



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dip. di AGRONOMIA ANIMALI ALIMENTI RISORSE NATURALI E
AMBIENTE

Corso di laurea in Scienze e Tecnologie Agrarie

**Stress da caldo nelle vacche da latte:
problematiche, effetti e strategie di mitigazione**

Relatore
Prof. Luigi Gallo

Laureando
Lorenzo Marcolin
Matricola n. 2015991

ANNO ACCADEMICO 2022/2023

RIASSUNTO

Lo stress da caldo è una sfida significativa negli allevamenti di vacche da latte, soprattutto negli ultimi anni. Le vacche sottoposte ad alte temperature andranno incontro ad un benessere compromesso che porta a perdite di produzione ingenti, oltre che alla diminuzione della fertilità. Per poter monitorare lo stato degli animali ci si può avvalere di sensori che misurano: temperatura, frequenza respiratoria e cardiaca degli animali, radiazione solare, umidità, movimento dell'aria, precipitazioni... Con i dati raccolti, si ricava l'indice di temperatura-umidità (THI), che è il valore utilizzato per misurare l'entità dello stress da calore. Con THI maggiori di 72 le vacche da latte iniziano ad entrare in una situazione di stress; è necessario quindi, attuare strategie di mitigazione degli animali. Ad oggi è ancora costoso riuscire a determinare un accurato livello di stress termico per identificare i requisiti di mitigazione, ma si riesce comunque ad arrivare ad una buona valutazione dello stato dell'animale. Alcune soluzioni per contrastare le alte temperature potrebbero essere: fornire una ventilazione adeguata, progettare una struttura ottimale della stalla oltre che a fornire zone d'ombra nelle aree adibite al pascolo, attuare regimi di alimentazione corretti, gestire adeguatamente l'allevamento e ricorrere alla selezione genetica.

ABSTRACT

Heat stress is a significant challenge in dairy farming systems, especially in past few years. Dairy cows subjected to high temperatures will undergo a compromised well-being that leads to significant production losses, as well as a decrease in fertility.

In order to monitor the state of the animals, can be used sensors that measure: temperature, breathing and heart rate of the animals, solar radiation, humidity, air movement, precipitation... With the collected data, can be derived the temperature-humidity index (THI), which is the value used to measure the extent of heat stress. With THI greater than 72, dairy cows begin to enter into a stressful situation, it is therefore necessary, to implement animal mitigation strategies. We must keep in mind that is still expensive to determine an accurate level of thermal stress for identify the mitigation requirements, to date however, it's possible to make a good assessment of the state of the animals. Some solutions to counteract high temperatures could be: providing adequate ventilation, designing an optimal structure of the shed as well as providing shady zones in the pasture areas, implementing correct feeding regimes, manage properly the farm and use genetic selection.

INDICE

1. STRESS DA CALDO: IL PROBLEMA	7
1.1. Valutazione Stress da Caldo	8
1.2. Indici Bioclimatici	9
1.3. Altri Indici di Stress	13
1.3.1. Indicatori Fisiologici	14
1.3.2. Indicatori Comportamentali	15
1.4. Metodi di Rilevazione	15
1.4.1. Apparecchiature con Bassa Frequenza di Acquisizione Dati	16
1.4.2. Apparecchiature ad Alta Frequenza di Acquisizione Dati	17
1.4.3. Osservazioni	19
1.5. Modelli Predittivi	20
1.5.1. Machine Learning.....	20
2. PROBLEMATICHE DI ADATTAMENTO	22
2.1. Fisiologia.....	22
2.1.1. Meccanismi Fisiologici	22
2.2. Digestione	24
2.2.1. Acidosi	24
2.2.2. Bilancio Energetico Negativo.....	26
2.2.3. Stress Ossidativo	27
2.3. Produzione	27
2.3.1. Qualità del Latte.....	29
2.3.2. Stress Ossidativo nella Produzione	29
2.3.3. Influenza sulla Prole.....	30
2.4. Riproduzione	31
2.4.1. Conseguenze sugli Ovociti	31
2.4.2. Embrioni	32
2.4.3. Concepimento nei Mesi Estivi	32
2.4.4. Modelli di Parto	33
2.4.5. Inseminazione Naturale.....	33
2.4.6. Periodo di Asciutta.....	34
2.4.7. Immunità Trasmessa.....	34
3. STRATEGIE GESTIONALI PER RIDURRE GLI EFFETTI	35
3.1. Genetica	35

3.1.1.	Genomica	35
3.2.	Alimentazione	38
3.2.1.	Grasso Alimentare	38
3.2.2.	Fibra Alimentare	39
3.2.3.	Integratori	39
3.2.4.	Minerali	40
3.2.5.	Vitamine	41
3.2.6.	Estratti Vegetali	41
3.2.7.	Alimentazione Notturna	43
3.3.	Strutture	43
3.3.1.	Ombreggiatura	44
3.3.2.	Raffreddamento Conduttivo	44
3.3.3.	Ventilazione e Raffrescamento Evaporativo	45
3.3.4.	Ventilazione a Tunnel	46
3.3.5.	Raffreddamento Notturno	47
3.3.6.	Manze e Vacche in Asciutta	47
3.3.7.	Confronto tra Sistemi di Raffreddamento	48
3.3.8.	Ritorni Economici dai Sistemi di Raffreddamento	48
4.	CONCLUSIONI	51
5.	BIBLIOGRAFIA	53

1. STRESS DA CALDO: IL PROBLEMA

Negli ultimi decenni è proseguita la tendenza al riscaldamento globale causato dall'aumento dei gas ad effetto serra in atmosfera. I principali effetti dei cambiamenti climatici sono l'aumento della temperatura dell'aria che comporta una variazione del clima, andando a provocare una situazione di stress da parte di piante e animali di ogni zona.

Il termine stress climatico causa cambiamenti metabolici (sia fisiologici che comportamentali) nelle piante e negli animali nel tentativo di adattarsi alle condizioni meteorologiche mutevoli.

Lo stress da caldo è definito come un evento che influisce sull'omeostasi e sulla salute di un animale a causa di un carico termico fisiologicamente dannoso; si verifica quando la capacità di una vacca di disperdere il calore prodotto attraverso il metabolismo ordinario è compromessa.

Il benessere delle vacche è sempre più visto come una preoccupazione morale e pratica, specialmente nei paesi sviluppati. In condizioni di stress da caldo, il benessere ottimale delle vacche da latte può essere compromesso a causa della diminuzione del consumo della razione, del tempo di riposo e di comfort. L'identificazione e l'analisi di questi fenomeni climatici sono necessarie per contrastare gli effetti avversi che procurano, in modo da garantire il benessere agli animali e una buona produzione. In effetti, lo stress da caldo è diventato una sfida significativa per gli allevatori, soprattutto negli ultimi anni, dove le ondate di calore sono più intense e durature; si prevede che lo stress da caldo aumenterà in termini di frequenza, durata e gravità.

Le vacche da latte sono animali altamente suscettibili allo stress da caldo, soprattutto perché la selezione genetica, storicamente finalizzata in primis all'aumento della produzione di latte, ha portato ad avere animali con elevati carichi di calore interno, che patiscono stress da calore molto prima rispetto alle loro controparti a bassa produzione.

Quando la temperatura corporea delle bovine supera la temperatura di equilibrio ($>39^{\circ}\text{C}$), i recettori periferici trasmettono impulsi nervosi all'ipotalamo per il rilascio di stimoli che attivano meccanismi fisiologici per controllare la termolisi. Questi meccanismi promuovono l'abbattimento del calore attraverso conduzione, convezione, irraggiamento ed evaporazione. Tuttavia, poiché la temperatura corporea supera il gradiente termico delle vacche, una quota di energia netta che

verrebbe utilizzata per la produzione viene utilizzata per mantenere una temperatura adeguata del corpo.

Gli effetti dello stress da calore hanno un impatto negativo sulla salute della vacca da latte, su diversi parametri fisiologici, quali l'aumento della temperatura rettale e della frequenza respiratoria, la diminuzione dell'assunzione di cibo, delle prestazioni riproduttive, della produzione e della qualità del latte; in casi estremi, lo stress da calore può portare alla morte.

Le conseguenze dello stress da calore sono evidenti anche durante brevi periodi di alte temperature. Gli effetti sulla produzione di latte sono immediati e sono la conseguenza più evidente. La diminuzione della fertilità, invece, non è così facile da quantificare, perché gli effetti sono soprattutto di lunga durata. I tassi di concepimento possono diminuire dal 20 al 30% (De Rensis e Scaramuzzi, 2003; Turk et al., 2015), con conseguente aumento dell'intervallo parto-concepimento, e più animali abbattuti per fallimento riproduttivo (St-Pierre et al., 2003).

1.1. Valutazione Stress da Caldo

Monitorare costantemente i propri animali è una pratica necessaria al fine di conoscere il loro stato di salute; più nello specifico, valutare se un animale è stressato dal caldo è uno degli aspetti da tenere in considerazione nella routine di controllo.

Per capire l'intensità dell'esposizione allo stress da caldo sulle vacche, possono venire misurate diverse variabili meteorologiche, le principali sono la temperatura ambiente e l'umidità relativa (Nienaber et al., 1999).

La temperatura ambiente è costituita dalla temperatura del bulbo secco e del bulbo umido. La temperatura a bulbo secco è la temperatura effettiva dell'aria senza considerare umidità e radiazione solare, mentre la temperatura a bulbo umido è la misura dell'umidità nell'aria.

L'umidità relativa (RH), invece, tiene conto della massima quantità d'acqua che l'aria può trattenere ad una specifica temperatura prima che condensi. Un incremento dell'umidità relativa aumenta la probabilità che i bovini siano stressati dal caldo (Herbut e Angrecka, 2018).

1.2. Indici Bioclimatici

Gli indici bioclimatici sono stati sviluppati per creare un modello che vada ad includere indicatori di ambiente, produzione e benessere animale, andando ad ipotizzare una risposta uniforme da parte di tutta la mandria. Tipicamente, questi indici vengono formulati basandosi su equazioni di regressione; solitamente vengono considerati tre livelli di stress (lieve, moderato e severo), ognuno costituito da valori soglia (Ji et al., 2020).

L'**indice temperatura-umidità** (THI) è un valore senza unità, utilizzato per misurare la gravità dello stress da caldo nelle vacche da latte. Il THI è uno tra gli indici bioclimatici più semplici, incorpora, infatti, solo la temperatura dell'aria e l'umidità relativa. (Mader et al., 2006; Bohmanova et al., 2007).

L'equazione utilizzata per calcolare il THI del bestiame in ambienti con clima umido è

$$\text{THI} = (0.8 * T_a) + [\text{Ur} * (T_a - 14.4)] + 46.4$$

Dove:

- T_a = temperatura dell'aria (°C)
- Ur = umidità relativa (%)

Il THI è emerso nel 1959 per valutare il disagio termico negli esseri umani. Questo concetto è stato successivamente esteso agli animali da allevamento e da allora diversi ricercatori e allevatori hanno considerato il THI un metodo standard per valutare lo stress da calore nelle vacche da latte, data la semplice applicazione e la richiesta minima di valori di input.

Utilizzando la formula precedente del THI, si andranno ad acquisire valori generali, data la mancata considerazione di fattori più specifici. I fattori che limitano la capacità dell'equazione del THI di valutare precisamente lo stress da calore includono la mancata considerazione della radiazione solare, la velocità del vento e tutti quei coefficienti specifici degli animali, come la produzione di latte o lo stadio della lattazione e il presupposto che tutte le vacche siano influenzate allo stesso modo dallo stesso ambiente (Hammami et al. al., 2013).

I ricercatori hanno utilizzato per molto tempo un $\text{THI} \geq 72$ come soglia di temperatura alla quale le vacche iniziano a sperimentare lo stress da calore. Collier et al. (2005) hanno rivalutato l'impatto del THI sulle vacche da latte ad alta produzione e hanno concepito che la soglia è, in realtà, una sottostima; in uno studio in Arizona, Collier et al. (2005) hanno riportato che la produzione di latte delle vacche diminuiva di 2,2 kg/giorno con un THI medio giornaliero di 68.

Sebbene il THI sia la misura più comunemente usata per valutare lo stress da calore, esistono altri indici che incorporano altre misure. Buffington et al. (1981) hanno formulato un'equazione che considerava la temperatura a bulbo secco, l'umidità, la radiazione solare e la velocità del vento, nota come **indice di umidità del globo nero** (BGHI).

La quantità di radiazione solare, sia diretta che diffusa, può aumentare la sensibilità degli animali allo stress da calore. La radiazione solare diretta proviene dai raggi diretti del sole, mentre la radiazione diffusa proviene dal riflesso del cielo e delle nuvole (Mader et al., 2006; Herbut e Angrecka, 2018).

La velocità del vento, invece, può influire sulla percezione del calore da parte degli animali, infatti, se la temperatura ambiente non supera la temperatura superficiale dei bovini, il vento può incrementare il raffreddamento per convezione degli animali (Davis et al., 2003).

L'equazione per BGHI è la seguente:

$$\text{BGHI} = \text{tbg} + 0,36 \text{ tdp} + 41,5$$

Dove:

- tbg= temperatura del globo nero in °C. Viene misurata utilizzando una sfera di rame nero opaco (15 cm di diametro) con un sensore di temperatura al suo interno (Lee, 1953)
- tdp= temperatura del punto di rugiada in °C. Il punto di rugiada è la temperatura in cui l'aria diventa completamente satura di umidità, iniziando lo stato di condensazione

Il BGHI, rispetto al THI, ha una maggiore correlazione con la temperatura rettale e la produzione di latte solamente quando le vacche sono esposte alla radiazione solare. Al contrario, in condizioni di ombra, o comunque quando la radiazione solare non è diretta, non sono state riscontrate differenze significative tra THI e BGHI; quindi il BGHI potrebbe essere un migliore predittore dello stress da calore rispetto al THI (Collier et al. 2005).

Includendo la velocità del vento anche nell'equazione del THI, i valori possono diminuire (Herbut e Angrecka, 2018). Per calcolarne il valore, è stata utilizzata un'equazione adattata per il THI che tiene conto della radiazione solare e della velocità del vento:

$$\text{THI}_{\text{adj}} = 4.51 + \text{THI} - (1.922 \times V) + (0,0068 \times \text{RS})$$

dove V = velocità dell'aria (m/s) e SR = intensità della radiazione solare (W/m²); (Mader et al., 2006).

Il THI_{adj} può essere utile per valutare lo stress da caldo dei bovini in climi temperati.

L'**indice climatico completo** (CCI) e l'**indice di carico termico** (HLI) sono indici complessi che tengono conto di più fattori, includendo anche quelli legati all'animale (come il genotipo, il colore del mantello, lo stato di salute); sono indici più precisi rispetto agli altri, ma richiedono più tempo e misurazioni di diverso tipo che si traducono in costi più elevati (Bernabucci et al., 2014; Hammami et al., 2013; Legrand et al., 2011; Silva et al., 2007).

Gaughan et al. (2008) hanno sviluppato l'indice HLI (Heat Load Index) utilizzando due equazioni che considerano la temperatura ambientale, l'umidità, la radiazione solare e la velocità del vento. Inoltre, l'effetto di diverse strategie gestionali (ad esempio, l'accesso all'ombra) e fattori correlati all'animale (come genotipo e colore del mantello) vengono considerati attraverso specifiche soglie di stress da calore.

RH:40–90%, WS: 0.5–6.5 m/s) $HLI_1 = 33.2 + 0.2 \times RH + 1.2 \times T_{bg} - (0.82 \times WS)^{0.1} - \log(0.4 \times WS^2 + 0.001)$	4 feedlots (2 months)	2187	RR, Behaviours	Gaughan et al. (2002)
$RRI = 5.1 \times T_{db} + 0.58 \times RH - 1.7 \times WS + 0.039 \times SR - 105.7$	Pends with shade structure (4 months)	96	RR	Eigenberg et al. (2005b)
$THRT = 33.7 + 7.9 \times WS - 3.8 \times WS^2 - 3.3 \times WVP + 1.6 \times WS \cdot WVP(T:20-45, RH: 0.8-3.9 \text{ kPa}, WS: 0.2-2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2})$	Data simulation for indoor farming	N/A	Thermal Balance Outputs	Berman (2005)
$HLI_2 = \begin{cases} 10.66 + 0.28 \times RH + 1.3 \times T_{bg} - WS(T_{bg} \leq 25) \\ 8.62 + 0.38 \times RH + 1.55 \times T_{bg} - 0.5 \times WS + e^{2.4-WS}(T_{bg} > 25) \end{cases}$	13 feedlots Varied shade specifications (>1 year)	>10,000	RR, Tympanic temperature,	Gaughan et al. (2008a)
$CCI = RH_{adj} + WS_{adj} + SR_{adj}$ Where : $RH_{adj} = e^{(0.00182 \times RH) + (1.8 \times 10^{-5} \times T_{db} \times RH)} \times [(0.000054 \times T_{db}^2) + (0.00192 \times T_{db}) - 0.0246] \times (RH - 30)$;	Combine of experiments' data from multiple studies over 15 years	N/A	DMI	Mader et al. (2010)
$WS_{adj} = \left(\frac{-6.56}{e^{\left\{ \frac{1}{(2.26 \times WS + 0.23)^{0.45}} \times [2.9 + 1.14 \times 10^{-6} \times WS^{2.5} - \log_{0.3}(2.26 \times WS + 0.33)^{-2}] \right\}}} \right) - 0.0056 \times WS^2 + 3.33$;				

Figura 1. Formula indice climatico completo CCI (Mader et al., 2010) e indice di carico termico HLI (Gaughan et al., 2002, 2008a)

Per costruire un algoritmo basato sugli indici menzionati, è necessario definire i valori al di sopra dei quali l'animale inizia a sentirsi a disagio. Tuttavia, i valori di soglia che definiscono se l'animale è in stress da caldo lieve, moderato o grave, dipendono molto dall'indice in questione; inoltre, non è realistico ipotizzare soglie uniformi per classificare il livello di stress da caldo di tutta la mandria, poiché gli animali hanno caratteristiche biologiche diverse e lo stato termico dell'animale dipende soprattutto dalle condizioni ambientali alle quali è esposto.

