ADF (Fibra Detergente Acida)	28,0
ADL (Lignina Detergente Acida)	4,0

Tabella 2. Esempio analisi silomais (LabCNX).

Per il silomais, l'umidità è maggiore rispetto a quella ottenuta tramite analisi unifeed, dato che esso viene conservato come insilato. Il contenuto di acqua influisce direttamente sulla conservabilità e sulla qualità del foraggio. Infatti, un'umidità superiore al 70% può favorire lo sviluppo di forme, come Fusarium e Aspergillus, le quali producono micotossine. Un valore moderato di proteine grezze è adatto per un silomais, poichè generalmente ha un contenuto proteico inferiore rispetto ad altri foraggi. Il contenuto di lipidi o grassi è relativamente basso, ma fornisce comunque una fonte di energia per gli animali. La cellulosa grezza rappresenta la frazione fibrosa meno digeribile del foraggio. Un valore di 24% è comune nei foraggi fibrosi come il silomais. Infine, tale valore di ADL evidenzia che la parte indigeribile della fibra è del 4%, indicando una buona qualità del foraggio dal punto di vista della digeribilità (LabCNX).

In aggiunta, per i foraggi insilati è fondamentale valutare anche parametri come il pH e il profilo acidico, che contribuiscono ad una gestione più efficace delle razioni alimentari negli allevamenti.

In Tabella 3, i valori sono espressi sia in grammi per chilogrammo di sostanza secca (g/kg SS) che in percentuale.

Parametro	Valore (g/kg SS)	Valore (%)
Acido Lattico	85	65%
Acido Acetico	20	15%
Acido Propionico	5	5%
Acido Butirrico	<1	<1%
pH	4,2	-

Tabella 3. Esempio analisi profilo acidico e pH (LabCNX).

I risultati dell'analisi mostrano che l'acido lattico è predominante: infatti è l'acido principale prodotto durante la fermentazione; gli altri acidi invece sono presenti in concentrazioni inferiori. La presenza di acido butirrico è minima, e ciò indica una buona qualità dell'insilato (in quanto una quantità elevata di acido butirrico è indice di fermentazione indesiderata). Infine, un pH troppo elevato (pH > 4,5) indica una cattiva fermentazione, la quale favorisce la proliferazione di muffe e micotossine.

1.1.6 *Analisi delle feci*

È importante ricavare la composizione chimica delle feci, poiché può fornire informazioni preziose su nutrienti importanti per la fertilizzazione, come azoto, fosforo e potassio, oltre a dati sulla qualità del materiale organico, umidità, e rapporto carbonio/azoto. Inoltre, può indicare la digeribilità della razione alimentare degli animali. Tradizionalmente, la composizione del letame viene determinata tramite analisi di laboratorio o modelli previsionali, ma recentemente è stato introdotto l'uso della spettroscopia NIRS per l'analisi chimica di letame e liquame.

Malley et al. (2005) hanno testato l'efficacia di uno spettrofotometro NIRS portatile (Zeiss Corona 45) per monitorare le caratteristiche del letame durante il compostaggio, ottenendo buoni risultati per il contenuto di carbonio e altri parametri, sebbene le predizioni di alcuni elementi, come il fosforo, fossero meno accurate. Reeves e Van Kessel (2000) hanno riscontrato

una buona precisione per parametri come l'umidità e l'azoto totale utilizzando un sistema FOSS-NIR 6500, ma con scarse predizioni per fosforo e potassio.
Cabassi et al. (2015) hanno confrontato strumenti NIRS portatili e da banco, osservando che, sebbene tutti gli strumenti fossero validi per la previsione della sostanza secca (SS), i dispositivi da banco offrivano prestazioni migliori per azoto e ceneri, grazie alla maggiore risoluzione e ampiezza spettrale. Finzi et al. (2015) hanno evidenziato che le prestazioni del NIRS sono influenzate principalmente dalla preparazione del campione e dalle configurazioni di lettura, mentre la temperatura ha un impatto minore.

L'uso del NIRS per stimare la digeribilità della dieta è ancora recente, ma promettente. Studi hanno dimostrato che la tecnologia può prevedere parametri come la digeribilità della sostanza secca e dell'NDF nel tratto digestivo (Jancewicz et al., 2017; Brogna et al., 2018). Colombini et al. (2020) hanno dimostrato che la NIRS può stimare con precisione la digeribilità dell'NDF utilizzando campioni di feci.

NIRS è stata utilizzata anche per monitorare il contenuto di amido fecale (FS), un indicatore chiave della digeribilità dell'amido nel tratto gastrointestinale dei bovini. Studi di Fredin et al. (2014) e Corona et al. (2005) hanno confermato una buona correlazione tra il contenuto di amido nelle feci e la digeribilità dell'amido nelle vacche da latte (Evangelista, 2021).
La Tabella 4 riporta i risultati di un'analisi dell'amido fecale e della sua dirigibilità.
Nello specifico, il contenuto di amido nelle feci (ES) indica l'amido non digerito: un valore elevato evidenzia una ridotta efficienza di digestione nel tratto gastrointestinale. L'amido è stato assorbito correttamente, infatti il valore di digeribilità è del 92%.

Parametro	Valore (%)
Contenuto di Amido nelle Feci (ES)	5,8
Digeribilità dell'Amido	92,0
Proteine Grezze nelle Feci	14,5
NDF (Fibra Detergente Neutra)	43,0
ADF (Fibra Detergente Acida)	25,0
Umidità	75,0

Tabella 4. Esempio di analisi feci (LabCNX).

Infine, la tecnica NIRS può essere applicata per stimare la digeribilità di singoli alimenti o di razioni complete, utilizzando campioni di feci fresche, essiccate e macinate, facilitando così il bilancio ingesta-escreta in ambito zootecnico. La Tabella 5 riporta un esempio dell'analisi di questi diversi tipi di campione. Questi dati permettono di stimare il bilancio ingesta-escreta e ottimizzare le razioni alimentari negli allevamenti, garantendo una gestione nutrizionale più efficiente.

Parametro	Feci Fresche (% SS)	Feci Essiccate (% SS)	Feci Macinate (% SS)
Umidità	75,0	12,0	10,5
Proteine Grezze	14,2	16,0	15,8
NDF (Fibra Detergente Neutra)	45,0	42,5	42,8
ADF (Fibra Detergente Acida)	25,5	24,8	25,0
ADL (Lignina Detergente Acida)	6,0	5,5	5,6
Digeribilità della sostanza organica (%)	68,0	70,5	70,0
Digeribilità della fibra (%)	58,0	60,0	59,5

Tabella 5. Analisi su 3 tipi di campioni di feci (LabCNX).

1.1.7 *Analisi per la certificazione del formaggio*

La spettroscopia infrarossa (IR), soprattutto nelle regioni del vicino (NIR) e medio infrarosso (MIR), si è affermata anche come una tecnologia di primaria importanza per l'autenticazione dei prodotti alimentari, inclusi i formaggi, grazie alla sua sensibilità, velocità e precisione. La sua efficacia è stata particolarmente evidenziata nel controllo della qualità e autenticità del formaggio, dove è impiegata per identificare l'origine geografica, individuare frodi attraverso adulterazioni, e monitorare le diverse fasi di maturazione (Silva L., 2022)

L'autenticità dei formaggi è strettamente legata a fattori come l'origine geografica e i processi produttivi. Prodotti come il formaggio con Denominazione di Origine Protetta (DOP) o Indicazione Geografica Protetta (IGP) richiedono metodi di certificazione rigorosi per garantire la loro genuinità. Le tecniche infrarosse, in particolare la spettroscopia NIRS, offrono una soluzione efficace per queste esigenze, grazie alla loro capacità di fornire un'impronta digitale unica che riflette la composizione chimica specifica del prodotto.

Le frodi nel settore caseario sono un problema ricorrente e includono pratiche come l'aggiunta di ingredienti non dichiarati o la sostituzione di latte di specie diverse. La spettroscopia NIR si

è dimostrata una tecnica non invasiva che consente di rilevare con precisione queste adulterazioni. Inoltre, il NIR ha permesso di rilevare l'aggiunta di additivi e sostanze non consentite in formaggi stagionati, contribuendo così a proteggere sia i produttori che i consumatori (Silva L., 2022)

Le tecniche spettroscopiche infrarosse offrono numerosi vantaggi rispetto ai metodi analitici tradizionali, come la cromatografia o la spettrometria di massa. Oltre a essere non distruttive, rapide e relativamente economiche, permettono di analizzare una vasta gamma di parametri contemporaneamente, riducendo significativamente il tempo e il costo delle analisi. Poi, l'associazione con tecniche chemometriche migliora ulteriormente la capacità di discriminare i campioni in modo preciso e affidabile, rendendo il NIR uno strumento ideale per l'industria lattiero-casearia (Silva L., 2022)

In conclusione, l'uso della spettroscopia infrarossa per la certificazione del formaggio rappresenta una soluzione innovativa e promettente per garantire l'autenticità dei prodotti lattiero-caseari. Sebbene l'investimento iniziale per l'acquisto delle apparecchiature possa essere elevato, i benefici derivanti dalla loro applicazione rendono queste tecnologie un punto di riferimento per l'analisi rapida e accurata dei formaggi, soprattutto nell'industria casearia moderna (Silva L., 2022)

La Figura 4 mostra la procedura di analisi NIRS eseguita in laboratorio, offrendo una rappresentazione di come vengono condotti i controlli per la certificazione del formaggio.

Figura 4. Analisi per certificazione formaggio (LabCNX).

1.1.8 *Vantaggi e limiti*

Il metodo NIRS offre numerosi vantaggi rispetto alle metodologie analitiche tradizionali. Uno dei principali punti di forza è la rapidità: le analisi possono essere eseguite in pochi secondi o minuti, a seconda del tipo di campione. Questo aspetto rende la tecnica particolarmente utile in contesti in cui è necessario processare un grande numero di campioni in tempi brevi.
Inoltre, un altro vantaggio significativo è che il campione analizzato non viene alterato durante il processo, permettendo quindi di conservarlo e di riutilizzarlo per ulteriori analisi, se necessario: questa caratteristica minimizza il rischio di errori metodologici dovuti alla manipolazione del campione, poiché non sono richiesti trattamenti preliminari complessi, se non la semplice essiccazione o macinazione in casi specifici (Ronchi B. 2020).

