



DIPARTIMENTO DI SCIENZE AGRARIE ALIMENTARI E AMBIENTALI

CORSO DI LAUREA IN:

SCIENZE E TECNOLOGIE AGRARIE

NUOVE TECNOLOGIE PER UN ALLEVAMENTO BOVINO DI PRECISIONE

NEW TECHNOLOGIES FOR PRECISION LIVESTOCK FARMING IN CATTLE

TIPO TESI: Compilativa

Studente:

Riccardo Raponi

Matricola: 1110382

Relatore:

PROF. SIMONE CECCOBELLI

Correlatore:

PROF. MARINA PASQUINI

ANNO ACCADEMICO 2025-2026

INDICE

1. INTRODUZIONE.....	3
2. PRECISION LIVESTOCK FARMING	8
3. ALLEVAMENTO DI PRECISIONE E TECNOLOGIE DIGITALI.....	13
3.1. Identificazione elettronica degli animali.....	13
3.2. Sistemi di localizzazione e monitoraggio degli spostamenti	16
3.3. Sensori indossabili	19
3.4. Sensori ambientali.....	22
3.5. Tecnologie utili alla mitigazione delle condizioni ambientali in allevamento	26
3.6. Internet of Things (IoT) nella gestione degli allevamenti bovini	29
3.7. Sistemi automatizzati di alimentazione.....	31
3.8. Sistemi automatizzati di mungitura.....	35
3.9. Sistemi di visione artificiale.....	40
3.10. Sistemi di precisione per il monitoraggio dell'allevamento estensivo o semi-estensivo...	42
4. RUOLO DELL'INTELIGENZA ARTIFICIALE	46
5. CRITICITÀ E PROBLEMATICHE	48
5.1. Criticità dei sensori	48
5.2. Criticità dell'Internet of Things (IoT).....	48
5.3. Criticità dei Computer Vision Systems (CVS)	49
5.4. Problematiche nella gestione dei vitelli	50
5.5. Criticità dell'Intelligenza Artificiale	51
5.6. Problematiche nella gestione produttiva	52
5.7. Problematiche nella gestione riproduttiva.....	52
5.8. Problematiche nella gestione sanitaria.....	53
5.9. Problematiche nella valutazione del benessere animale	54
6. CONCLUSIONI.....	55
7. BIBLIOGRAFIA	57
8. SITOGRAFIA.....	59
RINGRAZIAMENTI	61

1. INTRODUZIONE

In Italia, secondo i dati Istat relativi al 2024, sono presenti 5.327.932 capi bovini, considerando sia quelli da latte che quelli da carne. Nel 2016, invece, erano presenti 5.929.767 capi. In 8 anni, il numero di bovini in Italia è diminuito di circa 600.000 unità (Figura 1).

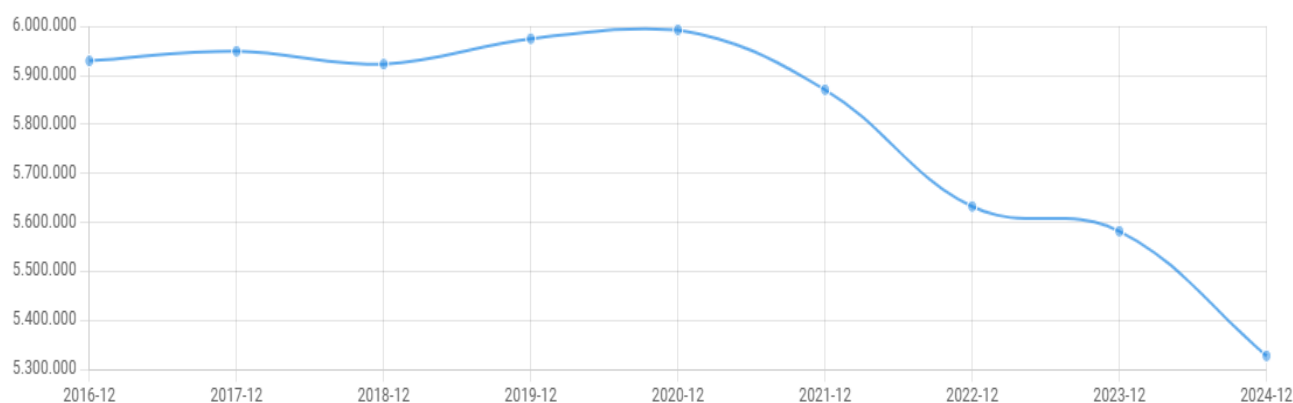
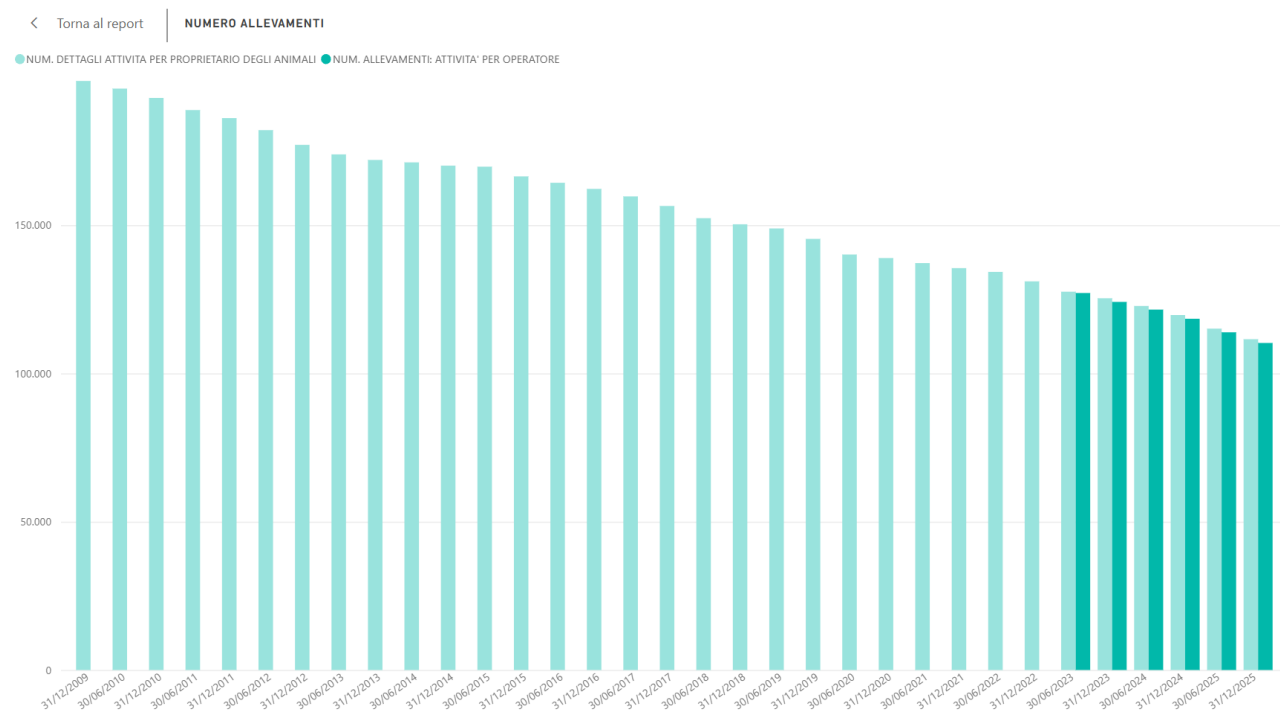


Figura 1. Andamento del numero di capi in Italia dal 2016 al 2024 (Fonte:

https://esploradati.istat.it/databrowser/#/it/dw/categories/IT1,Z1000AGR,1.0/AGR_CRP/DCSP_CONSISTENZE/IT1,101_961_DF_DCSP_CONSISTENZE_1,1.0).

Dal 2009 al 2025 anche il numero di allevamenti in Italia è diminuito, passando da circa 160.000 a circa 120.000 aziende. Gli allevamenti che hanno registrato la maggiore diminuzione sono stati quelli con un numero ridotto di capi. Per quanto riguarda l'allevamento da carne, le aziende con meno di 10 capi sono quelle che sono scomparse in misura maggiore, mentre per l'allevamento da latte la perdita più significativa ha riguardato gli allevamenti con meno di 100 capi. Gli allevamenti misti, invece, si sono orientati verso una specializzazione nella produzione di latte oppure di carne. In generale, gli allevamenti con meno di 50 capi sono drasticamente diminuiti; tuttavia, il numero complessivo di bovini presenti in Italia non ha subito una riduzione proporzionale, poiché sono aumentate le aziende con oltre 500 capi (Figura 2) (<https://archivio2023-2024.ruminantia.it/quali-e-quant-alle-amenti-bovini-stanno-chiudendo-in-italia/>; BDN, 2026).

A)



B)

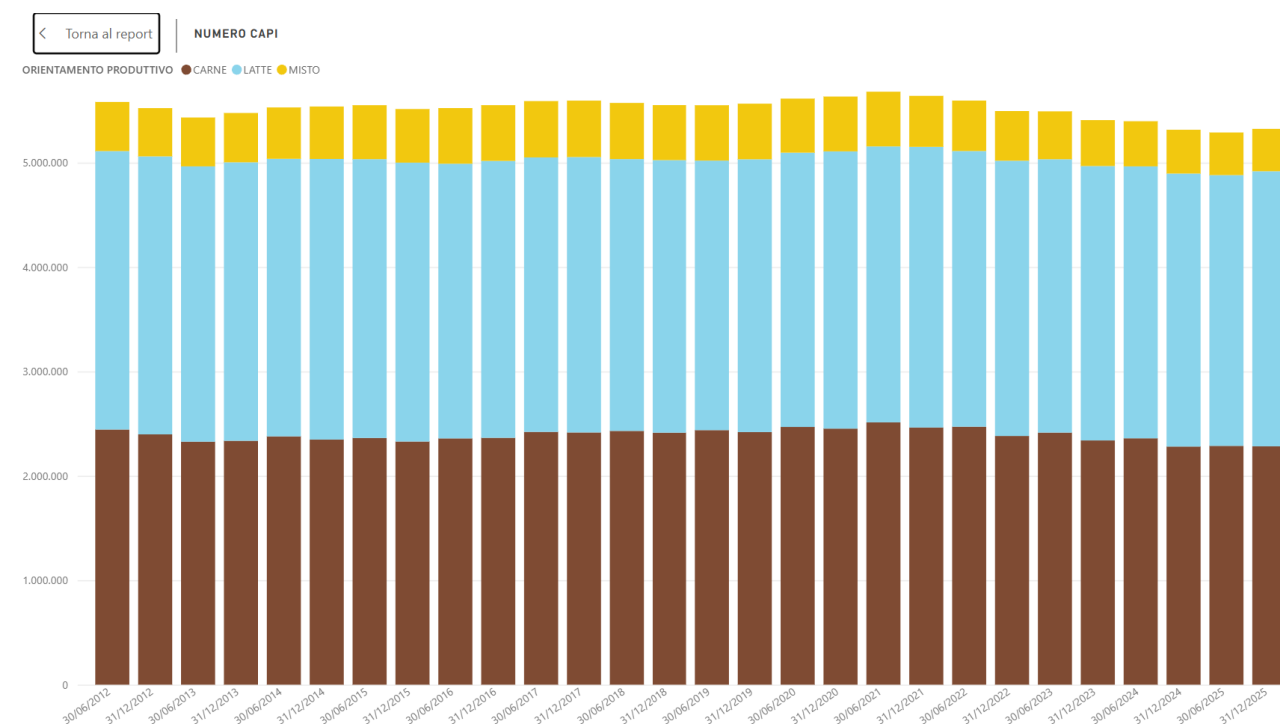


Figura 2. Andamento del numero di allevamenti (A) e capi (B) in Italia dal 2009 al 2025 (Fonte: BDN, 2026).

Inoltre, anche la manodopera del settore zootecnico sta diminuendo, sia per quanto riguarda il personale addetto alla gestione della stalla come, per esempio, operatori della mungitura o della formulazione e distribuzione della razione alimentare, sia per quanto riguarda personale esterno come, ad esempio, i medici veterinari. Si osserva infatti anche uno spostamento degli studenti universitari dai corsi di veterinaria dedicati ai grandi animali da reddito verso quelli relativi agli animali da compagnia. Secondo dati ISTAT tra il 2010 e il 2020 la manodopera è diminuita del 27%, scendendo a 2,8 milioni di addetti, con una carenza sempre maggiore di giovani lavoratori e il conseguente rischio di un ulteriore calo in futuro (<https://www.fieragri.it/2022/10/25/manodopera-nelle-stalle/>).

In questo contesto, l'introduzione di tecnologie innovative negli allevamenti può rappresentare un supporto concreto alla gestione aziendale, contribuendo a compensare almeno in parte la ridotta disponibilità di personale e a rendere più efficiente il monitoraggio degli animali.

Le tecnologie che verranno trattate in questa tesi riguarderanno l'identificazione elettronica degli animali mediante dispositivi come marche auricolari elettroniche, RFID, boli ruminali e collari intelligenti. Verranno inoltre analizzati sistemi di localizzazione e monitoraggio degli spostamenti degli animali, grazie a dispositivi come GPS e sistemi indoor di localizzazione.

Data la crescente importanza del benessere animale negli allevamenti saranno approfonditi anche i sensori ambientali per il monitoraggio di umidità relativa, ventilazione, temperatura, qualità dell'aria, gas ambientali, polveri e indici di stress termico. Si entrerà inoltre nel merito dei sistemi di visione artificiale, dell'Internet of Things (IoT) e dei diversi sistemi automatizzati, sia di mungitura che di alimentazione. Infine, verranno trattati gli strumenti utili al monitoraggio degli animali in sistemi di allevamento estensivo o semi-estensivo, con particolare attenzione alle tecnologie più innovative, come droni, robotica e automazione avanzata, ad esempio i sistemi di "Virtual Fencing".

L'utilizzo delle tecnologie sopra citate contribuisce anche a soddisfare i sempre più elevati requisiti legati alla sostenibilità aziendale e alla sicurezza alimentare. Questi due pilastri, insieme al benessere animale, stanno assumendo un ruolo sempre più centrale all'interno degli allevamenti, anche grazie alla maggior attenzione e sensibilità del consumatore. Per quanto riguarda il benessere animale, esso non consiste solamente nel garantire acqua e cibo, ma comprende una serie di condizioni di allevamento adeguate, come per esempio un ambiente pulito, la libertà di muoversi e socializzare, il libero accesso alle risorse primarie (acqua e cibo) e cure veterinarie tempestive. Inoltre, l'allevatore deve monitorare costantemente il comportamento degli animali, in modo da individuare e correggere eventuali condizioni di stress. Tutto ciò contribuisce non solo al benessere animale, ma anche a una maggiore produttività degli animali stessi. La normativa di riferimento sul benessere animale è la direttiva 98/58/CE che, con il relativo Decreto Legislativo 146/2001 ha fornito le prime indicazioni

specifiche riguardanti gli spazi, l'alimentazione e le cure veterinarie (<https://www.agroteam.it/benessere-animale-bovini-normativa-spiegata-in-modo-semplce/>).

Negli ultimi anni il settore dell'allevamento bovino ha subito importanti cambiamenti dovuti all'aumento della popolazione e, di conseguenza, alla crescente richiesta di alimenti di origine animale. A ciò si aggiungono le richieste di una maggiore attenzione al benessere animale e alla sostenibilità ambientale. Tutto questo ha portato gli allevatori a modificare le proprie strategie per aumentare l'efficienza produttiva. Tuttavia, le aziende zootecniche devono affrontare anche ulteriori problematiche, come la diminuzione della manodopera specializzata, l'aumento dei costi di produzione, l'imprevedibilità climatica e normative sempre più stringenti in materia di sostenibilità e sicurezza alimentare.

In questo contesto emergono limiti significativi, soprattutto nelle grandi aziende zootecniche, quando la gestione è basata esclusivamente sull'osservazione diretta degli animali e sull'esperienza dell'allevatore. Con l'aumentare delle dimensioni aziendali, infatti, i sistemi produttivi tendono a diventare più intensivi, rendendo quasi impossibile un monitoraggio costante e preciso dello stato sanitario, comportamentale e fisiologico degli animali. Di conseguenza, risulta difficile individuare tempestivamente anomalie che potrebbero compromettere il benessere animale e le performance produttive (Pereira et al., 2023).

Proprio per questo motivo è nato il concetto di allevamento di precisione (Precision Livestock Farming - PLF), un approccio gestionale basato sull'utilizzo di tecnologie digitali per il controllo continuo e automatico degli animali e dell'ambiente di allevamento. L'obiettivo di tale approccio è di rendere la gestione della mandria più tempestiva e oggettiva, senza affidarsi esclusivamente all'osservazione visiva.

L'allevamento di precisione si basa sull'utilizzo di differenti strumenti tecnologici, come l'Internet of Things (IoT), i sistemi di visione artificiale (Computer Vision Systems, CVS), i podometri e le tecniche di Intelligenza Artificiale (IA), che consentono di raccogliere, elaborare e analizzare grandi quantità di dati in tempo reale. Lo IoT si basa su sensori collocati sugli animali oppure all'interno delle strutture aziendali, in grado di fornire informazioni relative alla temperatura corporea, al tempo di ruminazione, all'attività motoria, al consumo alimentare e ai parametri ambientali. I dati raccolti vengono successivamente elaborati per ottenere informazioni utili alla gestione produttiva, riproduttiva e sanitaria della mandria, supportando così anche le decisioni quotidiane dell'allevatore. I CVS permettono invece l'analisi automatica di immagini e video, consentendo di monitorare il comportamento animale, stimare il peso corporeo e il Body Condition Score (BCS) e, soprattutto, individuare precocemente segni di stress o patologie, prevenendo problemi più gravi. Grazie a queste tecnologie si assiste quindi al passaggio da una gestione reattiva a una gestione predittiva

dell'azienda, nella quale le decisioni vengono prese sulla base di indicatori oggettivi e tempestivi. Ciò consente di migliorare l'efficienza produttiva, ottimizzare le risorse, ridurre l'impatto ambientale e garantire livelli più elevati di benessere animale (Abeni et al., 2024).

L'utilizzo di queste tecnologie è particolarmente importante per garantire la salute e il benessere degli animali. Sensori, sistemi di visione artificiale e tecniche avanzate di analisi dei dati consentono infatti di individuare precocemente problematiche quali zoppie, mastiti e patologie respiratorie, riducendo la gravità delle infezioni e, di conseguenza, l'impiego di farmaci. Strumenti come la termografia a infrarossi permettono inoltre di monitorare in modo non invasivo la temperatura corporea e lo stato di stress degli animali (Akhigbe et al., 2021).

Questa tesi si propone di analizzare le principali tecnologie digitali applicabili all'allevamento bovino negli ambiti della gestione produttiva, riproduttiva, sanitaria e del benessere animale. Verranno inoltre evidenziati i punti di forza, le criticità e le prospettive future di tali tecnologie. L'obiettivo è fornire una visione generale delle innovazioni tecnologiche implementabili negli allevamenti zootecnici, mettendo in evidenza il loro contributo allo sviluppo di una zootecnia sostenibile ed efficiente.