Nell'ambito di una routine aziendale quotidiana, risulta complicato monitorare tutti gli indicatori. Molto spesso, il monitoraggio continuo di indicatori fisiologici e comportamentali di una singola vacca può essere compromesso a causa di problemi tecnici (spostamento dei sensori o rimozione totale), richiedendo spese significative in termini di risorse umane e attrezzature.

In questa prospettiva, sembra ragionevole trascurare i singoli indicatori (fisiologici e comportamentali), concentrandosi invece sulla misurazione di parametri già monitorati dal sistema aziendale (ad esempio, la produzione di latte) e affidandosi maggiormente a apparecchiature relativamente economiche, come i sensori ambientali. Tuttavia, la risposta individuale animale può essere considerata attraverso modelli meccanicistici come proposto da Berman (2005). L'autore ha sviluppato un indice basato sulla simulazione dei dati di un modello meccanicistico considerando la varietà di dati specifici dell'animale (ad esempio, produzione di calore metabolico, perdita di acqua della pelle, spessore del mantello, isolamento dei tessuti e del mantello).

Secondo Ji et al. (2020), è chiaro che l'utilizzo di diversi indici bioclimatici può portare a conclusioni opposte: da condizioni neutre con un indice, a condizioni di stress termico moderato, con un altro; inoltre, ogni indice è adatto ad ambienti specifici, in base ai dati che va a considerare. L'uso inappropriato degli indici termici comporta l'alterazione delle reali risposte fisiologiche degli animali. Quindi è necessario scegliere accuratamente l'indice da utilizzare a seconda del clima in cui ci si trova e, se possibile, utilizzare formule che incorporano più variabili possibili.

C'è anche da tenere in considerazione che all'interno dell'azienda si instaurano microclimi in base alla zona di collocazione della stalla rispetto ai punti cardinali o ad altri fattori che possono influire sulla temperatura. Un modo più accurato della valutazione dello stress da caldo consiste nel misurare e valutare ogni microclima specifico, posizionando più sensori e suddividendo la stalla in unità di controllo più piccole.

1.3. Altri Indici di Stress

Attualmente, poiché sono stati sviluppati diversi tipi di sensori e attrezzature per supportare gli allevatori, è possibile misurare diverse variabili che, con l'ausilio di algoritmi basati su modelli predittivi, potrebbero consentire di prevedere lo stato termico dell'animale, in modo da agire prima che i bovini siano stressati eccessivamente da caldo.

In condizioni ambientali avverse, gli animali mostrano risposte fisiologiche o comportamentali specifiche; ad esempio, durante le prime fasi di esposizione al calore, il corpo dell'animale risponde rapidamente aumentando sia la frequenza respiratoria (Brown-Brandl et al., 2005; Ferrazza et al., 2017) che quella cardiaca (Vizzotto et al., 2015; Daltro et al., 2017) per mantenere l'omeostasi; per quanto riguarda il comportamento (Nienaber et al., 2007; Polsky et al., 2017), gli animali riducono i movimenti, assumono quantità maggiori d'acqua e ricercano aree ombreggiate in modo ridurre al minimo il carico di calore corporeo.

1.3.1. Indicatori Fisiologici

La temperatura corporea interna è l'indicatore animale più comunemente utilizzato nella rilevazione dello stress termico nelle vacche da latte; rappresenta la temperatura degli organi più importanti del corpo come il cuore, il fegato e il cervello (Farooq et al., 2010). Quando le vacche sono stressate dal calore, la loro temperatura interna aumenta in modo anomalo se non riescono a dissipare il calore in eccesso (valori tipici si attestano attorno a 38 e 39°C) (Vizzoto et al., 2015)

Un'altra modalità per identificare se gli animali sono sottoposti a stress da caldo è il monitoraggio della temperatura esterna del corpo degli animali. Molti autori hanno studiato la temperatura di occhi, arti e mammelle correlandola alla temperatura interna (Daltro et al., 2017; Yadav et al., 2017). In alcune situazioni, invece, la variazione di altri indicatori fisiologici è più significativa rispetto alla temperatura corporea interna. Ad esempio, in condizioni di stress da caldo moderato, Vizzoto et al. (2015) hanno confrontato vacche in zona d'ombra e altre esposte al sole alle 1300 h, osservando un aumento della frequenza respiratoria e cardiaca, ma nessuna differenza significativa della temperatura interna degli animali. Tuttavia, si è osservato un aumento significativo della temperatura interna degli animali non ombreggiati alle 1700 h.

Brown-Brandl et al. (2005) hanno concluso che la frequenza respiratoria è un buon indicatore fisiologico dello stress da caldo perché vi è poco o addirittura nessun ritardo nell'espressione dello stress, ed è costantemente influenzata da tutte le variabili dell'indice THI.

La risposta a livello endocrino contro lo stress da calore è principalmente riflessa da elevati livelli di cortisolo, aldosterone, ormone antidiuretico, tiroxina, prolattina e ormone della crescita. Tuttavia, il loro utilizzo come indicatori di stress da calore implicherebbe frequenti prelievi di sangue, una procedura che richiede tempo oltre che ad essere invasiva per gli animali. Un indicatore meno invasivo è sicuramente la misura della concentrazione di cortisolo nel latte (MC) poiché è altamente correlato alle concentrazioni di cortisolo nel plasma (Mormède et al., 2007).

Nonostante siano riconosciuti come indicatori funzionali del verificarsi dello stress da caldo, l'uso di indicatori endocrini presenta diversi limiti oltre agli elevati costi di laboratorio. Nel caso di MC, la

sua misurazione implicherebbe la mungitura delle vacche al di fuori dell'orario di mungitura, il che potrebbe risultare una pratica stressante per gli animali.

1.3.2. Indicatori Comportamentali

In condizioni di stress da caldo, le bovine tendono a trascorrere più tempo in piedi per aumentare la superficie corporea esposta all'aria, così da dissipare più calore. Lo stress da calore influisce anche sul ciclo estrale degli animali, riducendo sia la durata che l'intensità dell'espressione estrale, ed è responsabile di una diminuzione dal 20 al 30% dei tassi di concepimento (Orihuela et al., 2000; De Rensis et al., 2003; Santos et al., 2017).

Alcuni cambiamenti riguardano anche il comportamento sociale degli animali, come livelli più elevati di aggressività vicino agli abbeveratoi o competizione per la ricerca dell'ombra (Ammer et al., 2016; Heinicke et al., 2018; Kovács et al., 2018). Inoltre, cambia anche il comportamento alimentare; l'aumento del carico termico causa un aumento dell'assunzione d'acqua e una significativa riduzione dell'assunzione di sostanza secca (Ammer et al., 2016).

1.4. Metodi di Rilevazione

La complessità dei meccanismi fisiologici degli animali richiede la misurazione di indicatori a vari livelli: corporatura, performance, comportamento e ambiente dei bovini. Per la rilevazione di quest'ultimo si utilizzano sensori di temperatura e umidità sia per condizioni interne che esterne alla stalla, anemometri per misurare la direzione e la velocità del vento, e sensori di radiazione solare (Eigenberg et al., 2005; Sellier et al., 2014; Hempel et al., 2019; Heinicke et al., 2019; Pilatti et al., 2019; Chung et al., 2020; Ji et al., 2020; Müschner-Siemens et al., 2020).

L'allevamento di bestiame di precisione mira a fornire un monitoraggio in tempo reale in modo che gli interventi possano essere effettuati tempestivamente (Berckmans, 2017).

Alla luce di ciò, la richiesta di misurazioni non invasive, remote, accurate, continue e automatiche per gli indicatori fisiologici delle vacche è sempre più apprezzata per il rilevamento del carico termico.

1.4.1. Apparecchiature con Bassa Frequenza di Acquisizione Dati

Negli ultimi decenni, il rilevamento manuale è stato il metodo più utilizzato per misurare parametri fisiologici come frequenza cardiaca, frequenza di sudorazione o temperatura rettale. Tuttavia, con questa modalità di rilevazione si va a causare una serie di disturbi all'animale, poiché toccando o inserendo apparecchiature nel corpo, può aggiungere ulteriore stress e di conseguenza influenzare le misurazioni.

Il rilevamento manuale richiede inoltre molto tempo per effettuare le misurazioni, comportando costi di manodopera molto significativi. Il vantaggio di questo tipo di metodi è che spesso vengono utilizzate attrezzature economiche e di semplice utilizzo, come ad esempio un termometro per la misurazione della temperatura rettale o uno stetoscopio per la misurazione della frequenza cardiaca.

La **temperatura rettale** viene utilizzata come misura convenzionale della temperatura corporea interna. Viene misurata manualmente tramite un termometro digitale inserito per circa 15 cm nel retto di animali adulti (Piccione et al., 2003). È il metodo prevalente impiegato per misurare la temperatura interna delle vacche, ma possono venire utilizzate altre regioni, come la vagina, il ruminale, e il timpano per stimare tale valore.

Yan et al. (2021) hanno studiato la temperatura rettale delle vacche da latte esposte a diverse condizioni di stress da calore, osservando che, in condizioni di stress, si verifica un aumento di circa 1°C (da ~38 a ~39°C).

La **temperatura vaginale** è stata considerata affidabile quanto la temperatura rettale, data la vicinanza al retto (Bergen, et al., 2000). La vagina, inoltre, avendo un flusso sanguigno abbondante, risulta essere più sensibile ai cambiamenti della temperatura corporea interna rispetto al retto, fornendo quindi valori più accurati. Kaufman et al. hanno constatato che la temperatura vaginale ha mostrato una relazione più elevata con il THI rispetto alla temperatura rettale (Burdick et al., 2012; Kaufman, et al., 2018).

Il procedimento per la misurazione della temperatura vaginale è molto simile a quello per la misurazione della temperatura rettale; le rilevazioni sono effettuate per lo più manualmente, anche se sono stati fatti molti sforzi per automatizzare la procedura. Tutti i dispositivi interni possono

essere inseriti nella vagina per un massimo di una settimana nella maggior parte delle applicazioni, a causa dell'aumento del rischio di irritazione e infezione. Pertanto, il monitoraggio a lungo termine non può essere effettuato (Lee et al., 2015; Tresoldi et al., 2020).

Un'altra promettente alternativa in rapido sviluppo è la **termografia a infrarossi** (Idris et al., 2021). Le termocamere per la termografia a infrarossi offrono un metodo remoto e senza contatto per registrare la temperatura superficiale delle vacche (Daltro et al., 2017).

La termografia a infrarossi può essere misurata sia con strumentazione portatile che fissa. Per l'uso portatile, vengono utilizzate una fotocamera o una pistola ad infrarossi puntata alla fronte dell'animale (Salles et al., 2016; Vogel et al., 2016; Kaufman, et al., 2018; Peng et al., 2019). Tuttavia, il funzionamento manuale limita la frequenza della raccolta dei dati. Per un uso meno occasionale, una termocamera a infrarossi potrebbe venire montata in un luogo specifico, dove ogni animale può essere monitorato (ad esempio nella sala di mungitura) (Schaefer et al., 2012; Hoffmann et al., 2016; Jorquera-Chavez et al., 2019). Tuttavia, l'uso di tali sistemi presenta importanti sfide operative poiché la determinazione della temperatura delle superfici corporee esterne dipende dalla minimizzazione di fattori che ostacolerebbero tali misurazioni, ad esempio, il pelo dell'animale, lo sporco sulla pelle, la distanza e la direzione rispetto all'animale, l'esposizione diretta al sole o la temperatura ambiente. Inoltre, per garantire una risposta in tempo reale, le nuove apparecchiature dovrebbero fornire il monitoraggio continuo del processo (ovvero, lo stato termico dell'intera mandria e delle condizioni ambientali). Per questi motivi l'uso della termografia a infrarossi richiede ulteriori ricerche (Kunc et al., 2012; Unruh et al., 2017; Idris et al., 2021).

1.4.2. Apparecchiature ad Alta Frequenza di Acquisizione Dati

I dispositivi di monitoraggio automatico della temperatura possono avere diverse applicazioni nel bestiame, sia per monitorare costantemente la salute degli animali che per supportare gli allevatori nell'agricoltura di precisione. La misurazione a livello del singolo animale risulterebbe molto più utile nel gestire lo stress da calore e le malattie, nonostante gli elevati i costi di investimento associati; Inoltre, per poter gestire e archiviare la mole di dati giornalmente prodotta, è necessario sviluppare software specifici (Koltès et al., 2018). I sensori termici possono essere utilizzati per misurare la temperatura corporea mediante un collare, un bolo ruminale o un inserto vaginale, registrando

temperatura a intervalli di tempo predeterminati (Idris et al., 2021). In alternativa, la temperatura corporea interna può essere monitorata in tempo reale utilizzando biosensori impiantabili (Chung et al., 2020).

Per il monitoraggio della **temperatura del rumine e del reticolo** vengono utilizzati i boli. Un bolo è una specie di pillola posta nel reticolo o nella giunzione tra il rumine e il reticolo, costituita da un sensore di temperatura, un sistema di telemetria e una batteria (Koltes et al., 2018).

Le temperature registrate nel rumine e nel reticolo sono maggiori della temperatura rettale a causa del calore prodotto dall'attività dei microrganismi ruminali (Bewley et al., 2008); inoltre le misurazioni potrebbero venire influenzate dall'assunzione di liquidi; infatti, l'ingestione di grandi volumi (dal 10 al 15% del volume del rumine) di acqua fredda ($\leq 8^{\circ}\text{C}$) provoca un brusco abbassamento della temperatura ruminale (fino a 10°C) che comporta l'attesa di circa 2 o 3 ore per tornare alla temperatura normale (Cantor et al., 2018).

La **temperatura del timpano** viene misurata attraverso data logger posizionati nel condotto uditivo (Arias et al., 2008; Jara et al., 2016); questo metodo, però, presenta alcuni limiti dati dall'eventuale rimozione o spostamento del sensore nell'orecchio dovuti a movimenti bruschi dell'animale (Bergen et al., 2000).

La **temperatura della pelle** è un candidato per rappresentare la temperatura corporea interna poiché le vacche, quando stressate dal calore, indirizzerebbero più sangue verso le parti periferiche del corpo (Kadzere et al., 2002; Chung et al., 2020). La misurazione della temperatura per via sottocutanea richiede l'uso di sensori impiantabili con trasmissione wireless (Reid et al. 2012; Lee et al. 2016; Iwasaki et al. 2019). Reid et al. (2012) hanno dimostrato che la temperatura misurata alla base dell'orecchio è maggiormente correlata con la temperatura rettale (con coefficiente di 0,30). Un'altra modalità di rilevazione è utilizzare sensori termici associati ad un collare, oppure posizionati sulla pelle sopra la vena della coda opposta al retto (Hill et al. 2016).

Gli indicatori basati sulla respirazione sono considerati molto rilevanti per la valutazione dello stress termico; l'ansimare, insieme alla sudorazione, contribuisce alla dispersione di calore per evaporazione che viene utilizzata per mantenere l'omeotermia. Inoltre, il sistema respiratorio inizia a dissipare calore prima ancora che i valori di temperatura misurati per via rettale o vaginale inizino

a salire, quindi può venire utilizzato come indicatore precoce dello stress da caldo caldo (McArthur et al. 1987; Gaughan et al. 2000; Brown-Brand et al. 2005; Bar et al. 2019).

Il metodo tradizionale per misurare la **respirazione** consiste nel contare manualmente i movimenti del fianco e convertirli poi in respiri al minuto (BPM) (Strutzke et al. 2019).

La maggior parte dei metodi per la misurazione della respirazione sono dispositivi indossabili, come collari, cinture toraciche per rilevare la frequenza dell'espansione toracica o sensori addominali per rilevare l'espansione addominale.

Il valore di 37 BPM corrisponde ad un THI di 70, e rivela che l'animale è sulla soglia dello stress (Eigenberg et al. 2000). L'aspetto negativo è che problemi come lo spostamento o la rimozione del sensore, o malfunzionamenti della batteria vengono solitamente rilevati solo alla fine della prova.

Per misurare il **tasso di sudorazione**, Rungruang et al. (2014) hanno posizionato un evaporimetro a livello della cute.

1.4.3. Osservazioni

La frequenza respiratoria e l'ansimare, come già detto in precedenza, sono indicatori dell'aumento dello stress da calore e forniscono un metodo semplice per la valutazione non invasiva e a distanza della risposta allo stress da calore (Silanikove et al. 2000; Nienaber et al. 2007; Gaughan et al. 2014). Le principali caratteristiche dell'affanno includono un aumento della frequenza cardiaca, movimenti più intensi del torace, bocca aperta con bave, lingua sporgente e collo esteso (Lees et al. 2018).

Il metodo per rilevare l'ansimazione consiste nell'osservare l'animale e assegnare un punteggio (punteggio ansimante) su una scala da 0 a 4, in base a quanto il respiro è affannoso; zero non significa ansimare e quattro è ansimare molto (Vizzotto et al. 2015; Daltro et al. 2017). (il punteggio 1 corrisponde a 60 BPM di respirazione) (Lees et al. 2018). Tuttavia, l'osservazione umana non è mai precisa, e i risultati dipendono estremamente dall'esperienza del ricercatore o dell'agricoltore, inoltre, comporta un notevole aumento del costo del lavoro (Idris et al. 2021).

Questi metodi basati sui dati degli animali presentano delle limitazioni, in quanto identificano i segni dello stress da caldo ma non le condizioni che potenzialmente portano a tale situazione, quindi non riescono a prevenire il deterioramento della salute dell'animale.