Un ulteriore importante vantaggio offerto dalla NIRS è la significativa riduzione dei costi associati alle analisi chimiche. A differenza delle metodologie tradizionali, che spesso richiedono l'uso di reagenti chimici costosi e potenzialmente pericolosi, la NIRS non richiede tali sostanze, abbattendo così i costi operativi e migliorando la sicurezza del personale. Inoltre, grazie alla rapidità delle analisi, che possono essere completate in pochi minuti, la NIRS consente di ottenere risultati accurati e tempestivi, rendendo possibile la gestione di un grande volume di campioni in tempi ridotti. Questo aspetto è particolarmente vantaggioso per le aziende che operano su larga scala e devono monitorare costantemente la qualità dei loro prodotti. Di conseguenza, la NIRS contribuisce a un miglioramento dell'efficienza complessiva dei processi aziendali, rendendola una tecnologia economicamente vantaggiosa e accessibile (Evangelista C., 2021).

Un altro vantaggio riguarda l'assenza di reagenti chimici durante l'analisi, il che comporta una riduzione dei costi complessivi, non solo per l'acquisto e lo smaltimento dei reagenti stessi, ma anche in termini di sicurezza per i tecnici di laboratorio, visto che si evita il rischio di contaminazione con sostanze estranee. La riduzione dei costi per singola analisi rispetto ai metodi tradizionali rappresenta un altro beneficio rilevante, rendendo la NIRS una soluzione economicamente vantaggiosa, soprattutto quando si devono gestire volumi di analisi elevati.

Nonostante i numerosi vantaggi offerti dalla NIRS, esistono alcune limitazioni che devono essere prese in considerazione. Un primo ostacolo è il costo iniziale degli strumenti NIRS, che può essere elevato, soprattutto per le piccole e medie aziende. Questo costo può essere difficilmente ammortizzato, specialmente nelle realtà in cui le tecnologie di base sono meno sviluppate o in cui vi è una resistenza al cambiamento tecnologico. Inoltre, per garantire risultati accurati, è necessaria una corretta calibrazione degli strumenti. Questo processo di calibrazione

deve essere effettuato con campioni rappresentativi e aggiornato regolarmente, il che richiede supporto specializzato e personale qualificato. Senza un'adeguata calibrazione e gestione, i risultati ottenuti dalla NIRS possono perdere di precisione, riducendo l'efficacia della tecnologia. Pertanto, è essenziale che le aziende che adottano questa tecnologia dispongano di un team formato per la calibrazione, gestione e interpretazione dei dati (Evangelista C., 2021).

Un altro importante svantaggio è la scarsa sensibilità per la rilevazione di componenti presenti in basse concentrazioni, inferiori allo 0,1%. Questo limite è principalmente dovuto alla sensibilità strumentale della tecnica stessa, che non riesce a misurare con precisione piccole quantità di determinate sostanze. Un altro importante limite è la dipendenza dalle tecniche analitiche tradizionali per la calibrazione e la validazione dei risultati ottenuti. Nonostante la NIRS sia in grado di fornire misurazioni affidabili per molti parametri chimici, le metodologie tradizionali rimangono indispensabili per garantire la correttezza delle calibrazioni (Ronchi B., 2020).

L'affidabilità della NIRS, infatti, è strettamente legata alla qualità delle calibrazioni eseguite, le quali richiedono un set di campioni ampio e rappresentativo per garantire un risultato preciso e generalizzabile. La calibrazione non è un processo statico, ma necessita di aggiornamenti continui con l'introduzione di nuovi campioni per mantenere alta l'affidabilità della tecnica. Inoltre, la difficoltà di confrontare i risultati ottenuti con strumenti diversi rappresenta un ulteriore limite: ogni strumento richiede una calibrazione specifica e i modelli non sono trasferibili da una macchina all'altra, rendendo complicata la standardizzazione dei risultati.
Un ulteriore svantaggio riguarda la necessità di personale tecnico qualificato per gestire correttamente la calibrazione degli strumenti NIRS: questo fattore può limitare l'adozione della tecnologia in contesti dove non è disponibile un'adeguata formazione del personale.
Nonostante questo metodo offra un'ottima capacità predittiva per molti parametri, come la composizione chimica di proteine, amido e frazioni fibrose, risulta meno efficace nella misurazione della componente inorganica degli alimenti, per la quale sono richieste altre tecniche, come la spettrometria ad assorbimento atomico o la spettroscopia ICP-AES (Ronchi B., 2020).

Se da un lato la tecnica NIRS rappresenta una metodologia vantaggiosa per rapidità, economicità e non invasività, dall'altro presenta limiti che richiedono l'integrazione con tecniche tradizionali per garantire risultati affidabili, soprattutto per parametri a bassa concentrazione e per componenti inorganiche.

Altri ostacoli includono l'età avanzata di molti allevatori e il basso livello di digitalizzazione nel settore agricolo.

Infine, ulteriori ricerche sono necessarie per espandere le potenziali applicazioni della NIRS, che potrebbero includere l'analisi attraverso dispositivi mobili come smartphone, rendendo questa tecnologia sempre più accessibile e facile da utilizzare per gli allevatori (Evangelista, C., 2021).

1.2 **XRF Report**

La fluorescenza a raggi X (XRF) è una tecnica analitica che sta guadagnando sempre più attenzione nel campo della scienza animale, in particolare per la valutazione della composizione chimica e della qualità nutrizionale degli alimenti di interesse zootecnico. Questa metodologia si basa sul principio che gli atomi di un campione emettono radiazioni caratteristiche quando vengono eccitati da un fascio di raggi X. Grazie a questa caratteristica, l'XRF consente di identificare e quantificare vari elementi chimici presenti nel campione, rendendola una scelta ideale per analisi rapide e precise (Ronchi B., 2020).

Negli ultimi anni, l'XRF è stata utilizzata con successo per analizzare la composizione minerale degli alimenti per animali, contribuendo a migliorare la gestione nutrizionale nelle produzioni zootecniche. Essa, infatti, offre numerosi vantaggi significativi: la capacità di analizzare simultaneamente più elementi consente di ottenere risultati completi in un'unica misurazione, riducendo i tempi di analisi; inoltre, la preparazione del campione è relativamente semplice e non richiede l'uso di reagenti chimici complessi, il che rende il processo più sicuro e meno costoso. Infine, l'XRF è in grado di fornire risultati rapidi e accurati, il che è fondamentale per garantire un adeguato apporto nutrizionale agli animali e ottimizzare le razioni alimentari.
Un aspetto cruciale dell'XRF è la sua applicabilità in vari contesti, dalla ricerca scientifica alla pratica clinica in allevamenti. La tecnica è stata adottata da laboratori specializzati e aziende agricole per monitorare la qualità degli alimenti zootecnici e garantire un apporto minerale adeguato agli animali. Ad esempio, attraverso l'analisi XRF è possibile identificare carenze di elementi essenziali come calcio, fosforo e zinco nei foraggi, consentendo agli allevatori di apportare modifiche tempestive alle razioni alimentari (Berzaghi P., 2016). Questo è particolarmente importante in contesti produttivi dove il bilancio minerale influisce direttamente sulla salute e sulla produttività degli animali.

La preparazione del campione per l'analisi XRF è relativamente semplice; generalmente consiste nella macinazione e pressatura del campione in pastiglie compatte. Questo approccio riduce il rischio di contaminazione e garantisce risultati più affidabili. Inoltre, l'assenza di reagenti chimici significa che non ci sono rischi associati alla manipolazione di sostanze potenzialmente pericolose (Berzaghi P., 2016). Il sistema XRF può analizzare una vasta gamma di matrici alimentari, inclusi foraggi, concentrati e prodotti liquidi come latte e urine.

Nonostante i numerosi vantaggi, l'XRF presenta anche alcune limitazioni. Ad esempio, la sensibilità della tecnica può variare a seconda della matrice del campione e della concentrazione degli elementi analizzati. Inoltre, mentre l'XRF è efficace per molti metalli pesanti e minerali essenziali, potrebbe non essere altrettanto sensibile per alcuni elementi leggeri come il litio o il berillio (Nutristar Spa, 2021). Pertanto, è fondamentale utilizzare calibrature appropriate basate su campioni analizzati con metodi di riferimento per garantire risultati accurati.

La fluorescenza a raggi X, dunque, rappresenta una tecnica innovativa e promettente per la valutazione della composizione chimica degli alimenti zootecnici. La sua capacità di fornire risultati rapidi e precisi senza necessità di preparazioni complesse la rende un'importante risorsa per gli allevatori e i ricercatori nel campo della nutrizione animale. Con l'aumento dell'interesse verso pratiche agricole sostenibili e la necessità di ottimizzare le razioni alimentari per migliorare la salute animale e la produttività, l'XRF si conferma come uno strumento cruciale nel panorama delle tecnologie analitiche moderne.

1.2.1 *Descrizione dello strumento*

La fluorescenza a raggi X (XRF) è una tecnica analitica altamente sofisticata utilizzata per l'analisi quantitativa e qualitativa della composizione elementare di vari materiali, inclusi gli alimenti di interesse zootecnico. Gli strumenti XRF funzionano emettendo un fascio di raggi X su un campione, il quale, in risposta, emette radiazioni X caratterizzate da energie specifiche per ciascun elemento presente. Queste radiazioni vengono quindi rilevate e analizzate per determinare la presenza e la concentrazione degli elementi (Ronchi B., 2020).

Gli strumenti XRF possono essere classificati in due categorie principali: quelli a dispersione di energia (EDXRF) e quelli a dispersione di lunghezza d'onda (WDXRF). Gli EDXRF sono più comuni per applicazioni di screening rapido grazie alla loro semplicità e portabilità, mentre i WDXRF offrono una maggiore risoluzione e precisione, rendendoli ideali per analisi più dettagliate (Palmer P., 2009).

La configurazione tipica di un dispositivo XRF include una sorgente di raggi X, un sistema di collimazione per focalizzare il fascio sui campioni, e un rivelatore che misura l'intensità delle radiazioni emesse. Alcuni modelli avanzati sono dotati di software sofisticato che consente l'analisi automatizzata dei dati e la generazione di report dettagliati. In figura 5 è riportato lo strumento XRF presente nel laboratorio CNX dell'Università di Padova, dipartimento di Agraria e Medicina Veterinaria.