2. PRECISION LIVESTOCK FARMING

Per PLF si intende l'impiego di tecnologie quali telecamere, microfoni e sensori con l'obiettivo di monitorare e gestire in modo continuo e automatico la salute, il benessere e la produttività degli animali, attraverso metodi non invasivi. La PLF comprende, inoltre, sistemi in grado di raccogliere informazioni, elaborarle mediante algoritmi e software specifici e restituirle all'allevatore sotto forma di dati utili al supporto delle decisioni aziendali. In alcuni casi, tali sistemi possono anche svolgere interventi mirati in maniera automatizzata. Questo approccio consente il monitoraggio e la gestione individuale di ciascun animale presente nella mandria; proprio per questo motivo viene definito "di precisione" (Abeni et al., 2024).

L'allevamento tradizionale si basa principalmente sull'esperienza diretta dell'allevatore, sull'osservazione quotidiana degli animali e su controlli effettuati manualmente. In questo sistema, la gestione degli animali dipende dalla presenza dell'allevatore, dalle sue capacità nel riconoscere alterazioni comportamentali degli animali e dagli interventi che decide di effettuare in base alla propria esperienza e alle diverse fasi produttive dei capi allevati. L'allevatore osserva aspetti quali postura, locomozione, ingestione di acqua e mangime, comportamento sociale e condizioni generali dell'animale per individuare eventuali problemi sanitari o gestionali. Ad esempio, nei vitelli il controllo della salute viene generalmente effettuato tramite osservazioni visive periodiche e mediante la misurazione manuale di parametri quali temperatura corporea, peso e frequenza respiratoria. Questo approccio richiede notevoli quantità di tempo e manodopera, ma consente anche una buona conoscenza individuale dei soggetti allevati e favorisce una relazione uomo–animale più stretta. Tuttavia, l'allevamento tradizionale presenta diversi limiti. Innanzitutto, il monitoraggio dipende dall'osservazione umana, che è soggettiva e influenzata dall'esperienza dell'operatore, dal numero di animali presenti in azienda e soprattutto dal tempo disponibile. Inoltre, in allevamenti molto grandi è pressoché impossibile controllare in maniera accurata, continua e individuale ogni singolo animale. Di conseguenza, molte patologie vengono individuate solo quando i segni clinici risultano già evidenti. Alcune alterazioni comportamentali, come variazioni nell'attività motoria o nell'assunzione di alimento, possono inoltre passare inosservate se non monitorate costantemente.

Rispetto al sistema tradizionale, l'allevamento di precisione offre numerosi vantaggi. Innanzitutto, migliora la capacità di diagnosi precoce delle malattie, permettendo interventi tempestivi e riducendo mortalità e il calo o la perdita di performance produttive. Inoltre, consente una gestione più individualizzata degli animali, favorendo il miglioramento del benessere animale e dell'efficienza produttiva. L'automazione di alcune attività riduce anche il carico di lavoro dell'allevatore e permette una raccolta dati continua e oggettiva. L'allevamento di precisione nasce proprio per ovviare ai limiti

dell'allevamento tradizionale attraverso l'impiego di tecnologie digitali e sistemi automatizzati di raccolta dati. Questo approccio utilizza sensori, software e strumenti elettronici in grado di monitorare in tempo reale parametri fisiologici, produttivi e comportamentali degli animali. L'obiettivo principale è ottenere informazioni precise e continue sul singolo animale, permettendo interventi più rapidi e mirati. Tra le tecnologie maggiormente utilizzate rientrano gli accelerometri tridimensionali, i sistemi automatici di alimentazione del vitello, le telecamere 3D, la termografia a infrarossi, i sensori per il monitoraggio della frequenza cardiaca e i dispositivi GPS. Questi strumenti consentono di rilevare variazioni nell'attività locomotoria, nel comportamento alimentare, nella temperatura corporea o nei tempi di riposo, aspetti che possono indicare precocemente la presenza di malattie o condizioni di stress.

Un esempio di queste tecnologie sono i sistemi automatici di alimentazione dei vitelli, che distribuiscono il latte più volte nell'arco della giornata e registrano dati relativi alla velocità di assunzione, al numero di visite al distributore di alimento e alla quantità ingerita. Grazie a tali informazioni è possibile individuare tempestivamente cambiamenti nel comportamento alimentare che potrebbero essere associati a problemi sanitari. Tuttavia, una gestione fortemente automatizzata può ridurre il contatto diretto tra uomo e animale, con possibili effetti negativi sulla relazione uomo-animale, quindi, è bene considerare l'allevamento di precisione e quello tradizionale come strategie complementari. L'esperienza dell'allevatore rimane fondamentale anche nei sistemi più tecnologici, mentre le nuove tecnologie rappresentano strumenti di supporto in grado di migliorare il monitoraggio, la gestione sanitaria e il benessere degli animali (Mazon et al., 2024).

Il monitoraggio costante e individuale dell'animale è di fondamentale importanza per molti aspetti e proprio per questo è alla base dell'allevamento di precisione. Il monitoraggio continuo rende infatti possibile intervenire precocemente in seguito al rilevamento di problemi, evitando così risvolti talvolta gravi. Risulta molto utile anche nelle operazioni quotidiane riducendo così i costi dell'allevamento tra cui, per esempio, quelli per il mangime o per l'acquisto di farmaci. Ma soprattutto grazie al monitoraggio continuo ed individuale è possibile aumentare la sostenibilità dell'allevamento dal punto di vista economico sociale e ambientale garantendo anche il benessere dell'animale (<https://suinicoltura.edagricole.it/salute-e-benessere/lallevamento-del-futuro-e-di-precisione/>).

Tra gli obiettivi della PLF rientra anche la riduzione dell'impatto ambientale che può essere perseguita agendo su quattro ambiti: il monitoraggio delle prestazioni produttive, il monitoraggio dello stato riproduttivo, il monitoraggio dell'alimentazione e il monitoraggio della salute e benessere degli animali.

Il monitoraggio delle prestazioni produttive permette di individuare anomalie legate a problematiche sanitarie, alimentari o gestionali. Nel caso di bovine da carne, ciò consente di favorire il raggiungimento delle performance produttive attese a fine ciclo produttivo e di ridurre il rischio di perdite dovute a complicazioni sanitarie. Nel caso delle vacche da latte, invece, il monitoraggio produttivo consente di identificare eventuali animali scarsamente produttivi, la cui esclusione dalla mandria può contribuire ad aumentare l'efficienza aziendale e, di conseguenza, a ridurre l'impatto ambientale per unità di prodotto. Il monitoraggio dell'alimentazione consente di massimizzare la precisione e l'adeguatezza della razione alimentare, sia dal punto di vista quantitativo che qualitativo. In questo modo è possibile ridurre gli sprechi, migliorare l'indice di conversione alimentare e contribuire alla diminuzione dell'impatto ambientale. Il monitoraggio della salute degli animali è altrettanto importante, perché un animale malato può subire cali di produzione fino al 25% (Figura 3). Nelle bovine da latte, patologie come mastiti e zoppie possono determinare anche un incremento nelle emissioni di gas clima alteranti, a causa della riduzione dell'efficienza produttiva e della necessità di interventi sanitari e gestionali aggiuntivi. Nei bovini da carne, il rilevamento precoce di malattie respiratorie, soprattutto nei vitelli, permette di limitare le perdite di accrescimento medio giornaliero, che avrebbero ripercussioni negative sull'efficienza produttiva e sull'impatto ambientale della produzione di carne. Infine, il monitoraggio dello stato riproduttivo consente di aumentare l'efficienza riproduttiva degli animali, riducendo i periodi improduttivi. Ciò è possibile grazie all'integrazione di dati relativi a parto, patologie dell'apparato riproduttivo o trattamenti veterinari individuali, insieme alle informazioni fornite dai vari sensori. Quando vengono rilevati comportamenti riconducibili all'estro, il sistema può inviare avvisi all'allevatore, permettendo una migliore programmazione delle inseminazioni. Una rilevazione più rapida e precisa dell'estro può quindi contribuire all'ottimizzazione della fertilità e alla riduzione di circa il 20% dell'impatto ambientale dell'allevamento. L'implementazione delle tecnologie di PLF non determina necessariamente una riduzione diretta delle emissioni o dell'impatto ambientale associato all'allevamento. Tuttavia, l'incremento dell'efficienza produttiva ottenuto attraverso tali tecnologie consente di aumentare le produzioni mantenendo un impatto ambientale pressoché invariato. Ne consegue un miglioramento del rapporto tra impatto ambientale e quantità prodotta, con una maggiore sostenibilità del sistema produttivo in termini di emissioni per unità di prodotto (Abeni et al., 2024).



Figura 3. Bovino affetto da dismetabolia (Fonte: https://www.vetpro.it/it/dettaglio_news.aspx?id=20227).

Un altro aspetto rilevante dell'allevamento di precisione è quello legato al miglioramento del benessere degli animali. Grazie al monitoraggio continuo è possibile tenere traccia di indicatori fisiologici e comportamentali potenzialmente associati all'insorgenza di alcune patologie. Ad esempio, una riduzione improvvisa dell'attività motoria potrebbe essere collegata a problematiche degli arti dell'animale o di malessere generale. Questo tipo di monitoraggio consente di intervenire tempestivamente, garantendo la salute dell'animale ed evitando che la sua condizione clinica si complichino. Inoltre, permette di individuare segnali di stress o disagio, come quelli associati allo stress da caldo, consentendo all'operatore di adottare misure correttive.

Attraverso l'impiego di sensori e tecniche di machine learning, i diversi indicatori fisiologici e comportamentali possono essere confrontati sia a livello individuale sia a livello di mandria. Ciò consente di distinguere se l'alterazione di un determinato parametro sia riconducibile a un problema del singolo animale oppure a una condizione ambientale che coinvolge l'intero gruppo. Ad esempio, una riduzione dell'assunzione di alimento in un singolo individuo può indicare una patologia, mentre lo stesso fenomeno osservato a livello di mandria può essere indicativo di stress termico.

Inoltre, molti indicatori fisiologici e comportamentali sono tra loro correlati. Le tecnologie di PLF consentono di analizzare congiuntamente tali informazioni, migliorando la capacità di interpretare ciò che sta accadendo all'animale e permettendo interventi più mirati. In questo modo, la prevenzione delle malattie e il benessere animale risultano migliorati rispetto ai sistemi tradizionali, con effetti positivi anche sulla produttività complessiva dell'allevamento (Abeni et al., 2024).

In sintesi, gli strumenti della PLF permettono di registrare parametri fisiologici, comportamentali e produttivi in modo continuo e automatizzato, consentendo all'allevatore di prendere decisioni più rapide e precise rispetto ai sistemi tradizionali, basati principalmente sull'osservazione visiva e sull'esperienza personale. La PLF ha il potenziale per aumentare l'efficienza della produzione zootecnica, fornendo agli allevatori gli strumenti necessari per prendere decisioni basate sui dati e ottimizzare le pratiche di gestione (Akhigbe et al., 2021). L'impiego di algoritmi di machine learning e Intelligenza Artificiale consente inoltre di analizzare automaticamente grandi quantità di dati e di supportare gli allevatori nelle decisioni operative quotidiane. Il monitoraggio continuo dei parametri produttivi permette infatti di adeguare i programmi alimentari e ridurre i costi associati a un'alimentazione non ottimale. Grazie alle informazioni raccolte in tempo reale, l'allevatore può intervenire tempestivamente modificando razioni alimentari, strategie di allevamento o protocolli sanitari, migliorando così sia l'efficienza produttiva sia il benessere animale (Mazon et al., 2024).

3. ALLEVAMENTO DI PRECISIONE E TECNOLOGIE DIGITALI

3.1. Identificazione elettronica degli animali

L'identificazione degli animali rappresenta un aspetto di crescente importanza nell'allevamento bovino soprattutto in relazione alle normative sempre più stringenti riguardanti la profilassi sanitaria e la tracciabilità della filiera produttiva. Tra gli strumenti utilizzati per l'identificazione elettronica rientrano collari intelligenti, marche auricolari elettroniche e boli ruminali, dispositivi che sfruttano principalmente la tecnologia RFID (Radio Frequency Identification), ovvero l'identificazione a radiofrequenza. Tali sistemi permettono l'identificazione, la gestione delle informazioni individuali e la memorizzazione dei dati raccolti (Abeni et al., 2024).

I collari intelligenti (Figura 4) sono dei dispositivi posizionati sul collo dell'animale senza arrecare particolari fastidi. Essi trasmettono dei segnali wireless a lettori fissi oppure a dispositivi portatili utilizzati dall'operatore, consentendo il riconoscimento dei singoli capi. I lettori sono generalmente associati ad antenne, collocate in punti strategici dell'allevamento, come la sala di mungitura, la pesa o i sistemi automatici di alimentazione, in modo da raccogliere dati utili sul singolo animale. Oltre alla funzione di identificazione, i collari possono svolgere anche attività di monitoraggio del comportamento animale, fornendo informazioni utili sullo stato fisiologico, sul livello di attività motoria e su eventuali condizioni di stress. Grazie a questi dispositivi è possibile monitorare gli animali in modo continuo, ventiquattro ore su ventiquattro e sette giorni su sette (<https://www.milkline.com/it/73-collare-per-vacche-c-sense>).

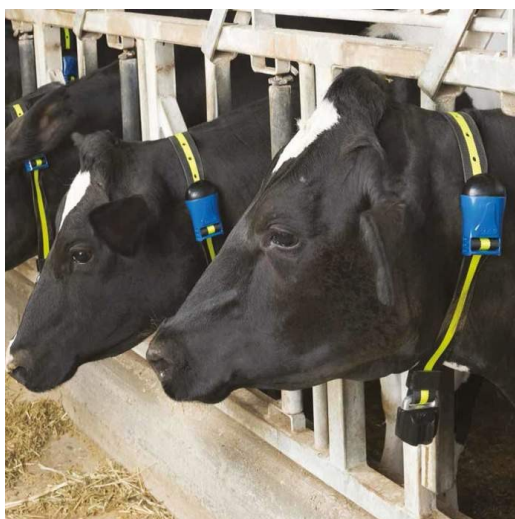


Figura 4. Collare intelligente per identificazione dei capi (Fonte: <https://informatorezootecnico.edagricole.it/bovini-da-latte/monitoraggio-costante-delle-bovine-consensetime/>).

Le marche auricolari elettroniche (Figura 5) sono simili alle marche auricolare tradizionali ma, oltre ad avere il codice alfanumerico, hanno incorporato anche un microchip, o tag, in grado di comunicare con lettori portatili o fissi. Questo microchip consente l'identificazione elettronica dell'animale e la rapida associazione tra i dati raccolti ed il singolo soggetto.



Figura 5. Marche auricolari elettroniche per l'identificazione dei bovini (Fonte: <https://www.allflex.global/it>).

I boli ruminali (Figura 6) sono delle capsule costituite da materiale ceramico e contenenti un transponder di circa 2-3 cm. Attraverso un apposito applicatore, il bolo viene fatto ingerire dall'animale e si posiziona all'interno del reticolo. Questa modalità di identificazione garantisce un elevato livello di sicurezza, poiché il dispositivo non può essere rimosso o sostituito fino alla macellazione dell'animale. Inoltre, alcuni boli ruminali possono essere dotati di sensori aggiuntivi come accelerometri e sensori termici, utili per il monitoraggio di parametri fisiologici.

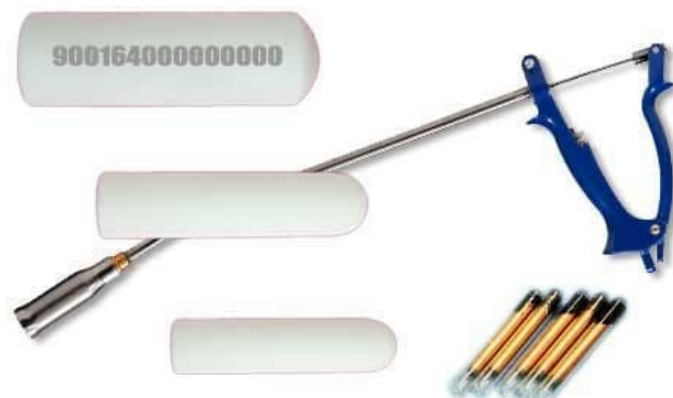


Figura 6. Applicatore e bolo ruminale per l'identificazione dei bovini (Fonte: <https://www.rfidup.com/rfid-animal-bio-chemical-electronic-ceramic-rumen-bolus-tag-for-cattle-cow-sheep-stomach/?lang=it>).

Tutti questi strumenti funzionano grazie alla tecnologia RFID, che permette l'identificazione e l'associazione automatica dei dati rilevati ai singoli animali attraverso lo scambio di informazioni tramite onde radio all'interno di un sistema wireless. Un sistema RFID è generalmente costituito da tre componenti principali:

- 1) il tag, che può essere integrato in una marca auricolare, in un bolo ruminale o in un collare;
- 2) il lettore, eventualmente associato a un'antenna;
- 3) il sistema di gestione delle informazioni (Figura 7).

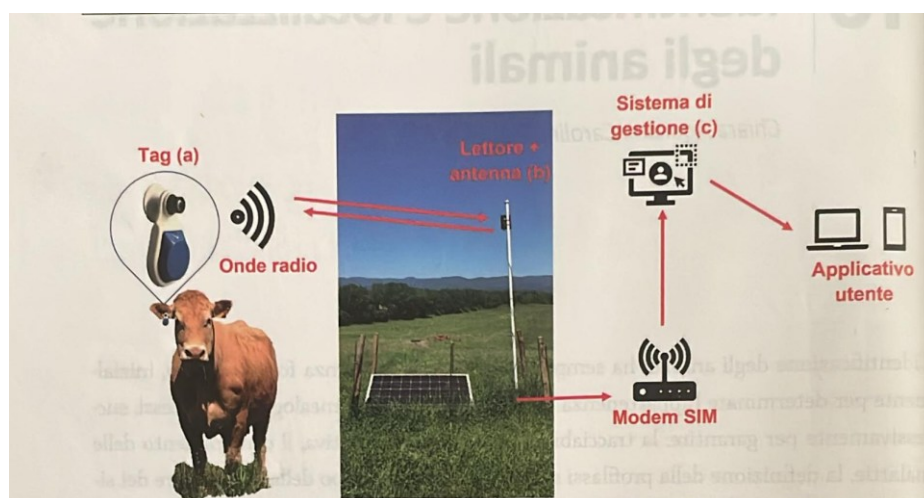


Figura 7. Funzionamento del sistema RFID (Fonte: Abeni et al., 2024).

Il tag è provvisto di un chip con memoria e di un'antenna, elementi che permettono la trasmissione dei dati ad un lettore. Il lettore può essere fisso, integrato con un'antenna, oppure portatile, nel caso in cui sia necessario ottenere informazioni immediate su un animale senza attendere il suo passaggio in aree specifiche, come la sala di mungitura o la zona di alimentazione.