1.5. Modelli Predittivi

Determinare le condizioni di stress da preriscaldamento è essenziale per rendere i sistemi di raffreddamento più capaci non solo di prevenire efficacemente lo stress da calore, ma anche di renderli più efficienti nell'utilizzo di energia e acqua. Tenendo conto dei limiti di valutazione tramite dati provenienti dagli animali, determinare preventivamente lo stress tramite variabili ambientali è la scelta più logica; tali misurazioni, inoltre, possono essere effettuate anche utilizzando attrezzature economiche. In seguito, per capire se gli animali siano in stato di stress o meno, è necessario sviluppare algoritmi basati su modelli predittivi che integrino tutti i dati provenienti dall'ambiente e dagli animali, combinando tutte le variabili che influenzano l'equilibrio termico del bovino.

1.5.1. Machine Learning

L'apprendimento automatico è un concetto potente, deriva dell'intelligenza artificiale, che consente ai sistemi di apprendere complesse relazioni non lineari nei dati senza essere esplicitamente programmati per farlo (Kotsiantis et al. 2006; Frank et al. 2020).

Questi sistemi sono basati sui dati, quindi, per disporre di uno strumento affidabile che riesca a risolvere il problema, è essenziale disporre di una quantità adeguata di dati. Una parte di questi (dal 60% all'80%) verrà utilizzata per addestrare l'algoritmo. Una volta addestrato si valuta la capacità del modello di prevedere nuovi risultati utilizzando nuovi valori. L'approccio può essere modificato finché il modello non mostra una buona capacità di previsione. Quando il modello risulta pronto, possono venire utilizzati nuovi input di dati per i quali non sono noti gli output.

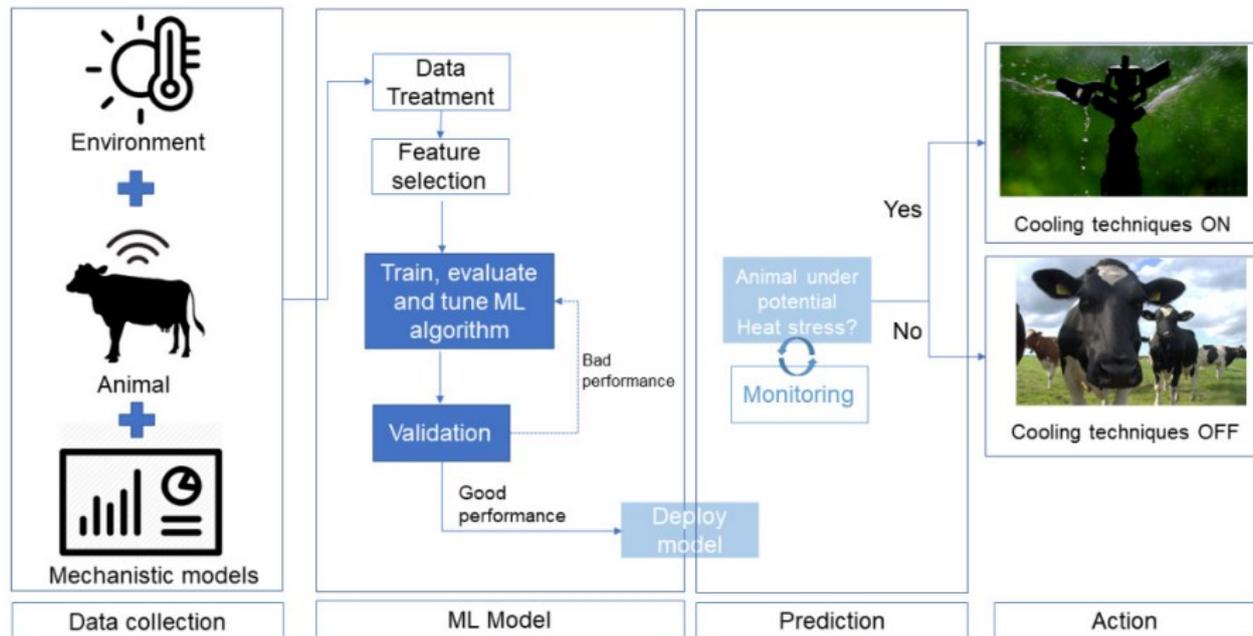


Figura 2. Implementazione di tecniche di Machine Learning per prevedere lo stato termico della mandria.

L'utilizzo di un modello di machine learning in un'azienda agricola implica, almeno, la convalida dei risultati e, nel peggiore dei casi, l'esecuzione di una nuova serie di esperimenti per mettere a punto il modello;

L'apprendimento automatico è una tecnologia estremamente nuova, non ancora approdata negli allevamenti ordinari, ma si rivela essere molto utile nelle scelte complesse derivate dalla presenza di molti fattori da prendere in considerazione, per questo è necessario approfondirne gli studi e la ricerca per poter, in futuro, sfruttarla al meglio.

2. PROBLEMATICHE DI ADATTAMENTO

2.1. Fisiologia

Le razze più produttive delle vacche da latte risultano più efficienti quando la temperatura ambientale è compresa tra 5 e 15°C, dato che sono state adattate a climi temperati. Quando invece le temperature superano i 25°C, soprattutto in presenza di elevata umidità relativa, si possono osservare i primi sintomi derivati dallo stress da calore. Di conseguenza, 25°C è generalmente considerata la temperatura critica superiore per le vacche da latte.

Quando si verificano condizioni ambientali avverse, gli animali mostrano risposte fisiologiche e comportamentali o, molto spesso, una combinazione di entrambi, ad esempio, un aumento della frequenza di ingestione d'acqua, l'assunzione della razione nelle ore più fresche, la riduzione del movimento e la ricerca di aree ombreggiate per ridurre al minimo il carico di calore (De Rensis et al., 2016).

Cook et al. (2007), hanno osservato adattamenti comportamentali negli animali quando si verifica un leggero stress da calore (THI 70-75): Il tempo dedicato all'abbeverarsi aumenta da 0,3 a 0,5 ore al giorno, mentre il tempo passato in piedi aumenta da 2,6 a 4,5 ore al giorno; questo cambiamento di postura, facilita la circolazione di aria più fresca e favorisce la dissipazione del calore per convezione. Tuttavia, le bovine quando trascorrono molto tempo in piedi hanno mostrato un aumento del 18,6% dei problemi agli zoccoli (Mudroň, 2022).

2.1.1. Meccanismi Fisiologici

Gli animali omeotermi possiedono una zona di termoneutralità, nella quale, per mantenere la temperatura corporea a livelli normali, il dispendio energetico è minimo e indipendente dalla temperatura ambientale (Johnson, 1987). Quando la temperatura sale al di sopra della zona termoneutrale, gli animali, per mantenere l'equilibrio termico, attivano processi di omeostasi come la vasodilatazione e la sudorazione, inoltre si verifica un aumento della frequenza respiratoria e cardiaca (Bouraoui et al., 2002; Horowitz 2002). Tramite la sudorazione, il corpo espelle liquidi dalle

ghiandole cutanee, dove l'evaporazione, un processo molto endotermico, elimina il calore dal corpo, raffreddandolo.

La vasodilatazione consente un maggior afflusso di sangue nelle zone periferiche, facilitando la perdita di calore e dunque il raffreddamento del corpo per convezione. Infine, l'aumento nella frequenza degli atti respiratori in presenza di elevate temperature permette di raffreddare il cavo orale e disperdere il calore in eccesso.

L'entità dello scambio di calore sensibile dipende dalla differenza di temperatura tra la superficie corporea dell'animale e l'ambiente, mentre la perdita di calore per evaporazione è indipendente dalla temperatura e associata all'umidità. Tuttavia, all'aumentare della temperatura ambientale, lo scambio di calore sensibile è quasi nullo a causa della differenza di temperatura negativa tra l'ambiente e la superficie corporea, pertanto, la perdita di calore per evaporazione è il metodo più efficace nella termoregolazione degli animali (Berman, 2005).

Le radiazioni solari sono molto rilevanti nelle vacche allevate a pascolo, poiché stando all'aperto ricevono una notevole quantità di calore da irraggiamento durante il giorno (Fuquay, 1981).

Gli animali, in base alle caratteristiche del mantello, possono essere più o meno predisposti all'allevamento all'aperto. Le vacche che presentano una colorazione chiara e una pelle ben pigmentata soffrono meno il caldo dato che la radiazione solare viene trasmessa in minor quantità alla pelle (DaSilva et al., 2003); gli animali con un mantello scuro, invece, possono assorbire anche il doppio delle radiazioni solari rispetto a quelli con tonalità più chiare, quindi hanno bisogno di sostenere una maggiore evaporazione cutanea per mantenere l'equilibrio termico, il che comporta un maggior dispendio di energia (Fonsêca et al., 2022). Per gli animali alloggiati in stalle, invece, lo scambio di calore per irraggiamento è ridotto al minimo dato che difficilmente sono esposti al sole.

I cambiamenti fisiologici causati dall'esposizione al calore devono essere compresi al fine di implementare pratiche di raffreddamento efficaci. È inoltre necessario modificare la razione alimentare, in modo da aumentare la densità energetica e di nutrienti per compensare la diminuzione dell'ingestione di sostanza secca e la maggiore richiesta di energia da parte dell'animale.

2.2. Digestione

Lo stress da calore ha un impatto molto significativo sulla salute e il benessere delle vacche da latte. Le vacche stressate dal caldo, infatti, andranno a consumare una minor quantità di cibo, di conseguenza il tempo di ruminazione risulta essere minore; questo si traduce in una diminuzione delle sostanze tampone presenti nel rumine (la ruminazione, infatti, è il principale stimolante della produzione di saliva). Inoltre, a causa della redistribuzione del flusso sanguigno verso la periferia (nel tentativo di migliorare la dissipazione del calore) e la conseguente riduzione dell'afflusso di sangue al tratto gastrointestinale, il processo digestivo viene alterato.

Un aumento della temperatura ambientale ha un effetto negativo sul centro dell'appetito, nell'ipotalamo, il quale, tramite il rilascio di ormoni, non induce l'animale ad avere fame causando una minor assunzione di cibo (Ammer et al.,2018). Le vacche in condizioni termiche neutre consumano tipicamente da 12 a 15 pasti al giorno, quando invece si verifica un aumento della temperatura ambientale, riducono la frequenza a 3-5 pasti al giorno (Kadzere et al.,2002). La diminuzione della frequenza, però, molto spesso è accompagnata da pasti più abbondanti, che potrebbero avere conseguenze sulla salute dell'intestino.

2.2.1. Acidosi

Nel tentativo di migliorare la dissipazione del calore, gli animali concentrano il flusso sanguigno verso la periferia, questo consegue che ci sia un minor afflusso di sangue nel tratto gastrointestinale; i prodotti finali della digestione (cioè gli acidi grassi volatili) vengono così assorbiti in modo meno efficiente causando un aumento del contenuto totale di acidi grassi volatili nel rumine (e quindi alla diminuzione del pH). Inoltre, anche l'aumento della frequenza respiratoria contribuisce all'abbassamento del pH ruminale, poiché l'ansimare provoca un aumento della CO₂ espirata.

Per assicurare un valore stabile di pH del sangue, il corpo dell'animale deve mantenere un rapporto tra bicarbonato (HCO₃) e anidride carbonica (CO₂) di 20:13. A causa della diminuzione della CO₂ ematica derivata dall'iperventilazione, i reni espellono HCO₃ per mantenere il rapporto costante. Tutto questo porta ad una riduzione della quantità di HCO₃ che può essere utilizzato tramite la saliva per produrre soluzione tampone e mantenere un pH ruminale stabile. Inoltre, le vacche, quando

ansimano, spesso sbavano, riducendo così la quantità di saliva prodotta. La riduzione di HCO_3 contenuto nella saliva e la minore quantità di tale sostanza che entra nel rumine rendono la vacca stressata dal caldo molto più suscettibile all'acidosi ruminale subclinica e acuta.

Inoltre, la diminuzione della frequenza di visite alla mangiatoia e il consumo di pasti più abbondanti provocano una maggiore produzione di acido nel rumine.

L'ipertermia cronica, che causa inappetenza grave o prolungata, potrebbe portare quindi ad acidosi ruminale (Kadzere et al.,2002).

Per compensare la minor assunzione di cibo e la grande richiesta di energia da parte degli animali affetti da stress da calore, l'allevatore tende ad aumentare la parte energetica della dieta; tuttavia, una razione ricca di concentrati andrà ad alterare il pH ruminale, infatti, una dieta non equilibrata, con poco apporto di fibra riduce il tempo di ruminazione che comporta una bassa produzione di saliva. La saliva, come già detto in precedenza, è fondamentale nel mantenere l'equilibrio del pH all'interno del rumine; la mancanza di questo fattore, infatti, causa un aumento dell'acidità, anche al di sotto di pH 5, che comporta una compromissione delle pareti ruminali, le quali non risulteranno più efficienti nell'assorbimento degli acidi grassi volatili; l'animale, quindi, andrà a subire tutte le conseguenze dell'acidosi, che andranno a sommarsi alle problematiche legate allo stress da calore.

Mantenere un rumine sano è la base di qualsiasi tipo di intervento nutrizionale dato che è molto importante per poter superare gli effetti dello stress da caldo (Ammer et al.,2018).

2.2.2. Bilancio Energetico Negativo

La lattazione esercita una grande quantità di stress sul bestiame, data la percentuale significativa di nutrienti che viene utilizzata per la sintesi del latte. Le vacche da latte odierne sperimentano un bilancio energetico negativo (NEBAL) durante la prima fase della lattazione, al fine di supportare l'elevato dispendio energetico richiesto da parte dell'organismo. Il metabolismo degli animali, infatti, subisce cambiamenti significativi per garantire l'approvvigionamento di nutrienti al sistema mammario.

Quando gli animali non riescono ad adattarsi a questa sfida metabolica, si verificano diversi disturbi che influenzano notevolmente il sistema immunitario, le prestazioni riproduttive, la qualità del latte e il benessere degli animali.

Il NEBAL riduce la concentrazione e la sensibilità all'insulina, esercitando così, un effetto lipolitico, che comporta l'asportazione di acidi grassi non esterificati (NEFA) dai tessuti adiposi in risposta all'elevata richiesta energetica (Bauman et al., 1993).

I NEFA e i corpi chetonici circolanti aiutano a superare i requisiti energetici più elevati dovuti all'elevata produzione; questo fenomeno causa una perdita di peso consistente delle vacche all'inizio della lattazione.

Le bovine in bilancio energetico negativo presentano alti livelli di acidi grassi non esterificati (NEFA), bassi livelli di glucosio (Garverick et al., 2013) e un'elevata presenza di corpi chetonici nel sangue, nelle urine e nel latte, che potrebbero provocare l'attivazione del sistema immunitario.

I chetoni si formano a causa dell'incompleta scomposizione di proteine e carboidrati. Questo fa sì che l'ammoniaca venga assorbita molto lentamente; di conseguenza, vengono formati acido butirrico e acetico, da cui si ottengono quindi acetone, acido acetoacetico e beta-idrossibutirrico, sostanze che rappresentano una minaccia per la salute degli animali.

In base alla quantità dei corpi chetonici, l'animale può manifestare chetosi subclinica o clinica; se invece è la grande quantità di acidi grassi a non venire gestita correttamente, l'animale potrebbe manifestare sintomi di lipidosi epatica. Entrambe le malattie se non vengono prese in considerazione per tempo, potrebbero causare elevati scompensi all'animale, causandone la morte.

2.2.3. Stress Ossidativo

Un importante meccanismo di adattamento al calore nei mammiferi è il reindirizzamento dell'afflusso di sangue dagli organi viscerali verso la periferia del corpo per aumentare lo scambio di calore con l'ambiente esterno. Questo comporta utilizzo di ATP, rischio di acidosi e di stress ossidativo dell'epitelio intestinale.

Lo stress ossidativo si verifica quando i fattori ossidanti superano i sistemi antiossidanti, a causa di uno squilibrio fra le due parti, portando ad un aumento delle concentrazioni di radicali liberi, come i ROS (specie reattive all'ossigeno) (Ganaie et al., 2013; Belhadj Slimen et al., 2016). I ROS sono metaboliti prodotti delle reazioni che avvengono nella catena di trasporto degli elettroni dei mitocondri (Kärkönen et al., 2015); l'aumento della presenza dei ROS è correlata ad un aumento della respirazione aerobica cellulare (Schieber et al., 2014; Kärkönen et al., 2015). Tutto questo ha un effetto negativo sulla mucosa intestinale, in quanto, le giunzioni proteiche che tengono uniti gli enterociti vengono alterate, causando di conseguenza un aumento della permeabilità intestinale.

Lo stress ossidativo e l'aumento della permeabilità contribuiscono alla perdita di integrità e di funzionalità della barriera intestinale. Conseguentemente, si ha una fuoriuscita indesiderata di batteri ed endotossine, come ad esempio i lipopolisaccaridi (LPS), uno dei componenti della parete dei batteri Gram Negativi con un elevato potere infiammatorio. Questo stato infiammatorio che si viene a creare, se protratto nel tempo, porta ad un effetto negativo sulla salute e sul benessere dell'animale.

2.3. Produzione

La continua selezione genetica delle vacche per ottenere performance produttive sempre più elevate si traduce in una maggiore sensibilità a situazioni di stress e ad una maggior difficoltà nel superare tali situazioni; ultimamente nel periodo estivo risultano esserci ondate di calore sempre più intense e durature, che portano gli animali a subire condizioni alle quali non sono adatti, causando quindi stress metabolico che comporta principalmente un calo di produzione nonché una scarsa qualità del latte (Bouraoui et al., 2002; Wheelock et al., 2010). Superata la soglia critica di THI, si è notato che l'ingestione di sostanza secca si riduce del 9,6% e la produzione di latte del 21%, riscontrando anche una minore percentuale di grassi e proteine nel latte (Bouraoui et al., 2002; Bernabucci et al., 2010).

La lattazione è un processo ad alta intensità energetica e che produce, quindi, un'elevata quantità di calore; il che, unito all'elevato carico termico, mette a repentaglio in modo significativo il benessere degli animali. Per adeguarsi a questa situazione di stress, le vacche riducono la produzione di latte, in modo da diminuire il carico di calore corporeo; questo implica risposte dirette e indirette a varie modificazioni fisiologiche, endocrine e biochimiche. Uno studio ha dimostrato, infatti, che un derivato della b-caseina agisce legandosi alle cellule epiteliali mammarie, interrompendo così i canali del potassio, riducendo così, la sintesi del latte (Silanikove et al., 2009).