Figura 5. Strumento XRF (LabCNX).

Uno dei principali vantaggi della tecnologia XRF è la sua capacità di eseguire analisi non distruttive, consentendo l'analisi diretta dei campioni senza alterarne la composizione. Inoltre, la rapidità dell'analisi (richiede solo pochi minuti) rende l'XRF particolarmente utile in contesti produttivi dove il monitoraggio della qualità è fondamentale.
Tuttavia, è importante considerare che la precisione delle misurazioni può essere influenzata da vari fattori, come la matrice del campione e le condizioni ambientali durante l'analisi.

1.2.2 *Descrizione della procedura*

La procedura di analisi tramite XRF si articola in diverse fasi: prima è necessario preparare il campione, il quale deve essere ridotto in polvere fine o compresso in forma di pellet. Questa preparazione è cruciale per garantire l'omogeneità del campione e dunque risultati accurati. Inoltre, nel caso di campioni solidi, come foraggi o concentrati, la preparazione può includere la macinazione e la pressatura del materiale per formare una pastiglia liscia e compatta; per campioni liquidi, come il latte o le urine, non è necessaria alcuna preparazione; è sufficiente

versare il campione in un contenitore apposito. La figura 6 mostra la fase di preparazione del campione, dalla macinatura alla compressione sottoforma di pellet.

Figura 6. La fase di preparazione del campione (LabCNX).

Una volta preparato, il campione viene inserito nell'apparecchiatura XRF, dove viene bombardato da raggi X ad alta energia. Questo bombardamento induce gli atomi del campione a emettere raggi X caratteristici, i quali vengono rilevati da un detector. L'analisi si basa sulla misura dell'energia dei raggi X emessi, che è specifica per ciascun elemento chimico presente nel campione. La concentrazione di ogni elemento può quindi essere quantificata in base alla quantità di energia emessa.

La calibrazione dell'apparecchiatura è un passaggio fondamentale nella procedura. I campioni sconosciuti vengono analizzati in confronto a curve di calibrazione ottenute da standard noti, assicurando così l'accuratezza dei risultati. È sufficiente un numero limitato di campioni (circa 5-10) con una buona variabilità nella concentrazione degli elementi per ottenere calibrazioni affidabili.

Diversi studi hanno dimostrato l'efficacia della tecnica XRF nell'analisi degli alimenti zootecnici. Ad esempio, un lavoro condotto dall'Università di Padova ha utilizzato la XRF per analizzare 35 campioni di foraggi provenienti da circuiti di certificazione internazionali. I risultati hanno mostrato una corrispondenza elevata tra i valori ufficiali e le predizioni ottenute tramite XRF, evidenziando l'affidabilità della tecnica nel monitoraggio della composizione minerale dei foraggi (Berzaghi P., 2016). Un altro studio ha confermato la capacità della XRF di identificare carenze ed eccessi nei minerali delle razioni alimentari, rivelando problematiche

significative come l'elevato contenuto di potassio e le carenze di calcio e zolfo (Lazoovet, 2023).

Inoltre, la tecnologia XRF è stata adottata anche in contesti industriali e universitari per migliorare la gestione del bilancio minerale negli allevamenti. La sua applicazione si estende non solo all'analisi dei foraggi ma anche al monitoraggio della qualità del latte e alla valutazione dei reflui zootecnici. Grazie alla sua rapidità e precisione, l'XRF rappresenta uno strumento promettente per ottimizzare le pratiche alimentari negli allevamenti.

1.2.3 *Possibilità di utilizzo*

La spettroscopia a fluorescenza a raggi X (XRF) rappresenta una tecnica innovativa e altamente efficace per l'analisi degli alimenti di interesse zootecnico, consentendo di ottenere informazioni dettagliate sulla composizione chimica degli ingredienti utilizzati negli alimenti per animali.

Una delle applicazioni principali dell'XRF è nella determinazione della composizione minerale degli alimenti. Gli elementi minerali sono essenziali per la salute e la crescita degli animali, e l'XRF consente di analizzare rapidamente la concentrazione di nutrienti chiave come calcio, magnesio, fosforo e potassio. Ad esempio, un'analisi condotta da Cargill Animal Nutrition ha mostrato come l'implementazione della tecnologia XRF nei loro laboratori abbia migliorato significativamente la capacità di monitorare i livelli minerali nei mangimi, contribuendo a formulazioni più precise e ottimizzate per il benessere animale (Roembke J., 2015).

Inoltre, l'XRF è fondamentale nel controllo della contaminazione da metalli pesanti. La presenza di metalli tossici come piombo, cadmio e mercurio negli alimenti zootecnici rappresenta un rischio significativo per la salute degli animali e per la sicurezza alimentare umana. Attraverso l'analisi XRF, è possibile monitorare i livelli di questi contaminanti in modo efficace, garantendo che gli ingredienti utilizzati rispettino i limiti normativi stabiliti. Questo aspetto è particolarmente rilevante in un contesto in cui le normative sulla sicurezza alimentare sono sempre più severe (Rigaku Corporation, 2018).

La valutazione della qualità dei foraggi è un' area in cui l'XRF trova applicazione. I foraggi costituiscono una parte essenziale della dieta degli animali ruminanti e la loro qualità influisce direttamente sulla salute animale e sulla produttività. Utilizzando l'XRF, è possibile analizzare le caratteristiche chimiche dei foraggi freschi e conservati, fornendo informazioni su nutrienti

chiave e potenziali tossine. Questo tipo di analisi aiuta gli allevatori a ottimizzare le diete degli animali in base alla qualità del foraggio disponibile.
Inoltre, un'altra applicazione significativa dell'XRF riguarda l'analisi dei sottoprodotti utilizzati come ingredienti nei mangimi. Sottoprodotti industriali come le farine di estrazione possono variare notevolmente nella loro composizione chimica. L'XRF permette di valutare rapidamente la qualità di questi materiali, assicurando che siano idonei all'alimentazione animale.

Mentre, in ambito di ricerca, l'XRF si rivela uno strumento prezioso per gli scienziati che studiano nuove formulazioni alimentari. Essa consente di esplorare vari ingredienti e valutare la loro efficacia nutrizionale attraverso analisi dettagliate della loro composizione chimica. Per esempio, i ricercatori possono utilizzare la fluorescenza a raggi X per sviluppare nuove strategie nutrizionali che migliorano la salute animale e riducono i costi di produzione.
Infine, l'XRF è utile anche nel monitoraggio della produzione degli alimenti per animali. Grazie alla sua rapidità ed efficienza, questa tecnologia consente il controllo in tempo reale dei materiali in ingresso e dei prodotti finiti, garantendo che ogni lotto soddisfi gli standard qualitativi richiesti. La capacità dell'XRF di identificare corpi estranei o contaminanti fisici nei mangimi rappresenta un ulteriore vantaggio nella gestione della qualità.

In conclusione, l'applicazione della spettroscopia a fluorescenza a raggi X nell'analisi degli alimenti zootecnici offre una vasta gamma di opportunità per migliorare la qualità e la sicurezza degli ingredienti utilizzati nell'alimentazione animale. Questa tecnologia non solo facilita il monitoraggio dei nutrienti essenziali ma contribuisce anche a garantire che gli alimenti siano privi di contaminanti tossici, sostenendo così un allevamento più sicuro e sostenibile.

1.2.4 *Vantaggi e limiti*

La tecnica XRF è uno strumento analitico innovativo e versatile per la valutazione della composizione chimica degli alimenti, in particolare nel settore zootecnico. Tra i principali vantaggi, spicca la minima preparazione del campione, che consente un'analisi rapida e non distruttiva. A differenza di altre tecniche analitiche che richiedono complesse procedure di preparazione, l'XRF permette di analizzare campioni solidi e liquidi con una preparazione limitata a operazioni come la macinazione e la pressatura per i solidi, mentre per i liquidi è sufficiente versare il campione in un contenitore adatto (Berzaghi P., 2016). Questo aspetto non

solo riduce il tempo necessario per l'analisi, ma diminuisce anche il rischio di contaminazione e perdita di campione.

Un altro vantaggio significativo è la capacità di analisi multielementare: la fluorescenza a raggi X è in grado di identificare e quantificare simultaneamente diversi elementi minerali presenti nel campione, rendendola una scelta ideale per l'analisi nutrizionale degli alimenti zootecnici. Questa caratteristica è particolarmente utile per monitorare le carenze o gli eccessi di minerali nelle razioni alimentari degli animali, contribuendo a ottimizzare la loro salute e produttività. Inoltre, la tecnologia XRF ha dimostrato un elevato grado di accuratezza nelle sue misurazioni, come evidenziato da studi che hanno confrontato i risultati ottenuti tramite XRF con metodi tradizionali di analisi chimica, mostrando una correlazione molto alta (R^2) ed errori minimi nelle predizioni (Berzaghi P., 2016). In figura 7 viene riportato un esempio di analisi multielementare simultanea da parte della tecnica XRF.

Figura 7. Analisi multielementare simultanea (LabCNX).

Tuttavia, nonostante i numerosi vantaggi, l'XRF presenta anche alcuni limiti. Uno dei principali è la necessità di calibrazioni precise basate su campioni noti. Per ottenere risultati affidabili, è fondamentale avere un numero adeguato di campioni di riferimento con una buona variabilità nella concentrazione degli elementi minerali analizzati (World of Test, 2021). Questo richiede un investimento iniziale in termini di tempo e risorse per sviluppare e validare le calibrazioni necessarie.

Inoltre, l'XRF può presentare difficoltà nell'analisi di elementi leggeri come il litio o il boro, che potrebbero non essere rilevabili con la stessa precisione rispetto ad elementi più pesanti. Questo può limitare l'applicabilità della tecnica in contesti in cui è necessaria una valutazione completa della composizione minerale. Un altro aspetto da considerare è che l'accuratezza dell'XRF può variare a seconda della matrice del campione; ad esempio, i risultati possono differire significativamente tra foraggi freschi e foraggi essiccati.
Infine, sebbene l'XRF sia una tecnica promettente per l'analisi degli alimenti zootecnici, la sua implementazione richiede una formazione adeguata del personale e una comprensione approfondita delle tecniche analitiche per interpretare correttamente i dati ottenuti. La mancanza di competenze specifiche potrebbe portare a errori nell'interpretazione dei risultati e nella formulazione delle razioni alimentari.