Il funzionamento del sistema si basa sull'invio di onde radio da parte del lettore verso il tag. Il tag riceve il segnale tramite la propria antenna e, grazie all'energia fornita dal lettore, alimenta il chip. Successivamente, il tag trasmette un segnale di ritorno contenente le informazioni relative all'animale, che vengono recepite dall'antenna del lettore. In questo modo è necessario collegare all'alimentazione elettrica soltanto il lettore, mentre il tag può funzionare senza una batteria interna, caratteristica particolarmente utile nel caso dei boli ruminanti. I dati raccolti dai lettori tramite tecnologia RFID vengono inviati al sistema di gestione, interconnesso alla rete dei dispositivi di lettura. Il sistema immagazzina le informazioni raccolte e può restituirle in forma grezza oppure, nei sistemi più evoluti, elaborarle per ottenere indicazioni più dettagliate sul singolo individuo. Ad esempio, tramite la tecnologia RFID è possibile associare automaticamente all'animale identificato i dati raccolti da altri sensori, come stazioni di pesa o sistemi di mungitura. Nel sistema descritto vengono generalmente utilizzati tag semi-passivi, cioè dispositivi in grado di memorizzare dati relativi all'animale, ma che necessitano dell'energia fornita dal lettore tramite onde radio per trasmetterli. Per questo motivo, il loro raggio d'azione è limitato a pochi metri. Esistono tuttavia anche tag passivi e tag attivi. I tag passivi non possiedono una fonte di energia interna e permettono principalmente l'identificazione dell'animale, funzionando grazie all'energia fornita dal lettore. I tag attivi, invece, sono dotati di una propria fonte di alimentazione e possono integrare sensori per il monitoraggio di parametri legati alla salute, al movimento o alla temperatura corporea. Inoltre, essendo autonomi dal punto di vista energetico, possono trasmettere dati anche a distanze maggiori rispetto ai tag passivi e semi-passivi (Abeni et al., 2024).

3.2. Sistemi di localizzazione e monitoraggio degli spostamenti

Le tecnologie di identificazione univoca degli animali hanno favorito lo sviluppo di sistemi di tracciamento e monitoraggio degli spostamenti. Nell'allevamento in stalla sono disponibili numerose tecnologie indoor, tra cui RFID, Ultra Wideband (UWB) e Bluetooth Low Energy (BLE). Per sistemi indoor di tracciamento si intendono tecnologie capaci di individuare la posizione dell'animale all'interno della stalla e di fornire informazioni circa la posizione e gli spostamenti. Lo scopo principale dei sistemi RFID è quello di identificare gli animali. Tuttavia, questa tecnologia può essere impiegata anche per monitorare gli spostamenti, grazie alla collocazione dei lettori in punti di

passaggio obbligati. In questo modo è possibile registrare il passaggio dell'animale da un'area all'altra, ad esempio dalla zona di riposo alla zona di alimentazione, alla stazione di mungitura o alla pesa.

I sistemi UWB sono sistemi di trasmissione a corto raggio che consentono di acquisire dati molto precisi sulla posizione e sulla direzione degli spostamenti, soprattutto in ambienti confinati come la stalla. La loro portata massima può arrivare a circa 200 metri. Per il funzionamento di questi sistemi è necessario applicare all'animale un tag UWB, che può essere posizionato mediante collari, marche auricolari o bracciali, purché non interferisca con le normali attività fisiologiche dell'animale.

All'interno dell'allevamento vengono poi installate alcune antenne, disposte in modo da coprire l'intera area della stalla e ricevere costantemente il segnale trasmesso dai tag. I dati raccolti dalle antenne vengono inviati a un gateway, cioè un punto di raccolta e gestione delle informazioni, che calcola la posizione dell'animale in base alla distanza del tag dalle diverse antenne. Tale distanza viene determinata considerando il tempo impiegato dal segnale emesso dal tag per raggiungere l'antenna (Abeni et al., 2024).

Il Bluetooth Low Energy, rappresentato in Figura 8, utilizza tag Bluetooth che emettono segnali in modo continuo. Questi dispositivi possono includere accelerometri tridimensionali e, come suggerisce il nome, sono caratterizzati da un basso consumo energetico. Di conseguenza, la durata della loro batteria può raggiungere anche i due anni, riducendo la necessità di frequenti sostituzioni. Anche in questo caso è previsto l'impiego di un gateway, posizionato ad esempio vicino agli abbeveratoi, nelle aree di alimentazione o in punti strategici del pascolo. Il gateway riceve i segnali Bluetooth trasmessi dai tag e raccoglie informazioni relative alla posizione, al movimento e, in alcuni casi, al comportamento degli animali. Successivamente, i dati vengono trasmessi a una piattaforma centrale di gestione attraverso reti a lungo raggio, come LoRaWAN (Long Range Wide Area Network) con un protocollo di comunicazione wireless LPWAN (Low Power Wide Area Network). Questo sistema consente all'allevatore di visualizzare le informazioni in tempo reale tramite un software o un'applicazione, ottenendo indicazioni utili sulla localizzazione, sull'attività e sul possibile stato di salute degli animali (<https://www.lansitec.com/it/applicazioni/soluzione-intelligente-per-il-monitoraggio-del-bestiaime/>).

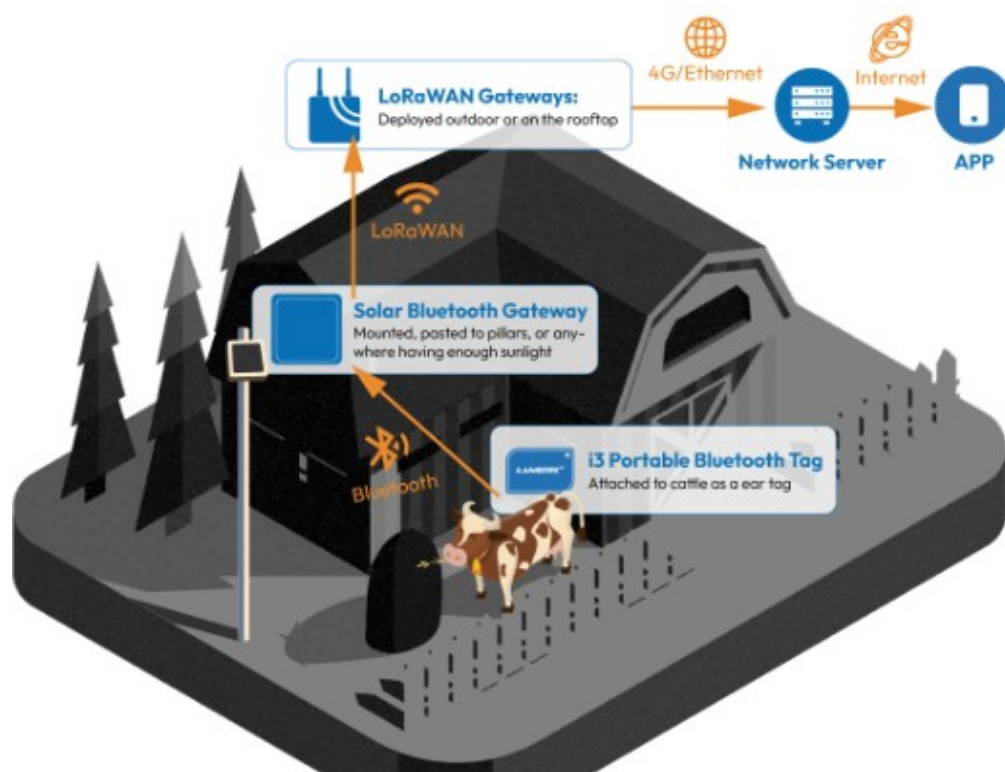


Figura 8. Schema di funzionamento del sistema Bluetooth (Fonte: <https://www.lansitec.com/it/applicazioni/soluzione-intelligente-per-il-monitoraggio-del-bestiamo/>).

Le tecnologie indoor risultano tuttavia meno adatte agli allevamenti estensivi, nei quali l'area da coprire è molto più ampia. In questi contesti viene utilizzata principalmente la tecnologia GPS (Global Positioning System) che consente di localizzare gli animali al pascolo attraverso collari dotati di specifico modulo di trasmissione.

In alcuni sistemi, i collari trasmettono i dati a specifiche antenne, in grado di coprire aree estese, anche fino a circa 20 km. La comunicazione può avvenire tramite reti a lungo raggio, come LoRaWAN, che sfruttano segnali radio UHF (Ultra High Frequency, con banda di radiofrequenza compresa tra 300 MHz e 3 GHz). Una volta raccolti, i dati vengono inviati dalle antenne al cloud attraverso una scheda SIM e la rete GSM (Global System for Mobile Communications); per questo motivo è necessaria una copertura telefonica adeguata nell'area in cui sono installate le antenne.

Una volta caricati nel cloud, i dati possono essere consultati dall'allevatore tramite piattaforme digitali o applicazioni dedicate. Nei sistemi più moderni, tali applicazioni possono generare avvisi automatici in caso di criticità, ad esempio quando un animale esce dalla zona di pascolo prestabilita. Nelle aree in cui è presente una buona copertura telefonica, è possibile utilizzare direttamente collari dotati di GPS e scheda SIM, senza ricorrere ad antenne intermedie o reti di comunicazione a lungo raggio.

Questa tecnologia permette quindi di localizzare gli animali al pascolo e monitorarne gli spostamenti, anche se con un intervallo temporale di aggiornamento che può arrivare a circa 30 minuti, a seconda del sistema utilizzato e delle condizioni di connessione (Abeni et al., 2024).

I sistemi di tracciamento e monitoraggio degli spostamenti sono particolarmente utili negli allevamenti di grandi dimensioni, poiché forniscono informazioni importanti per il controllo dello stato di salute e fisiologico degli animali. In contesti aziendali molto ampi, infatti, non sempre è possibile osservare con attenzione ogni singolo capo in modo continuativo.

Le informazioni relative alla salute e allo stato fisiologico possono essere ricavate dall'analisi di variazioni nei modelli di movimento. Ad esempio, una riduzione dell'attività motoria può rappresentare un segnale precoce di zoppia o di altre problematiche sanitarie. Al contrario, un aumento dell'attività motoria, associato alla tendenza all'isolamento, può indicare l'approssimarsi del parto. Disporre tempestivamente di queste informazioni, soprattutto nel caso di animali al pascolo o di mandrie numerose, può supportare in modo significativo l'allevatore nella gestione della mandria e nella pianificazione degli interventi (Abeni et al., 2024).

3.3. Sensori indossabili

Per sensori indossabili si intendono tutti quei dispositivi applicati sull'animale, in grado di fornire informazioni relative al suo stato fisiologico, comportamentale e sanitario. Tra questi rientrano accelerometri, podometri, collari intelligenti, marche auricolari intelligenti e boli ruminali.

Gli accelerometri utilizzati negli allevamenti sono generalmente triassiali, così chiamati perché misurano l'accelerazione lungo tre assi dello spazio (X, Y, Z). Per comprenderne il funzionamento, si può immaginare l'accelerometro come una piccola struttura contenente una massa sospesa tramite microscopiche molle. Quando l'animale si muove, la massa si sposta e genera una deformazione delle strutture interne; in base all'intensità, alla direzione e alla frequenza di tali movimenti, il dispositivo è in grado di interpretare l'attività svolta dall'animale.

Gli accelerometri triassiali fanno parte dei sistemi MEMS (Micro Electro Mechanical Systems), cioè sistemi micro-elettro-meccanici costituiti da strutture meccaniche e circuiti elettronici miniaturizzati. Questa miniaturizzazione consente l'applicazione dei dispositivi direttamente sull'animale. Un dispositivo accelerometrico, come riportato in Figura 9, comprende generalmente un accelerometro, un sistema di condizionamento del segnale, un microprocessore per una prima elaborazione dei dati, una batteria e un circuito per la memorizzazione e la trasmissione delle informazioni.

Gli accelerometri possono essere posizionati su collari, marche auricolari o arti dell'animale. Questi dispositivi permettono di rilevare variazioni dell'attività motoria e, di conseguenza, possono fornire indicazioni sullo stato di salute, sull'eventuale presenza di stress o sull'imminenza dell'estro. Quando

sono applicati al collare, possono inoltre rilevare l'attività di ruminazione attraverso il riconoscimento dei movimenti caratteristici della mandibola (Abeni et al., 2024).

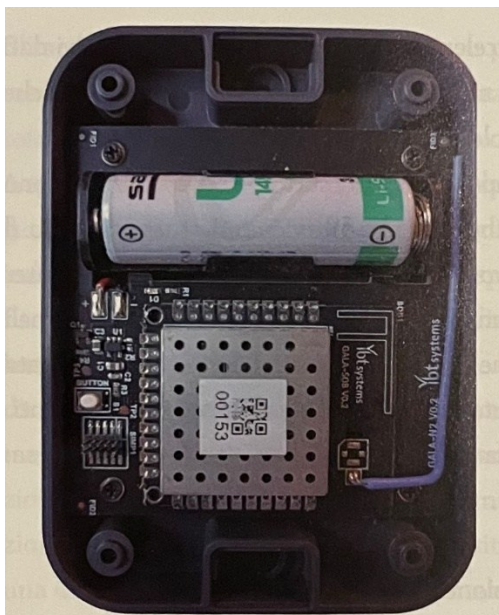


Figura 9. Prototipo di accelerometro che presenta al centro il microprocessore e sulla destra l'antenna per la trasmissione dei dati (Fonte: Abeni et al., 2024).

I podometri, invece, sono applicati agli arti e hanno la funzione principale di contare il numero di passi compiuti dall'animale e di rilevare se l'animale si trova in stazione o in decubito. Anche questi dispositivi si basano sull'impiego di accelerometri, generalmente biassiali. Attraverso il numero di passi e la durata dei periodi di decubito, i podometri possono fornire informazioni utili sullo stato fisiologico e sanitario dell'animale (Abeni et al., 2024).

Un altro dispositivo indossabile è rappresentato dal bolo ruminale. Si tratta di capsule, generalmente realizzate in materiale ceramico o biocompatibile, che vengono fatte ingerire all'animale e si posizionano stabilmente all'interno del reticolo o del rumine. Il bolo è progettato per evitare l'espulsione o lo spostamento lungo il tratto digerente, grazie alla sua forma e, in alcuni casi, alla presenza di specifiche strutture che ne favoriscono la stabilità.

Il sensore contenuto all'interno del bolo può misurare la temperatura corporea a intervalli regolari preimpostati. I dati vengono elaborati da un microchip interno al dispositivo e successivamente trasmessi tramite un'antenna e un trasmettitore a radiofrequenza. Il segnale viene intercettato da un'antenna posizionata all'interno della stalla, che invia le informazioni a un ricevitore o a una

centrale di controllo. Quest'ultima può essere rappresentata da un computer aziendale, da un software gestionale o da una piattaforma cloud.

I dati raccolti vengono quindi elaborati e, nel caso in cui la temperatura rilevata superi una soglia prestabilita, il sistema può inviare una notifica all'allevatore, segnalando la necessità di un controllo dell'animale. I boli ruminali possono inoltre integrare sensori per il monitoraggio di altri parametri fisiologici, come il pH ruminale, utile per prevenire condizioni di acidosi, gestire i cambi di dieta e ottenere informazioni sulle fermentazioni ruminali. Questo consente di identificare tempestivamente variazioni metaboliche prima che evolvano in condizioni patologiche, permettendo di correggere e ottimizzare la razione alimentare e di conseguenza le performance produttive del bovino.

Oltre al monitoraggio fisiologico, i boli possono svolgere funzioni di identificazione e tracciamento dell'animale grazie alla presenza di un transponder. Se dotati di accelerometri, possono inoltre contribuire alla valutazione della ruminazione, attraverso il rilevamento dei movimenti associati al rigurgito e alla masticazione dell'alimento, e quelli per la rilevazione dell'estro, grazie all'aumento dell'attività motoria dell'animale (<https://terraevita.edagricole.it/nova/nova-allevamento-zootecnica/welfare-la-tecnologia-a-supperto-del-benessere-del-bovino-da-carne/>).

I collari intelligenti per bovini sono dispositivi progettati per monitorare in modo continuo e automatico diversi parametri legati alla salute e al comportamento degli animali. Alcuni modelli possono rilevare la temperatura corporea e la frequenza cardiaca, ad esempio attraverso sensori a infrarossi e sensori di ossimetria tissutale, che rilevano in modo continuo ed in tempo reale la percentuale di ossigeno nei tessuti. I dati raccolti vengono gestiti da un microcontrollore integrato e trasmessi in tempo reale a una piattaforma digitale mediante sistemi di comunicazione wireless, come il Wi-Fi. Una volta acquisiti, i dati vengono elaborati e visualizzati in modo chiaro. L'elaborazione non si limita alla semplice rappresentazione delle informazioni, ma può includere modelli statistici e algoritmi in grado di valutare l'accuratezza delle misurazioni e generare allarmi automatici in caso di valori fuori norma. Questo consente un monitoraggio continuo e immediato dello stato di salute degli animali (Darwis et al., 2022).

I collari possono inoltre essere dotati di accelerometri e microfoni, permettendo il monitoraggio continuo dei movimenti e dei rumori prodotti dalla testa e dal collo dell'animale. Il dispositivo non si limita a rilevare se l'animale si muove, ma può interpretare il tipo di movimento. Ad esempio, il movimento della mandibola durante la ruminazione presenta ritmo, frequenza e cadenza differenti rispetto ai movimenti eseguiti durante l'ingestione di alimento, il pascolamento o il riposo.

Tra i principali parametri analizzati rientrano il tempo di ingestione, utile per verificare che l'animale si alimenti correttamente e con frequenza adeguata; l'attività motoria, utile per identificare eventuali fasi di estro attraverso cambiamenti nei livelli di agitazione; e lo stato di salute, che può essere

valutato anche tramite i microfoni, in grado di rilevare segnali acustici riconducibili a patologie respiratorie, come ad esempio episodi di tosse (<https://www.informatoreagrario.it/filiere-produttive/zootecnica/il-monitoraggio-delle-bovine-con-collari-con-accelerometro/>).

Le marche auricolari intelligenti sono anch'esse dotate di accelerometri triassiali, capaci di registrare i movimenti della testa nelle tre dimensioni dello spazio. Attraverso algoritmi di Intelligenza Artificiale, le informazioni grezze relative ai movimenti vengono trasformate in dati utili per la gestione dell'animale.

Il dispositivo comunica costantemente con una centralina presente in allevamento. Il software collegato alla centralina può creare un profilo individuale per ciascun animale, fornendo informazioni personalizzate basate sulle variazioni rispetto alle abitudini del singolo soggetto. Eventuali anomalie vengono quindi notificate all'allevatore tramite applicazione, consentendo un intervento tempestivo. Tra i parametri monitorati tramite marche auricolari intelligenti rientra il tempo di ruminazione. Il dispositivo è infatti in grado di distinguere il movimento tipico della bocca durante la ruminazione, parametro importante perché una sua riduzione può rappresentare un primo indicatore dell'insorgenza di problematiche sanitarie, come disturbi metabolici e digestivi. Vengono inoltre monitorate l'attività motoria e le manifestazioni comportamentali associate all'estro: una bovina che si muove in modo insolito o risulta più agitata rispetto al proprio comportamento abituale può essere segnalata come prossima al calore. Rispetto alla sola osservazione visiva, questi sistemi permettono all'allevatore di ottimizzare i tempi dell'inseminazione. Alcune marche auricolari possono inoltre fornire informazioni sulla posizione dell'animale mediante GPS o radiofrequenza (<https://agronotizie.imaginenetwork.com/zootecnica/2019/09/19/con-smartbow-l-intelligenza-artificiale-entra-in-stalla/64117>).

In sintesi, i sensori indossabili permettono di monitorare costantemente i segnali biologici e comportamentali di ogni singolo animale, rilevando alterazioni che la sola osservazione umana potrebbe non individuare. L'integrazione di questi dati con algoritmi intelligenti migliora ulteriormente la gestione aziendale, fornendo un supporto decisionale utile all'allevatore. In questo modo è possibile intervenire in modo mirato sul singolo animale, ad esempio modificando la razione alimentare o programmando un controllo sanitario. Tali tecnologie amplificano le capacità dell'allevatore, permettendo una gestione accurata anche in allevamenti di grandi dimensioni (<https://ruminantiamese.ruminantia.it/i-sensori-indossabili-sono-unincredibile-opportunita/>).