Molti studi hanno approfondito questi effetti, constatando che la riduzione dell'assunzione della razione alimentare rappresenta solo il 35-50% del calo della produzione di latte durante lo stress termico (Rhoads et al., 2009; Wheelock et al., 2010). Ad esempio, si è notato che la presenza ridotta dell'ormone "ST" osservata durante situazioni di stress da calore sembra coinvolgere meccanismi indipendenti dalla minore assunzione di cibo. ST e IGF-1 sono due tra i più importanti ormoni che promuovono la lattazione (Bauman et al., 1993). Normalmente, l'ormone ST ripartisce i nutrienti verso la ghiandola mammaria diminuendone così la disponibilità da parte di tessuti extra-mammari e stimolando la sintesi e la secrezione epatica di IGF-1. Le vacche stressate da caldo eccessivo presentano concentrazioni ridotte di ST (McGuire et al. 1991; Rhoads et al., 2009).

Inoltre, a causa della riduzione dell'assunzione di alimenti e dell'aumento del fabbisogno di mantenimento, gli animali stressati dal caldo diminuiscono la disponibilità di nutrienti per il sistema mammario (Wang et al., 2010). La ghiandola mammaria dei bovini da latte richiede glucosio per la sintesi del lattosio. Tuttavia, per generare meno calore metabolico possibile, e per far fronte all'elevata richiesta di energia, il corpo degli animali tende ad utilizzare il glucosio con più intensità. La mammella, quindi, potrebbe non ricevere quantità sufficienti di glucosio per la sintesi del lattosio, portando a un calo della produzione di latte.

2.3.1. Qualità del Latte

I costituenti del latte sono fortemente influenzati dallo stress da calore (Pragna et al., 2017).

Il maggior numero di cellule somatiche presenti nel latte durante l'estate evidenzia che il caldo eccessivo influisce gravemente sulla qualità della produzione (Archer et al., 2013). Inoltre, è stato riportato che lo stress da caldo interferisce con il metabolismo dell'azoto, causando la diminuzione del contenuto proteico del latte (Cowley et al., 2015). In particolare, si è notata la diminuzione della sintesi di alfa e beta-caseina, proteine fondamentali nella produzione di formaggio (Bernabucci et al., 2010). Si ipotizza che, durante situazioni di stress, gli amminoacidi, piuttosto che venire indirizzati alla mammella, siano coinvolti nella risposta immunitaria e nella gluconeogenesi (Guo et al., 2018).

Allo stesso modo, anche la composizione lipidica del latte viene alterata (Liu et al., 2017).

Il grasso è una delle componenti più variabili nel latte; svolge un ruolo fondamentale nelle proprietà fisiche, nella qualità della lavorazione e nelle caratteristiche organolettiche dei prodotti lattiero-caseari. La concentrazione di grassi nel latte è influenzata da molti fattori, tra cui la composizione della dieta, le caratteristiche genetiche dell'animale e lo stato fisiologico (Palmquist et al., 2020).

2.3.2. Stress Ossidativo nella Produzione

Lo stress ossidativo, come visto in precedenza, è un fattore molto importante che, se presente, porta ad avere risposte immunitarie compromesse causando infiammazioni di vario genere (Bernabucci et al., 2005).

L'uso di una dieta ad alto contenuto di concentrati può danneggiare la funzione di difesa antiossidante dei tessuti del fegato e delle ghiandole mammarie, con conseguente danno ossidativo (Abaker et al., 2017). Infatti, l'aumento del contenuto in cellule somatiche o leucocitarie nel latte è l'evidenza della risposta immunitaria della vacca ad un processo infiammatorio causato dalla penetrazione di batteri o di altri agenti esterni nella mammella.

Vi sono prove crescenti che lo stress ossidativo e la disfunzione mitocondriale nella ghiandola mammaria siano strettamente correlati alla produzione e al contenuto di grassi nel latte.

Lo stress ossidativo, infatti, può causare un'infiammazione subclinica di uno o più quarti mammari, aumentando così il rischio di mastiti, inoltre provoca la diminuzione della produzione e del

contenuto di grassi nel latte (Józwik et al., 2012). Inoltre, il livello di ROS regola la differenziazione delle cellule epiteliali mammarie, che sono direttamente correlate alla riduzione della produzione di latte (Baratta et al., 2019).

Gli animali sotto stress ossidativo hanno bisogno di un'integrazione di minerali e vitamine coinvolti nel sistema antiossidante (Osorio et al., 2016), come ad esempio l'apporto di donatori di metile (Zhou et al., 2016), i quali potrebbero essere una strategia efficace per ridurre gli effetti negativi dello stress sulla produttività animale e sulla sintesi dei componenti del latte.

La misurazione delle prestazioni produttive fa parte della routine quotidiana degli allevatori. Gli indicatori chiave relativi alla produzione, come la quantità e la qualità del latte (proteine, grassi, caseina, lattosio e solidi totali) possono essere misurati automaticamente da analizzatori del latte incorporati nelle sale di mungitura (Kendal et al., 2006). Ciò consente teoricamente agli allevatori di valutare l'impatto dello stress da calore sugli animali dato che tali indicatori, come evidenziato in precedenza, sono strettamente correlati allo stress da calore.

2.3.3. Influenza sulla Prole

L'esposizione allo stress termico durante la tarda gestazione può compromettere lo sviluppo mammario prima del parto, il che si traduce in una minore produzione nella successiva lattazione (Tao e Dahl, 2013). Studi recenti (Dahl et al., 2017; Laporta et al., 2020) hanno dimostrato che lo stress da calore subito a tarda gestazione, influisce sulla successiva produzione di latte sia della madre che della figlia. Le vacche nate da madri che hanno subito stress da caldo durante le ultime 6 settimane di gestazione hanno prodotto il 19% di latte in meno rispetto a vacche nate da animali in aziende dove il caldo è stato mitigato in maniera corretta durante la gestazione avanzata (Dahl et al., 2017). Inoltre, è stato riscontrato che questi effetti potrebbero essere anche trasmessi attraverso le generazioni (Laporta et al., 2020).

2.4. Riproduzione

La ridotta fertilità durante il periodo estivo è associata a cambiamenti fisiologici dovuti all'esposizione al caldo estremo. Tali cambiamenti possono avere effetti negativi immediati e anche duraturi sulla riproduzione.

Lo stress da calore, infatti, influisce sulla disposizione della vacca a mostrare un comportamento estrale naturale, riducendo sia la durata che l'intensità dell'espressione estrale (Orihuela, 2000; Santos et al., 2017), ed è responsabile di una diminuzione dal 20 al 30% dei tassi di concepimento (De Rensis et al., 2003). Inoltre, la riduzione della fertilità durante il periodo estivo è spiegata anche dalla minor qualità degli ovociti, dalla morte embrionale precoce, dalla disfunzione dell'endometrio e dalla ridotta spermatogenesi nei tori (Silanikove, 2000; Roth et al., 2001).

2.4.1. Conseguenze sugli Ovociti

La diminuzione del tasso di concepimento è dovuta in parte agli effetti negativi del calore sugli ovociti (Ealy et al., 1993; Ferreira et al., 2011; Hansen et al., 1999; Rot et al., 2008; Sakatani et al., 2012). Maya Soriano et al. (2013) hanno constatato che gli ovociti bovini prodotti durante i mesi più caldi presentano una migliore resistenza al calore e sono meno suscettibili agli effetti negativi indotti dallo stress termico rispetto a quelli prodotti durante stagioni più fresche. Tuttavia, Baruselli et al. (2020) hanno riferito che dopo la fecondazione in vitro, gli ovociti raccolti da animali nei mesi estivi avevano una minore capacità di svilupparsi in blastocisti rispetto a quelli raccolti durante la stagione fredda.

Gli effetti sulla riproduzione causati dallo stress da caldo si riscontrano anche nel periodo autunnale.

Al termine dell'estate le temperature subiscono un abbassamento, rientrando nel range ottimale degli animali, tuttavia la fertilità continua ad essere compromessa. Questo accade perché sono necessari circa 40-50 giorni affinché nuovi follicoli si sviluppino e che rilascino nuovi ovuli (Lussier et al., 1987; Rot et al., 2001). Le vacche che vengono inseminate quando sono ancora presenti ovociti o follicoli che hanno subito stress termico, sperimenteranno una ridotta fertilità e avranno meno possibilità di sviluppare un embrione sano.

Per aumentare il tasso di concepimento, è necessario mitigare adeguatamente la temperatura degli animali durante il periodo di asciutta (cioè, alla fine della gestazione), in modo da ridurre gli effetti dannosi dello stress da caldo sul follicolo contenente l'ovocita (Negrón-Pérez et al., 2019).

Un'altra strategia che può essere attuata è l'uso di protocolli di pre-sincronizzazione per promuovere il ricambio follicolare tramite l'induzione dell'ovulazione. Questa pratica aiuta a liberare l'ovaio dai follicoli e dagli ovociti danneggiati prima dell'inseminazione.

2.4.2. Embrioni

Il trasferimento di embrioni in vitro può aggirare il danno provocato dalle alte temperature all'ovocita. Gli embrioni possono essere prodotti in vivo durante i mesi più freddi, quando la qualità degli ovociti è più elevata, recuperati e infine trasferiti alle vacche riceventi durante l'estate.

Il tasso di successo del trasferimento di embrioni è migliorato negli ultimi anni, infatti, durante l'estate, l'impianto di embrioni che non hanno subito stress, aumenta i tassi di concepimento dal 9 al 15% rispetto all'inseminazione artificiale (Putney et al., 1989; Demetrio et al., 2007).

La produzione e il trasferimento di embrioni, però, è un processo costoso e molto spesso non è giustificato economicamente (Ferreira et al., 2021).

2.4.3. Concepimento nei Mesi Estivi

Sono stati osservati effetti negativi a lungo termine negli animali concepiti durante i mesi estivi.

Pinedo e De Vries (2017) hanno dimostrato che le vacche concepite durante l'estate hanno minori probabilità di sopravvivere ad un secondo parto, intervalli parto-concepimento più lunghi e producono meno latte rispetto alle vacche concepite durante stagioni più miti.

Inoltre, DuBois e Williams (1980) hanno constatato che la probabilità che avvenga la ritenzione della placenta nei mesi più caldi è doppia rispetto al periodo invernale.

2.4.4. Modelli di Parto

Alcune ricerche (West, 2003) hanno dimostrato come una ridotta produzione di latte potrebbe comportare anche una ridotta produzione di calore metabolico, offrendo vantaggio alle vacche a fine ciclo produttivo. Gli animali in asciutta, inoltre, non devono sopperire alle dispendiose richieste energetiche relative alla produzione di latte, potendo così concentrare le energie per contrastare il caldo in modo più efficiente. Per avere maggiore benessere nella mandria quindi, tutti gli animali dovrebbero trovarsi in uno stato avanzato del ciclo produttivo durante il periodo estivo.

Essendo lo stress da caldo, infatti, un evento che si verifica solamente nei mesi più caldi, si può ipotizzare l'utilizzo di modelli di parto stagionali, tramite sincronizzazione dell'ovulazione degli animali; l'uso di tali modelli, però, porta ad avere una produzione di latte stagionale (Ferreira et al., 2020, 2021). Pertanto, se non si ha la necessità di avere una quota di latte più o meno omogenea durante l'anno, il parto stagionale può essere una delle migliori strategie di gestione dell'allevamento, perché oltre ad avere animali meno predisposti a subire gli effetti dello stress da caldo, si otterrà anche una maggiore produzione.

2.4.5. Inseminazione Naturale

Gli effetti dannosi dello stress da caldo sulla fertilità si osservano anche sui tori utilizzati per la riproduzione naturale. In particolare, si verifica una diminuzione della concentrazione degli spermatozoi e della loro motilità, di pari passo con un aumento della percentuale di spermatozoi morfologicamente anormali (Malama et al., 2017; Sabés-Alsina et al., 2017; Rahman et al., 2018; Lucio et al., 2016).

Alcuni di questi effetti permangono nel tempo, dato che la qualità del seme non torna alla normalità fino a che non sono maturati gli spermatozoi di un nuovo ciclo (2 mesi circa).

Effettuare spesso controlli dello sperma è importante per avere le informazioni necessarie in modo che si possa valutare l'utilizzo o meno del toro da monta durante i mesi estivi.

La decisione migliore su quali strategie attuare per ridurre gli effetti dannosi del caldo sulla fertilità non è semplice data la complessità dell'argomento; è necessario studiare a fondo i parametri degli animali e ambientali, in modo da scegliere le migliori pratiche gestionali (Ferreira et al., 2021).

2.4.6. Periodo di Asciutta

Attenuare gli effetti dello stress da caldo durante il periodo di asciutta degli animali gravidi può risultare vantaggioso sia per la madre che per il vitello in via di sviluppo. L'esposizione a fattori di stress materni, infatti, potrebbe avere conseguenze per tutta la vita della prole, impedendo la piena espressione del potenziale genetico del nascituro.

Le vacche in asciutta che subiscono condizioni di stress da caldo consumano meno sostanza secca, inoltre, viene ridotto l'assorbimento di glucosio e di aminoacidi da parte del feto, dato che tali nutrienti vengono impiegati dalla madre per contrastare il caldo; tutto questo può limitare la crescita fetale, portando a un peso dei vitelli alla nascita inferiore (de Vrijer et al., 2004; Reynolds et al., 1985). Il ritardo della crescita intrauterina potrebbe derivare anche dal fatto che la madre, per dissipare meglio il calore, concentra il sangue alla periferia del proprio corpo, riducendo così il flusso sanguigno destinato alla placenta. (Thomson et al., 2013).

In diversi studi, gli animali che sono stati correttamente gestiti dal punto di vista termico negli ultimi 60 giorni di gravidanza, danno alla luce vitelli più pesanti, migliorano le risposte immunitarie e aumentano la produzione di latte (Do Amaral et al., 2009; Thomson et al., 2012; Tao e Dahl, 2013).

2.4.7. Immunità Trasmessa

Lo stress da calore prenatale compromette il trasferimento passivo delle immunoglobuline colostrali al neonato. I vitelli nati da madri che hanno subito stress da calore e nutriti con colostro delle rispettive madri presentano un'efficienza ridotta nell'assorbimento delle immunoglobuline rispetto a vitelli nati da animali gestite correttamente (Tao et al., 2012; Laporta et al., 2017). Monteiro et al. (2014) hanno dimostrato che lo stress da caldo non provoca una riduzione della qualità del colostro, ma altera la capacità del vitello di acquisire le immunoglobuline; in questo modo, il vitello non sarà in grado di sviluppare a pieno le difese immunitarie, riducendo così la probabilità di sopravvivenza durante il periodo postnatale.

3. STRATEGIE GESTIONALI PER RIDURRE GLI EFFETTI

Date le grandi preoccupazioni economiche provocate dallo stress da caldo nei confronti della produzione lattiero-casearia, è bene cercare di limitarne i danni il più possibile.

Le strategie di mitigazione che potrebbero venire attuate vengono suddivise in base all'aspetto genetico, alimentare e strutturale, inoltre possono essere classificate in base alla durata dell'investimento effettuato. Le strategie a breve termine riguardano principalmente la formulazione di una razione alimentare adeguata; mentre gli approcci a lungo termine si basano principalmente su investimenti, anche importanti, nella valutazione dello stress da caldo e negli ausili per il raffreddamento.

3.1. Genetica

La selezione genetica per un'elevata produzione di latte ha ridotto la tolleranza al calore tra i bovini; l'identificazione di animali resistenti al caldo all'interno di razze ad alta produzione potrebbe quindi risultare molto utile per poter avere una mandria tollerante al caldo eccessivo.

Oltre all'identificazione dei soggetti termotolleranti, un altro approccio potrebbe essere basarsi sulle differenze nelle caratteristiche anatomiche e morfologiche, come la presenza di peli lisci, non troppo fitti, e mantello con colorazione chiara, che in parte spiegano la capacità di tolleranza al calore tra specie e razze (West et al., 2003; Collier et al., 2008; Dikmen et al., 2009; Gaughan et al., 2009).

3.1.1. Genomica

La selezione genomica utilizza una popolazione di riferimento che presenta fenotipi di interesse (nota come popolazione genomica di riferimento) per sviluppare equazioni di previsione genomica.

Ci sono diverse strategie che possono essere prese in considerazione per trasmettere tolleranza al calore. Queste includono:

- 1) scelta della razza o incrocio
- 2) criteri di selezione associati alla tolleranza al calore
- 3) introgressione di geni associati alla termotolleranza

1) Scelta della razza o utilizzo di incroci

È ampiamente riconosciuto che la sottospecie *Bos indicus* presenta una tolleranza maggiore alle temperature elevate rispetto a *Bos taurus*. Questa differenza può offrire opportunità per poter migliorare le prestazioni dei bovini da latte ad alta produzione.

Block et al. (2002), Eberhardt et al. (2009), Satrapa et al. (2011) hanno descritto l'influenza della razza del padre e della madre sulla tolleranza al calore degli embrioni bovini, confrontando embrioni di razza *Bos indicus* (Nelore e Brahman), di *Bos taurus* (Angus e Holstein) e di origine ibrida, esponendoli per 12 ore a 41°C. Nel complesso, gli embrioni di *Bos indicus* hanno mostrato risultati più soddisfacenti rispetto a *Bos taurus* e agli ibridi. Dopo l'esposizione allo shock termico, infatti, la riduzione del tasso di formazione di blastocisti era al massimo del 15% per gli embrioni di *Bos indicus*, dal 17 al 30% per gli incroci (madre *indicus* × padre *taurus*) embrioni, dal 30 al 40% per gli incroci (madre *taurus* × padre *indicus*) e dal 45 al 75% per gli embrioni di *Bos taurus* (Block et al., 2002; Eberhardt et al., 2009; Satrapa et al., 2011). Ciò suggerisce che negli incroci la razza della madre ha un'influenza maggiore rispetto alla razza del padre nel conferire tolleranza al caldo all'embrione risultante. All'interno di un allevamento tradizionale, tuttavia, è più semplice e rapido cambiare la razza del padre piuttosto che cambiare la razza della madre.