In conclusione, la tecnica XRF offre un approccio innovativo ed efficace per l'analisi chimica degli alimenti zootecnici, con vantaggi significativi in termini di velocità e capacità multielementare. Tuttavia, è essenziale affrontare le sue limitazioni attraverso una corretta calibrazione e formazione del personale per garantire risultati affidabili e utili nella gestione nutrizionale degli animali.

1.3 **Naso elettronico**

Il naso elettronico è una tecnologia che, attraverso un insieme di sensori elettro-chimici, permette di rilevare e quantificare i composti volatili presenti in un alimento, rendendolo uno strumento particolarmente utile per l'analisi delle sue proprietà organolettiche (Ronchi B., 2020).

In particolare, è capace di identificare l'aroma e l'odore di un prodotto, due parametri fondamentali che forniscono informazioni preziose sulla qualità nutrizionale e la sicurezza degli alimenti, soprattutto quelli destinati all'alimentazione animale. In figura 8 è riportato il setup del naso elettronico.

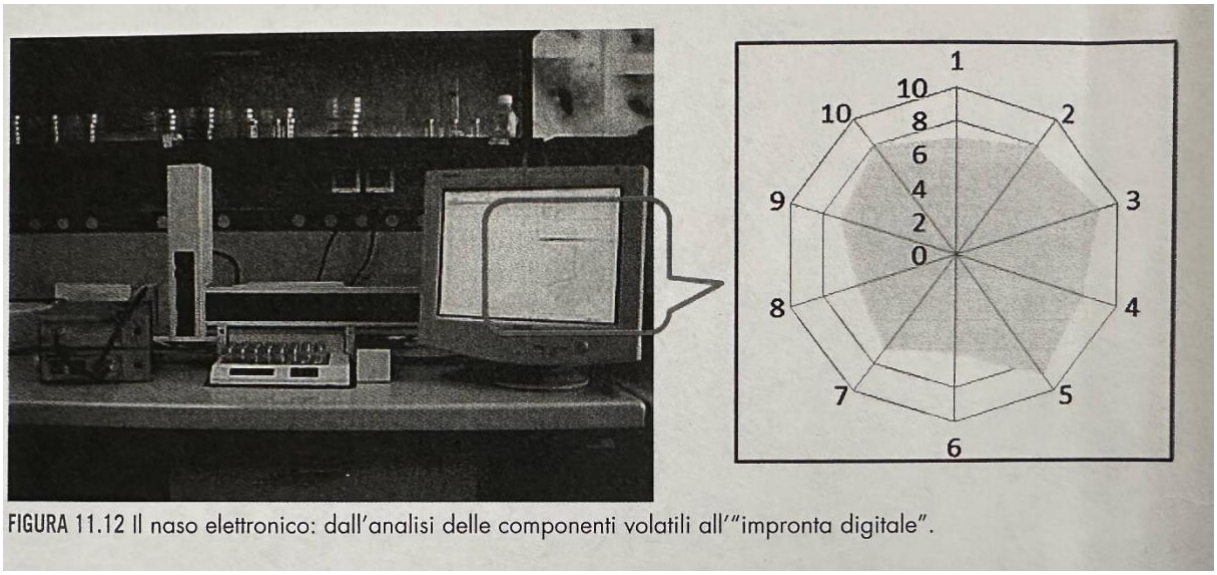

Figura 8. Naso elettronico (Ronchi, et al., 2020).

Tradizionalmente, tali caratteristiche sensoriali venivano valutate attraverso l'olfatto umano, una procedura soggettiva e quindi soggetta a variabilità individuali. L'introduzione del naso elettronico ha quindi rivoluzionato il settore, poiché consente di ottenere dati oggettivi e ripetibili, rendendolo dunque uno strumento essenziale per le aziende zootecniche e per l'industria mangimistica (Ronchi B., 2020).

Nel contesto dell'industria zootecnica, il naso elettronico trova ampio impiego per il monitoraggio della qualità dei mangimi, poiché l'odore di un alimento può indicare la presenza di sostanze indesiderate o il deterioramento del prodotto. L'analisi rapida e in tempo reale offerta dal naso elettronico è particolarmente vantaggiosa per l'industria alimentare, dove il controllo della qualità deve avvenire in modo tempestivo per garantire che i prodotti immessi sul mercato rispettino gli standard normativi e siano sicuri per il consumo. Questo tipo di analisi

sensoriale può inoltre contribuire a ottimizzare il processo produttivo, consentendo di individuare tempestivamente eventuali problemi nella filiera di lavorazione degli alimenti, e facilitando così la correzione immediata di eventuali anomalie (Ronchi B., 2020).

Il funzionamento del naso elettronico si basa sulla capacità dei sensori di reagire alle molecole volatili emesse dagli alimenti, che vengono percepite in modo complessivo e trasformate in segnali elettrici. Questi segnali sono poi elaborati e interpretati attraverso algoritmi specifici, creando una sorta di "impronta digitale" del prodotto. Questa impronta rappresenta una firma univoca che permette di classificare il prodotto secondo parametri specifici come la qualità, la freschezza, l'integrità e, in alcuni casi, l'eventuale presenza di contaminanti (Ronchi B., 2020). Il naso elettronico non solo riduce i tempi necessari per condurre analisi approfondite, ma offre anche risultati altamente affidabili che supportano i processi decisionali nel controllo della qualità alimentare.

Inoltre, rispetto alle tecniche sensoriali tradizionali, questo strumento risponde alla crescente domanda di analisi multi-analitiche, che permettono di raccogliere più informazioni da un singolo campione. Ciò è particolarmente rilevante in un'epoca in cui l'industria alimentare è chiamata a rispondere a normative sempre più stringenti e a fornire prodotti sicuri, tracciabili e di alta qualità. Il naso elettronico, dunque, si dimostra una soluzione versatile e innovativa, che può essere utilizzata sia a livello industriale per il controllo di prodotto che in azienda per la gestione quotidiana degli alimenti destinati agli animali.

1.3.1 *Descrizione dello strumento e del procedimento analitico*

Il naso elettronico è composto principalmente da una serie di sensori elettro-chimici, ciascuno dei quali reagisce a un determinato spettro di composti volatili presenti nell'aria o nell'ambiente in cui viene campionato l'alimento. Questi sensori, sebbene non siano in grado di identificare i singoli composti chimici in modo dettagliato, captano una combinazione di molecole volatili, producendo così un segnale complessivo che rappresenta il profilo aromatico globale del prodotto analizzato. Il risultato di questa interazione tra i sensori e i composti volatili genera una risposta elettrica che viene successivamente elaborata da un software avanzato, in grado di convertire queste informazioni in dati utili per la valutazione qualitativa e quantitativa del campione (Ronchi B., 2020).

Dal punto di vista strutturale, il naso elettronico è costituito, oltre che dai sensori elettro-chimici, da una camera di rilevamento, dove il campione viene introdotto e analizzato, e da

un'unità di elaborazione dei dati, la quale integra algoritmi statistici avanzati per interpretare le risposte dei sensori (Ronchi B., 2020). Il sistema è progettato per essere modulare, consentendo l'aggiunta di sensori specifici a seconda dell'applicazione e del tipo di prodotto da analizzare. Ad esempio, in alcuni contesti è possibile configurare il naso elettronico per rilevare specifici contaminanti o per valutare il grado di deterioramento di un alimento.

La procedura di utilizzo del naso elettronico è relativamente semplice: il campione viene inserito nella camera di analisi, dove i sensori entrano in contatto con i composti volatili emessi. In pochi minuti, i sensori reagiscono e generano segnali che vengono processati dal sistema, il quale elabora i dati raccolti e fornisce una risposta, spesso visibile su un display digitale. Il risultato può essere espresso in termini qualitativi, come nel caso di una risposta binaria ("buono-cattivo", "Sì-No"), oppure in forma quantitativa, con una valutazione più dettagliata delle caratteristiche del campione. Questa flessibilità rende il naso elettronico uno strumento versatile, adatto a una varietà di applicazioni nel settore agro-alimentare (Ronchi B., 2020).

L'elaborazione dei dati è una fase critica del processo, poiché è qui che vengono applicati complessi algoritmi di riconoscimento dei pattern, come le reti neurali o le tecniche chemiometriche, per classificare i campioni in base ai parametri di interesse. Questo passaggio richiede un'elevata precisione per garantire che i risultati siano affidabili e utilizzabili per il monitoraggio e il controllo della qualità degli alimenti. La precisione del naso elettronico dipende, infatti, non solo dalla sensibilità dei sensori, ma anche dalla capacità del sistema di riconoscimento di elaborare correttamente i dati e fornire una valutazione accurata del campione (Ronchi B., 2020).

Oltre ai sistemi di laboratorio, esistono versioni portatili del naso elettronico, che sono particolarmente utili per l'analisi sul campo o per il controllo in tempo reale di prodotti lungo la catena di produzione. Questi dispositivi sono compatti, dotati di display integrati e facili da usare anche per operatori non specializzati. Grazie alla loro versatilità, i nasi elettronici portatili sono utilizzati in un'ampia gamma di applicazioni, dalla rilevazione di odori indesiderati alla valutazione della qualità di mangimi e foraggi direttamente sul luogo di produzione.

1.3.2 *Possibilità di utilizzo*

Per quanto riguarda le applicazioni nell'analisi degli alimenti per animali, il naso elettronico è caratterizzato da una notevole versatilità. Infatti, esso può essere impiegato nella rilevazione di contaminanti, nella valutazione della qualità degli insilati e delle caratteristiche organolettiche dei foraggi, ed anche nella ricerca di costituenti di origine animale nei mangimi (Ronchi B., 2020). La presenza di contaminanti nei mangimi, come le micotossine derivanti dallo sviluppo di muffe, rappresenta un grave rischio per la qualità e la sicurezza alimentare. Il naso elettronico offre la possibilità di identificare rapidamente i composti volatili associati alla crescita fungina, come alcoli, aldeidi e chetoni, che indicano la presenza di contaminazioni. Questa tecnologia è particolarmente utile nella valutazione della contaminazione dei cereali, dove è in grado di distinguere campioni contaminati da micotossine come il deossinivalenolo (DON) in base ai livelli normativi stabiliti (Ronchi B., 2020). Grazie all'applicazione di modelli chemiometrici, il naso elettronico può non solo rilevare la presenza di tali contaminanti, ma anche fornire una valutazione semi-quantitativa, e ciò è fondamentale per garantire che i livelli di contaminazione non superino i limiti consentiti dalla legge.