3.4. Sensori ambientali

I sensori ambientali impiegati negli allevamenti sono dispositivi, spesso wireless, utilizzati per monitorare parametri quali temperatura, umidità, qualità dell'aria e concentrazione di gas

potenzialmente nocivi. Le rilevazioni vengono associate a riferimenti temporali, come data e ora, in modo da poter ricostruire l'andamento delle condizioni ambientali nel tempo.

Questi sensori sono distribuiti all'interno dell'allevamento e trasmettono i dati in modo continuo a un gateway, cioè un dispositivo che funge da intermediario tra i sensori e il sistema di gestione. Il gateway invia le informazioni tramite rete internet a una piattaforma digitale, dove i dati vengono analizzati e trasformati in report facilmente consultabili. Inoltre, l'allevatore può ricevere notifiche immediate in caso di anomalie, come un aumento eccessivo della temperatura o la presenza di concentrazioni elevate di gas pericolosi (<https://sitip.net/monitoraggio-ambientale-stalle-bovine/#>).

Le condizioni ambientali all'interno della stalla possono differire sensibilmente da quelle esterne a causa della produzione di gas, umidità, calore e polveri derivanti dalla presenza degli animali e dalle attività svolte in allevamento. Tutti questi parametri presentano soglie oltre le quali possono influire negativamente sulla salute degli animali e degli operatori.

Per quanto riguarda l'umidità, viene monitorata l'umidità assoluta, cioè la quantità di vapore acqueo contenuta in un metro cubo d'aria, oppure l'umidità relativa. Livelli troppo bassi possono rendere l'ambiente più polveroso, mentre livelli troppo elevati possono ostacolare la dispersione del calore corporeo, soprattutto se associati ad alte temperature. Al contrario, in presenza di basse temperature, un'umidità elevata può aumentare la perdita di calore corporeo.

Per valutare il rischio di stress termico negli animali si utilizza spesso l'indice termoigrometrico, indicato come THI (Temperature Humidity Index), che tiene conto dell'effetto combinato di temperatura e umidità. Questo indice permette di stimare il livello di stress termico percepito dagli animali, come riportato in Figura 10.

Per quanto riguarda la qualità dell'aria, i principali gas monitorati negli allevamenti sono anidride carbonica, ammoniaca, acido solfidrico, metano e, inoltre, vengono misurati parametri come polveri e composti organici volatili.

L'anidride carbonica viene prodotta dalla respirazione degli animali e dalla decomposizione della sostanza organica presente nelle deiezioni. Viene misurata in ppm, cioè parti per milione, e il livello massimo consigliato negli allevamenti è di circa 2.500 ppm.

L'ammoniaca deriva soprattutto dalla degradazione dell'urea e dell'acido urico presenti nelle deiezioni; concentrazioni superiori a 10 ppm possono compromettere le vie respiratorie degli animali. L'acido solfidrico viene prodotto dalla degradazione anaerobica, in assenza di ossigeno, della sostanza organica contenuta nelle deiezioni. Questo composto può risultare pericoloso o letale ad alte concentrazioni; per tale motivo il limite massimo consigliato è di circa 10 ppm.

Il metano deriva invece dall'emissione di gas da parte degli animali e dalla fermentazione della sostanza organica, con un limite massimo accettabile pari a circa 1.000 ppm.

Le polveri derivano da particelle di mangime, peli, muffe, pollini e altre sostanze presenti nell'ambiente di allevamento. Esse possono causare irritazioni e, nel caso delle particelle più sottili, depositarsi negli alveoli polmonari, favorendo infezioni respiratorie. Il limite di concentrazione negli allevamenti è indicativamente pari a 10 mg/m^3 per le polveri totali e a 3 mg/m^3 per quelle più fini, cioè inferiori a 4 micrometri.

I composti organici volatili comprendono numerosi composti chimici caratterizzati da elevata volatilità e comportamento simile in atmosfera. Negli allevamenti vengono prodotti dal metabolismo animale e dalla degradazione della sostanza organica presente nelle deiezioni.

I vari sensori ambientali (centraline termoigrometriche, centraline per rilevamento di gas) servono quindi a monitorare tutti questi parametri nella stalla, consentendo di intervenire prima che vengano raggiunte soglie critiche (Abeni et al., 2024).

		Umidità relativa (%)																			
Temperatura (°C)		5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
	22	64	65	65	66	66	66	67	67	67	68	68	69	69	69	70	70	70	71	71	72
	23	65	66	66	67	67	67	68	68	69	69	70	70	70	71	71	72	72	73	73	73
	24	66	67	67	68	68	68	69	69	70	70	71	71	72	72	73	73	74	74	75	75
	25	67	67	68	69	69	70	70	71	71	72	72	73	73	74	74	75	75	76	76	77
	26	68	68	69	70	70	71	71	72	72	73	74	74	75	75	76	76	77	78	78	79
	27	69	69	70	71	71	72	72	73	74	74	75	76	76	77	77	78	79	79	80	81
	28	69	70	71	72	72	73	74	74	75	76	76	77	78	78	79	80	80	81	82	82
	29	70	71	72	73	73	74	75	75	76	77	78	78	79	80	81	81	82	83	83	84
	30	71	72	73	74	74	75	76	77	77	78	79	80	81	81	82	83	84	84	85	86
	31	72	73	74	75	75	76	77	78	79	80	80	81	82	83	84	84	85	86	87	88
	32	73	74	75	76	76	77	78	79	80	81	82	83	83	84	85	86	87	88	89	90
	33	74	75	76	77	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	90	91
	34	75	76	77	78	79	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93
	35	75	76	77	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95
	36	76	77	78	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	94	95	96	97
	37	77	78	79	81	82	83	84	85	86	87	88	90	91	92	93	94	95	96	97	99
	38	78	79	80	82	83	84	85	86	87	89	90	91	92	93	95	96	97	98	99	100
	39	79	80	81	83	84	85	86	87	89	90	91	92	94	95	96	97	99	100	101	102
	40	80	81	82	84	85	86	87	89	90	91	92	94	95	96	98	99	100	101	103	104
	41	81	82	83	85	86	87	89	90	91	93	94	95	96	98	99	100	102	103	104	106
	42	81	83	84	86	87	88	90	91	92	94	95	97	98	99	101	102	103	105	106	108
	43	82	84	85	87	88	89	91	92	94	95	97	98	99	101	102	104	105	107	108	109
	44	83	85	86	88	89	90	92	93	95	96	98	99	101	102	104	105	107	108	110	111

Indice THI	Classi di rischio produttività			
	Nulla	Minimo	Allerta	Emergenza
Massimo giornaliero	THI ≤ 72	72 < THI ≤ 78	78 < THI < 84	THI ≥ 84
Minimo giornaliero	THI ≤ 62	62 < THI ≤ 68	68 < THI < 74	THI ≥ 74

Figura 10. Grafico rappresentativo del THI che esprime la reale condizione di disagio termico degli animali in base all'umidità relativa e alla temperatura della stalla (Fonte: <https://www.arpa.fvg.it/temi/temi/meteo-e-clima/ultimi-approfondimenti-pubblicati/thi-indice-di-disagio-bioclimatico-per-bovine-da-latte/>).

Questi sensori sono progettati per resistere a condizioni ambientali complesse, caratterizzate da elevata umidità, presenza di polveri e, talvolta, sostanze corrosive come l'ammoniaca.

Per garantire il benessere animale, i sistemi di monitoraggio si concentrano principalmente su tre variabili: temperatura, umidità relativa e livelli di anidride carbonica. Quest'ultima rappresenta un indicatore importante per valutare l'efficienza della ventilazione e la salubrità dell'ambiente.

A tale scopo vengono impiegate sonde capaci di operare autonomamente, offrendo misurazioni stabili e precise anche in condizioni difficili. Questi sensori possono essere integrati in sistemi di gestione automatizzati. Ad esempio, se i livelli di anidride carbonica superano una soglia prestabilita, il sistema di ventilazione può attivarsi automaticamente; al contrario, può ridurre la propria attività o spegnersi quando le condizioni ambientali rientrano nei valori desiderati. Questo contribuisce al risparmio energetico e al miglioramento della sostenibilità aziendale (<https://www.vaisala.com/it/industries-applications/food-beverage-and-agriculture/primary-production-and-agriculture/animal-shelter-indoor-air-monitoring>).

3.5. Tecnologie utili alla mitigazione delle condizioni ambientali in allevamento

Come descritto nel paragrafo precedente, i sensori permettono di monitorare le condizioni ambientali all'interno dell'allevamento. Tuttavia, per modificarle sono necessarie tecnologie specifiche che, in alcuni casi, possono essere collegate direttamente ai sensori, rendendo automatica la loro accensione e il loro spegnimento. Tali impianti comprendono principalmente sistemi di ventilazione, sistemi di raffrescamento e sistemi di riscaldamento.

I sistemi di ventilazione hanno funzioni differenti a seconda della stagione. Durante l'inverno favoriscono il ricambio dell'aria, riducendo l'umidità in eccesso, le polveri e la concentrazione dei gas prodotti dagli animali, senza provocare un eccessivo abbassamento della temperatura. Durante l'estate, oltre a ridurre umidità, gas e polveri, contribuiscono a limitare l'aumento della temperatura interna della stalla.

La ventilazione può essere naturale o meccanica. La ventilazione naturale sfrutta fenomeni fisici come l'effetto camino e l'azione del vento; tuttavia, in alcuni casi può non essere sufficiente a garantire un adeguato ricambio d'aria. In tali situazioni si ricorre alla ventilazione meccanica, mediante l'impiego di ventilatori. Questi devono essere installati in modo da non ostacolare la ventilazione naturale, ma piuttosto da integrarla e favorirla. I ventilatori possono essere ad asse orizzontale o ad asse verticale. I primi imprimono all'aria una maggiore velocità e generano un flusso continuo in grado di dare sollievo agli animali, soprattutto nei periodi caldi. I ventilatori ad asse verticale, invece, sono generalmente più lenti e hanno la funzione di evitare ristagni d'aria, favorire il ricircolo e contribuire all'evaporazione dell'acqua presente nella lettiera. I sistemi di raffrescamento vengono utilizzati quando la sola ventilazione non è sufficiente a mantenere il THI al di sotto delle soglie critiche.

Negli allevamenti bovini si distinguono principalmente due metodi di raffrescamento: la nebulizzazione ad alta pressione e la bagnatura diretta associata alla ventilazione. Il sistema di nebulizzazione ad alta pressione è dotato di una pompa che spinge l'acqua attraverso il sistema con

pressioni molto elevate. In questo modo l'acqua viene trasformata in una nebbia costituita da goccioline molto piccole e che rimangono sospese nell'aria per alcuni secondi. Durante l'evaporazione, queste goccioline assorbono calore dall'ambiente circostante. In questo caso il raffrescamento riguarda soprattutto l'aria della stalla e non direttamente l'animale. Tuttavia, se l'aria è molto umida, l'evaporazione rallenta e l'effetto rinfrescante diminuisce. Per questo motivo il sistema viene spesso utilizzato associato ai ventilatori, che favoriscono il movimento dell'aria e accelerano l'evaporazione dell'acqua emessa dagli ugelli.

Nel sistema di bagnatura diretta con ventilazione, l'acqua non viene nebulizzata, ma distribuita tramite irrigatori o ugelli che producono gocce di dimensioni maggiori. Gli animali vengono bagnati direttamente sul dorso e sul mantello; successivamente entrano in funzione i ventilatori, che generano un flusso d'aria costante sopra gli animali. L'acqua presente sul corpo evapora e, durante questo processo, sottrae calore direttamente all'animale. A differenza della nebulizzazione, questo metodo non ha come obiettivo principale l'abbassamento della temperatura dell'ambiente, ma il raffrescamento diretto dell'animale. È un sistema particolarmente efficace nelle bovine da latte, poiché questi animali producono elevate quantità di calore metabolico.

I sistemi di riscaldamento vengono invece utilizzati principalmente per i vitelli durante i periodi invernali. In questi casi sono impiegate lampade a infrarossi, che trasmettono calore per irraggiamento al corpo del giovane animale (Figura 11).



Figura 11. Riscaldamento localizzato nei box per vitelli realizzato con lampade all'infrarosso (Fonte: <https://www.ruminantia.it/meglio-al-caldo-o-in-compagnia-cosa-scelgono-i-vitelli-in-inverno/>).

Se ai sensori e agli impianti vengono associati sistemi di controllo, è possibile automatizzare i processi di mitigazione ambientale, massimizzandone l'efficienza. Questi sistemi, schematicamente rappresentati in Figura 12, sono sistemi di controllo automatico che consentono di mantenere un determinato parametro, come la temperatura della stalla, vicino a un valore desiderato. La loro caratteristica principale è la presenza della retroazione. La retroazione consente al sistema di non limitarsi a impartire un comando, ma di controllare continuamente il risultato ottenuto e confrontarlo con l'obiettivo impostato. Ad esempio, se il sensore rileva una temperatura di 30 °C e il valore desiderato è pari a 25 °C, la centralina rileva un errore di 5 °C e attiva gli attuatori, come ventilatori e sistemi di raffrescamento. Man mano che la temperatura diminuisce, il sensore continua a effettuare misurazioni e a inviarle alla centralina. Quando la temperatura si avvicina al valore desiderato, il sistema riduce gradualmente la propria azione oppure si disattiva. Se successivamente la temperatura aumenta di nuovo, il ciclo riprende automaticamente (Abeni et al., 2024).



Figura 12. Schema di controllo dei sensori di mitigazione ambientale (Fonte: Abeni et al., 2024).

3.6. Internet of Things (IoT) nella gestione degli allevamenti bovini

L'Internet of Things (IoT) rappresenta una delle tecnologie più importanti per lo sviluppo dell'allevamento di precisione. Questo approccio si basa sull'impiego di sensori e dispositivi in grado di raccogliere, elaborare e trasmettere dati in tempo reale. Ciò consente il monitoraggio continuo e automatico di numerosi parametri legati agli animali, all'ambiente di allevamento e alla gestione aziendale. In questo modo è possibile migliorare tre aspetti fondamentali: efficienza produttiva, benessere animale e gestione sanitaria.

I sensori che fanno parte dei sistemi IoT possono essere installati sia sugli animali sia all'interno della stalla. Essi permettono di rilevare informazioni relative ad attività motoria, ruminazione, assunzione di alimento, condizioni ambientali, temperatura corporea, localizzazione e comportamento. Le informazioni raccolte vengono trasmesse attraverso reti wireless a piattaforme digitali, dove i dati vengono elaborati, archiviati e analizzati mediante algoritmi specifici. Da tali elaborazioni è possibile estrarre informazioni utili per supportare le scelte gestionali.

Il funzionamento dei sistemi IoT può essere suddiviso in diverse fasi. La prima fase riguarda l'acquisizione dei dati tramite sensori e dispositivi di raccolta. Tra questi rientrano podometri e accelerometri, che permettono di monitorare l'attività motoria dei bovini. Tale parametro è particolarmente utile per l'individuazione dell'estro, poiché durante questa fase l'animale tende a essere più irrequieto e ad aumentare il livello di movimento.

Un'altra categoria è rappresentata dai sensori termici, che consentono di rilevare sia la temperatura ambientale sia quella corporea del singolo animale. Queste informazioni permettono di intervenire rapidamente per prevenire condizioni di stress termico. Sono inoltre importanti i sensori acustici, in grado di rilevare vocalizzazioni o suoni associati a specifiche condizioni fisiologiche o patologiche. I sistemi GPS e RFID, invece, consentono rispettivamente la localizzazione e l'identificazione degli animali.

La seconda fase riguarda la trasmissione dei dati dai sensori ai sistemi di elaborazione. Tale trasmissione può avvenire mediante Wi-Fi, reti cellulari o tecnologie a lungo raggio, come

LoRaWAN, particolarmente adatte agli ambienti agricoli grazie al basso consumo energetico e alla capacità di coprire ampie distanze. La scelta della tecnologia di comunicazione dipende da diversi fattori, tra cui l'estensione dell'azienda, la disponibilità di infrastrutture e i costi di implementazione. La terza fase riguarda l'elaborazione dei dati, che può avvenire su piattaforme cloud oppure tramite sistemi di "edge computing" (elaborazione sul posto/in loco). In questa fase, attraverso algoritmi di machine learning o modelli predittivi, i dati vengono analizzati per individuare pattern, anomalie o variazioni che potrebbero non essere rilevate mediante la sola osservazione visiva.

L'ultima fase è quella applicativa, nella quale le informazioni vengono restituite all'allevatore sotto forma di notifiche, indicatori di performance o report sintetici e facilmente interpretabili.

Un ambito applicativo particolarmente importante dell'IoT è la gestione riproduttiva. Per garantire il successo e l'efficienza dell'inseminazione artificiale è fondamentale individuare con precisione il momento dell'estro delle bovine. Attraverso l'analisi dell'attività motoria e dei comportamenti sociali, i sistemi IoT possono rilevare automaticamente i segnali di estro con maggiore precisione rispetto alla sola osservazione visiva, riducendo il rischio di errori.

I sensori IoT permettono inoltre di individuare precocemente variazioni nei parametri fisiologici e comportamentali, risultando utili nella gestione della salute animale. Ad esempio, una riduzione dell'attività motoria o dell'assunzione di alimento, così come la presenza di suoni respiratori anomali, può indicare l'insorgenza di malattie o infezioni respiratorie.

L'IoT può essere applicato anche alla gestione dei vitelli, categoria particolarmente delicata dal punto di vista sanitario. I dispositivi automatici di alimentazione consentono di monitorare l'assunzione di latte e le abitudini alimentari del vitello, permettendo di individuare precocemente eventuali problemi sanitari prima che si manifestino in modo evidente. Ciò può contribuire alla riduzione della mortalità, alla diminuzione della gravità delle patologie, al contenimento dei costi sanitari e a un uso più razionale e mirato dei farmaci.

Infine, l'IoT può contribuire al miglioramento del benessere animale grazie al monitoraggio continuo di stress, disagio o alterazioni comportamentali. L'individuazione tempestiva di tali condizioni consente di intervenire rapidamente, ad esempio modificando temperatura, umidità o ventilazione, in modo da creare condizioni ambientali più adeguate e ridurre gli effetti negativi sulla salute e sulla produttività degli animali (Akhigbe et al., 2021).

3.7. Sistemi automatizzati di alimentazione

Inizialmente, i sistemi automatizzati di alimentazione sono stati sviluppati per sopperire alla carenza di manodopera negli allevamenti. Successivamente, è stato osservato che tali sistemi possono migliorare anche l'accuratezza e la precisione della dieta. Nella preparazione della razione, gli "Automatic Feeding Systems" (AFS) possono affiancare o sostituire i tradizionali carri trincia-miscelatori, offrendo vantaggi quali la riduzione della variabilità fisica e chimica della razione e l'aumento della frequenza di distribuzione dell'alimento. Questi aspetti possono influenzare positivamente il comportamento alimentare, la produttività e la salute degli animali.