Utilizzare comunque tori della sottospecie *Bos indicus* potrebbe essere un approccio per migliorare la tolleranza al caldo complessiva della mandria. Tuttavia non sono animali adatti alle alte produzioni, quindi impiegarli per la rimonta della mandria sarebbe svantaggioso. Una soluzione potrebbe essere di inseminare le vacche con *Bos indicus* solamente d'estate in modo da avere una maggiore probabilità di gravidanze, aumentando così la redditività della mandria.

2) criteri di selezione associati alla tolleranza al calore

Come visto in precedenza, l'incrocio degli animali con *Bos indicus* non è sempre la scelta migliore dato che non possiedono elevate doti produttive. Un'alternativa potrebbe essere selezionare nella zona d'allevamento gli animali acclimatati alle condizioni meteorologiche di quel clima specifico. Sfortunatamente sarebbe difficile, se non impossibile, identificare in modo accurato gli individui che sono acclimatati alle temperature regionali e che hanno anche un alto valore genetico.

Risultati simili potrebbero essere raggiunti attraverso previsioni genomiche basate su marcatori del DNA presenti in animali resistenti al calore (Carabaño et al., 2019).

3) Introggressione di locus utili che aumentano la tolleranza al calore.

L'introggressione, o ibridazione introggressiva, può essere definita come l'incorporazione permanente in un animale di geni con effetto noto, provenienti da una razza completamente diversa. Questo processo, però, richiede diverse generazioni di incroci, risultando quindi lungo e inefficiente.

Un gene specifico che è noto per migliorare la regolazione della temperatura corporea è il gene SLICK (Olson et al., 2003; Mariasegaram et al., 2007). Gli animali che portano questo gene dominante presentano peli più corti, meno follicoli piliferi e hanno ghiandole sudoripare più grandi, che si traduce in una migliore termoregolazione corporea (Landaeta-Hernández et al., 2011). Ulteriori parametri sono attualmente in corso di studio per identificare altri vantaggi che il gene SLICK conferisce in condizioni di stress da caldo e per determinare come questo tratto potrebbe essere incorporato negli animali.

L'editing genetico si presenta come un'alternativa più rapida all'introggressione ed è particolarmente utile per introdurre con precisione singoli alleli da razze tolleranti al caldo eccessivo (Van Eenennaam, 2019).

È probabile che un approccio che riesca a combinare la genomica e le misure più recenti di tolleranza al calore sia una delle migliori strategie per contrastare gli effetti dello stress da caldo.

3.2. Alimentazione

Per compensare la ridotta assunzione di cibo causata dal caldo eccessivo è necessario aumentare la parte energetica della dieta. Tuttavia, come visto in precedenza, questa pratica deve essere condotta con attenzione, in quanto questo tipo di dieta può causare acidosi. Per questo sono stati studiati una serie di alimenti ed integratori che potrebbero aiutare gli animali a superare tale situazione.

3.2.1. Grasso Alimentare

Durante lo stress da caldo si verifica una riduzione significativa dell'assunzione di razione alimentare nelle vacche da latte, questo implica che gli animali non riescono ad assumere energia sufficiente per supportare l'elevato carico metabolico. L'approccio tradizionale a questo problema è l'integrazione di grassi aggiuntivi alla dieta per migliorare il deficit energetico e ridurre la termogenesi (il grasso, infatti, genera un incremento di calore inferiore rispetto a carboidrati o proteine) (Wang et al., 2010). Nello specifico, Drackley et al. (2003) hanno riportato che un supplemento del 3% di grassi può risultare molto utile come supporto agli animali nel periodo estivo.

Sostituendo i carboidrati fermentescibili con acidi grassi saturi si riesce a risparmiare una notevole quantità di calore metabolico. Il grasso di pesce idrogenato è un tipo di grasso alimentare che riesce a bypassare il rumine, risultando quindi molto efficiente. L'integrazione di 200 g/vacca/giorno di grasso di pesce idrogenato alle vacche da latte "Holando Argentino" in estate ha prodotto un aumento significativo della produzione da 23,9 a 26,4 l/vacca, oltre a miglioramenti nel contenuto di proteine e grassi del latte (Gallardo et al., 2001).

L'integrazione di grassi alimentari, inoltre, può migliorare le risposte immunitarie delle vacche esposte a stress da caldo. Implementando nella dieta i semi di lino interi, si è aumentato il livello di immunoglobuline, migliorando quindi le risposte immunitarie degli animali.

3.2.2. Fibra Alimentare

Un'altra strategia per compensare la mancanza di energia delle vacche da latte in lattazione consiste nell'aumentare l'apporto energetico sostituendo il foraggio grezzo con NDF (fibra al detergente neutro), più facilmente digeribile. La fibra alimentare di alta qualità tende a migliorare la digeribilità e l'appetibilità della razione, stimolando quindi l'assunzione di cibo. Halachmi et al. (2004) hanno valutato gli effetti del comportamento alimentare e della produttività nelle vacche da latte Holstein sostituendo il foraggio grezzo con bucce di soia, fonte di fibre facilmente digeribili. Nello specifico, il 16,5% di insilato di mais è stato sostituito con lolla di soia, riducendo l'NDF da foraggio grezzo dal 18 al 12%, aumentando così la digeribilità, portando la produzione di latte da 36,3 a 38,5 kg/giorno.

La polpa di barbabietola potrebbe essere una fonte alternativa alla soia, dato che contiene un'elevata percentuale di NDF digeribile. Naderi et al. (2016) hanno studiato l'effetto di tale alimento sugli animali, constatando che potrebbe a sostituire fino al 75% del contenuto di insilato di mais nella dieta; infatti, la polpa di barbabietola tende a ridurre il pH medio del rumine, perciò è un alimento da non utilizzare in oltranza. Complessivamente la sostituzione dell'insilato di mais con la polpa di barbabietola nella dieta delle vacche da latte stressate dal calore ha portato la produzione di latte da 38,5 a 40,9 kg/giorno, con maggior contenuto di proteine e di lattosio.

3.2.3. Integratori

È stato dimostrato che l'aumento delle concentrazioni nella dieta di specifiche vitamine, minerali, antiossidanti e altri nutrienti migliora alcuni aspetti della risposta fisiologica allo stress da calore. L'aggiunta di acidi grassi saturi, glutammina, cromo, e altri integratori alle diete delle vacche da latte hanno avuto un risvolto positivo per quanto riguarda la produzione (Soltan, 2010; Wang et al., 2010; Boyd et al., 2011; Caroprese et al., 2013).

3.2.4. Minerali

Le risposte fisiologiche allo stress da calore implicano un aumento delle escrezioni di liquidi corporei, causando quindi la perdita di minerali essenziali per l'organismo; è necessario, pertanto, integrare oligoelementi alla dieta per far fronte alle maggiori perdite corporee.

Il cromo (Cr) è ampiamente utilizzato fisiologicamente in numerosi stati di ossidazione.

L'aggiunta di 4 g/giorno di lievito di Cr ha aiutato ad aumentare l'assunzione della razione e la produzione di latte nelle vacche Holstein stressate dal caldo da 29,87 a 33,24 kg/giorno (Al-Saiady et al., 2004); inoltre il cromo agisce come agente antinfiammatorio (Zhang et al., 2014a)

Il selenio (Se) ristabilisce l'equilibrio redox e del metabolismo con conseguente miglioramento della funzione immunitaria, della qualità del latte e degli animali (Sejian et al. 2012).

Lo zinco (Zn) è un micronutriente che può migliorare l'integrità epiteliale del tessuto mammario. Weng et al. (2018) hanno dimostrato che l'aggiunta di 35 mg/kg di idrossicloruro di Zn e di 40 mg/kg del complesso Zn-Met alla dieta di vacche Holstein andava ad aumentare l'espressione di E-caderina nel tessuto mammario, migliorando così l'integrità dell'epitelio mammario.

L'integrazione di propionato potrebbe risultare utile agli animali poiché viene principalmente convertito in glucosio nel rumine con l'efficienza del 30%, fornendo così un supplemento di energia prontamente disponibile (Leng et al., 1967; Melendez et al., 2003).

I bicarbonati (HCO_3), grazie alle proprietà tampone, possono aiutare in modo significativo gli animali a superare la condizione di acidosi, aumentando il pH ruminale (Erdman, 1988).

Inoltre, tracce di minerali come Mn, Mo, e P, hanno influito positivamente sullo stato metabolico sulla salute generale delle vacche (Bicalho, 2014).

3.2.5. Vitamine

Le vitamine agiscono come cofattori enzimatici (coenzimi), sono essenziali per la crescita e lo sviluppo dell'organismo, infatti partecipano ad una moltitudine di reazioni metaboliche come catalizzatori.

Lawrence et al. (2004) hanno dimostrato che la vitamina A potrebbe aiutare lo sviluppo degli ovociti in blastocisti quando inibiti da temperature elevate.

Inoltre, l'integrazione di vitamina A durante il periodo del postpartum potrebbe aumentare l'immunità e migliorare le prestazioni riproduttive delle vacche da latte stressate dal caldo (De et al., 2014).

Lo stress da calore, come visto in precedenza, può causare stress ossidativo, portando gli animali ad avere una minor concentrazione di vitamina C (possiede effetto antiossidante).

Padilla et al. (2006) hanno dimostrato questo fenomeno, tuttavia non è chiaro se la carenza di vitamina C influisca negativamente sulla produttività e sulla salute delle vacche; sono necessari ulteriori studi per capire se è necessario integrare o meno tale vitamina alla dieta.

L'integrazione di vitamina B3 (niacina) induce una maggiore vasodilatazione cutanea con conseguente aumento del flusso sanguigno sulla superficie del corpo, aumentando così lo scambio di calore per convezione (Di et al., 1997).

3.2.6. Estratti Vegetali

Negli ultimi anni si sono studiate le proprietà di estratti vegetali dietetici aventi elevato valore nutritivo e medicinale per poter migliorare la produzione delle vacche da latte. Particolari estratti vegetali, inoltre, possono migliorare gli effetti negativi dello stress da caldo nelle vacche.

La radice di bupleuro è ampiamente nota nella medicina popolare orientale; Pan et al. (2014) hanno valutato gli effetti di tale radice integrando 0,5 g/kg di razione nella dieta di vacche da latte Holstein sottoposte ad elevate temperature. Durante la prova si è notato un abbassamento della frequenza

respiratoria media (60,3 contro 71,4 respiri/min) e della temperatura rettale (39,0 contro 39,3 °C), inoltre la produzione di latte è passata da 31,6 kg/giorno a 33,4 kg/giorno.

Complessivamente, l'aggiunta di soli 0,25 g/kg di estratto di radice alla dieta potrebbe mitigare gli effetti delle elevate temperature sugli animali; la diminuzione della temperatura corporea è dovuta alle proprietà della radice che favorisce la vasodilatazione e quindi una migliore dissipazione del calore.

Zhang et al. (2014) hanno constatato che la somministrazione di 15 g/giorno di betaina (sostanza estratta dalle barbabietole da zucchero) alle vacche da latte Holstein influisce sia sulla produzione di latte (da 27,70 a 29,16 kg/giorno) che sulla qualità, tramite un aumento di lattosio e delle proteine nel latte.

Di questi additivi, alcuni sono stati testati come meccanismo per migliorare anche la fertilità compromessa dalle alte temperature, uno tra questi è la melatonina.

La melatonina ha molte proprietà, inclusa una potente attività antiossidante (Cebrian-Serrano et al., 2013); è stato dimostrato, infatti, che l'integrazione di metionina nella dieta delle vacche stressate dal calore aiuta a mantenere la ghiandola mammaria sana, migliora la funzione ovarica e accorcia l'intervallo parto-concepimento (Nikkhah et al., 2013; Zhou et al., 2016; Batistel et al., 2017).

Sfortunatamente, nessuno di questi integratori può portare tutti gli aspetti di produzione o di riproduzione a livelli normali. Ciò è probabilmente dovuto alla miriade di adattamenti fisiologici che influenzano il metabolismo del corpo degli animali. È evidente che nessuna strategia utilizzata singolarmente può contrastare gli effetti dannosi dello stress da caldo, tuttavia con la combinazione di più approcci si possono ottenere risultati ragionevoli anche in condizioni di stress.

3.2.7. Alimentazione Notturna

Un approccio relativamente semplice per migliorare il benessere e la produzione delle vacche che subiscono stress da calore consiste nello sfruttare le ore più fresche della giornata per alimentare gli animali, con l'intento di ridurre la produzione di calore metabolico nelle ore più calde.

Calamari et al., (2013) hanno dimostrato come la temperatura rettale e la frequenza respiratoria dei bovini potrebbero essere ridotti semplicemente fornendo la razione alimentare alla sera o al mattino. Tuttavia Niu e Harvatine (2018) hanno dimostrato in uno studio come l'alimentazione notturna potrebbe ridurre la digeribilità degli alimenti; questa indagine però richiede ulteriori ricerche per poter confermare quanto detto.

3.3. Strutture

Per ottenere una produzione ottimale, le vacche da latte, sia in lattazione che in asciutta, dovrebbero poter contrastare il caldo e l'umidità. I metodi strutturali più pratici e diffusi per alleviare gli effetti negativi dello stress da caldo si possono suddividere in tre categorie: creazione di zone d'ombra, ventilazione e raffreddamento (Collier et al., 2006; Rot, 2020).

Questi metodi possono essere presi in considerazione singolarmente o in combinazione.

I benefici associati al raffreddamento delle vacche variano a seconda del tempo in cui gli animali sono sottoposti a tali metodi.

Oltre a fornire sollievo attraverso strutture e impianti di ventilazione/refrigerazione, è necessario che le vacche possano sempre avere a disposizione una fonte d'acqua potabile fresca e pulita.

Quando gli animali subiscono stress da caldo dissipano il calore attraverso la respirazione e la sudorazione, andando ad aumentare, di conseguenza, il consumo d'acqua. Se l'approvvigionamento idrico è inadeguato, le vacche utilizzano l'acqua nei processi fisiologici coinvolti nella dissipazione del calore piuttosto che nella produzione di latte. Potrebbe essere necessario quindi fornire ulteriori fonti d'abbeveramento temporanee per consentire l'accesso all'acqua costantemente a tutti gli animali, in modo da ridurre al minimo gli effetti negativi del calore.

3.3.1. Ombreggiatura

Fornire copertura d'ombra nelle aree adibite al pascolo è una misura essenziale nelle ore più critiche della giornata. La presenza di molti alberi, distribuiti lungo l'appezzamento, è un buon metodo per alleviare lo stress da caldo dato che le strutture artificiali necessitano di investimenti e manutenzione. Tuttavia, se non sono presenti ripari di origine naturale, le strutture artificiali temporanee o permanenti possono fornire la copertura necessaria per mitigare gli effetti della radiazione solare. L'orientamento delle strutture è molto importante e deve essere sempre considerato prima della costruzione (Toledo et al., 2019).

Kendal et al. (2006) hanno constatato che l'abbassamento della temperatura del corpo degli animali, derivante dalla presenza d'ombra, risulta essere quasi irrilevante rispetto agli effetti derivanti dal raffreddamento notturno. È stato riscontrato che, sebbene l'ombreggiatura protegga gli animali dalle radiazioni solari, si verifica una riduzione della temperatura corporea di solamente 0,2°C.

3.3.2. Raffreddamento Conduttivo

Un approccio totalmente diverso che si sta affermando negli ultimi anni si basa sul raffreddamento conduttivo. Questo tipo di raffreddamento comporta lo scambio di calore attraverso il contatto diretto tra l'animale e una superficie, purché l'area a contatto con la pelle abbia una temperatura inferiore a quella corporea. (Gebremedhin et al., 2016).

Sono stati studiati gli effetti del raffreddamento conduttivo attraverso lettiere costituite da sabbia, ottenendo buoni risultati (Radon et al., 2014). Questo tipo di modello presuppone che la stalla non sia sovraffollata in modo che, quando un animale si alza, la sabbia possa raffreddarsi in tempo e risultare efficiente.

Alcuni studi hanno valutato l'utilizzo di acqua refrigerata per il raffreddamento delle cuccette.

Perano et al. (2015) hanno sviluppato un sistema di raffreddamento conduttivo facendo circolare acqua refrigerata attraverso tubazioni poste all'interno delle cuccette, ottenendo buoni risultati, se non fosse per i costi elevati d'impianto.

Altri studi hanno osservato le preferenze degli animali sulla scelta del substrato dove sdraiarsi.

Uzal Seyfi (2013) ha notato che le vacche per riposare preferivano usare le aree adibite al pascolo invece della stalla coperta. Le vacche prediligono zone asciutte, comode e in ombra, anche se non è chiaro se questa preferenza sia correlata allo stress da calore.

Gli animali sotto stress da calore molto spesso cercano in tutti i modi di trovare sollievo dalle alte temperature. Herbut e Angrecka (2018) hanno notato che quando il THI è elevato, gli animali

tendono a sdraiarsi nella corsia di pulizia del letame, utilizzandolo apparentemente come un modo per rinfrescarsi; tuttavia, quando il letame sulla pelle si secca non fornisce più sollievo e limita lo scambio di calore tra la pelle e l'aria, senza contare che la scarsa igiene aumenta il rischio d'insorgenza di malattie, come le mastiti.

3.3.3. Ventilazione e Raffrescamento Evaporativo

Un altro fattore molto importante per poter alleviare lo stress da calore è il movimento dell'aria. L'aumento del flusso d'aria è una componente essenziale per lo scambio di calore con il corpo dell'animale e per allontanare l'umidità in eccesso, rendendo più efficiente l'evaporazione del sudore.