Nell'ambito degli insilati, il naso elettronico è uno strumento promettente per valutare la qualità di conservazione e fermentazione. Durante la conservazione degli insilati, si sviluppano una serie di composti volatili che influenzano la qualità nutrizionale, lo stato igienico e le caratteristiche organolettiche del prodotto. La possibilità di rilevare in modo rapido questi composti è di fondamentale importanza per una gestione efficiente degli insilati, poiché la qualità può variare significativamente in base alla posizione all'interno del deposito. In particolare, nella valutazione di alcuni parametri come gli acidi grassi e l'azoto ammoniacale, il naso elettronico ha mostrato capacità superiori rispetto ad altre tecniche, come il NIR (Ronchi B., 2020). Anche se l'uso del naso elettronico per la valutazione degli insilati è ancora in una fase iniziale, i vantaggi legati alla portabilità dello strumento, alla rapidità di analisi e ai bassi costi operativi rendono questa tecnologia una soluzione ideale per il controllo della qualità direttamente nel campo.

Un'altra importante applicazione del naso elettronico riguarda la valutazione delle caratteristiche organolettiche dei foraggi. Queste caratteristiche influenzano direttamente l'appetibilità e, di conseguenza, il consumo di sostanza secca da parte degli animali. L'analisi del profilo aromatico dei foraggi, resa possibile dai sensori del naso elettronico, consente di valutare in modo obiettivo la qualità organolettica, aiutando così a prevedere il comportamento

alimentare degli animali ed a ottimizzare la gestione alimentare. In particolare, la presenza di composti volatili come l'acido butirrico, e di prodotti della proteolisi, indica una scarsa qualità di conservazione, la quale riduce l'assunzione di sostanza secca compromettendo così la produttività dell'allevamento (Ronchi B., 2020).

Infine, il naso elettronico si è rivelato utile nella ricerca di costituenti di origine animale nei mangimi. Questa applicazione è particolarmente rilevante in seguito alle normative europee che regolano l'uso di farine animali nei mangimi. Grazie alla capacità di discriminare tra campioni contenenti farine di carne e pesce, il naso elettronico rappresenta una soluzione rapida per rilevare la presenza di tali costituenti, anche a basse concentrazioni (Ronchi B., 2020).
Tuttavia, la tecnologia presenta ancora delle limitazioni, come la difficoltà a distinguere tra farine di carne e pesce, quando entrambe sono presenti in basse quantità. Nonostante questi limiti, l'approccio basato sul naso elettronico offre un potenziale significativo per l'implementazione di metodi di screening più rapidi ed efficaci nel controllo di qualità dei mangimi.

1.3.3 *Vantaggi e limiti*

Il naso elettronico presenta numerosi vantaggi, che lo rendono un'opzione interessante per l'industria mangimistica e agricola. Uno dei principali punti di forza è la sua rapidità di analisi: rispetto ai metodi tradizionali di laboratorio, che richiedono tempi più lunghi e spesso complesse preparazioni dei campioni, il naso elettronico fornisce risultati in tempo reale, consentendo decisioni rapide ed un controllo continuo della qualità. Questo aspetto è particolarmente rilevante nella gestione degli insilati, dove la qualità può variare rapidamente e un intervento tempestivo può fare la differenza in termini di nutrizione animale e costi produttivi (Ronchi B., 2020).

Un altro vantaggio significativo è la facilità d'uso dello strumento, che non richiede una particolare formazione tecnica da parte dell'operatore. Ciò significa che il naso elettronico può essere utilizzato direttamente in campo da personale non specializzato, riducendo i costi legati all'impiego di tecnici esperti e laboratori. Inoltre, la portabilità di alcuni modelli consente un utilizzo versatile, sia per analisi di routine in azienda sia per applicazioni più specifiche di ricerca e sviluppo.

Nonostante questi vantaggi, il naso elettronico presenta alcuni limiti che ne condizionano l'applicabilità. Uno dei principali limiti è la sensibilità inferiore rispetto ai metodi analitici tradizionali, come la cromatografia o la spettrometria di massa (Ronchi B., 2020). Questo può rappresentare un problema quando è necessaria una valutazione estremamente precisa di alcuni composti volatili o contaminanti. Inoltre, l'affidabilità dei risultati dipende fortemente dalla qualità del campionamento, dunque nel caso degli insilati, a causa della variabilità interna del prodotto, i campioni analizzati possono non essere perfettamente rappresentativi (Ronchi B., 2020).

Un altro limite riguarda la specificità dello strumento. Sebbene il naso elettronico sia in grado di rilevare un'ampia gamma di composti volatili, la sua capacità di distinguere tra singoli componenti chimici è limitata (Ronchi B., 2020). Questo significa che, in alcuni casi, i risultati potrebbero non essere sufficientemente dettagliati per identificare con precisione la causa di un problema di qualità, richiedendo comunque l'uso di metodi analitici più specifici.

Dunque, il naso elettronico rappresenta uno strumento innovativo e versatile per l'analisi degli alimenti destinati alla nutrizione animale, con un elevato potenziale per migliorare l'efficienza dei processi di controllo qualità. Tuttavia, per garantire risultati affidabili e un'ampia applicabilità, è necessario continuare a sviluppare protocolli specifici e migliorare la sensibilità e la robustezza dello strumento. Nonostante i limiti attuali, le sue caratteristiche di rapidità, facilità d'uso e basso costo lo rendono uno strumento promettente, soprattutto nei contesti aziendali dove la velocità di risposta è cruciale.

1.4 **Termografia a infrarosso**

La termografia a infrarosso, nota anche come termovisione, è una tecnica di imaging non invasiva che permette di rilevare e mappare la temperatura superficiale di un oggetto o di un organismo attraverso l'analisi delle radiazioni infrarosse emesse. Questa tecnologia si basa sul principio fisico per cui ogni corpo con una temperatura superiore allo zero assoluto (0 K, ossia -273,15 °C) emette radiazioni elettromagnetiche, principalmente nella gamma degli infrarossi. Le termocamere, dispositivi utilizzati per catturare queste radiazioni, convertono tali emissioni in segnali visivi, restituendo immagini in cui le diverse temperature superficiali vengono rappresentate attraverso un gradiente cromatico, di solito dal blu per le superfici più fredde al rosso per quelle più calde (Ronchi B., 2020). La figura 9 riporta lo spettro elettromagnetico.

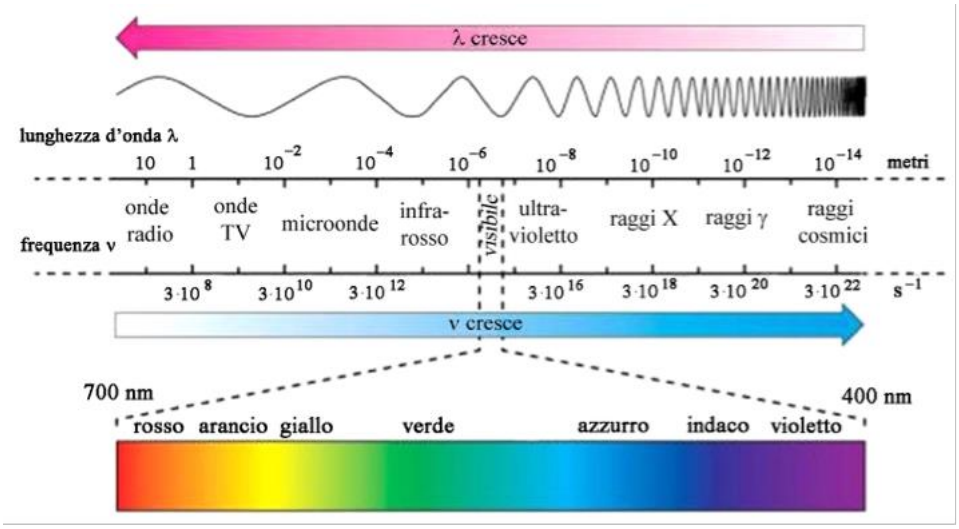

Figura 9. Lo spettro elettromagnetico (IBSE, 2015).

Questa tecnica, inizialmente sviluppata per scopi militari, ha trovato una vasta gamma di applicazioni in campo civile e industriale grazie alla sua capacità di fornire informazioni in tempo reale, senza bisogno di contatto fisico e senza compromettere l'integrità degli oggetti o organismi osservati. Al giorno d' oggi, oltre ai settori medico, edile e della sicurezza, la termografia ha un impiego crescente nel campo della zootecnia e dell'industria alimentare, dato che può essere utilizzata per monitorare lo stato di salute degli animali, valutare il loro benessere, verificare le condizioni ambientali e garantire la qualità nutrizionale dei prodotti destinati all'alimentazione zootecnica (Ronchi B., 2020).

1.4.1 Descrizione dello strumento

Il principale strumento per la termografia a infrarosso è la termocamera, un dispositivo che cattura le radiazioni infrarosse emesse dagli oggetti e le converte in segnali elettrici che vengono elaborati per produrre un'immagine termica. Le termocamere moderne utilizzano sensori a microbolometro non raffreddati, capaci di rilevare con estrema precisione le variazioni di temperatura, anche minime. La finestra spettrale entro la quale operano, tipicamente tra 8 e 14 micrometri, è ottimale per la rilevazione delle temperature di oggetti o superfici a temperatura ambiente, consentendo una rappresentazione accurata delle differenze termiche (Ronchi B., 2020).

Le termocamere, oltre al sensore termico, sono dotate di ottiche speciali, generalmente realizzate in materiali trasparenti all'infrarosso come il germanio, che permettono la focalizzazione delle radiazioni. Alcuni modelli più avanzati integrano funzioni di zoom ottico e digitale, consentendo di analizzare più nel dettaglio le aree di interesse. Queste fotocamere termiche sono inoltre dotate di software dedicati per l'analisi e la registrazione delle immagini, permettendo così di isolare specifici intervalli di temperatura e di quantificare in modo preciso le differenze termiche (Ronchi B., 2020).