I risultati positivi ottenuti hanno favorito un crescente sviluppo dei sistemi di alimentazione automatica. Attraverso l'impiego di software, sensori e sistemi robotizzati, gli AFS sono in grado di preparare e distribuire automaticamente le razioni alimentari. Questi sistemi possono essere progettati per l'alimentazione di gruppi di animali, formulando una razione bilanciata in base alle caratteristiche medie del gruppo, oppure per l'alimentazione individuale. In quest'ultimo caso, il bovino viene riconosciuto mediante tecnologia RFID e il sistema può formulare una razione personalizzata in base alle esigenze del singolo animale oppure somministrare la quota integrativa rispetto alla razione media del gruppo di appartenenza.

I criteri di formulazione della razione variano in base all'indirizzo produttivo. Nei bovini da carne, la quantità di alimento può essere regolata in funzione dell'ingestione e dell'effettiva conversione dell'alimento in carne. Nelle bovine da latte, invece, i parametri considerati possono includere consumo medio di alimento, produzione media di latte, composizione del latte, peso corporeo, condizione corporea e stadio fisiologico.

Le principali tipologie di AFS per l'alimentazione di gruppo sono: sistemi fissi, sistemi fissi con carri di distribuzione mobili e robot miscelatori-distributori mobili.

I sistemi fissi, riportati in Figura 13, necessitano di una zona di stoccaggio delle materie prime, spesso definita "cucina", dotata di un miscelatore fisso. Una volta preparata, la razione viene scaricata su nastri trasportatori che la distribuiscono lungo le corsie di alimentazione.



Figura 13. AFS fisso con cucina, miscelatore e nastri trasportatori (Fonte: <https://www.mondomacchina.it/it/sistemi-automatici-per-alimentazione-dei-bovini-c3278>).

Gli AFS fissi con carri di distribuzione mobili, riportati in Figura 14, necessitano anch'essi di una cucina per lo stoccaggio degli alimenti, ma in questo caso la miscelazione avviene all'interno dei carri mobili, generalmente mediante una coclea. I carri si spostano lungo binari sospesi e distribuiscono la razione lungo la corsia di alimentazione.



Figura 14. Carro di distribuzione semovente durante la distribuzione di alimento (Fonte: <https://macchineagricolenews.edagricole.it/innovazioni-tecniche/carri-miscelatori-allunifed-ci-pensa-il-robot/>).

I robot automatici semoventi, mostrati in Figura 15, sono carri miscelatori-distributori privi di vincoli fisici fissi. Essi si spostano autonomamente tramite sensori di distanza e sistemi di navigazione, depositando la razione lungo la corsia di alimentazione.

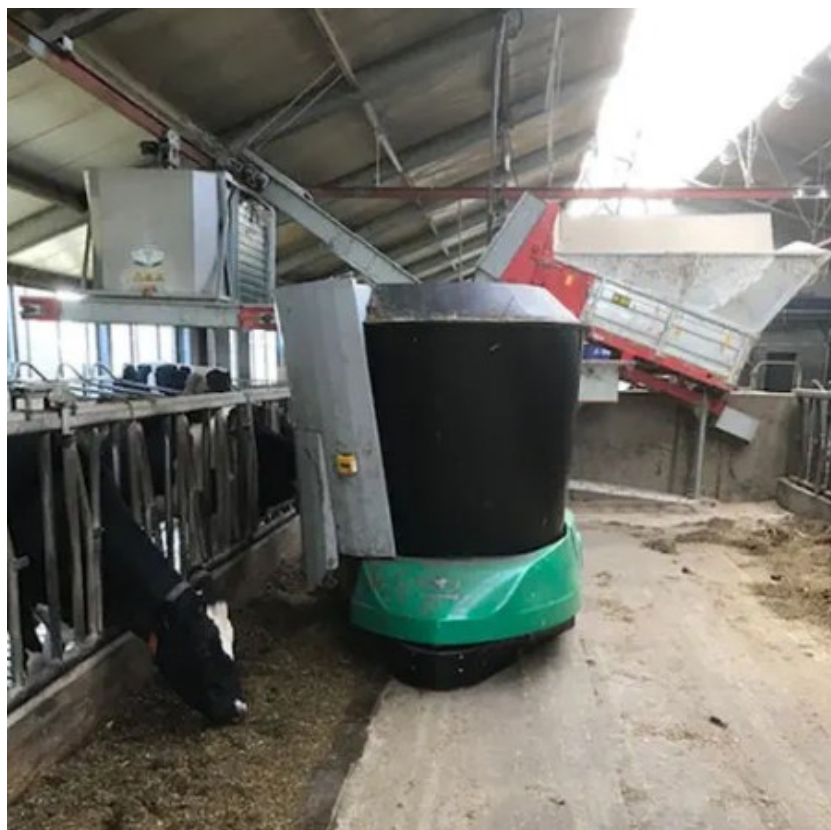


Figura 15. Robot automatizzato durante la distribuzione di alimento (Fonte: <https://www.agriexpo.online/it/prod/wasserbauer-gmbh-fuetterungssysteme/product-172731-145269.html>).

Per rendere questi sistemi ancora più efficaci, possono essere affiancati da robot spingi-foraggio, come quello riportato in Figura 16. Questi dispositivi avvicinano continuamente la razione alla rastrelliera in seguito agli spostamenti causati dagli animali durante l'assunzione della razione. In questo modo è possibile favorire il consumo di tutto alimento distribuito, riducendo il residuo o lo spreco in mangiatoia.



Figura 16. Spingi-foraggio in una stalla di vacche da latte (Fonte: <https://www.lely.com/it/soluzioni/alimentazione/juno/>).

Per quanto riguarda i sistemi di alimentazione individuale, questi sono rappresentati dagli autoalimentatori o alimentatori individuali, mostrati in Figura 17. Tali dispositivi riconoscono i singoli animali tramite transponder applicati, ad esempio, su collari o marche auricolari. Questo consente sia la distribuzione di una razione personalizzata, sia l'acquisizione di dati relativi al numero di accessi alla mangiatoia, al numero di pasti, alla quantità di alimento assunto e alla velocità di ingestione. La razione può essere formulata in base a diversi parametri individuali tra cui: produzione di latte, BCS, stadio fisiologico, peso corporeo e altri fattori gestionali o produttivi.



Figura 17. Stazioni di alimentazione individuali (Fonte: <https://www.agriexpo.online/it/prod/dairymaster/product-171455-60779.html>).

Gli autoalimentatori possono essere impiegati anche per i vitelli, attraverso allattatrici automatiche dotate di tettarelle elettroniche, come riportato in Figura 18. Questi sistemi riconoscono il vitello tramite la marca auricolare elettronica e forniscono il latte in base a età, peso, fabbisogni nutrizionali o eventuali problematiche sanitarie. In alcuni casi, se il vitello è malato, possono essere somministrati trattamenti o farmaci secondo protocolli stabiliti, rispettivamente, dall'allevatore o dal veterinario. Anche in questo caso l'auto-alimentatore registra la quantità di alimento assunto, i tentativi di accesso e la velocità di assunzione del singolo individuo. Inoltre, questi sistemi sono spesso dotati di lavaggio automatico della vasca di miscelazione, delle condutture e della tettarella; il lavaggio viene effettuato più volte al giorno per ridurre i rischi di proliferazione microbica.



Figura 18. Allattatrice automatica per vitelli (Fonte: <https://www.lely.com/it/soluzioni/alimentazione/calm/>).

Nel complesso, i diversi modelli di AFS consentono una maggiore efficienza alimentare, fornendo agli animali le quantità di alimento più vicine ai loro reali fabbisogni, evitando carenze o eccessi. Questo permette di migliorare le prestazioni produttive, utilizzare in modo più efficiente le risorse disponibili e ridurre le perdite di alimento. Di conseguenza, l'allevamento diventa più efficiente dal punto di vista economico e più sostenibile dal punto di vista ambientale (Abeni et al., 2024).

3.8. Sistemi automatizzati di mungitura

I sistemi automatici di mungitura, noti anche come AMS (Automatic Milking System), sono stati sviluppati per rispondere alla necessità di ridurre i costi della mungitura, alla crescente difficoltà di reperire manodopera qualificata e alla possibilità di incrementare il numero di mungiture giornaliere.

Gli AMS possono essere a stallo singolo o multiplo; tuttavia, in generale, il loro principio di funzionamento è analogo (Figura 19).

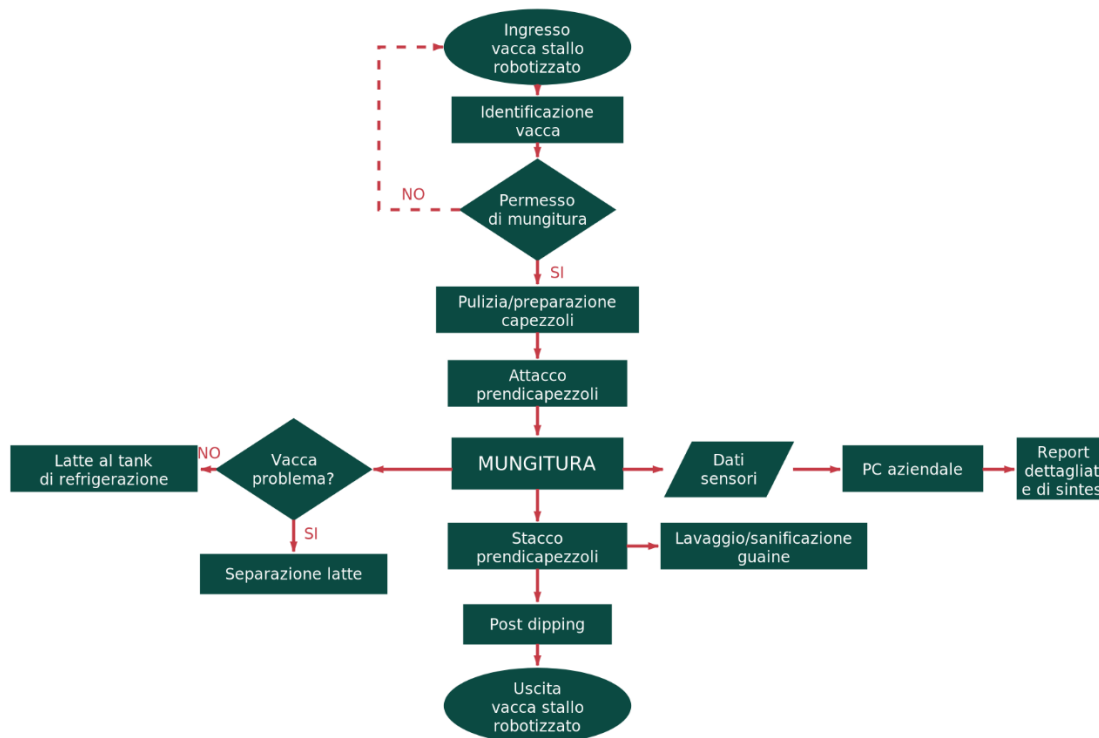


Figura 19. Schema di lavoro di un AMS (Fonte: Rielaborato da Abeni et al., 2024).

Questi sistemi sono costituiti da uno stallo di mungitura, un braccio robotizzato per l'attacco dei prendicapezzoli alla mammella, un sistema di identificazione degli animali e un impianto di mungitura. Tramite un software gestionale integrato con diversi sensori è inoltre possibile monitorare la produzione e la qualità del latte, le prestazioni di mungitura e alcuni parametri fisiologici e sanitari degli animali.

Lo stallo di mungitura ha il compito di contenere l'animale durante la mungitura. Inoltre, per incentivare l'ingresso volontario delle bovine, al suo interno è presente un distributore automatico di concentrato, che viene erogato durante la mungitura. L'ingresso e l'uscita dell'animale sono regolati da cancelli automatici. Una volta all'interno, la bovina viene identificata mediante un'antenna che rileva il segnale emesso da un transponder a radiofrequenza, posizionato sull'animale, per esempio all'interno di collari o cavigliere. Una volta riconosciuta la matricola, l'AMS verifica se la bovina può essere munta. Tale controllo si rende necessario poiché, avendo le bovine libero accesso al robot di mungitura, potrebbero tentare di entrare più volte per ricevere il concentrato, anche quando non è

trascorso sufficiente tempo dalla mungitura precedente. Se la bovina risulta idonea alla mungitura, il cancello di accesso si apre e il sistema avvia il processo e, dopo il riconoscimento, registra simultaneamente i dati produttivi, fisiologici e sanitari dell'animale, che poi verranno inviati al software gestionale. La mungitura avviene mediante il braccio robotizzato, azionato da motori elettrici; il braccio, tramite telecamere 3D o scanner laser, rileva la posizione dei capezzoli e provvede ad attaccare il gruppo mungitore alla mammella. Il braccio robotizzato si occupa anche della pulizia e preparazione della mammella prima della mungitura, mediante un dispositivo multifunzione dedicato (Figura 20). Questo passaggio è fondamentale per salvaguardare la salute della bovina, prevenire le mastiti e garantire la qualità del latte. Al termine della mungitura, lo stesso sistema si occupa della disinfezione dei capezzoli con specifiche soluzioni di post-dipping.

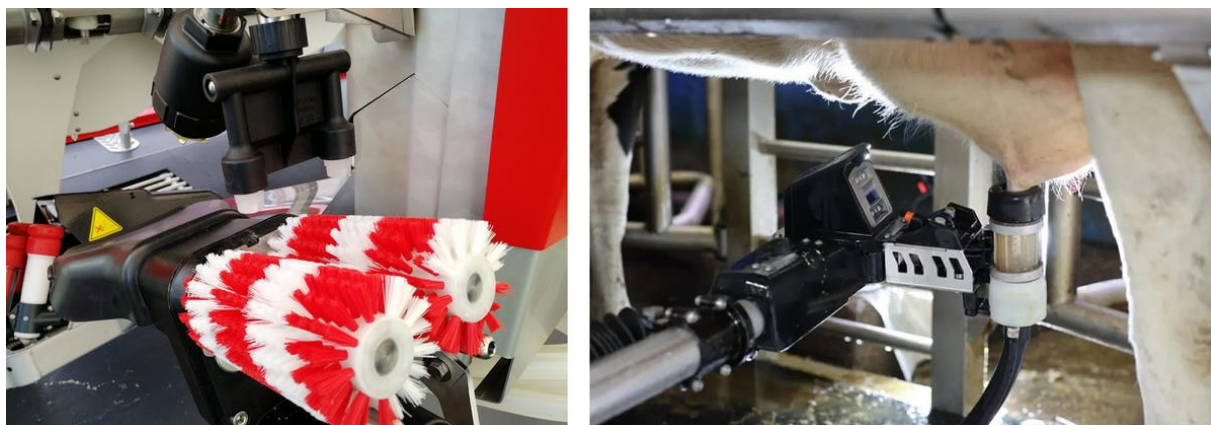


Figura 20. Dettaglio del braccio robotizzato nella mungitura automatica (Fonte: <https://www.mondomacchina.it/it/i-robot-di-mungitura-c3388>).

Il gruppo mungitore è composto principalmente da quattro unità, uno per ciascun capezzolo, all'interno dei quali si trovano le guaine o tettarelle in silicone. Ogni unità è collegata a un flussometro indipendente, in modo da rendere indipendente la mungitura di ogni quarto della mammella. Il flussometro è un dispositivo che misura in tempo reale la quantità e la velocità del latte rilasciato da ciascun quarto. Inoltre, fotocellule, LED a infrarossi ed elettrodi sono integrati nel gruppo di mungitura o nei singoli tubi di raccolta per rilevare parametri quali presenza di sangue o altre anomalie e conducibilità elettrica del latte. Queste informazioni consentono di segnalare all'allevatore eventuali alterazioni a carico di specifici quarti mammari, permettendo controlli e trattamenti mirati. Il latte conforme viene convogliato attraverso i tubi del latte verso la linea di raccolta e, infine, al serbatoio refrigerato, mentre quello non conforme viene separato dal circuito principale. Oltre ai tubi del latte, sono presenti anche i tubi della pulsazione, collegati al pulsatore, un dispositivo che alterna vuoto e aria all'interno del sistema simulando così la suzione del vitello. Al termine della mungitura,

il distacco del gruppo mungitore avviene in modo differenziato in funzione del calo del flusso di latte rilevato nei singoli quarti mammari, evitando fenomeni di sovrampungitura, potenzialmente dannosi per la mammella (Abeni et al., 2024).

Per quanto riguarda il monitoraggio della produzione del latte, i robot di mungitura consentono la registrazione automatizzata e in tempo reale della quantità di latte prodotta da ciascuna bovina durante ogni sessione di mungitura. I dati raccolti a ogni mungitura, confrontati con lo storico produttivo della lattifera, permettono di valutare le performance produttive delle varie bovine e di intervenire tempestivamente in caso di riduzioni anomale della produzione. Questo monitoraggio è reso possibile da sensori che misurano non solo il volume del latte, ma anche parametri come la velocità di mungitura e la frequenza delle sessioni, fornendo un quadro dettagliato della produttività. Anche la qualità del latte viene monitorata attraverso strumentazioni NIR che valutano direttamente componenti analitici come grasso, proteine, lattosio, cellule somatiche e presenza di eventuali anomalie durante la mungitura, senza necessità di prelievi esterni (Figura 21). Tutti i dati raccolti vengono quindi elaborati dal software gestionale, che può utilizzare algoritmi di analisi avanzata e, in alcuni casi, sistemi di Intelligenza Artificiale per individuare anomalie e correlazioni tra produzione, qualità del latte e stato di salute degli animali. Tali strumenti forniscono all'allevatore report dettagliati che supportano le decisioni relative all'alimentazione, alla gestione sanitaria e alle strategie di allevamento. Ad esempio, un calo improvviso nella produzione o una variazione repentina nella composizione del latte possono rappresentare indicatori precoci di squilibri metabolici, alterazioni fisiologiche o problematiche sanitarie. Grazie all'elaborazione automatizzata dei dati, l'allevatore può quindi intervenire tempestivamente con misure correttive mirate (<https://informatorezootechnico.edagricole.it/notizie-dalle-aziende/anche-gestione-della-mandria-con-il-robot-di-mungitura/>).



Figura 21. Robot di mungitura (Fonte: <https://archivio2023-2024.ruminantia.it/le-interviste-di-ruminantia-robot-o-sala-di-mungitura-questo-e-il-dilemma/>).