Il movimento dell'aria può essere naturale o indotto artificialmente tramite l'uso di ventilatori; per avere una buona efficienza, la struttura dove alloggiare gli animali deve possedere ampie aperture in modo da massimizzare il flusso d'aria sia in entrata che in uscita.

In associazione con i ventilatori possono venire utilizzati anche sistemi che inumidiscono il corpo degli animali. Questa combinazione favorisce l'evaporazione ottimale dell'acqua dalla pelle e dal pelo, infatti le vacche vengono raffreddate trasferendo il calore corporeo alle goccioline d'acqua che evaporano. Tramite il flusso d'aria forzato si allontana l'eccesso di umidità che si va a formare attorno agli animali in modo da non interrompere il processo.

Principalmente vengono utilizzati due sistemi di inumidimento:

- I sistemi di nebulizzazione, che si basano sulla formazione di piccole goccioline d'acqua (circa 10 micron se ad alta pressione, altrimenti di 200 micron) le quali evaporano rapidamente grazie al calore ambientale, raffreddando così l'aria attorno agli animali (Mistafog, 2019).
- I sistemi sprinkler, che spruzzano gocce d'acqua più grandi rispetto ai nebulizzatori, bagnando il pelo degli animali; in seguito, tramite il calore corporeo, le gocce evaporano, rinfrescando così la pelle.

I sistemi sprinkler sono più adatti ad essere installati dove si hanno condizioni di elevata umidità dell'aria, dato che i sistemi di nebulizzazione si basano sulla capacità dell'ambiente di far evaporare l'acqua (Collier et al., 2006). Uno dei vantaggi dei sistemi a nebulizzazione riguarda il fatto che il consumo d'acqua è molto inferiore rispetto a sistemi a spruzzo. Tuttavia c'è il rischio che si vada ad aumentare in modo eccessivo l'umidità ambientale, causando problemi di salute come mastiti e

zoppie, oltre ad eventuali malattie respiratorie, soprattutto se l'area di riposo è bagnata (Nienaber & Hahn, 2007).

In genere i sistemi di irrigazione non vengono installati nelle zone a riposo (Martin et al., 2012) per evitare di bagnare la lettiera. Inoltre, sia i ventilatori che i nebulizzatori dovrebbero attivarsi in base alla temperatura rilevata e aumentare la frequenza di funzionamento man mano che la temperatura aumenta.

Mader et al. (2007), tuttavia, hanno notato che gli animali abituati ad essere bagnati con i sistemi sopra menzionati sarebbero più suscettibili allo stress da calore quando questi non venivano più azionati. Ciò implica che la loro tolleranza alle temperature elevate potrebbe essersi indebolita rispetto ad animali che non hanno ricevuto tale trattamento.

3.3.4. Ventilazione a Tunnel

Le stalle che utilizzano la ventilazione a tunnel presentano una serie di ventilatori ad alta potenza posti in uno dei due lati più corti dell'edificio, distribuiti lungo tutta la parete. Questo tipo di ventilatori risucchiano l'aria dall'interno della stalla, movimentandola orizzontalmente in modo da creare un "effetto vento" che raffredda gli animali oltre a rimuovere l'umidità (Toledo et al., 2019). Perché questo sistema sia efficace, la struttura deve avere pareti chiuse (tranne il lato opposto ai ventilatori) e il tetto ribassato, in modo da garantire un flusso d'aria ottimale.

Uno studio ha confrontato le prestazioni delle vacche da latte con i due sistemi di ventilazione, constatando che le temperature rettalì sono risultate più basse negli animali raffreddati con ventilazione a tunnel rispetto a quelli raffreddati nelle stalle aperte, con ventilatori e nebulizzatori (Dikmen et al., 2020).

Indipendentemente dalla configurazione del sistema di ventilazione della stalla, mantenere un'adeguata velocità dell'aria vicino agli animali è importante per poter contrastare le alte temperature (Shoshani & Hetzroni, 2013).

3.3.5. Raffreddamento Notturmo

Per poter risparmiare sui costi di raffreddamento si potrebbe ipotizzare di non azionare i sistemi di mitigazione durante la notte, essendoci una temperatura considerata più accettabile. Tuttavia questa strategia è alquanto controintuitiva; un recente studio ha dimostrato, infatti, che la temperatura corporea minima raggiunta giornalmente influisce maggiormente sulla produzione di latte rispetto alla temperatura massima giornaliera (Spiers et al., 2018).

Gli animali raffreddati solamente nelle ore notturne hanno diminuito la produzione di latte dell'1,66%, rispetto a una riduzione del 6,81% per le vacche raffreddate solamente durante il giorno.

Una considerazione importante per comprendere questa relazione è il fatto che i bovini da latte sottoposti ad elevate temperature consumano la stragrande maggioranza della razione alimentare durante le ore notturne (Mallonée et al., 1985). Di conseguenza, il raffreddamento notturno porterebbe gli animali ad un consumo maggiore di cibo. Ciò sottolinea ulteriormente i potenziali vantaggi dell'alimentazione serale discussi in precedenza.

3.3.6. Manze e Vacche in Asciutta

È importante sottolineare che le vacche in asciutta e le manze in età riproduttiva non devono essere assolutamente trascurate per quanto riguarda la mitigazione dallo stress da caldo.

I tassi di concepimento estivi, infatti, potrebbero essere migliorati tramite un adeguato raffreddamento, passando anche dal 23,3% al 56,7% (Moghaddam et al., 2009).

Il raffreddamento delle vacche in asciutta inoltre è considerato molto importante dato che gli animali in questa fase produttiva sono sottoposti a pesanti stress fisiologici associati alla gestazione e alla successiva lattazione (Collier et al., 1982a,b; Wolfenson et al., 1988; Avendaño-Reyes et al., 2010; Dahl et al., 2017).

3.3.7. Confronto tra Sistemi di Raffreddamento

Diversi studi hanno esaminato gli effetti dei sistemi di mitigazione tramite evaporazione (ventilatori con sprinkler o nebulizzatori) rilevando un aumento della produzione di latte di 0,6 fino a 7,7 kg al giorno per vacca.

Il raffreddamento conduttivo, utilizzando cuccette raffreddate ad acqua, ha migliorato la produzione di latte fino a 2,1 kg al giorno per vacca.

I sistemi di raffreddamento che si basano solamente su ventilatori e ombra, invece, sono stati meno efficaci, migliorando la produzione di latte solamente di 0,4, massimo 0,8 kg al giorno di latte per vacca (Grant, 2012).

Tuttavia, come detto in precedenza, l'utilizzo dell'acqua nei vari sistemi di raffreddamento comporta dei costi, a volte non indifferenti.

3.3.8. Ritorni Economici dai Sistemi di Raffreddamento

Diversi studi hanno concluso che i ventilatori, associati a meccanismi di bagnatura, sono un buon investimento per il raffreddamento delle vacche. Dhuyvetter et al. (2000) hanno utilizzato i dati di due aziende agricole ad alta produzione in Kansas, dimostrando un aumento del 6% della produzione di latte durante i mesi in cui si verificava il problema dello stress da caldo (da luglio a novembre) tramite un sistema di raffreddamento costituito da ventilatori e sprinkler posti nella zona di alimentazione. Hanno concluso che se un allevamento investisse per il raffreddamento di tutti gli animali in lattazione, prevenendo il 25% delle perdite di latte durante i mesi più critici, il rapporto costi/benefici sarebbe di quasi 0,5; quindi, da 1\$ speso per il raffreddamento se ne andranno a ricavare 2\$. Questo rapporto potrebbe scendere a 0,125 se fosse possibile impedire tutte le perdite di produzione.

Perano et al. (2017) hanno realizzato un confronto economico tra diverse strategie di mitigazione: l'uso di soli ventilatori, l'uso di un sistema di nebulizzazione, ventilatori associati a nebulizzatori ed infine un sistema di raffreddamento delle cuccette associato a ventilatori.

Lo studio ha ipotizzato che le vacche si trovassero in un clima con almeno 180 giorni all'anno in cui il THI raggiungeva valori compresi tra 80 e 85 per almeno 2 ore al giorno.

Per prevedere la variazione della produzione di latte, Perano et al. (2017) hanno utilizzato la variazione della temperatura corporea interna dovuta ai diversi sistemi di raffreddamento per poter ricavare i dati di produzione, in base alla relazione stabilita da Spiers et al. (2004) e Perano et al. (2015).

Il vantaggio economico del raffreddamento è stato valutato ipotizzando che il reddito netto del latte (prezzo di vendita meno i costi di alimentazione) fosse di 0,33 USD per kg di latte.

I costi del sistema di raffreddamento, invece, sono stati stimati considerando i costi di elettricità e acqua, oltre che a considerare il costo di investimento per il sistema, ipotizzando una durata di vita di 10 anni.

I risultati hanno mostrato un notevole vantaggio economico nell'utilizzo di ventilatori associati a nebulizzatori.

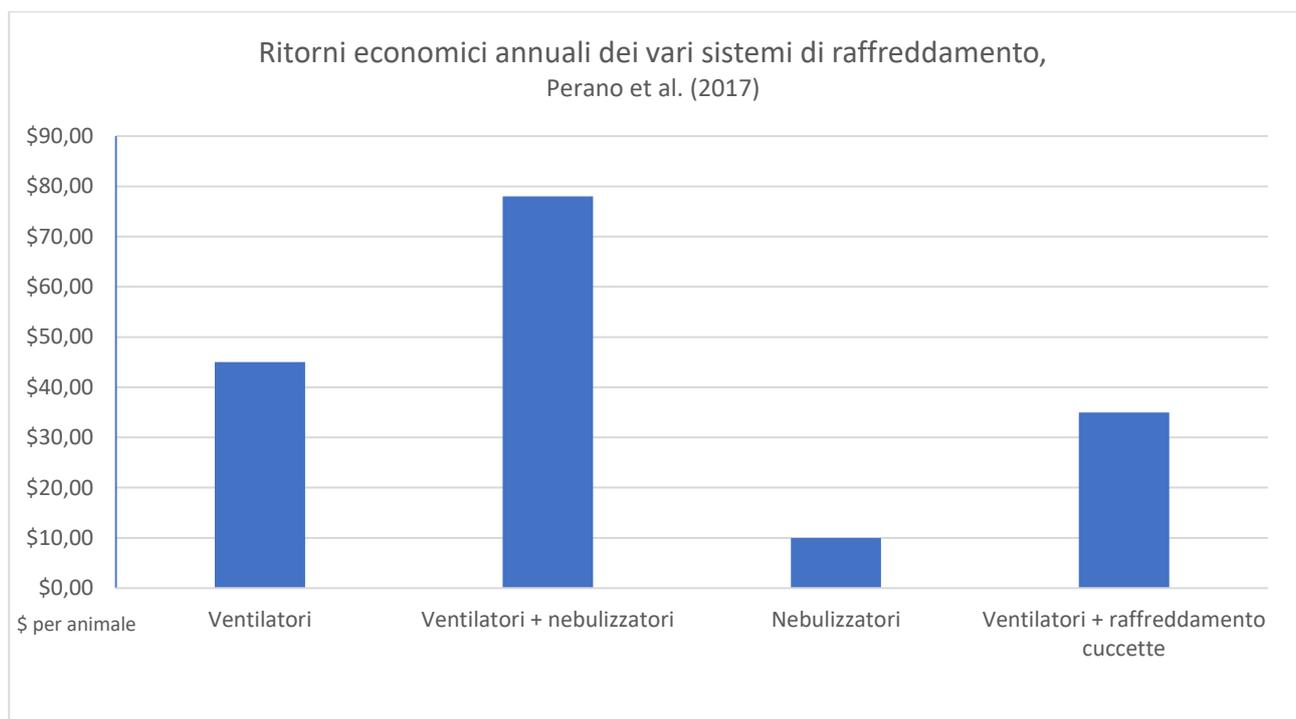


Figura 3. Ritorni economici annuali per ogni animale dei vari sistemi di raffreddamento (Perano et al., 2017)

Discussione dei fattori che determinano la variazione

La variabilità tra diversi studi condotti in condizioni diverse può creare incertezza, che è sempre un fattore limitante nel dare una risposta accurata; anche gli studi condotti in laboratorio non sempre ricalcano tutte le variabili presenti sul campo, non riuscendo a fornire, quindi, soluzioni accurate per ogni allevamento.

Alcuni fattori che influenzano maggiormente la risposta riguardano il clima presente in ogni regione o zona, la densità degli animali, le modalità di gestione dell'allevamento, la razza degli animali o le differenze tra i singoli individui (Huan et al., 2008; Gantner et al., 2011; Bernabucci et al., 2014; Wang et al., 2016).

Gli studi condotti, pur non riuscendo a prevedere precisamente la risposta di ogni singolo animale, si avvicinano molto ad interpretare lo stato della mandria e risultano quindi essere un'ottima base per la gestione dello stress da caldo sugli animali.

4. CONCLUSIONI

La prevenzione degli effetti negativi dello stress da caldo in tutte le fasi del ciclo produttivo dei bovini è essenziale per ottimizzare la salute, la produttività e il benessere degli animali.

La cosa più importante è riconoscere le condizioni di stress da calore il prima possibile, al fine di implementare strategie per prevenirne l'ulteriore sviluppo. Per fare questo ci si può avvalere di diversi sensori che monitorano costantemente le condizioni degli animali (come respirazione, temperatura corporea, movimenti) e ambientali (temperatura, umidità, movimento dell'aria) in modo da raccogliere una serie di dati da utilizzare per stimare lo stato di stress dell'animale tramite gli indici bioclimatici. Nel momento in cui viene superata la soglia critica (dettata dagli indici in questione) è essenziale attuare strategie di mitigazione, le quali comprendono: l'uso di ventilatori sia a flusso verticale che orizzontale, l'uso di nebulizzatori o sprinkler, molto spesso associati ai ventilatori, assicurare la presenza di zone d'ombra, soprattutto nelle aree a pascolo, garantire l'accesso idrico a tutti gli animali, attuare strategie genetiche, gestionali e alimentari. La maggior parte degli studi concorda sul fatto che investire sul raffreddamento delle vacche da latte risulta essere molto conveniente, anche nei climi temperati.

L'uso combinato di ventilatori e nebulizzatori è considerato il metodo di raffreddamento economicamente più vantaggioso, mentre attuare strategie alimentari, riproduttive o genetiche, in alcuni casi porta ad avere costi molto elevati. L'integrazione di grassi, additivi o integratori alla dieta degli animali, se considerata come unica modalità di mitigazione, non porta ad avere elevati benefici. Lo stesso vale per i metodi riproduttivi, come ad esempio, la produzione e il trasferimento di embrioni, procedimento che risulta essere ancora costoso.

Le strategie genetiche, invece, come l'allevamento o l'incrocio di razze resistenti al calore, sono procedimenti lunghi e attualmente non studiati concettualmente in termini di differenziazione dei tratti adattativi degli animali in diversi continenti, latitudini e zone climatiche.

Sebbene gli approcci per migliorare gli effetti dannosi dello stress da calore siano ampi e vari, nessuno di questi è riuscito a riportare le prestazioni riproduttive o di produzione a livelli termoneutrali. La più promettente in termini di impatto sulla produzione e sul benessere delle vacche è una strategia che combini più modalità di mitigazione.

L'efficacia delle strategie, inoltre, varia in base all'azienda presa in considerazione; per questo gli approcci devono essere attentamente pianificati in base alle circostanze, alle risorse e alle opportunità a disposizione degli allevatori.

Negli ultimi anni si stanno affermando nuove tecnologie, una di queste è l'intelligenza artificiale. Potrebbe risultare una soluzione molto utile per prevedere al meglio l'applicazione delle giuste modalità di mitigazione.

Alla fine di queste considerazioni è doveroso tener conto che i cambiamenti climatici, che fino a pochi anni fa erano decisamente meno critici, oggi sono un fenomeno sempre più percepito, anche nelle nostre zone. L'inusuale aumento delle temperature provoca effetti avversi nel bestiame, è opportuno quindi sostenere una ricerca continuativa nell'ambito ingegneristico, genetico e alimentare per garantire lo stato ottimale degli animali.