Le immagini generate dalle termocamere sono rappresentazioni visive delle differenze di temperatura, con una scala cromatica che varia dal blu per le aree più fredde al rosso o bianco per quelle più calde. Queste immagini possono essere registrate e analizzate successivamente per identificare anomalie, zone di stress termico o situazioni che potrebbero indicare problemi come infiammazioni negli animali o inefficienze nei processi produttivi (Ronchi B., 2020).

1.4.2 Descrizione della procedura

La termografia a infrarossi è un metodo innovativo e non invasivo utilizzato per analizzare la qualità degli alimenti zootecnici, in particolare gli insilati, che sono fondamentali nella dieta dei ruminanti. La procedura per l'analisi degli alimenti attraverso questa tecnologia può essere suddivisa in diversi passaggi.

In primo luogo, è necessario selezionare il campione di insilato da analizzare, come ad esempio insilati di mais o orzo. Una volta scelto il campione, si procede a preparare il sito di analisi,

assicurandosi che l'area sia priva di fonti di luce diretta e altre interferenze che potrebbero alterare le misurazioni della temperatura (Ronchi B., 2020).

Successivamente, si utilizza una termocamera per acquisire immagini termografiche della massa insilata. La termocamera viene posizionata a una distanza adeguata dal campione per garantire una visione chiara e precisa. Durante l'acquisizione delle immagini, è importante monitorare la temperatura del fronte di taglio dell'insilato, poiché variazioni termiche possono indicare fermentazioni anomale o deterioramento del materiale (Ronchi B., 2020).

Una volta ottenute le immagini, si analizzano i dati per identificare eventuali aree di temperatura anomala, che possono segnalare problemi di stabilità o di qualità del materiale. Questo processo non solo fornisce informazioni immediate sulla condizione dell'insilato, ma consente anche di eseguire analisi ripetute nel tempo, monitorando i cambiamenti nella temperatura e nella qualità del campione (Ronchi B., 2020).

Inoltre, la termografia a infrarossi trova applicazione anche nell'analisi delle parti del corpo degli animali, dove la temperatura superficiale può fornire informazioni utili sullo stato di salute e sul benessere degli animali stessi. In particolare, può essere utilizzata per monitorare segni di infiammazione, infezioni o stress, contribuendo a un approccio integrato nella gestione della nutrizione e della salute animale (Ronchi B., 2020).

Questa tecnologia, quindi, si dimostra un valido strumento non solo per garantire la qualità degli alimenti, ma anche per promuovere il benessere degli animali, evidenziando l'importanza di un'alimentazione sana e nutriente nel contesto della zootecnia moderna.

1.4.3 Possibilità di utilizzo

La termografia a infrarossi presenta numerose applicazioni nel settore dell'analisi degli alimenti zootecnici, rendendola uno strumento innovativo e versatile per migliorare la qualità e la sicurezza alimentare. Una delle principali aree di applicazione è la valutazione della qualità degli insilati, che rappresentano una componente cruciale della dieta per ruminanti. Utilizzando la termografia, è possibile monitorare la temperatura del fronte di taglio degli insilati, identificando variazioni termiche che possono segnalare fermentazioni indesiderate o deterioramento del materiale. Questo approccio garantisce che gli insilati mantengano standard

di qualità elevati, contribuendo al benessere degli animali e alla produzione di alimenti sani (Ronchi B., 2020).

Un'altra applicazione importante è la valutazione della stabilità aerobica degli insilati. Attraverso l'analisi termografica, è possibile individuare aree particolarmente calde che potrebbero indicare processi di degradazione, fornendo indicazioni tempestive per intervenire e migliorare le condizioni di conservazione. Inoltre, la termografia permette di effettuare misurazioni non invasive e ripetute nel tempo, offrendo dati preziosi per la gestione della qualità alimentare durante il periodo di stoccaggio (Ronchi B., 2020).

La tecnologia può anche essere utilizzata per analizzare altri tipi di alimenti zootecnici, come i concentrati e i foraggi, consentendo una valutazione globale della loro qualità nutrizionale. Monitorando la temperatura e identificando anomalie, i tecnici nutrizionisti possono prendere decisioni informate sulla formulazione delle razioni, ottimizzando l'alimentazione degli animali e migliorando la loro efficienza produttiva (Ronchi B., 2020).

Oltre all'analisi degli alimenti, la termografia a infrarossi trova applicazione nel monitoraggio delle parti del corpo degli animali, contribuendo a un approccio integrato alla salute animale (Ronchi B., 2020). Infatti, questa tecnologia si rivela utile anche per rilevare segnali di stress, infiammazione o infezioni dell'animale, integrando le informazioni sulla qualità alimentare con quelle sul benessere del bestiame.

1.4.4 Vantaggi e limiti

La termografia a infrarossi offre numerosi vantaggi nell'analisi degli alimenti zootecnici, rendendola una tecnica innovativa e utile nel settore della nutrizione animale. Uno dei principali vantaggi è la capacità di fornire misurazioni non invasive e in tempo reale. Questo consente un monitoraggio continuo della qualità degli alimenti, riducendo il rischio di deterioramento e garantendo che gli animali ricevano nutrimenti ottimali (Ronchi B., 2020). Inoltre, la termografia permette di identificare rapidamente aree problematiche negli insilati, facilitando interventi tempestivi per migliorare le condizioni di conservazione e prevenire perdite economiche.

Un altro aspetto positivo è l'alta sensibilità della tecnologia nel rilevare variazioni termiche, che possono essere indicative di processi di fermentazione anomali o di deterioramento degli

alimenti (Ronchi B., 2020). Ciò si traduce in una gestione più efficiente della qualità degli insilati e degli alimenti zootecnici, promuovendo il benessere degli animali e la produzione di alimenti di qualità superiore. Inoltre, l'uso di termocamere è facilmente automatizzabile, consentendo acquisizioni di dati standardizzate e ripetitive senza necessità di operazioni manuali laboriose.

Tuttavia, la termografia a infrarossi presenta anche alcuni limiti. Innanzitutto, le misurazioni possono essere influenzate da fattori ambientali, come la temperatura dell'aria e l'umidità, che possono alterare i risultati e rendere necessaria una calibrazione accurata degli strumenti (Ronchi B., 2020).

Inoltre, la tecnologia può rivelarsi meno efficace in alimenti con una composizione chimica complessa o in presenza di coperture isolate, che potrebbero impedire una corretta lettura della temperatura. Questo è particolarmente evidente per insilati di qualità variabile, dove la densità e la compattezza possono influenzare le letture termografiche (Ronchi B., 2020).

Infine, la termografia a infrarossi, sebbene utile, non può sostituire completamente le metodologie tradizionali di analisi della qualità alimentare, come l'analisi chimica e microbiologica (Ronchi B., 2020). Pertanto, è consigliabile utilizzarla in combinazione con altre tecniche analitiche per ottenere un quadro completo della qualità degli alimenti zootecnici.

In conclusione, la termografia a infrarossi si presenta come un valido strumento nell'analisi degli alimenti zootecnici, con numerosi vantaggi, ma è fondamentale considerare anche i suoi limiti e integrarla con altre metodologie per massimizzare l'efficacia del monitoraggio della qualità alimentare.

1.5 **Strumenti per la determinazione delle emissioni di metano**

Il metano è un gas serra di notevole rilevanza, essendo responsabile di circa il 44% delle emissioni antropiche globali di questo gas, con una parte significativa proveniente dagli allevamenti intensivi. Il processo di produzione del metano negli allevamenti è principalmente legato alla fermentazione enterica, un fenomeno naturale che avviene nel tratto digestivo dei ruminanti, come bovini e ovini. Durante questo processo, i microbi metanogeni presenti nello stomaco degli animali degradano la materia organica, producendo metano come sottoprodotto. Questo gas ha un potenziale di riscaldamento globale 80 volte superiore a quello dell'anidride carbonica (CO_2) nel breve termine, rendendo la sua gestione cruciale per affrontare il cambiamento climatico (Urbani L., 2023).
Le emissioni di metano derivanti dagli allevamenti intensivi sono aumentate drammaticamente negli ultimi decenni, contribuendo significativamente al riscaldamento globale. Secondo recenti studi, le emissioni di metano dagli allevamenti sono aumentate dell'86% rispetto a un secolo fa, evidenziando l'urgenza di sviluppare strategie efficaci per la loro mitigazione. La crescente consapevolezza riguardo all'impatto ambientale dell'allevamento ha spinto la comunità scientifica a esplorare tecniche innovative per misurare e monitorare queste emissioni (Urbani L., 2023).

Tra le tecniche più promettenti per la valutazione delle emissioni di metano ci sono i rilevatori laser di metano (LMD), che utilizzano la spettroscopia di assorbimento infrarosso per rilevare le concentrazioni di CH_4 nell'aria espirata dagli animali. Questo metodo offre vantaggi significativi rispetto ai metodi tradizionali, poiché consente misurazioni in tempo reale senza la necessità di confinare gli animali in camere respiratorie, riducendo così lo stress sugli animali e migliorando il benessere animale. Inoltre, i LMD possono essere utilizzati in condizioni ambientali variabili e forniscono dati utili per confrontare le emissioni tra diverse pratiche di allevamento (Conte G., 2023).

Un altro approccio innovativo è l'uso del tracciante esafluoruro di zolfo (SF_6), che permette di stimare le emissioni di metano mantenendo gli animali al pascolo. Questa tecnica, sebbene più invasiva e laboriosa, offre un'alternativa utile per studi su larga scala in ambienti naturali. È importante notare che ogni metodo presenta vantaggi e limiti: ad esempio, mentre i LMD sono meno invasivi e più rapidi, le tecniche tradizionali possono fornire dati più accurati ma richiedono condizioni controllate (Conte G., 2023).