3.9. Sistemi di visione artificiale

I sistemi di visione artificiale (CVS - Computer Vision System) rappresentano una tecnologia di grande rilevanza nell'ambito dell'allevamento di precisione, poiché consentono il monitoraggio continuo e non invasivo dei bovini. Questa tecnologia comprende telecamere digitali dotate di sensori ottici e, in alcuni casi, termici. Le immagini acquisite vengono successivamente elaborate mediante algoritmi avanzati e tecniche di Intelligenza Artificiale, che permettono di analizzarle in automatico e di restituire informazioni utili per la gestione aziendale. I CVS permettono di superare diversi limiti legati all'osservazione tradizionale, quali la soggettività della valutazione, la discontinuità delle osservazioni e la difficoltà di applicazione su larga scala. Grazie all'acquisizione continua di immagini e all'elaborazione automatizzata dei dati, è infatti possibile ottenere una valutazione oggettiva di numerosi parametri fenotipici, comportamentali e sanitari, permettendo il miglioramento dell'efficienza produttiva e del benessere animale. Dal punto di vista tecnologico, i CVS possono essere dotati di telecamere 2D, che consentono l'acquisizione di immagini a colori o in scala di grigio. Queste immagini possono essere utilizzate per l'analisi del comportamento e per l'identificazione dei singoli individui. Esistono inoltre CVS dotati di telecamere 3D, in grado di acquisire informazioni sulla profondità e, quindi, sulla struttura corporea degli animali. Tali strumenti permettono, ad esempio, la stima del peso corporeo e del BCS. Oltre alle telecamere 2D e 3D, i CVS possono essere dotati di telecamere termiche, capaci di rilevare le radiazioni infrarosse emesse dagli animali, permettendo così anche il monitoraggio della temperatura superficiale corporea, fornendo indicazioni utili sullo stato fisiologico, sanitario e di benessere dell'animale. Per quanto riguarda l'identificazione degli animali, i metodi tradizionali prevedono l'utilizzo di marche auricolari o sistemi RFID. Tuttavia, grazie ai CVS, tali strumenti possono essere integrati o, in alcuni contesti, parzialmente sostituiti da sistemi di riconoscimento automatico basati su caratteristiche proprie dell'animale, come il pattern del mantello, la morfologia corporea o specifici tratti biometrici. Ad esempio, nelle bovine da latte di razza Holstein, il pattern del mantello rappresenta una sorta di "firma visiva", caratterizzata da un elevato grado di individualità e utilizzabile per il riconoscimento automatico. Tuttavia, permangono alcune criticità, soprattutto in presenza di animali introdotti da poco o nati in allevamento non ancora registrati nel sistema o in condizioni ambientali variabili, che possono influenzare la qualità delle immagini acquisite.

Un'altra importante applicazione dei CVS riguarda il monitoraggio e l'analisi del comportamento animale. Questi sistemi sono in grado di rilevare attività quali alimentazione, ruminazione, riposo, locomozione e interazioni sociali, classificandole automaticamente. Le informazioni ottenute sono fondamentali per la valutazione dello stato di salute e del benessere degli animali, poiché variazioni

anche minime del comportamento possono rappresentare indicatori precoci di stress, disagio o condizioni patologiche.

Alcuni sistemi raggiungono livelli di accuratezza particolarmente elevati grazie all'impiego di algoritmi di deep learning, che migliorano la capacità di riconoscimento e classificazione dei comportamenti anche in mandrie numerose e in contesti ambientali complessi.

Per quanto riguarda la gestione produttiva, i CVS consentono la stima automatizzata del BCS, riducendo la necessità di valutazioni manuali, che possono risultare laboriose, soggettive e talvolta stressanti per gli animali. Le telecamere 3D permettono infatti di acquisire informazioni relative alle dimensioni e alla conformazione corporea, consentendo anche la stima del peso corporeo con un margine di errore contenuto. Il BCS rappresenta un parametro fondamentale per la gestione nutrizionale e per la prevenzione di disordini metabolici, in particolare nelle fasi più critiche del ciclo produttivo.

Dal punto di vista sanitario, i CVS possono contribuire all'individuazione precoce di segni di patologie attraverso l'analisi del comportamento, della postura e della locomozione. Ad esempio, le zoppie possono essere identificate automaticamente mediante la valutazione dell'andatura e della distribuzione del peso sui quattro arti, permettendo di rilevare anche alterazioni lievi che potrebbero non essere evidenti mediante la semplice osservazione visiva.

La termografia a infrarossi può invece essere impiegata per individuare variazioni della temperatura superficiale associate a processi infiammatori o infettivi, come nel caso delle mastiti, oppure per il monitoraggio dello stress termico. Attraverso l'analisi combinata delle immagini termiche e dei comportamenti associati, è possibile identificare condizioni di disagio e intervenire tempestivamente mediante strategie gestionali, quali l'attivazione di sistemi di ventilazione o raffrescamento.

In prospettiva futura, l'integrazione tra CVS, tecnologie IoT e sistemi avanzati di Intelligenza Artificiale potrà ampliare notevolmente le applicazioni disponibili, favorendo una gestione più precisa, automatizzata e personalizzata dell'azienda zootecnica. Inoltre, lo sviluppo di strumenti più accessibili e di modelli di analisi sempre più evoluti potrà favorire una maggiore diffusione di queste tecnologie, contribuendo alla transizione verso una zootecnia più attenta al benessere animale, efficiente e sostenibile (Mazon et al., 2024).

3.10. Sistemi di precisione per il monitoraggio dell'allevamento estensivo o semi-estensivo

Tra le tecnologie più innovative per il monitoraggio degli animali in allevamenti estensivi o semi-estensivi rientrano i droni, il Geofencing e il Virtual Fencing. Questi strumenti consentono di migliorare il controllo degli animali al pascolo, riducendo la necessità di interventi manuali diretti e favorendo una gestione più efficiente e sostenibile delle superfici pascolive. I droni, definiti anche come UAV (Unmanned Aerial Vehicles) o velivoli a pilotaggio remoto (Figura 22), sono progettati per sorvolare ampie aree di pascolo, consentendo un monitoraggio rapido, preciso e non invasivo degli animali. Il sorvolo avviene mediante sistemi di navigazione GPS, che permettono al drone di seguire rotte di volo predefinite o adattive, in modo da coprire in maniera sistematica l'intera area di interesse. I dati raccolti durante il volo possono essere trasmessi in tempo reale oppure memorizzati per un'analisi successiva mediante software dedicati, spesso integrati con algoritmi di Intelligenza Artificiale. Tali sistemi sono in grado di riconoscere e contare automaticamente gli animali, monitorarne la distribuzione spaziale e il comportamento, nonché individuare eventuali anomalie riconducibili a problemi sanitari o di benessere. Tra i principali sensori installabili sui droni rientrano le telecamere termiche, i sensori RGB e le telecamere multispettrali. Le termocamere rilevano le radiazioni infrarosse emesse dagli animali e consentono di individuarli anche in condizioni di scarsa visibilità o parziale copertura vegetale. Inoltre, le termocamere possono contribuire all'identificazione di soggetti in difficoltà o con alterazioni dello stato fisiologico, poiché variazioni della temperatura superficiale corporea possono rappresentare indicatori precoci di stress, infiammazione o malessere. I sensori RGB permettono l'acquisizione di immagini e video ad alta risoluzione nello spettro visibile, utili per il riconoscimento degli animali, la valutazione della loro distribuzione nel pascolo e il monitoraggio del comportamento. Nei sistemi più avanzati, tali sensori sono associati ad algoritmi di Intelligenza Artificiale capaci di elaborare automaticamente le immagini, distinguere i singoli animali e supportare il monitoraggio individuale o di gruppo. Le telecamere multispettrali, invece, consentono una valutazione indiretta delle condizioni del pascolo, acquisendo immagini in diverse bande dello spettro elettromagnetico, comprese bande non visibili all'occhio umano. Queste informazioni permettono di stimare lo stato vegetativo, la qualità e la disponibilità del foraggio, contribuendo all'ottimizzazione della gestione del pascolo e garantendo agli animali un accesso più adeguato alle risorse alimentari disponibili (<https://www.droinservice.it/droni-zootecnia-digitale-gestione-benessere-animale/#tecnologie-droni-in-zootecnia%3A-sensori%2C-camere-e-automazione>).

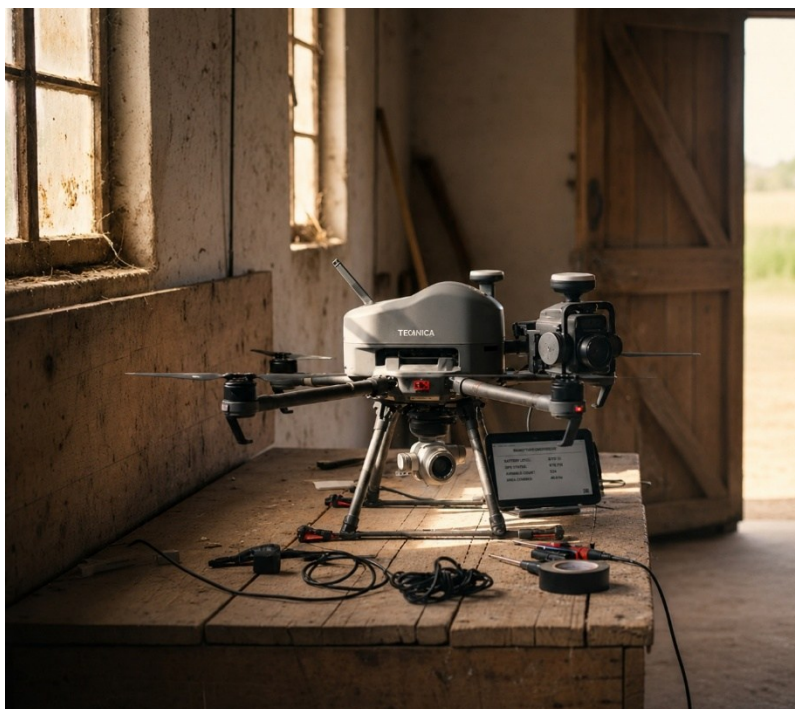


Figura 22. Drone per il monitoraggio dei bovini (Fonte: Rielaborato da <https://www.droinservice.it/ruolo-droni-nella-zootecnia/>)

Il Geofencing è un sistema basato sulla tecnologia GPS che consente di delimitare virtualmente specifiche aree di pascolo.

L'allevatore, tramite un'applicazione o una piattaforma web, può definire un perimetro virtuale associato a determinate coordinate geografiche. Tali informazioni vengono memorizzate nei collari elettronici applicati agli animali. Nel caso in cui uno o più soggetti escano dall'area delimitata, il sistema invia una notifica all'allevatore, permettendo un intervento tempestivo.

Un'evoluzione del Geofencing è rappresentata dal Virtual Fencing. A differenza del Geofencing, che svolge principalmente una funzione di localizzazione e allerta, il Virtual Fencing interviene attivamente nel controllo dei movimenti degli animali, senza la necessità di recinzioni fisiche. Quando un bovino si avvicina al limite dell'area designata, il collare emette un segnale acustico di avvertimento (Figura 23). Se l'animale modifica la propria direzione o rientra nell'area consentita, il segnale viene interrotto immediatamente. Se, al contrario, continua ad avanzare e supera il confine virtuale, il collare emette uno stimolo elettrico breve e a bassa intensità, finalizzato a indurre l'animale a fermarsi o a tornare indietro.



Figura 23. Dettaglio di un collare Virtual Fencing (Fonte: www.gallagher.eu)

Qualora il bovino ignori sia il segnale acustico sia lo stimolo elettrico, il sistema può ripetere la sequenza di avvertimento e correzione (Figura 24). A ogni ripetizione, il segnale acustico può aumentare di intensità, in modo da rafforzare il richiamo. Il numero massimo di sequenze varia in funzione del modello di collare e delle impostazioni adottate. Per tutelare il benessere animale, qualora il soggetto continui a ignorare tutti gli avvisi, il collare interrompe automaticamente l'erogazione degli stimoli correttivi e mantiene attiva esclusivamente la funzione di localizzazione GPS. In tale situazione, il sistema segnala all'allevatore l'animale come uscito dall'area di pascolo o non responsivo agli stimoli.

L'alimentazione dei collari può avvenire tramite batterie a lunga durata, con autonomia variabile in funzione del modello e dell'intensità di utilizzo, oppure mediante piccoli pannelli solari in grado di contribuire alla ricarica della batteria durante il funzionamento. La trasmissione dei dati può avvenire attraverso rete GSM, nelle aree dotate di copertura telefonica, oppure tramite sistemi a radiofrequenza, che richiedono l'installazione di un'infrastruttura dedicata all'interno dell'allevamento.

In entrambi i casi, l'allevatore può monitorare in tempo reale la posizione degli animali e gestire con maggiore flessibilità le aree di pascolo, riducendo il ricorso a recinzioni fisiche e favorendo una gestione dinamica delle risorse foraggere. Queste tecnologie possono quindi contribuire al miglioramento dell'efficienza gestionale, della sicurezza degli animali e della sostenibilità complessiva dei sistemi zootecnici estensivi e semi-estensivi (Abeni et al., 2024).

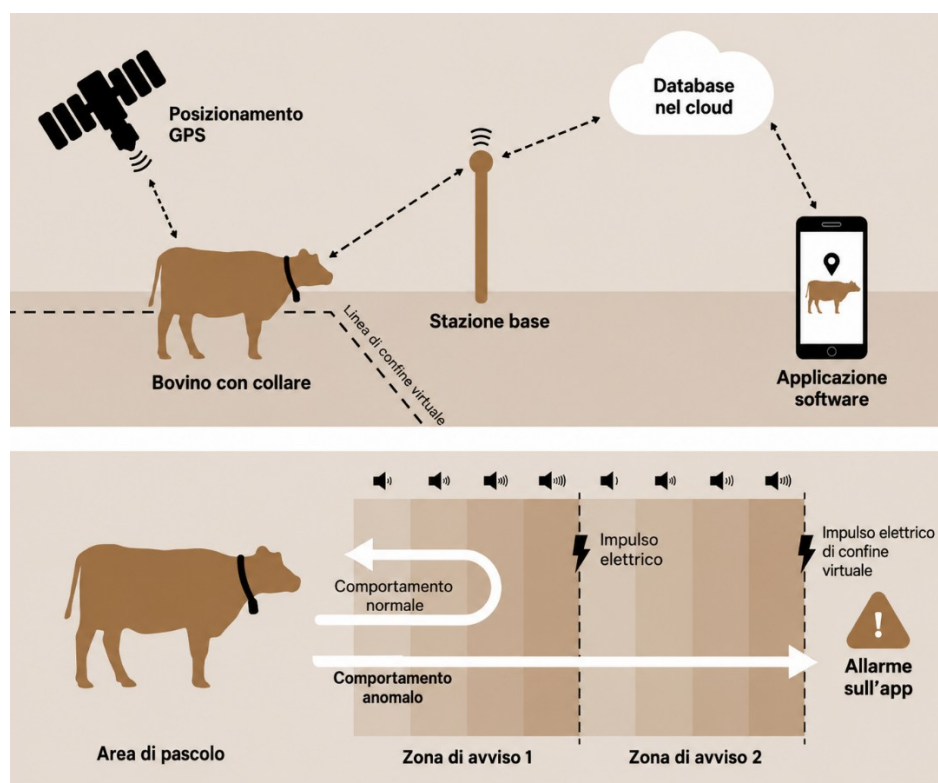


Figura 24. Schema di funzionamento del sistema di Virtual Fencing (Fonte: modificato da www.perc.org/2024/11/21/unlocking-the-conservation-potential-of-virtual-fencing/)

4. RUOLO DELL'INTELIGENZA ARTIFICIALE

L'Intelligenza Artificiale (IA) rappresenta un elemento centrale nell'ambito dell'allevamento di precisione, perché permette di tradurre i dati raccolti dalle diverse tecnologie digitali in informazioni di supporto alle decisioni aziendali. Integrata con l'Internet of Things (IoT) e con i sistemi di visione artificiale, l'IA permette di analizzare grandi quantità di dati in tempo reale, contribuendo al miglioramento della gestione produttiva, riproduttiva e sanitaria dell'allevamento. Negli allevamenti più moderni, la diffusione di sensori e dispositivi digitali ha determinato un aumento significativo della quantità di dati disponibili relativi agli animali, all'ambiente di allevamento e alle prestazioni produttive degli animali. Tuttavia, questi dati assumono pieno valore solo se elaborati mediante strumenti in grado di interpretarli in modo efficace. In questo contesto, l'IA svolge un ruolo fondamentale, permettendo di identificare pattern complessi, correlazioni tra variabili e anomalie difficilmente rilevabili attraverso la sola osservazione diretta.

In ambito zootecnico, le principali tecniche di IA utilizzate sono il machine learning e il deep learning. Il primo consente di sviluppare modelli predittivi basati sull'analisi di dati storici, utili per stimare eventi futuri, come l'insorgenza di patologie o variazioni delle prestazioni produttive. Il secondo, invece, si basa su reti neurali artificiali complesse ed è particolarmente efficace nell'analisi di dati non strutturati, come immagini, video e segnali acustici; quindi, per questo motivo trova ampia applicazione nei sistemi di visione artificiale. L'IA può essere impiegata anche per il monitoraggio dello stato sanitario degli animali. Algoritmi di apprendimento automatico sono in grado di analizzare dati relativi al comportamento animale, all'attività motoria, all'assunzione di alimento, alla ruminazione e ad altri parametri fisiologici, individuando eventuali alterazioni compatibili con l'insorgenza di patologie. In questo modo è possibile sviluppare sistemi di allerta precoce, capaci di segnalare condizioni anomale prima della comparsa evidente dei sintomi clinici. Ciò permette un intervento tempestivo, una migliore gestione sanitaria e una potenziale riduzione dei costi veterinari. Un ulteriore ambito di applicazione riguarda la gestione riproduttiva, in particolare l'ottimizzazione del rilevamento dell'estro e delle pratiche di inseminazione strumentale. L'analisi integrata dei dati provenienti da sensori, e dispositivi di monitoraggio comportamentale e motorio permette di identificare con maggiore accuratezza il momento ottimale per l'inseminazione, riducendo gli errori gestionali e aumentando i tassi di concepimento. In questo contesto, i modelli predittivi possono stimare la probabilità di successo dell'inseminazione, fornendo un ulteriore supporto per le scelte aziendali.

Per quanto riguarda la gestione produttiva, l'IA consente di ottimizzare l'impiego delle risorse e di migliorare le prestazioni degli animali, attraverso l'analisi dei dati relativi all'alimentazione, al

comportamento e alle condizioni ambientali. Tali informazioni permettono di individuare i principali fattori che influenzano la produzione di latte e di adottare strategie nutrizionali e gestionali più efficaci. In questo modo è possibile migliorare l'efficienza alimentare, ridurre gli sprechi e contribuire alla sostenibilità ambientale dell'allevamento.

Un altro ambito di particolare rilevanza è rappresentato dal benessere animale. L'IA consente di integrare e analizzare diversi indicatori di benessere, quali comportamento, attività, parametri fisiologici e condizioni microclimatiche. L'identificazione precoce di situazioni di stress, disagio o alterazione comportamentale permette di intervenire tempestivamente per migliorare le condizioni di allevamento. Grazie all'integrazione con i CVS e con la termografia, algoritmi avanzati possono inoltre contribuire alla valutazione di aspetti complessi, come le risposte comportamentali e fisiologiche associate allo stato emotivo degli animali.

Recentemente, l'attenzione si è rivolta anche ai modelli linguistici di grandi dimensioni (LLMs - Large Language Models), che rappresentano una nuova frontiera dell'Intelligenza Artificiale. Questi modelli sono in grado di elaborare grandi quantità di informazioni testuali e possono supportare l'accesso alla conoscenza scientifica e tecnica. Sebbene il loro impiego in ambito zootecnico sia ancora limitato, le prospettive applicative risultano interessanti, soprattutto per l'integrazione delle informazioni, la consultazione di dati complessi e il supporto ai processi decisionali.

L'evoluzione dell'Intelligenza Artificiale e delle tecnologie digitali potrà contribuire a trasformare profondamente la gestione degli allevamenti, rendendola più precisa, tempestiva e basata su dati oggettivi. Inoltre, lo sviluppo di sistemi sempre più accessibili potrà favorire una maggiore diffusione di queste soluzioni anche in realtà aziendali di dimensioni diverse, contribuendo al miglioramento dell'efficienza produttiva, della sostenibilità ambientale e del benessere animale.