5. BIBLIOGRAFIA

- Abaker JA, Xu TL, Jin D, Chang GJ, Zhang K, Shen XZ. Lipopolysaccharide derived from the digestive tract provokes oxidative stress in the liver of dairy cows fed a high-grain
- Al-Saiady M, Al-Shaikh M, Al-Mufarrej S, Al-Showeimi T, Mogawer H, Dirrar A (2004) Effect of chelated chromium supplementation on lactation performance and blood parameters of Holstein cows under heat stress. *Anim Feed Sci Technol* 117(3):223–233. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2004.07.008diet>. *J Dairy Sci* 2017;100:666–78. [http://refhub.elsevier.com/S0739-7240\(22\)00075-3/sbref0048](http://refhub.elsevier.com/S0739-7240(22)00075-3/sbref0048)
- Ammer, S.; Lambertz, C.; Gauly, M. Is reticular temperature a useful indicator of heat stress in dairy cattle? *J. Dairy Sci.* 2016, 99, 10067–10076. <http://doi.org/10.3168/jds.2016-11282>
- Ammer, S.; Lambertz, C.; Von Soosten, D.; Zimmer, K.; Meyer, U.; Dänicke, S.; Gauly, M. Impact of diet composition and temperature-humidity index on water and dry matter intake of high-yielding dairy cows. *J. Anim. Physiol. Anim. Nutr. (Berl.)* 2018, 102, 103–113 <http://dx.doi.org/10.1111/jpn.12664>
- Arias, R.A.; Mader, T.L.; Escobar, P.C. Climatic factors affecting cattle performance in dairy and beef farms. *Arch. Med. Vet.* 2008, 40, 7–22.
- Avendaño-Reyes, L., J. W. Fuquay, R. B. Moore, Z. Liu, B. L. Clark, and C. Vierhout. 2010. Relationship between accumulated heat stress during the dry period, body condition score, and reproduction parameters of Holstein cows in tropical conditions. *Trop. Anim. Health Prod.* 42:265–273.
- Bar, D.; Kaim, M.; Flamenbaum, I.; Hanochi, B.; Toaff-Rosenstein, R.L. Technical note: Accelerometer-based recording of heavy breathing in lactating and dry cows as an automated measure of heat load. *J. Dairy Sci.* 2019, 102, 3480–3486. <http://doi.org/10.3168/jds.2018-15186>
- Baratta M, Miretti S, Macchi E, Accornero P, Martignani E. Mammary stem cells in domestic animals: the role of ROS. *Antioxidants* 2019;8:6. [http://refhub.elsevier.com/S0739-7240\(22\)00075-3/sbref0052](http://refhub.elsevier.com/S0739-7240(22)00075-3/sbref0052)
- Batistel, F., Arroyo, J.M., Bellingeri, A., Wang, L., Saremi, B., Parys, C., Trevisi, E., Cardoso, F.C., Loor, J.J., 2017. Ethyl-cellulose rumen-protected methionine enhances performance during the periparturient period and early lactation in Holstein dairy cows. *J. Dairy Sci.* 100, 7455–7467. [http://refhub.elsevier.com/S1871-1413\(21\)00410-8/sbref0008](http://refhub.elsevier.com/S1871-1413(21)00410-8/sbref0008)
- Bauman, D.E.; Vernon, R.G. Effects of Exogenous Bovine Somatotropin on Lactation. *Annu. Rev. Nutr.* 1993, 13, 437–461. <http://dx.doi.org/10.1146/annurev.nu.13.070193.002253>
- Belhadj Slimen, I.; Najjar, T.; Ghram, A.; Abdrrabba, M. Heat stress effects on livestock: Molecular, cellular and metabolic aspects, a review. *J. Anim. Physiol. Anim. Nutr.* 2016, 100, 401–412. <http://doi.org/10.1111/jpn.12379>
- Berckmans, D. General introduction to precision livestock farming. *Anim. Front.* 2017, 7, 6–11. <https://academic.oup.com/af/article/7/1/6/4638786>
- Bergen, R.D.; Kennedy, A.D. Relationship between vaginal and tympanic membrane temperature in beef heifers. *Can. J. Anim. Sci.* 2000, 80, 515–518. <https://cdnsiencepub.com/doi/10.4141/A00-033>

- Baruselli, P.S., Ferreira, R.M., Vieira, L.M., Souza, A.H., Bo, ´ G.A., Rodrigues, C.A., 2020. Use of embryo transfer to alleviate infertility caused by heat stress. *Theriogenology* 155, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2020.04.028>.
- Berman, A. (2005). Estimates of heat stress relief needs for Holstein dairy cows. *Journal of Animal Science*, 83(6), 1377-1384. [http://refhub.elsevier.com/S1537-5110\(20\)30202-6/sref20](http://refhub.elsevier.com/S1537-5110(20)30202-6/sref20)
- Bernabucci, U.; Lacetera, N.; Baumgard, L.H.; Rhoads, R.P.; Ronchi, B.; Nardone, A. Metabolic and hormonal acclimation to heat stress in domesticated ruminants. *Animal* 2010, 4, 1167–1183. <http://dx.doi.org/10.1017/S175173111000090X>
- Bernabucci, U., S. Biffani, L. Buggiotti, A. Vitali, N. Lacetera, and A. Nardone. 2014. The effects of heat stress in Italian Holstein dairy cattle. *J. Dairy Sci.* 97:471–486. <https://doi.org/10.3168/jds.2013-6611>.
- Bernabucci U, Ronchi B, Lacetera N, Nardone A. Influence of body condition score on relationships between metabolic status and oxidative stress in periparturient dairy cows. *J Dairy Sci* 2005;88:2017–26. [http://refhub.elsevier.com/S0739-7240\(22\)00075-3/sbref0046](http://refhub.elsevier.com/S0739-7240(22)00075-3/sbref0046)
- Bewley, J.; Einstein, M.; Grott, M.; Schutz, M. Comparison of Reticular and Rectal Core Body Temperatures in Lactating Dairy Cows. *J. Dairy Sci.* 2008, 91, 4661–4672. <http://doi.org/10.3168/jds.2007-0835>
- Bicalho, M.L.S.; Lima, F.S.; Ganda, E.K.; Foditsch, C.; Meira, E.B.S.; Machado, V.S.; Teixeira, A.G.V.; Oikonomou, G.; Gilbert, R.O.; Bicalho, R.C. Effect of trace mineral supplementation on selected minerals, energy metabolites, oxidative stress, and immune parameters and its association with uterine diseases in dairy cattle. *J. Dairy Sci.* 2014, 97, 4281–4295. <http://dx.doi.org/10.3168/jds.2013-7832>
- Block, J., C. C. Chase Jr., and P. J. Hansen. 2002. Inheritance of resistance of bovine preimplantation embryos to heat shock: Relative importance of the maternal versus paternal contribution. *Mol. Reprod. Dev.* 63:32–37.
- Bohmanova, J., I. Misztal, and J. B. Cole. 2007. Temperature-humidity indices as indicators of milk production losses due to heat stress. *J. Dairy Sci.* 90:1947–1956. <https://doi.org/10.3168/jds.2006-513>.
- Bouraoui, R.; Lahmar, M.; Majdoub, A.; Djemali, M.; Belyea, R. The relationship of temperature-humidity index with milk production of dairy cows in a Mediterranean climate. *Anim. Res.* 2002, 51, 479–491. <http://dx.doi.org/10.1051/animres:2002036>
- Boyd, J., J. W. West, and J. K. Bernard. 2011. Effects of the addition of direct-fed microbials and glycerol to the diet of lactating dairy cows on milk yield and apparent efficiency of yield. *J. Dairy Sci.* 94:4616–4622.
- Brown-Brandl, T.M.; Eigenberg, R.A.; Nienaber, J.A.; Hahn, G.L. Dynamic Response Indicators of Heat Stress in Shaded and Non-shaded Feedlot Cattle, Part 1: Analyses of Indicators. *Biosys. Eng.* 2005, 90, 451–462. <http://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2004.12.006>
- Buffington, D. E., A. Collazo-Arocho, G. H. Canton, D. Pitt, W. W. Thatcher, and R. J. Collier. 1981. Black globe-humidity index (BGHI) as comfort equation for dairy cows. *Trans. ASAE* 24:711–714. <https://doi.org/10.13031/2013.34325>.

- Burdick, N.C.; Carroll, J.A.; Dailey, J.W.; Randel, R.D.; Falkenberg, S.M.; Schmidt, T.B. Development of a self-contained, indwelling vaginal temperature probe for use in cattle research. *J. Therm. Biol.* 2012, 37, 339–343. <http://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2011.10.007>
- Calamari, L., F. Petrera, L. Stefanini, and F. Abeni. 2013. Effects of different feeding time and frequency on metabolic conditions and milk production in heat-stressed dairy cows. *Int. J. Biometeorol.* n57:785–796.
- Cantor, M.C.; Costa, J.H.C.; Bewley, J.M. Impact of Observed and Controlled Water Intake on Reticulorumen Temperature in Lactating Dairy Cattle. *Animals* 2018, 8, 194. <http://doi.org/10.3390/ani8110194>
- Carabaño, M. J., M. Ramón, A. Menéndez-Buxadera, A. Molina, and C. Díaz. 2019. Selecting for heat tolerance. *Anim. Front.* 9:62–68
- Caroprese, M., M. Albenzio, R. Marino, A. Santillo, and A. Sevi. 2013. Dietary glutamine enhances immune responses of dairy cows under high ambient temperature. *J. Dairy Sci.* 96:3002–3011.
- Cebrian-Serrano, A., I. Salvador, E. Raga, A. Dinnyes, and M. A. Silvestre. 2013. Beneficial effect of melatonin on blastocyst in vitro production from heat-stressed bovine oocytes. *Reprod. Domest. Anim.* 48:738–746
- Chung, H.; Li, J.; Kim, Y.; Van Os, J.M.C.; Brounts, S.H.; Choi, C.Y. Using implantable biosensors and wearable scanners to monitor dairy cattle’s core body temperature in real-time. *Comput. Electron. Agric.* 2020, 174, 105453. <http://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105453>
- Cook, N.B., Mentink, R.L., Bennett, T.B., Burgi, K., 2007. The effect of heat stress and lameness on time budgets of lactating dairy cows. *J. Dairy Sci.* 90, 1674–1682. [http://refhub.elsevier.com/S1871-1413\(21\)00410-8/sbref0015](http://refhub.elsevier.com/S1871-1413(21)00410-8/sbref0015)
- Collier, R. J., D. K. Beede, W. W. Thatcher, L. A. Israel, and C. J. Wilcox. 1982a. Influences of environment and its modification on dairy animal health and production. *J. Dairy Sci.* 65:2213–2227.
- Collier, R. J., S. G. Doelger, H. H. Head, W. W. Thatcher, and C. J. Wilcox. 1982b. Effects of heat stress during pregnancy on maternal hormone concentrations, calf birth weight and postpartum milk yield of Holstein cows. *J. Anim. Sci.* 54:309–319.
- Collier, R. J., R. B. Zimbelman, R. P. Rhoads, M. L. Rhoads, and L. H. Baumgard. 2005. A re-evaluation of the impact of temperature humidity index (THI) and black globe humidity index (BGHI) on milk production in high producing dairy cows. Pages 113–125 in *Proc. Western Dairy Management Conference*, Reno, NV. University of Arizona, Tucson, AZ.
- Collier, R.J.; Collier, J.L.; Rhoads, R.P.; Baumgard, L.H. Invited review: Genes involved in the bovine heat stress response. *J. Dairy Sci.* 2008, 91, 445–454 <http://dx.doi.org/10.3168/jds.2007-0540>
- Collier, R.J., Dahl, G.E., VanBaale, M.J., 2006. Major advances with environmental effects on dairy cattle. *J. Dairy Sci.* 89, 1244–1253. [http://refhub.elsevier.com/S1871-1413\(21\)00410-8/sbref0014](http://refhub.elsevier.com/S1871-1413(21)00410-8/sbref0014)
- Dahl, G.E., Tao, S., Laporta, J., 2017. Triennial Lactation Symposium/BOLFA: late gestation heat stress of dairy cattle programs dam and daughter milk production. *J. Anim. Sci.* 95, 5701–5710. [http://refhub.elsevier.com/S1871-1413\(21\)00410-8/sbref0018](http://refhub.elsevier.com/S1871-1413(21)00410-8/sbref0018)

- Daltro, D.D.S.; Fischer, V.; Alfonso, E.P.M.; Dalcin, V.C.; Stumpf, M.T.; Kolling, G.J.; Da Silva, M.V.G.B.; McManus, C. Infrared thermography as a method for evaluating the heat tolerance in dairy cows. *Rev. Bras. Zootec.* 2017, 46, 374–383. <http://doi.org/10.1590/s1806-92902017000500002>
- DaSilva RG, LaScala Junior N, Tonhati H. Radiative properties of the skin and haircoat of cattle and other animals. *Trans ASAE.* (2003) 46:913– 8. <http://doi.org/10.13031/2013.13567>
- Davis, M. S., T. L. Mader, S. M. Holt, and A. M. Parkhurst. 2003. Strategies to reduce feedlot cattle heat stress: Effects on tympanic temperature. *J. Anim. Sci.* 81:649–661. <https://doi.org/10.2527/2003.813649x>.
- De K, Pal S, Prasad S, Dang AK (2014) Effect of micronutrient supplementation on the immune function of crossbred dairy cows under semi-arid tropical environment. *Trop Anim Health Prod* 46(1):203–211. <https://doi.org/10.1007/s11250-013-0477-1>
- Demetrio, D.G., Santos, R.M., Demetrio, C.G., Vasconcelos, J.L., 2007. Factors affecting conception rates following artificial insemination or embryo transfer in lactating Holstein cows. *J. Dairy Sci.* 90, 5073–5082. [http://refhub.elsevier.com/S1871-1413\(21\)00410-8/sbref0019](http://refhub.elsevier.com/S1871-1413(21)00410-8/sbref0019)
- De Rensis, F.; Lopez-Gatius, F.; García-Ispuerto, I.; Morini, G.; Scaramuzzi, R. Causes of declining fertility in dairy cows during the warm season. *Theriogenology* 2016, 91, 145–153. <http://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2016.12.024>
- De Rensis, F.; Scaramuzzi, R.J. Heat stress and seasonal effects on reproduction in the dairy cow—A review. *Theriogenology* 2003, 60, 1139–1151. [http://doi.org/10.1016/S0093-691X\(03\)00126-2](http://doi.org/10.1016/S0093-691X(03)00126-2)
- DeVrijer, B., Regnault, T.R.H., Wilkening, R.B., Meschia, G., Battaglia, F.C., 2004. Placental uptake and transport of ACP, a neutral nonmetabolizable amino acid, in an ovine model of fetal growth restriction. *Am. J. Physiol. Endocrinol. Metab* 287, E1114–E1124. [http://refhub.elsevier.com/S1871-1413\(21\)00410-8/sbref0020](http://refhub.elsevier.com/S1871-1413(21)00410-8/sbref0020)
- Dhuyvetter, K., Kastens, T., Brouk, M., Smith, J., & Harner, J., III (2000). Economics of cooling cows. In *Proc. Heart of America dairy management conference*, st. Joseph, MO (pp. 56e71). [http://refhub.elsevier.com/S1537-5110\(20\)30202-6/sref52](http://refhub.elsevier.com/S1537-5110(20)30202-6/sref52)
- Di CA, Spain JN, Spiers DE (1997) Supplementation of nicotinic acid for lactating Holstein cows under heat stress conditions. *J Dairy Sci* 80(6):1200–1206. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(97\)76048-X](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(97)76048-X)
- Dikmen, S.; Hansen, P.J. Is the temperature-humidity index the best indicator of heat stress in lactating dairy cows in a subtropical environment? *J. Dairy Sci.* 2009, 92, 109–116. <http://dx.doi.org/10.3168/jds.2008-1370>
- Dikmen, S., Larson, C.C., De Vries, A., Hansen, P.J., 2020. Effectiveness of tunnel ventilation as dairy cow housing in hot climates: rectal temperatures during heat stress and seasonal variation in milk yield. *Trop. Anim. Health Prod.* 52, 2687–2693. <https://doi.org/10.1007/s11250-020-02309-3>.
- Do Amaral, B., Connor, E., Tao, S., Hayen, J., Bubolz, J., & Dahl, G. (2009). Heat-stress abatement during the dry period: Does cooling improve transition into lactation? *Journal of Dairy Science*, 92(12), 5988e5999. [http://refhub.elsevier.com/S1537-5110\(20\)30202-6/sref54](http://refhub.elsevier.com/S1537-5110(20)30202-6/sref54)

- Drackley J, Cicela T, LaCount D (2003) Responses of primiparous and multiparous Holstein cows to additional energy from fat or concentrate during summer. *J Dairy Sci* 86(4):1306–1314.
[https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(03\)73714-X](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(03)73714-X)
- DuBois PR, Williams DJ. Increased incidence of retained placenta associated with heat stress in dairy cows. *Theriogenology*. (1980) 13:115–21. [http://doi.org/10.1016/0093-691X\(80\)90120-X](http://doi.org/10.1016/0093-691X(80)90120-X)
- Ealy, A.D., Drost, M., Hansen, P.J., 1993. Developmental changes in embryonic resistance to adverse effects of maternal heat stress in cows. *J Dairy Sci* 76, 2899e905. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(93\)77629-8](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(93)77629-8).
- Eberhardt, B. G., R. A. Satrapa, C. R. Capinzaiki, L. A. Trinca, and C. M. Barros. 2009. Influence of the breed of bull (*Bos taurus indicus* vs. *Bos taurus taurus*) and the breed of cow (*Bos taurus indicus*, *Bos taurus taurus* and crossbred) on the resistance of bovine embryos to heat. *Anim. Reprod. Sci.* 114:54–61.
- Eigenberg, R.A.; Nienaber, J.A.; Hahn, G.L. Dynamic response indicators of heat stress in shaded and non-shaded feedlot cattle, Part 2: Predictive Relationships. *Biosyst. Eng.* 2005, 91, 111–118.
<http://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2005.02.001>
- Erdman, R.A. Dietary Buffering Requirements of the Lactating Dairy Cow: A Review. *J. Dairy Sci.* 1988, 71, 3246–3266 [http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(88\)79930-0](http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(88)79930-0)
- Farooq, U.; Samad, H.A.; Shehzad, F.; Qayyum, A. Physiological responses of cattle to heat stress. *World Appl. Sci. J.* 2010, 8, 38–43.
- Ferrazza, R.D.A.; Garcia, H.D.M.; Aristizábal, V.H.V.; Nogueira, C.D.S.; Veríssimo, C.J.; Sartori, J.R.; Sartori, R.; Ferreira, J.C.P. Thermoregulatory responses of Holstein cows exposed to experimentally induced heat stress. *J. Therm. Biol.* 2017, 66, 68–80. <http://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2017.03.014>
- Ferreira, R.M., Ayres, H., Chiaratti, M.R., Ferraz, M.L., Araújo, A.B., Rodrigues, C.A., 2011. The low fertility of repeat-breeder cows during summer heat stress is related to a low oocyte competence to develop into blastocysts. *J Dairy Sci* 94, 2383e92. <https://doi.org/10.3168/jds.2010-3904>.
- Ferreira, F.C., Clay, J.S., De Vries, A., 2020. Distribution of seasonality of calving patterns and milk production in dairy herds across the United States. *J. Dairy Sci.* 103, 8161–8173.
<https://doi.org/10.3168/jds.2019-18138>.
- Ferreira, F.C., Marcondes, M.I., Santos, J.E.P., De Vries, A., 2021. Economic analysis of the use of in-vitro produced embryos transferred during heat stress under dairy herd constraints. *Animal* 15, 100117.
<https://doi.org/10.1016/j.animal.2020.100117>.
- Fonsêca VFC, DaSilva RG, Moura GA, Snelling EP, Fuller A, Mitchell D, et al. Reliability of methods to determine cutaneous evaporative water loss rate in furred and fleeced mammals. *J Exp Zool A Ecol Integr Physiol.* (2022) 337:356–5. <http://doi.org/10.1002/jez.2572>
- Frank, M.; Drikakis, D.; Charisis, V. Machine-learning methods for computational science and engineering. *Computation* 2020, 8, 15. <http://doi.org/10.3390/computation8010015>
- Fuquay JW. Heat stress as it affects animal production. *J Anim Sci.* (1981) 51:164–74.
<http://doi.org/10.2527/jas1981.521164x>