Inoltre, il metano prodotto durante la fermentazione enterica non è solo una fonte di emissioni indesiderate; può anche essere valorizzato attraverso processi di digestione anaerobica per la produzione di biogas e biometano. Questi processi consentono di catturare il metano emesso e utilizzarlo come fonte energetica rinnovabile. Il biogas prodotto può essere impiegato per generare elettricità o calore, mentre il biometano può essere purificato e immesso nella rete del gas naturale o utilizzato come carburante per veicoli. Questo approccio non solo contribuisce a ridurre le emissioni nette di gas serra, ma offre anche opportunità economiche per gli allevatori attraverso la valorizzazione dei sottoprodotti agricoli.
La necessità di ridurre le emissioni di metano è ulteriormente accentuata dalla crescente pressione normativa e dalle iniziative globali per affrontare il cambiamento climatico. Tuttavia, attualmente solo una piccola percentuale delle aziende agricole ha implementato sistemi efficaci per monitorare e gestire queste emissioni.

In conclusione, la comprensione e la gestione delle emissioni di metano negli allevamenti sono fondamentali non solo per ridurre l'impatto ambientale dell'agricoltura intensiva ma anche per garantire la sostenibilità a lungo termine del settore zootecnico. L'adozione di tecniche innovative come i rilevatori laser e l'uso di traccianti rappresenta un passo importante verso una maggiore consapevolezza e responsabilità ambientale nel settore.

1.5.1 *Descrizione degli strumenti e della loro procedura*

Il Laser Methane Detector (LMD) è un dispositivo portatile che utilizza la spettroscopia di assorbimento infrarosso per misurare le concentrazioni di metano nell'aria. Questo strumento è stato inizialmente sviluppato per rilevare perdite di gas in contesti industriali, ma dal 2009 è stato adattato per misurare le emissioni di metano da ruminanti. Esso funziona emettendo un fascio laser che interagisce con le molecole di metano presenti nell'aria: la quantità di luce assorbita fornisce una misura della concentrazione di metano, espressa in parti per milione (ppm) lungo il percorso del laser. Questo strumento ha dimostrato un'accuratezza del ±10% e può operare a distanze comprese tra 0,5 e 30 metri, rendendolo particolarmente utile per misurazioni non invasive e in tempo reale (Sorg D., 2021). La portabilità del LMD consente anche l'uso in diverse condizioni ambientali, rendendolo adatto a studi sia in stalla che in pascolo.

La figura 10 mostra lo strumento LMD portatile.

Figura 10. Lo strumento Laser Methane Detector MINI (Conte, 2024).

Un altro strumento importante è la tecnica dei traccianti di esafluoruro di zolfo (SF_6), utilizzata per stimare le emissioni di metano enterico dai ruminanti. Questa tecnica si basa sull'inserimento di un tubo permeabile nel rumine dell'animale, che rilascia SF_6 a un tasso costante. Quando l'animale erutta, i gas espulsi contengono sia metano che SF_6. Raccolti in contenitori evacuati, i campioni di gas vengono analizzati per determinare il rapporto tra metano e SF_6, permettendo così di calcolare le emissioni giornaliere di metano (Berndt A., 2014). Questa metodologia ha il vantaggio di poter essere applicata anche ad animali liberi di pascolare, eliminando la necessità di confinamento in condizioni artificiali e stressanti.

Entrambi gli strumenti hanno dimostrato efficacia nella quantificazione delle emissioni di metano, ma presentano anche limitazioni. Il LMD richiede condizioni atmosferiche favorevoli e può essere influenzato da fattori come il comportamento dell'animale e le condizioni climatiche al momento della misurazione (Kang K., 2022). D'altra parte, la tecnica dei traccianti di SF_6 può presentare variazioni nei risultati a causa della complessità nella raccolta dei campioni e della necessità di calibrazione accurata. Tuttavia, studi recenti hanno mostrato che entrambi i metodi possono fornire stime affidabili delle emissioni, contribuendo così a strategie più efficaci per la gestione delle emissioni nei sistemi zootecnici.

In conclusione, l'uso del LMD e della tecnica dei traccianti di SF_6 rappresenta un passo significativo verso una migliore comprensione e gestione delle emissioni di metano nell'allevamento degli animali. Questi strumenti non solo facilitano il monitoraggio delle

emissioni in tempo reale, ma offrono anche opportunità per sviluppare pratiche più sostenibili nell'allevamento ruminante, contribuendo così alla lotta contro i cambiamenti climatici.

1.5.2 *Possibilità di utilizzo*

L'uso del Laser Methane Detector (LMD) e dei traccianti di esafluoruro di zolfo (SF_6) offre opportunità significative non solo per la misurazione delle emissioni di metano, ma anche per migliorare l'efficienza della produzione zootecnica e promuovere pratiche sostenibili. Questi strumenti possono essere integrati in vari contesti, come il monitoraggio della salute degli animali, la personalizzazione delle diete e la gestione delle risorse alimentari. Ad esempio, l'analisi dei dati raccolti tramite LMD può contribuire a identificare animali con emissioni elevate, permettendo agli allevatori di apportare modifiche mirate alla dieta o alla gestione del bestiame. Inoltre, l'implementazione di tecniche di "precision feeding" può ottimizzare l'alimentazione degli animali, riducendo le emissioni di metano attraverso una dieta più bilanciata e adeguata alle esigenze nutrizionali specifiche di ciascun animale (Conte G., 2024).

Il Laser Methane Detector, grazie alla sua capacità di fornire misurazioni in tempo reale, consente di monitorare le emissioni in diverse situazioni, come durante il pascolo, l'alimentazione e la ruminazione. Questa versatilità permette agli allevatori di adattare le loro pratiche in base alle condizioni ambientali e al comportamento degli animali. Inoltre, esso può essere utilizzato per valutare l'efficacia di nuovi additivi alimentari o strategie nutrizionali nel ridurre le emissioni di metano. Infine, la possibilità di effettuare misurazioni non invasive rappresenta un ulteriore vantaggio, poiché riduce lo stress sugli animali e consente una raccolta dati più accurata (Conte G., 2023).
I traccianti di esafluoruro di zolfo offrono un approccio complementare per la misurazione delle emissioni di metano. Questo metodo prevede l'inserimento di un bolo contenente SF_6 nel tratto gastrointestinale dell'animale, da cui si può monitorare la quantità di metano emessa durante il pascolo. Sebbene questo metodo possa fornire dati utili sulle emissioni in situazioni naturali, presenta alcuni svantaggi significativi, come l'invasività e le complicazioni logistiche legate al posizionamento del bolo. Tuttavia, i dati ottenuti possono essere utilizzati per studi approfonditi sui fattori che influenzano le emissioni enteriche, come la genetica degli animali e le pratiche di gestione (Conte G., 2024).

Un aspetto cruciale dell'uso delle emissioni di metano è il loro potenziale utilizzo per la produzione di biogas e biometano. Catturando il metano prodotto dagli animali attraverso

processi come la digestione anaerobica del letame, è possibile trasformare un problema ambientale in una risorsa energetica rinnovabile. Il biogas generato può essere purificato per ottenere biometano, un'alternativa sostenibile ai combustibili fossili. Questa pratica non solo contribuisce a ridurre le emissioni complessive di gas serra, ma offre anche un'opportunità economica per gli allevatori, consentendo loro di diversificare le fonti di reddito (Conte G., 2023).

1.5.3 *Vantaggi e limiti*

I metodi per la determinazione delle emissioni di metano, come il Laser Methane Detector e il tracciamento del diesafluoruro di zolfo (SF_6), offrono vantaggi significativi ma presentano anche alcune limitazioni.

Il primo utilizza la tecnologia della spettroscopia ad assorbimento laser per rilevare il metano a distanza: uno dei principali vantaggi di questo dispositivo è la sua capacità di identificare fughe di gas metano anche di bassissima entità, fino a valori di parti per milione (ppm) . Inoltre, la sua portabilità e facilità d'uso rendono il Laser Methane Detector particolarmente utile in situazioni in cui è necessario monitorare ampie aree.

Tuttavia, ci sono anche dei limiti associati all'uso del Laser Methane Detector. La tecnologia può essere influenzata da condizioni ambientali avverse, come pioggia o nebbia, che potrebbero ridurre l'efficacia del rilevamento. Inoltre, sebbene il dispositivo sia altamente selettivo per il metano, la presenza di altri gas potrebbe complicare l'interpretazione dei dati in alcune situazioni. Infine, il costo iniziale del dispositivo può rappresentare una barriera per alcune aziende agricole o operatori (Conte G., 2024).

D'altra parte, il tracciamento del diesafluoruro di zolfo è un metodo alternativo utilizzato per monitorare le emissioni di metano. Questo approccio prevede l'utilizzo di SF_6 come tracciante, poiché ha una vita atmosferica molto lunga e non si degrada facilmente. Un vantaggio significativo dell'uso dello SF_6 è la sua capacità di fornire informazioni dettagliate sulla dispersione delle emissioni nel tempo e nello spazio. Questo metodo consente una valutazione più completa delle fonti di emissione e della loro intensità .

Tuttavia, l'uso di questo gas presenta anche delle limitazioni. In primo luogo, il costo del tracciamento può essere elevato, richiedendo attrezzature specializzate e competenze tecniche avanzate. Inoltre, sebbene SF_6 sia un tracciante efficace, esso stesso è un gas serra molto potente; pertanto, l'uso non controllato potrebbe contribuire ulteriormente ai cambiamenti

climatici . Infine, la necessità di monitorare continuamente le concentrazioni di SF_6 richiede risorse aggiuntive e può complicare le operazioni quotidiane (Conte G., 2024).

In conclusione, sia il Laser Methane Detector che il tracciamento con diesafluoruro di zolfo offrono strumenti utili per la valutazione delle emissioni di metano nel settore zootecnico. Mentre il primo si distingue per la sua facilità d'uso e portabilità, il secondo fornisce una visione più dettagliata della dispersione delle emissioni. Tuttavia, entrambi gli strumenti presentano sfide legate ai costi e alle condizioni ambientali che devono essere considerate nella pianificazione delle strategie di monitoraggio delle emissioni. La scelta tra questi metodi dipenderà dalle specifiche esigenze operative e dalle risorse disponibili per le aziende coinvolte nella gestione delle emissioni nel settore zootecnico.

CAPITOLO 2: CONCLUSIONI

Le tecniche innovative discusse in questa tesi rappresentano un passo avanti significativo nel campo della valutazione della composizione chimica e della qualità nutrizionale degli alimenti zootecnici. Tali metodologie offrono strumenti più rapidi, sostenibili e versatili rispetto ai metodi tradizionali, rispondendo in modo efficace alle esigenze sempre più complesse del settore. L'analisi approfondita delle tecnologie trattate ha evidenziato il loro notevole potenziale nel migliorare l'efficienza delle analisi e nel promuovere una produzione zootecnica più sostenibile e responsabile.