L'Intelligenza Artificiale rappresenta quindi uno strumento strategico per affrontare le sfide della zootecnia moderna e per promuovere lo sviluppo di sistemi produttivi più innovativi, responsabili ed efficienti, fondati sull'integrazione tra dati, tecnologie digitali e conoscenze scientifiche (Mazon et al., 2024).

5. CRITICITÀ E PROBLEMATICHE

5.1. Criticità dei sensori

I sensori costituiscono una componente essenziale della PLF, poiché consentono il monitoraggio continuo e, in molti casi, individuale di parametri comportamentali, fisiologici, produttivi e ambientali. Tuttavia, la loro efficacia dipende dalla qualità del segnale acquisito, dalla robustezza del dispositivo e dalla capacità del sistema di trasformare i dati grezzi in informazioni gestionali affidabili. Le principali criticità riguardano accuratezza, sensibilità, specificità, stabilità del segnale, durabilità in ambiente di allevamento e necessità di calibrazione periodica. Nei sistemi indossabili, inoltre, aspetti come il comfort, posizionamento del dispositivo, consumo energetico e durata della batteria rappresentano fattori determinanti per l'impiego continuativo su larga scala. Le review più recenti sui collari sensorizzati evidenziano come l'elevato consumo energetico, la necessità di ricariche frequenti e la copertura limitata dei parametri da parte di singoli dispositivi siano ancora ostacoli rilevanti alla piena diffusione commerciale (Lamanna et al., 2025).

Un ulteriore limite è rappresentato dall'interazione tra sensore e ambiente. Polvere, fango, umidità, urti contro strutture, contatto con altri animali e variabilità climatica possono compromettere la qualità del dato o ridurre la vita utile dei dispositivi. Questi problemi diventano ancora più evidenti nei sistemi estensivi o al pascolo, dove la distanza dagli animali, la copertura di rete discontinua, la minore disponibilità di infrastrutture e la difficoltà di recuperare o sostituire dispositivi danneggiati aumentano i costi di gestione. Nei sistemi pastorali, GPS, accelerometri e Virtual Fencing offrono opportunità rilevanti per il monitoraggio di comportamento, salute e uso del pascolo, ma l'adozione resta limitata da barriere economiche, tecniche e infrastrutturali (Marchegiani et al., 2025).

È quindi fondamentale che l'introduzione dei sensori sia accompagnata da protocolli di validazione in condizioni operative reali, controllo periodico della calibrazione, strategie di manutenzione preventiva e analisi del rapporto costo-beneficio. La letteratura scientifica sottolinea che la PLF non dipende solo dalla disponibilità di dispositivi tecnologicamente avanzati, ma anche dalla loro affidabilità, accessibilità economica, accettabilità da parte degli allevatori e integrazione nei processi decisionali aziendali (Rosa, 2021).

5.2. Criticità dell'Internet of Things (IoT)

L'Internet of Things applicato alla zootecnia consente di collegare sensori, attuatori, dispositivi mobili, piattaforme cloud, edge computing e algoritmi di analisi dati, creando reti capaci di supportare decisioni gestionali in tempo reale. Nell'allevamento bovino da latte, l'integrazione tra sensori e tecnologie IoT permette il monitoraggio individuale degli animali e favorisce processi decisionali

basati sui dati. Tuttavia, la complessità dell'ecosistema IoT introduce nuove criticità legate alla trasmissione, archiviazione, interoperabilità e sicurezza dei dati (Tangorra et al., 2024).

Uno dei principali limiti riguarda l'eterogeneità dei dispositivi e dei formati dati. Sensori, software gestionali e piattaforme commerciali sviluppati da produttori diversi spesso utilizzano standard proprietari, rendendo complessa l'integrazione delle informazioni in un unico sistema aziendale. La letteratura sull'IoT per il management del bestiame identifica nella "eterogeneità dei dati e dei dispositivi" un ostacolo rilevante per l'adozione su larga scala e sottolinea la necessità di architetture interoperabili, protocolli comuni e sistemi capaci di integrare dispositivi preesistenti e nuove tecnologie.

Altre criticità riguardano la connettività nelle aree rurali, la gestione della complessità di rete, la sicurezza informatica e la tutela della privacy. L'IoT genera grandi volumi di dati, spesso sensibili dal punto di vista aziendale, sanitario e gestionale; pertanto, devono essere garantite protezione, tracciabilità, controllo degli accessi e chiara definizione della proprietà del dato. L'adozione richiede inoltre competenze tecniche specifiche per installazione, manutenzione, configurazione dei dispositivi e interpretazione delle informazioni. Questi aspetti possono penalizzare soprattutto le aziende di piccole e medie dimensioni, dove i costi iniziali e il fabbisogno di formazione rappresentano barriere importanti.

Nonostante tali limiti, l'IoT rappresenta una delle direttrici principali della zootecnia di precisione. In prospettiva, l'integrazione con Intelligenza Artificiale, cloud/edge computing, dashboard decisionali e sistemi predittivi potrà favorire una gestione più tempestiva di salute, riproduzione, alimentazione, benessere e sostenibilità ambientale, a condizione che le soluzioni siano validate, economicamente sostenibili e realmente utilizzabili nel contesto aziendale (Akhigbe et al., 2021).

5.3. Criticità dei Computer Vision Systems (CVS)

I sistemi di visione artificiale rappresentano una tecnologia promettente per il monitoraggio non invasivo degli animali, poiché consentono di acquisire informazioni su identificazione individuale, comportamento, postura, locomozione, BCS, peso corporeo, ingestione alimentare, stato sanitario e performance riproduttive. Le applicazioni più recenti utilizzano telecamere RGB, sensori di profondità, termocamere e algoritmi di deep learning, in particolare reti neurali convoluzionali, per la classificazione, la segmentazione, il rilevamento degli oggetti (object detection) e il tracciamento degli animali (Guarnido-Lopez et al., 2025).

Le criticità principali riguardano la variabilità delle condizioni ambientali e la robustezza dei modelli. Illuminazione non costante, ombre, polvere, fango, occlusioni tra animali, presenza di strutture metalliche, variazioni di postura e angolo di ripresa possono ridurre la qualità delle immagini e

compromettere l'accuratezza dell'algoritmo. Nei bovini, l'identificazione individuale è particolarmente complessa nei soggetti con mantello uniforme o in scenari aperti, dove gli animali entrano ed escono dal campo visivo. La letteratura evidenzia che i modelli di computer vision richiedono dataset ampi e diversificati per generalizzare correttamente rispetto a illuminazione, postura, occlusione, angolo di ripresa e condizioni aziendali (Menezes et al., 2024).

Un ulteriore ostacolo è la necessità di dataset annotati. L'etichettatura manuale delle immagini richiede tempo, risorse e competenze specialistiche, soprattutto quando si lavora sull'identificazione individuale o la classificazione di comportamenti. Per ridurre questo limite, stanno emergendo approcci di apprendimento semi-supervisionato, pseudo-etichettatura e modelli pre-addestrati, che possono ridurre il carico di annotazione e migliorare la trasferibilità dei sistemi tra aziende. Tuttavia, le applicazioni commerciali richiedono ancora validazioni su periodi lunghi, in allevamenti reali e su popolazioni animali eterogenee (Menezes et al., 2024).

I CVS hanno quindi un elevato potenziale, ma la loro implementazione richiede infrastrutture adeguate, capacità computazionale, connettività stabile e procedure di manutenzione delle telecamere. In futuro, l'obiettivo principale sarà passare da prototipi sperimentali ad algoritmi real-time utilizzabili direttamente in azienda, integrati con altri flussi informativi e capaci di fornire all'allevatore indicazioni operative semplici, tempestive e affidabili (Guarnido-Lopez et al., 2025).

5.4. Problematiche nella gestione dei vitelli

La gestione dei vitelli rappresenta un ambito particolarmente sensibile per l'applicazione delle tecnologie di precisione, poiché la fase neonatale e pre-svezzamento è associata a elevata vulnerabilità sanitaria, rischio di patologie respiratorie, gastrointestinali e ombelicali, e necessità di monitoraggio tempestivo. Le tecnologie maggiormente studiate includono alimentatori automatici del latte, accelerometri 3D, termografia a infrarossi, telecamere 3D, boli ruminali, sistemi di analisi sonora e strumenti per il monitoraggio dell'accrescimento (Silva et al., 2023).

Gli alimentatori automatici del latte consentono di registrare informazioni individuali sul consumo giornaliero, velocità di suzione, numero di visite con e senza erogazione, fornendo indicatori potenzialmente utili per l'identificazione precoce di alterazioni sanitarie. Tuttavia, questi sistemi richiedono corretta calibrazione, manutenzione, igiene, gestione del gruppo e controllo del comportamento competitivo tra i vitelli. La letteratura scientifica segnala inoltre che i costi di acquisizione e manutenzione possono limitarne l'adozione in alcune aziende e che la riduzione del contatto uomo-animale deve essere gestita con attenzione per evitare effetti negativi sulla relazione uomo-animale.

Molte tecnologie emergenti per il monitoraggio dei vitelli sono promettenti ma ancora insufficientemente validate in condizioni commerciali. Le review disponibili indicano che termografia, telecamere 3D, boli ruminali e analisi dei suoni richiedono ulteriori studi per confermare accuratezza, ripetibilità e utilità decisionale. Inoltre, i comportamenti alimentari e di decubito possono essere influenzati da fattori gestionali come livello di latte somministrato, tipo di stabulazione, dimensione del gruppo e stato sanitario, rendendo difficile l'interpretazione di un singolo parametro isolato. Per questo, gli approcci multi-tecnologici e l'integrazione con algoritmi di machine learning sembrano più promettenti rispetto all'uso di singole fonti informative (Silva et al., 2023).

5.5. Criticità dell'Intelligenza Artificiale

L'Intelligenza Artificiale applicata alla zootecnia permette di elaborare grandi quantità di dati provenienti da sensori, immagini, sistemi di mungitura, alimentatori, registri aziendali e dati sanitari, supportando la previsione di eventi biologici e gestionali. In ambito bovino, l'IA viene utilizzata per supportare decisioni relative a salute, alimentazione, benessere, produzione, riproduzione, identificazione individuale e integrazione di dati eterogenei. Le review più recenti evidenziano anche il potenziale dei “large language models” e dei sistemi multimodali per standardizzazione, integrazione e recupero della conoscenza scientifica in ambito zootecnico (Menezes et al., 2024).

Le criticità principali riguardano la qualità dei dati, la rappresentatività dei dataset, la generalizzabilità dei modelli e l'interpretabilità degli output. Dati incompleti, rumorosi, sbilanciati o raccolti in condizioni sperimentali non rappresentative possono produrre modelli scarsamente affidabili quando trasferiti in aziende diverse. Inoltre, molti algoritmi di machine learning e deep learning funzionano come “scatole nere”, rendendo difficile comprendere quali variabili abbiano determinato una specifica previsione. Questo limita la fiducia degli allevatori, dei veterinari e dei tecnici, soprattutto quando il sistema fornisce allarmi sanitari o raccomandazioni gestionali (Sani et al., 2026).

Un passaggio cruciale è quindi lo sviluppo di modelli trasparenti, spiegabili e validati esternamente. L'IA dovrebbe essere concepita come supporto decisionale e non come sostituto dell'esperienza dell'allevatore o del veterinario. Per passare dalla prova di concetto all'applicazione pratica, la ricerca dovrà integrare i dati sensoriali con registri aziendali, informazioni economiche e protocolli sanitari, valutando non solo sensibilità e specificità, ma anche utilità clinica, valore economico e impatto sul lavoro quotidiano in stalla (Sani et al., 2026).

5.6. Problematiche nella gestione produttiva

Le tecnologie digitali possono migliorare la gestione produttiva attraverso monitoraggio di ingestione, accrescimento, peso vivo, BCS, efficienza alimentare, produzione latte, qualità del latte e risposta agli stress ambientali. Tuttavia, la loro adozione richiede un passaggio culturale e organizzativo: non è sufficiente raccogliere dati, ma è necessario trasformarli in indicatori decisionali chiari, tempestivi e coerenti con gli obiettivi aziendali. Le review recenti indicano che la PLF può contribuire a produttività, benessere e sostenibilità, ma che rimangono sfide legate a costi, limiti tecnici, integrazione dei sistemi, proprietà del dato e aspetti etici dell'automazione (Mata, 2026).

Una problematica ricorrente è la frammentazione dei flussi informativi. Dati provenienti da sensori, sistemi di alimentazione, bilance automatiche, software gestionali, sistemi di mungitura e piattaforme sanitarie possono rimanere separati, impedendo una visione complessiva della mandria o del singolo animale. La mancanza di standard comuni e la scarsa interoperabilità limitano la possibilità di costruire modelli predittivi robusti e strumenti decisionali realmente integrati. Inoltre, l'elevata quantità di dati può generare sovraccarico informativo se non viene accompagnata da dashboard semplici, soglie di allarme validate e procedure operative definite (Akhigbe et al., 2021).

Dal punto di vista produttivo e ambientale, le tecnologie PLF possono avere effetti indiretti positivi, ad esempio migliorando efficienza alimentare, salute, fertilità e tempi di finissaggio. Uno studio modellistico sui sistemi bovini da carne in Scozia ha mostrato che piattaforme automatiche di pesatura, sensori per fertilità e sensori sanitari possono contribuire alla riduzione delle emissioni totali e delle emissioni per unità di prodotto, se inseriti in strategie gestionali efficaci. Questo conferma che il valore delle tecnologie non risiede solo nel dispositivo, ma nella capacità di orientare decisioni gestionali misurabili ed efficaci (McNicol et al., 2024).

5.7. Problematiche nella gestione riproduttiva

Nella gestione riproduttiva, sensori di attività, accelerometri, pedometri, sistemi di localizzazione, telecamere e software predittivi possono supportare rilevamento dell'estro, monitoraggio del parto, controllo del BCS e valutazione del periodo di transizione. Queste tecnologie rispondono a una criticità ben nota: nelle mandrie numerose, l'osservazione individuale continua è difficilmente sostenibile, e i segni dell'estro possono essere deboli, brevi o spesso non rilevati. Le tecnologie di precisione consentono quindi di monitorare comportamento, parametri fisiologici e indicatori riproduttivi, migliorando la tempestività delle decisioni per gli interventi fecondativi (Das et al., 2023).

Le principali criticità riguardano però la variabilità individuale e ambientale, la presenza di falsi positivi e falsi negativi, la durata della batteria dei sensori, il range di trasmissione, la capacità di

archiviazione, la sensibilità, la specificità e la sostenibilità economica. Le performance degli algoritmi possono variare in base a razza, sistema di allevamento, tipo di stabulazione, livello produttivo, stato sanitario, gerarchia sociale e condizioni climatiche. È quindi necessario validare i sistemi nei contesti in cui verranno applicati, evitando di trasferire automaticamente soglie o modelli sviluppati in condizioni sperimentali o in aziende molto diverse.

In prospettiva, l'integrazione di sensori, sistemi di visione artificiale e dati gestionali potrà migliorare la precisione del rilevamento dell'estro, la sorveglianza del parto e la gestione del periodo post-partum. Tuttavia, la tecnologia deve essere inserita all'interno di protocolli riproduttivi chiari, con responsabilità definite tra allevatore, veterinario e tecnico, affinché l'informazione generata si traduca in un'azione tempestiva e corretta (Das et al., 2023).

5.8. Problematiche nella gestione sanitaria

La gestione sanitaria è uno degli ambiti in cui le tecnologie digitali possono produrre maggiore impatto, poiché la diagnosi precoce di alterazioni comportamentali, fisiologiche o produttive può consentire interventi tempestivi, ridurre la gravità delle patologie e potenzialmente limitare l'uso di antimicrobici. I sistemi digitali permettono di quantificare nel tempo comportamento, fisiologia e produzione, supportando l'identificazione precoce di problemi sanitari e di benessere a livello individuale o di mandria (Neculai-Valeanu et al., 2025).

Le principali applicazioni riguardano mastite, zoppia, disordini metabolici, alterazioni della locomozione, variazioni di ruminazione, riduzione dell'ingestione, stress da caldo e patologie respiratorie. Tuttavia, l'affidabilità dei sistemi dipende dalla qualità dei dati, dalla frequenza di campionamento, dalla corretta definizione dei casi clinici, dalla validazione su più aziende e dalla capacità di integrare output sensoriali con informazioni sanitarie, produttive ed economiche. Una review del 2026, basata su articoli pubblicati tra il 2014 e il 2024 e indicizzati da Scopus, ha individuato 132 studi e 151 sistemi sensoriali per la rilevazione di mastite, disturbi della fertilità, alterazioni della locomozione e disordini metabolici; la maggior parte dei lavori si collocava però ancora al livello di interpretazione del dato, mentre pochi sistemi raggiungevano una reale integrazione decisionale (Sani et al., 2026).

La sfida principale è quindi il passaggio da sistemi di allarme a strumenti di supporto decisionale realmente utilizzabili. Per essere efficaci in azienda, gli output devono essere comprensibili, classificati per priorità, associati a protocolli di intervento e valutati anche dal punto di vista economico. È inoltre necessario ridurre il rischio di "assuefazione agli allarmi", cioè l'eccesso di segnalazioni non rilevanti, o falsi allarmi che può portare l'allevatore a ignorare gli avvisi. La ricerca

futura dovrà concentrarsi su validazione multicentrica, integrazione con cartelle sanitarie e modelli economici, valutando contemporaneamente sensibilità, specificità, valore predittivo e utilità pratica.

5.9. Problematiche nella valutazione del benessere animale

La valutazione del benessere animale è complessa perché non può essere ridotta a un singolo parametro. Il benessere include parametri sanitari, comportamentali, fisiologici, ambientali e affettivi; richiede quindi un approccio multidimensionale basato su indicatori diretti sull'animale, strutturali e gestionali. Le tecnologie PLF possono supportare una valutazione continua e automatizzata di diversi parametri, ma devono essere interpretate all'interno di un quadro biologico ed etologico corretto (Schillings et al., 2021).

Le criticità principali riguardano l'identificazione di indicatori realmente validi, la distinzione tra assenza di malattia e presenza di stati positivi di benessere e il rischio di una valutazione eccessivamente tecnocentrica. Le tecnologie PLF sono considerate promettenti per ridurre malattie e lesioni attraverso monitoraggio precoce, ma la loro capacità di promuovere e misurare stati positivi di benessere è ancora limitata e richiede ulteriori studi. Inoltre, l'automazione può modificare la relazione uomo-animale e la percezione della responsabilità delle cure da parte dell'allevatore, rendendo necessario un approccio etico che mantenga l'uomo al centro del processo (Schillings et al., 2021).

Dal punto di vista applicativo, l'integrazione di sensori, computer vision, termografia, microfoni, sistemi di localizzazione e algoritmi predittivi può offrire una valutazione più dinamica dello stato dell'animale, soprattutto se collegata a indicatori come attività, riposo, alimentazione, ruminazione, locomozione, interazioni sociali, risposta allo stress termico e accesso agli alimenti e all'acqua. Tuttavia, costi di implementazione, necessità di formazione, variabilità delle condizioni aziendali, standardizzazione dei dati e interpretazione degli output restano ostacoli importanti. Le tecnologie digitali devono quindi essere considerate strumenti di supporto alla valutazione del benessere, non sostituti dell'osservazione competente e della responsabilità gestionale dell'allevatore (Papakonstantinou et al., 2024).