La spettroscopia nel vicino infrarosso (NIRS) si conferma una tecnologia di punta grazie alla sua capacità di fornire analisi rapide, non distruttive e altamente precise su una vasta gamma di matrici alimentari. La sua versatilità è dimostrata dalle numerose applicazioni, tra cui il controllo di foraggi, unifeed, silomais, feci e prodotti caseari. L'introduzione di dispositivi NIRS portatili ha ulteriormente ampliato le sue potenzialità, permettendo analisi direttamente sul campo e riducendo i tempi operativi. Tuttavia, la necessità di calibrazioni accurate e l'utilizzo di campioni rappresentativi rimangono aspetti critici per garantirne l'affidabilità. Nonostante queste sfide, la tecnologia NIRS contribuisce in modo significativo alla riduzione dei costi e dell'impatto ambientale, rafforzando il ruolo dell'innovazione tecnologica nella gestione sostenibile delle produzioni.

La fluorescenza a raggi X (XRF) rappresenta una soluzione efficace per l'analisi della composizione elementare di campioni solidi e liquidi senza la necessità di reagenti chimici. Questa caratteristica la rende particolarmente vantaggiosa per il controllo della qualità degli alimenti e per la valutazione di minerali essenziali o contaminanti come i metalli pesanti. La preparazione semplice dei campioni e la rapidità delle analisi conferiscono alla tecnica XRF un valore aggiunto per laboratori e aziende agricole. Tuttavia, la sensibilità variabile per gli elementi più leggeri e l'importanza di calibrazioni precise richiedono attenzione per garantire risultati accurati. Nonostante questi aspetti, l'XRF offre un supporto indispensabile per la gestione nutrizionale degli allevamenti e la promozione di pratiche agricole sostenibili.

Il naso elettronico è emerso come una tecnologia innovativa per il monitoraggio qualitativo degli alimenti, fornendo informazioni preziose sulla freschezza, la qualità e lo stato di conservazione attraverso l'analisi dei composti volatili. Questa tecnologia si distingue per la capacità di rilevare rapidamente contaminazioni o deterioramenti, garantendo un controllo efficiente e non invasivo. L'approccio oggettivo e la capacità di produrre dati ripetibili lo rendono uno strumento ideale per l'industria zootecnica. Tuttavia, la sensibilità dei sensori e la necessità di algoritmi di elaborazione più avanzati costituiscono sfide che richiedono ulteriori sviluppi tecnologici per ampliare le applicazioni del naso elettronico.

La termografia a infrarosso, sebbene meno sviluppata rispetto ad altre metodologie, offre un interessante potenziale per il controllo della qualità degli alimenti attraverso l'analisi delle variazioni termiche. Questo approccio consente di identificare rapidamente anomalie fisiche e chimiche senza contatto diretto, rendendolo particolarmente utile per il monitoraggio della freschezza e delle condizioni di conservazione. La combinazione di questa tecnica con altre metodologie potrebbe fornire un sistema di controllo più completo e integrato, migliorando ulteriormente la gestione della qualità.

L'analisi delle emissioni di metano rappresenta un tema centrale per la sostenibilità ambientale nel settore zootecnico. Tra le tecniche discusse, l'utilizzo di strumenti come il Laser Methane Detector (LMD) e il tracciamento con esafluoruro di zolfo (SF_6) ha dimostrato notevole efficacia. Questi approcci consentono di monitorare in maniera accurata le emissioni attraverso tecniche non invasive, fornendo dati preziosi per valutare l'impatto ambientale delle produzioni zootecniche. L'integrazione di queste tecnologie nei sistemi di allevamento non solo contribuisce alla riduzione delle emissioni di gas serra, ma migliora anche l'efficienza alimentare degli animali, in linea con gli obiettivi globali di sostenibilità ambientale. Tuttavia, la loro implementazione richiede investimenti iniziali significativi e una formazione tecnica del personale per garantire un utilizzo ottimale e sostenibile.

In conclusione, le tecniche innovative descritte in questa tesi offrono opportunità straordinarie per migliorare la qualità nutrizionale e la sostenibilità degli alimenti zootecnici. L'integrazione di queste metodologie con i metodi tradizionali rappresenta un passaggio cruciale per ottenere analisi più affidabili e complete, rispondendo alle esigenze di un settore in continua evoluzione. Tuttavia, è fondamentale promuovere un cambiamento culturale e organizzativo che supporti l'adozione di queste tecnologie, investendo in infrastrutture e formazione. La capacità di combinare innovazione tecnologica, sostenibilità ambientale e gestione efficiente delle risorse sarà determinante per il futuro successo del settore zootecnico. È auspicabile che ulteriori

ricerche e sviluppi rendano queste tecnologie sempre più accessibili e adattabili alle diverse realtà produttive.

Bibliografia

Berndt A., Boland T., Deighton M. 2014. Guidelines for use of sulphur hexafluoride (SF6) tracer technique to measure enteric methane emissions from ruminants. [Online] https://globalresearchalliance.org/wp-content/uploads/2018/02/SF6-Tracer-Technique-Guidelines_April-2014.pdf.

Berzaghi P. 2016. Ruminantia: *La tecnica XRF (Fluorescenza ai raggi X) nella gestione del bilancio minerale della bovina da latte.* [Online] https://ruminantiamese.ruminantia.it/la-tecnica-xrf-fluorescenza-ai-raggi-x-nella-gestione-del-bilancio-minerale-della-bovina-da-latte/?t.

Berzaghi P. 2019. *Analisi XRF: carenze ed eccessi riscontrati nelle razioni.* [Online] https://www.informatoreagrario.it/filiere-produttive/zootecnia/analisi-xrf-carenze-ed-eccessi-riscontrati-nelle-razioni/.

Conte G., Atzori A., Correddu F. 2022. *Ruminantia: La metodica NIR può fornire informazioni affidabili sulla contaminazione da micotossine?* [Online] https://www.ruminantia.it/la-metodica-nir-puo-fornire-informazioni-affidabili-sulla-contaminazione-da-micotossine/.

Conte G., Atzori A., Correddu F. 2023. *Ruminantia: Emissioni di metano negli allevamenti bufalini: metodi innovativi di rilevazione.* [Online] https://www.ruminantia.it/emissioni-di-metano-negli-allevamenti-bufalini-metodi-innovativi-di-rilevazione/.

Conte G., Atzori A., Correddu F. 2024. *Ruminantia: Emissioni di metano nelle bovine da latte: ecco come misurarle con i rilevatori laser.* [Online] https://www.ruminantia.it/emissioni-di-metano-nelle-bovine-da-latte-ecco-come-misurarle-con-i-rilevatori-laser/.

Evangelista C., Bernabucci U., Basiricò L. 2021. *Ruminantia: Una panoramica sull'uso della spettroscopia nel vicino infrarosso (NIRS) in azienda per la gestione delle vacche da latte* [Online] https://ruminantiamese.ruminantia.it/una-panoramica-sulluso-della-spettroscopia-nel-vicino-infrarosso-nirs-in-azienda-per-la-gestione-delle-vacche-da-latte/.

IBSE. 2015. [Online] https://ibseedintorni.com/2015/01/04/esplorare-lo-spettro-elettromagnetico/.

Kang K., Cho H., Jeong S. 2022. *Pubmed: Application of a hand-held laser methane detector for measuring enteric methane emissions from cattle in intensive farming.* [Online] https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9387598/.

LabCNX. Università di Padova, Dipartimento di medicina animale, produzioni e salute: *Comunicazione personale.*

Lazoovet. 2023. Spettrofotometria XRF - Laboratorio Analisi Zootecniche. [Online] https://www.lazoovet.it/spettrofotometria-xrf/.

Nutristar Spa. 2021. [Online] https://www.informatoreagrario.it/agroindustria/nutristar-punta-su-esclusive-analisi-del-latte-e-degli-alimenti/.

Goi A. 2024. *Ruminantia: Potenzialità di dispositivi portatili NIR per la predizione della concentrazione di immunoglobuline nel colostro bovino in stalla* [Online] https://www.ruminantia.it/potenzialita-di-dispositivi-portatili-nir-per-la-predizione-della-concentrazione-di-immunoglobuline-nel-colostro-bovino-in-stalla/ .

Palmer P., Jacobs R., Baker P. 2009. *Pubmed: Use of field-portable XRF analyzers for rapid screening of toxic elements in FDA-regulated products.* [Online] 10.1021/jf803285h.

Rigaku Corporation. 2018. Analysis of Animal Feeds. [Online] https://rigaku.com/products/xrf-spectrometers/edxrf/application-notes/edxrf1279-animal-feeds-analysis.

Roembke J. 2015. *Feed Strategy: Applying XRF analysis to improve animal feed ingredients* [Online] https://www.feedstrategy.com/animal-feed-manufacturing/feed-mill-management/article/15438243/applying-xrf-analysis-to-improve-animal-feed-ingredients?t.

Ronchi B., Savoini G., Trabalza M. 2020. *Manuale di nutrizione dei ruminanti da latte.*

Silva L., Santos L., Ferrao S. 2022 *Ruminantia: Applicazione di tecniche di spettroscopia infrarossa per la certificazione del formaggio: una review* [Online] https://www.ruminantia.it/applicazione-di-tecniche-di-spettroscopia-infrarossa-per-la-certificazione-del-formaggio-una-review/.

Sorg D. 2021. *MDPI: Measuring Livestock CH4 Emissions with the Laser Methane Detector: A Review.* [Online] https://doi.org/10.3390/methane1010004

Urbani L. 2023. *ANSA: Gli allevamenti intensivi immettono nell'aria molecole come metano e ammoniaca.* [Online] https://www.lumsanews.it/gli-allevamenti-intensivi-immettono-nellaria-molecole-come-metano-e-ammoniaca/

World of Test. 2021. *Analizzatore XRF: come funziona, applicazioni principali, vantaggi e limiti.* [Online] https://www.worldoftest.com/it/articles/xrf-analyzer-how-it-works-key-applications-benefits-and-limitations