6. CONCLUSIONI

Alla luce delle evidenze analizzate, le tecnologie digitali applicate all'allevamento bovino rappresentano uno strumento strategico per favorire l'evoluzione dei sistemi zootecnici verso modelli più produttivi, sostenibili, efficienti e orientati al benessere animale. Sensori, Internet of Things, sistemi di visione artificiale, piattaforme di analisi dati e algoritmi di Intelligenza Artificiale consentono infatti di superare alcuni limiti delle metodologie tradizionali, spesso basate su osservazioni discontinue, soggettive e difficilmente applicabili su larga scala.

L'allevamento di precisione permette invece un monitoraggio continuo, oggettivo e individuale degli animali e dell'ambiente di allevamento, trasformando dati comportamentali, fisiologici, produttivi e ambientali in informazioni utili per il supporto alle decisioni aziendali.

Uno degli aspetti più rilevanti riguarda la possibilità di individuare precocemente alterazioni dello stato sanitario, del comportamento o delle performance produttive. La raccolta e l'analisi di dati in tempo reale permettono di riconoscere tempestivamente condizioni di rischio, migliorando l'efficacia degli interventi e riducendo i tempi di risposta dell'allevatore, del veterinario e del tecnico aziendale. Questo approccio può contribuire a una gestione più razionale delle risorse, a una riduzione degli sprechi e, indirettamente, a un minore impatto ambientale, soprattutto quando le tecnologie sono integrate con strategie nutrizionali, sanitarie e riproduttive adeguate.

Le applicazioni nella gestione sanitaria e del benessere animale risultano particolarmente promettenti. Il monitoraggio di parametri quali attività motoria, ruminazione, ingestione, temperatura, postura, locomozione e interazioni sociali consente di rilevare variazioni che possono rappresentare indicatori precoci di malattia, stress o disagio. L'identificazione tempestiva di tali alterazioni può favorire interventi mirati, limitare la diffusione di patologie e ridurre il ricorso non necessario a trattamenti farmacologici. Inoltre, l'impiego di strumenti oggettivi per la valutazione del benessere risponde alle crescenti richieste normative, etiche e sociali nei confronti di sistemi produttivi più responsabili e trasparenti.

Anche la gestione produttiva e riproduttiva può beneficiare in modo significativo dell'adozione di tecnologie digitali. I sistemi di monitoraggio automatico consentono una rilevazione più accurata dell'estro, una migliore sorveglianza del parto, una valutazione più precisa dello stato corporeo e una gestione più efficiente dell'alimentazione e delle performance individuali. Tali strumenti permettono di passare da una gestione prevalentemente reattiva a un approccio predittivo e preventivo, nel quale le decisioni vengono supportate da dati continui e integrati. Nella gestione dei vitelli, fase particolarmente critica del ciclo produttivo, alimentatori automatici, accelerometri, termografia e altri

sistemi di monitoraggio possono contribuire a identificare precocemente soggetti a rischio, migliorando salute, accrescimento e sopravvivenza dei vitelli.

Nonostante le numerose potenzialità, l'adozione dell'allevamento di precisione presenta ancora alcune criticità. I costi iniziali di investimento, la necessità di competenze tecniche specifiche, la manutenzione dei dispositivi, la qualità della connettività nelle aree rurali e la difficoltà di integrazione tra sistemi sviluppati da produttori diversi rappresentano ostacoli importanti, soprattutto per le aziende di piccole e medie dimensioni. Un ulteriore elemento critico riguarda la gestione dei grandi volumi di dati prodotti: la semplice raccolta di informazioni non è sufficiente se queste non vengono elaborate, interpretate e trasformate in indicazioni operative chiare, affidabili e facilmente utilizzabili.

In prospettiva, il continuo sviluppo di sensori più affidabili, sistemi IoT interoperabili, algoritmi di Intelligenza Artificiale più trasparenti e piattaforme decisionali integrate potrà favorire una diffusione sempre più ampia delle tecnologie digitali in zootecnia. Tuttavia, affinché tali strumenti possano esprimere pienamente il loro potenziale, sarà necessario validarli in condizioni operative reali, adattarli ai diversi contesti aziendali e garantire un adeguato percorso di formazione per allevatori, veterinari e tecnici. L'obiettivo non deve essere la sostituzione dell'esperienza umana, ma il suo potenziamento attraverso strumenti capaci di rendere le decisioni più tempestive, oggettive e fondate su dati affidabili.

In conclusione, le tecnologie digitali rappresentano una componente chiave per affrontare le principali sfide della zootecnia moderna, legate alla sicurezza alimentare, alla sostenibilità ambientale, all'efficienza produttiva e al benessere animale. La loro integrazione nei sistemi di allevamento bovino può contribuire allo sviluppo di modelli produttivi più resilienti, responsabili e competitivi. Il futuro dell'allevamento di precisione dipenderà tuttavia dalla capacità di coniugare innovazione tecnologica digitale, sostenibilità economica, semplicità d'uso e reale utilità gestionale, affinché i dati raccolti possano tradursi in decisioni concrete e in un miglioramento effettivo delle condizioni produttive e del benessere degli animali.

7. BIBLIOGRAFIA

- Abeni, F. P., Nannoni, E., Sandrucci, A. (2024). *Zootecnia di precisione e tecnologie innovative in allevamento*. Le Point Vétérinaire Italie, Milano.
- Akhigbe, B. I., Munir, K., Akinade, O., Akanbi, L. O., Oyedele, L. O. (2021). IoT Technologies for Livestock Management: A Review of Present Status, Opportunities, and Future Trends. *Big Data and Cognitive Computing*, 5(1), 10. <https://doi.org/10.3390/bdcc5010010>
- Das, S., Shaji, A., Nain, D., Singha, S., Karunakaran, M., Baithalu, R. K. (2023). Precision technologies for the management of reproduction in dairy cows. *Tropical Animal Health and Production*, 55, 286. <https://doi.org/10.1007/s11250-023-03704-2>
- Darwis, D., Mehta, A. R., Wati, N. E., Samsugi, S., Swaminarayan, P. R. (2022). Digital smart collar: Monitoring cow health using internet of things. In 2022 International Symposium on Electronics and Smart Devices (ISESD) (pp. 1-5). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ISESD56103.2022.9980682>
- Guarnido-Lopez, P., Pi, Y., Tao, J., Mendes, E. D. M., Tedeschi, L. O. (2025). Computer vision algorithms to help decision-making in cattle production. *Animal Frontiers*, 14(6), 11-22. <https://doi.org/10.1093/af/vfae028>
- Lamanna, M., Bovo, M., Cavallini, D. (2025). Wearable Collar Technologies for Dairy Cows: A Systematized Review of the Current Applications and Future Innovations in Precision Livestock Farming. *Animals*, 15(3), 458. <https://doi.org/10.3390/ani15030458>
- Marchegiani, S., Gislon, G., Marino, R., Caroprese, M., Albenzio, M., Pinchak, W. E., Carstens, G. E., Ledda, L., Trombetta, M. F., Sandrucci, A., Pasquini, M., Deligios, P. A., Ceccobelli, S. (2025). Smart technologies for sustainable pasture-based ruminant systems: A review. *Smart Agricultural Technology*, 10, 100789. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2025.100789>
- Mata, F. (2026). The Impact of Precision Livestock Farming Technologies on Productivity, Animal Welfare, and Environmental Sustainability. *J*, 9(2), 13. <https://doi.org/10.3390/j9020013>
- McNicol, L. C., Bowen, J. M., Ferguson, H., Bell, J., Dewhurst, R., Duthie, C.-A. (2024). Adoption of precision livestock farming technologies has the potential to mitigate greenhouse gas emissions from beef production. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 8, 1414858. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2024.1414858>

- Menezes, G. L., Mazon, G., Ferreira, R. E. P., Cabrera, V. E., Dorea, J. R. R. (2024). Artificial intelligence for livestock: a narrative review of the applications of computer vision systems and large language models for animal farming. *Animal Frontiers*, 14(6), 42-53. <https://doi.org/10.1093/af/vfae048>
- Neculai-Valeanu, A.-S., Sanduleanu, C., Porosnicu, I. (2025). From tradition to precision: leveraging digital tools to improve cattle health and welfare. *Frontiers in Veterinary Science*, 12, 1549512. <https://doi.org/10.3389/fvets.2025.1549512>
- Papakonstantinou, G. I., Voulgarakis, N., Terzidou, G., Fotos, L., Giamouri, E., Papatsiros, V. G. (2024). Precision Livestock Farming Technology: Applications and Challenges of Animal Welfare and Climate Change. *Agriculture*, 14(4), 620. <https://doi.org/10.3390/agriculture14040620>
- Rosa, G. J. M. (2021). Grand Challenge in Precision Livestock Farming. *Frontiers in Animal Science*, 2, 650324. <https://doi.org/10.3389/fanim.2021.650324>
- Sani, M. I., van der Voort, M., Tekinerdogan, B., Hogeveen, H. (2026). Application of precision livestock farming: challenges and opportunities. *Animal Bioscience*, 39(4), 250895. <https://doi.org/10.5713/ab.250895>
- Schillings, J., Bennett, R., Rose, D. C. (2021). Exploring the Potential of Precision Livestock Farming Technologies to Help Address Farm Animal Welfare. *Frontiers in Animal Science*, 2, 639678. <https://doi.org/10.3389/fanim.2021.639678>
- Silva, F. G., Conceição, C., Pereira, A. M. F., Cerqueira, J. L., Silva, S. R. (2023). Literature Review on Technological Applications to Monitor and Evaluate Calves' Health and Welfare. *Animals*, 13(7), 1148. <https://doi.org/10.3390/ani13071148>
- Tangorra, F. M., Buoio, E., Calcante, A., Bassi, A., Costa, A. (2024). Internet of Things (IoT): Sensors Application in Dairy Cattle Farming. *Animals*, 14(21), 3071. <https://doi.org/10.3390/ani14213071>

8. SITOGRAFIA

- <https://www.agriexpo.online/it/prod/wasserbauer-gmbh-fuetterungssysteme/product-172731-145269.html> (consultato il 18/06/2026).
- <https://www.agriexpo.online/it/prod/dairymaster/product-171455-60779.html> (consultato il 18/06/2026).
- <https://agronotizie.imagelinenetwork.com/zootecnica/2019/09/19/con-smartbow-l-intelligenza-artificiale-entra-in-stalla/64117> (consultato il 18/06/2026).
- www.agroteam.it/benessere-animale-bovini-normativa-spiegata-in-modo-semplice/ (consultato il 18/06/2026).
- <https://www.allflex.global/it> (consultato il 18/06/2026).
- <https://www.arpa.fvg.it/temi/temi/meteo-e-clima/ultimi-approfondimenti-pubblicati/thi-indice-di-disagio-bioclimatico-per-bovine-da-latte/> (consultato il 18/06/2026).
- BDN (2026). Banca Dati Nazionale dell'Anagrafe Zootecnica. Dati consultati nel 2026.
- <https://www.droinservice.it/droni-zootecnica-digitale-gestione-benessere-animale/#tecnologie-droni-in-zootecnica%3A-sensori%2C-camere-e-automazione> (consultato il 18/06/2026).
- <https://www.droinservice.it/ruolo-droni-nella-zootecnica/> (consultato il 18/06/2026).
- <https://suinicoltura.edagricole.it/salute-e-benessere/lallevamento-del-futuro-e-di-precisione/> (consultato il 18/06/2026).
- <https://www.fieragri.it/2022/10/25/manodopera-nelle-stalle/> (consultato il 18/06/2026).
- <https://www.gallagher.eu/> (consultato il 18/06/2026).
- <https://www.informatoreagrario.it/filiere-produttive/zootecnica/il-monitoraggio-delle-bovine-con-collari-con-accelerometro/> (consultato il 18/06/2026).
- <https://informatorezootecnico.edagricole.it/notizie-dalle-aziende/anche-gestione-della-mandria-con-il-robot-di-mungitura/> (consultato il 18/06/2026).
- <https://informatorezootecnico.edagricole.it/bovini-da-latte/monitoraggio-costante-delle-bovine-con-sensetime/> (consultato il 18/06/2026).
- ISTAT. Consistenze bovine in Italia. https://esploradati.istat.it/databrowser/#/it/dw/categories/IT1,Z1000AGR,1.0/AGR_CRP/DCSP_CONSISTENZE/IT1,101_961_DF_DCSP_CONSISTENZE_1,1.0 (consultato il 18/06/2026).
- <https://www.lansitec.com/it/applicazioni/soluzione-intelligente-per-il-monitoraggio-del-bestiaime/> (consultato il 18/06/2026).

- <https://www.lely.com/it/soluzioni/alimentazione/calm/> (consultato il 18/06/2026).
- <https://www.lely.com/it/soluzioni/alimentazione/juno/> (consultato il 18/06/2026).
- <https://macchineagricolenews.edagricole.it/innovazioni-tecniche/carri-miscelatori-allunifeed-ci-pensa-il-robot/> (consultato il 18/06/2026).
- <https://www.milkline.com/it/73-collare-per-vacche-c-sense> (consultato il 18/06/2026).
- <https://www.mondomacchina.it/it/i-robot-di-mungitura-c3388> (consultato il 18/06/2026).
- <https://www.mondomacchina.it/it/sistemi-automatici-per-alimentazione-dei-bovini-c3278> (consultato il 18/06/2026).
- <https://www.perc.org/2024/11/21/unlocking-the-conservation-potential-of-virtual-fencing/>
- <https://www.rfidup.com/rfid-animal-bio-chemical-electronic-ceramic-rumen-bolus-tag-for-cattle-cow-sheep-stomach/?lang=it> (consultato il 18/06/2026).
- <https://ruminantiamese.ruminantia.it/i-sensori-indossabili-sono-unincredibile-opportunita/> (consultato il 18/06/2026).
- <https://www.ruminantia.it/meglio-al-caldo-o-in-compagnia-cosa-scelgono-i-vitelli-in-inverno/> (consultato il 18/06/2026).
- <https://archivio2023-2024.ruminantia.it/quali-e-quant-allevamenti-bovini-stanno-chiudendo-in-italia/> (consultato il 18/06/2026).
- <https://archivio2023-2024.ruminantia.it/le-interviste-di-ruminantia-robot-o-sala-di-mungitura-questo-e-il-dilemma/> (consultato il 18/06/2026).
- <https://sitip.net/monitoraggio-ambientale-stalle-bovine/#> (consultato il 18/06/2026).
- <https://terraevita.edagricole.it/nova/nova-allevamento-zootecnia/welfare-la-tecnologia-a-sostegno-del-benessere-del-bovino-da-carne/> (consultato il 18/06/2026).
- <https://www.vaisala.com/it/industries-applications/food-beverage-and-agriculture/primary-production-and-agriculture/animal-shelter-indoor-air-monitoring> (consultato il 18/06/2026).
- https://www.vetpro.it/it/dettaglio_news.aspx?id=20227 (consultato il 18/06/2026).

RINGRAZIAMENTI

Innanzitutto, vorrei ringraziare il Prof. Ceccobelli e la Prof.ssa Pasquini per la pazienza, il tempo e i consigli con cui mi hanno guidato nella stesura di questa tesi. Il loro supporto è stato fondamentale per portare a termine questo lavoro nel migliore dei modi.

Ringrazio anche i ragazzi conosciuti alle superiori, che hanno reso l'inizio di questo percorso lontano da casa meno difficoltoso e mi sono stati vicini nei momenti difficili che ho dovuto affrontare durante il primo anno di Università, quando ancora non conoscevo nessuno.

Un grande grazie va a tutti i ragazzi conosciuti ai corsi, soprattutto a quelli con cui ho legato di più. Nonostante io stessi spesso per conto mio e parlassi poco, grazie a voi sono riuscito a fare più conoscenze e a vivere i periodi delle lezioni con più leggerezza e anche con qualche risata quando non era opportuna, vero Giorgio e Ferro?

Poi voglio ringraziare i ragazzi dello studentato: con voi si è formato un gruppo con cui è successo di tutto. Ho capito che l'Università, oltre allo studio, è anche un'esperienza e va vissuta a pieno, lasciando spazio anche alle feste, alle sciocchezze e alle cattive decisioni. Con voi ho passato bei momenti e vissuto situazioni che mi hanno fatto uscire dalla mia zona di comfort, permettendomi di crescere a livello personale e relazionale. Anche se devo ammettere che, dopo avervi conosciuti, il rendimento si è abbassato un pochino, ma ci sta.

Grazie ad Antony e Lorenzo che mi hanno spinto a iniziare palestra e mi hanno seguito nei primi periodi, correggendomi e spronandomi anche con qualche insulto; anzi, tanti insulti, soprattutto Antony, però va bene così: i progressi in palestra li devo anche a lui. Per voi magari è stata una cosa da nulla, ma mi ha aiutato tantissimo a migliorare, dandomi un riscontro tangibile su come l'impegno e la costanza, anche nei momenti in cui non si ha voglia o sarebbe più comodo mollare tutto e non pensarci, portino comunque a dei risultati, anche se non si vedono subito. Grazie a questa mentalità, che in parte avevo già ma che grazie a voi sono riuscito a consolidare, ho imparato ad affrontare con maggiore responsabilità anche le sfide del mio percorso universitario, e questo mi ha permesso di sopperire a quel piccolo calo di rendimento del secondo anno.

Grazie anche ai ragazzi di Scheggia, che nonostante negli ultimi anni io sia stato sempre meno presente, non hanno mai smesso di farmi sentire parte del gruppo. Grazie per avermi accolto sempre allo stesso modo. Spero di poter ricambiare, negli anni che verranno, tutto ciò che mi avete dato.

Il ringraziamento più grande va alla mia famiglia, per avermi permesso di intraprendere questo percorso senza farmelo pesare. Senza il vostro sostegno e la vostra pazienza forse non avrei continuato. Avete creduto in me anche nei momenti in cui io stesso facevo fatica a farlo. Ogni vostro sacrificio, ogni parola di incoraggiamento e ogni gesto di supporto hanno avuto un valore enorme e mi hanno permesso di arrivare fino a qui. Non lo dico spesso, anzi praticamente mai, ma vi voglio bene (non vi abituate, questo è un caso eccezionale). Avete sopportato i miei momenti peggiori, i miei errori, i miei momenti di nervosismo, le mie assenze, il mio silenzio e tutte le volte in cui non è stato facile starmi accanto. Vi sarò sempre grato per ciò che siete e per ciò che avete fatto per me.

Infine, un grazie speciale va anche a tutte quelle persone che, in un modo o nell'altro, mi hanno messo in difficoltà, hanno dubitato di me o si sono opposte al mio percorso. Col tempo ho capito che proprio gli ostacoli e le sfide che hanno rappresentato mi hanno spinto a crescere, a mettermi in discussione e a sviluppare una maggiore consapevolezza di me stesso e del mondo che mi circonda. Senza rendersene conto, mi hanno dato la motivazione per dimostrare, prima di tutto a me stesso, quanto valessi davvero. Se oggi sono la persona che sono, è anche grazie a quelle esperienze, che mi hanno insegnato a non arrendermi e a trasformare le difficoltà in occasioni di crescita. Oggi non ringrazio ciò che è accaduto, ma la persona che quelle esperienze mi hanno permesso di diventare. Per questo, oggi non porto rancore, ma consapevolezza: la consapevolezza che nessuna difficoltà è stata abbastanza grande da fermarmi.