- Gallardo M, Valtorta S, Leva P, Castro H, Maiztegui J (2001) Hydrogenated fish fat for grazing dairy cows in summer. *Int J Biometeorol* 45(3):111–114. <https://doi.org/10.1007/s004840100091>
- Ganaie, A.; Ghasura, R.; Mir, N.; Bumla, N.; Sankar, G.; Wani, S. Biochemical and Physiological Changes during Thermal Stress in Bovines: A Review. 2013. <https://www.sid.ir/en/journal/ViewPaper.aspx?id=325800>
- Gantner, V., Mijic, P., Kuterovac, K., Soli c, D., & Gantner, R. (2011). Temperature-humidity index values and their significance on the daily production of dairy cattle. *Mljekarstvo*, 61(1), 56. [http://refhub.elsevier.com/S1537-5110\(20\)30202-6/sref64](http://refhub.elsevier.com/S1537-5110(20)30202-6/sref64)
- Garverick, H.A.; Harris, M.N.; Vogel-Bluel, R.; Sampson, J.D.; Bader, J.; Lamberson, W.R.; Spain, J.N.; Lucy, M.C.; Youngquist, R.S. Concentrations of nonesterified fatty acids and glucose in blood of periparturient dairy cows are indicative of pregnancy success at first insemination. *J. Dairy Sci.* 2013, 96, 181–188 <http://dx.doi.org/10.3168/jds.2012-5619>
- Gaughan, J.B.; Holt, S.M.; Hahn, G.L.; Mader, T.L.; Eigenberg, R.A. Respiration rate—Is it a good measure of heat stress in cattle? *Asian-Australas. J. Anim. Sci.* 2000, 13, 329–332.
- Gaughan, J., Mader, T. L., Holt, S., & Lisle, A. (2008a). A new heat load index for feedlot cattle. *Faculty Papers and Publications in Animal Science*, 613. [http://refhub.elsevier.com/S1537-5110\(20\)30202-6/sref70](http://refhub.elsevier.com/S1537-5110(20)30202-6/sref70)
- Gaughan, J.; Lacetera, N.; Valtorta, S.E.; Khalifa, H.H.; Hahn, L.; Mader, T. Response of Domestic Animals to Climate Challenges. In *Biometeorology for Adaptation to Climate Variability and Change*; Springer: Dordrecht, The Netherlands, 2009; pp. 131–170 http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4020-8921-3_7
- Gaughan, J.B.; Mader, T.L. Body temperature and respiratory dynamics in un-shaded beef cattle. *Int. J. Biometeorol.* 2014, 58, 1443–1450. <http://doi.org/10.1007/s00484-013-0746-8>
- Gebremedhin, K. G., B. Wu, and K. Perano. 2016. Modeling conductive cooling for thermally stressed dairy cows. *J. Therm. Biol.* 56:91–99.
- Grant, R. (2012). Economic benefits of improved cow comfort. In *Novus int.* St. Charles, MO. [http://refhub.elsevier.com/S1537-5110\(20\)30202-6/sref77](http://refhub.elsevier.com/S1537-5110(20)30202-6/sref77)
- Guo, J.; Gao, S.; Quan, S.; Zhang, Y.; Bu, D.; Wang, J. Blood amino acids profile responding to heat stress in dairy cows. *Asian-Australas. J. Anim. Sci.* 2018, 31, 47–53 <http://dx.doi.org/10.5713/ajas.16.0428>
- Halachmi I, Maltz E, Livshin N, Antler A, Ben-Ghedalia D, Miron J (2004) Effects of replacing roughage with soy hulls on feeding behavior and milk production of dairy cows under hot weather conditions. *J Dairy Sci* 87(7):2230–2238. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(04\)70043-0](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(04)70043-0)
- Hammami, H., J. Bormann, N. M’hamdi, H. H. Montaldo, and N. Gengler. 2013. Evaluation of heat stress effects on production traits and somatic cell score of Holsteins in a temperate environment. *J. Dairy Sci.* 96:1844–1855. <https://doi.org/10.3168/jds.2012-5947>.
- Hansen, P.J., Arechiga, C.F., 1999. Strategies for managing reproduction in the heatstressed dairy cow. *J Anim. Sci.* 77 (Suppl 2), 36-50. [http://refhub.elsevier.com/S1871-1413\(21\)00410-8/sbref0039](http://refhub.elsevier.com/S1871-1413(21)00410-8/sbref0039)

- Heinicke, J.; Hoffmann, G.; Ammon, C.; Amon, B.; Amon, T. Effects of the daily heat load duration exceeding determined heat load thresholds on activity traits of lactating dairy cows. *J. Therm. Biol.* 2018, 77, 67–74. <http://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2018.08.012>
- Heinicke, J.; Ibscher, S.; Belik, V.; Amon, T. Cow individual activity response to the accumulation of heat load duration. *J. Therm. Biol.* 2019, 82, 23–32.
- Hempel, S.; Menz, C.; Pinto, S.; Galán, E.; Janke, D.; Estellés, F.; Müschner-Siemens, T.; Wang, X.; Heinicke, J.; Zhang, G.; et al. Heat stress risk in European dairy cattle husbandry under different climate change scenarios—Uncertainties and potential impacts. *Earth Syst. Dyn.* 2019, 10, 859–884. <http://doi.org/10.5194/esd-10-859-2019>
- Herbut, P., & Angrecka, S. (2018). Relationship between THI level and dairy cows' behaviour during summer period. *Italian Journal of Animal Science*, 17(1), 226-233. [http://refhub.elsevier.com/S1537-5110\(20\)30202-6/sref85](http://refhub.elsevier.com/S1537-5110(20)30202-6/sref85)
- Hill, T.M.; Bateman, H.G.; Suarez-Mena, F.X.; Dennis, T.S.; Schlotterbeck, R.L. Short communication: Changes in body temperature of calves up to 2 months of age as affected by time of day, age, and ambient temperature. *J. Dairy Sci.* 2016, 99, 8867–8870. <http://doi.org/10.3168/jds.2016-10994>
- Hoffmann, G.; Schmidt, M.; Ammon, C. First investigations to refine video-based IR thermography as a non-invasive tool to monitor the body temperature of calves. *Animal* 2016, 10, 1542–1546 <http://doi.org/10.1017/S1751731115001354>
- Horowitz, M. From molecular and cellular to integrative heat defense during exposure to chronic heat. *Comp. Biochem. Physiol. Part A Mol. Integr. Physiol.* 2002, 131, 475–483. [http://dx.doi.org/10.1016/S1095-6433\(01\)00500-1](http://dx.doi.org/10.1016/S1095-6433(01)00500-1)
- Huang, C., Tsuruta, S., Bertrand, J., Misztal, I., Lawlor, T., & Clay, J. (2008). Environmental effects on conception rates of Holsteins in New York and Georgia. *Journal of Dairy Science*, 91(2), 818e825. [http://refhub.elsevier.com/S1537-5110\(20\)30202-6/sref88](http://refhub.elsevier.com/S1537-5110(20)30202-6/sref88)
- Iwasaki, W.; Ishida, S.; Kondo, D.; Ito, Y.; Tateno, J.; Tomioka, M. Monitoring of the core body temperature of cows using implantable wireless thermometers. *Comput. Electron. Agric.* 2019, 163, 104849. <http://doi.org/10.1016/j.compag.2019.06.004>
- Idris, M.; Uddin, J.; Sullivan, M.; McNeill, D.M.; Phillips, C.J.C. Non-invasive physiological indicators of heat stress in cattle. *Animals* 2021, 11, 71. <http://doi.org/10.3390/ani11010071>
- Jara, I.E.; Keim, J.P.; Arias, R.A. Behaviour, tympanic temperature and performance of dairy cows during summer season in southern Chile. *Arch. Med. Vet.* 2016, 48, 113–118. <http://doi.org/10.4067/S0301-732X2016000100014>
- Ji, B.; Banhazi, T.; Ghahramani, A.; Bowtell, L.; Wang, C.; Li, B. Modelling of heat stress in a robotic dairy farm. Part 4: Time constant and cumulative effects of heat stress. *Biosyst. Eng.* 2020, 199, 73–82 <http://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2020.07.014>

- Ji, B.; Banhazi, T.; Perano, K.; Ghahramani, A.; Bowtell, L.; Wang, C.; Li, B. A review of measuring, assessing and mitigating heat stress in dairy cattle. *Biosyst. Eng.* 2020, 199, 4–26
<http://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2020.07.009>
- Johnson, H.D. Bioclimates and Livestock. In *Bioclimatology and the Adaptation of Livestock*, Chap. 1; Johnson, H.D., Ed.; Elsevier Science Publishers: Amsterdam, The Netherlands, 1987; pp. 3–16.
- Jorquera-Chavez, M.; Fuentes, S.; Dunshea, F.R.; Warner, R.D.; Poblete, T.; Jongman, E.C. Modelling and Validation of Computer Vision Techniques to Assess Heart Rate, Eye Temperature, Ear-Base Temperature and Respiration Rate in Cattle. *Animals* 2019, 9, 1089. <http://doi.org/10.3390/ani9121089>
- Jóźwik ´ A, Krzyzewski ´ J, Strzałkowska N, Poławska E, Bagnicka E, Wierzbicka A, Niemczuk K, Lipinska ´ P, Horbanczuk ´ JO. Relations between the oxidative status, mastitis, milk quality and disorders of reproductive functions in dairy cows- a review. *Anim Sci Pap and Rep* 2012;30(4):297–307.
[http://refhub.elsevier.com/S0739-7240\(22\)00075-3/sbref0051](http://refhub.elsevier.com/S0739-7240(22)00075-3/sbref0051)
- Kadzere, C.T.; Murphy, M.R.; Silanikove, N.; Maltz, E. Heat stress in lactating dairy cows: A review. *Livest. Prod. Sci.* 2002, 77, 59–91. [http://doi.org/10.1016/S0301-6226\(01\)00330-X](http://doi.org/10.1016/S0301-6226(01)00330-X)
- Kärkönen, A.; Kuchitsu, K. Reactive oxygen species in cell wall metabolism and development in plants. *Phytochemistry* 2015, 112, 22–32. <http://doi.org/10.1016/j.phytochem.2014.09.016>
- Kaufman, J.D.; Saxton, A.M.; Ríus, A.G. Short communication: Relationships among temperature-humidity index with rectal, udder surface, and vaginal temperatures in lactating dairy cows experiencing heat stress. *J. Dairy Sci.* 2018, 101, 6424–6429. <http://doi.org/10.3168/jds.2017-13799>
- Kendall, P. E., Nielsen, P. P., Webster, J. R., Verkerk, G. A., Littlejohn, R. P., & Matthews, L. R. (2006). The effects of providing shade to lactating dairy cows in a temperate climate. *Livestock Science*, 103(1e2), 148e157. [http://refhub.elsevier.com/S1537-5110\(20\)30202-6/sref98](http://refhub.elsevier.com/S1537-5110(20)30202-6/sref98)
- Koltes, J.E.; Koltes, D.A.; Mote, B.E.; Tucker, J.; Hubbell, D.S. Automated collection of heat stress data in livestock: New technologies and opportunities. *Transl. Anim. Sci.* 2018, 2, 319–323.
<http://doi.org/10.1093/tas/txy061>
- Kotsiantis, S.B.; Zaharakis, I.D.; Pintelas, P.E. Machine learning: A review of classification and combining techniques. *Artif. Intell. Rev.* 2006, 26, 159–190. <http://doi.org/10.1007/s10462-007-9052-3>
- Kovács, L.; Kézér, F.L.; Bakony, M.; Jurkovich, V.; Szenci, O. Lying down frequency as a discomfort index in heat stressed Holstein bull calves. *Sci. Rep.* 2018, 8, 15065. <http://doi.org/10.1038/s41598-018-33451-6>
- Kunc, P.; Knizkova, I. The use of infrared thermography in livestock production and veterinary field. In *Infrared Thermog-Raphy: Recent Advances and Future Trends*; Bentham Science Publisher: Sharjah, United Arab Emirates, 2012; pp. 85–101.
- Landaeta-Hernández, A., S. Zambrano-Nava, J. P. Hernández-Fonseca, R. Godoy, M. Calles, J. L. Iragorri, L. Anez, M. Polanco, M. Montero-Urdaneta, and T. Olson. 2011. Variability of hair coat and skin traits as related to adaptation in Criollo Limonero cattle. *Trop. Anim. Health Prod.* 43:657–663.

- Laporta J, Fabris TF, Skibieli AL, Powell JL, Hayen MJ, Horvath K, et al. In utero exposure to heat stress during late gestation has prolonged effects on the activity patterns and growth of dairy calves. *J Dairy Sci.* (2017) 100:2976–84. <http://doi.org/10.3168/jds.2016-11993>
- Lawrence J, Payton R, Godkin J, Saxton A, Schrick F, Edwards J (2004) Retinol improves development of bovine oocytes compromised by heat stress during maturation. *J Dairy Sci* 87(8):2449–2454. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(04\)73368-8](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(04)73368-8)
- Lee, C.; Gebremedhin, K.; Parkhurst, A.; Hillman, P. Placement of temperature probe in bovine vagina for continuous measurement of core-body temperature. *Int. J. Biometeorol.* 2015, 59, 1201–1205. <http://doi.org/10.1007/s00484-014-0931-4>
- Lee, D. H. K. (1953). Manual of field studies on the heat tolerance of domestic animals. Manual of field studies on the heat tolerance of domestic animals. (38). [http://refhub.elsevier.com/S1537-5110\(20\)30202-6/sref102](http://refhub.elsevier.com/S1537-5110(20)30202-6/sref102)
- Lee, Y.; Bok, J.D.; Lee, H.J.; Lee, H.G.; Kim, D.; Lee, I.; Kang, S.K.; Choi, Y.J. Body Temperature Monitoring Using Subcutaneously Implanted Thermo-loggers from Holstein Steers. *Asian Australas. J. Anim. Sci.* 2016, 29, 299–306. <http://doi.org/10.5713/ajas.15.0353>
- Lees, A.M.; Lea, J.M.; Salvin, H.E.; Cafe, L.M.; Colditz, I.G.; Lee, C. Relationship between Rectal Temperature and Vaginal Temperature in Grazing *Bos taurus* Heifers. *Animals* 2018, 8, 156. <http://doi.org/10.3390/ani8090156>
- Legrand, A., K. E. Schütz, and C. B. Tucker. 2011. Using water to cool cattle: Behavioral and physiological changes associated with voluntary use of cow showers. *J. Dairy Sci.* 94:3376–3386. <https://doi.org/10.3168/jds.2010-3901>.
- Leng, R.A.; Steel, J.W.; Luick, J.R. Contribution of propionate to glucose synthesis in sheep. *Biochem. J.* 1967, 103, 785–790. <http://dx.doi.org/10.1042/bj1030785>
- Liu, Z.; Ezernieks, V.; Wang, J.; Arachchilage, N.W.; Garner, J.B.; Wales, W.J.; Cocks, B.G.; Rochfort, S. Heat Stress in Dairy Cattle Alters Lipid Composition of Milk. *Sci. Rep.* 2017, 7, 961. <http://dx.doi.org/10.1038/s41598-017-01120-9>
- Lucio, A.C., Alves, B.G., Alves, K.A., Martins, M.C., Braga, L.S., Miglio, L., Alves, B.G., Silva, T.H., Jacomini, J.O., Beletti, M.E., 2016. Selected sperm traits are simultaneously altered after scrotal heat stress and play specific roles in in vitro fertilization and embryonic development. *Theriogenology* 86, 924–933. [http://refhub.elsevier.com/S1871-1413\(21\)00410-8/sbref0047](http://refhub.elsevier.com/S1871-1413(21)00410-8/sbref0047)
- Lussier, J.G., Matton, P., Dufour, J.J., 1987. Growth rates of follicles in the ovary of the cow. *J. Reprod. Fertil.* 81, 301–307. [http://refhub.elsevier.com/S1871-1413\(21\)00410-8/sbref0048](http://refhub.elsevier.com/S1871-1413(21)00410-8/sbref0048)
- Mader, T.L.; Davis, M.S.; Brown-Brandl, T. Environmental factors influencing heat stress in feedlot cattle. *J. Anim. Sci.* 2006, 84, 712–719. <http://doi.org/10.2527/2006.843712x>
- Mader, T. L., Davis, M. S., & Gaughan, J. B. (2007). Effect of sprinkling on feedlot microclimate and cattle behavior. *International Journal of Biometeorology*, 51(6), 541-551. [http://refhub.elsevier.com/S1537-5110\(20\)30202-6/sref109](http://refhub.elsevier.com/S1537-5110(20)30202-6/sref109)

- Malama, E., Zeron, Y., Janett, F., Siuda, M., Roth, Z., Bollwein, H., 2017. Use of computer-assisted sperm analysis and flow cytometry to detect seasonal variations of bovine semen quality. *Theriogenology* 87, 79–90. [http://refhub.elsevier.com/S1871-1413\(21\)00410-8/sbref0049](http://refhub.elsevier.com/S1871-1413(21)00410-8/sbref0049)
- Mallonée, P. G., D. K. Beede, R. J. Collier, and C. J. Wilcox. 1985. Production and physiological responses of dairy cows to varying dietary potassium during heat stress. *J. Dairy Sci.* 68:1479–1487.
- Mariasegaram, M., C. C. Chase Jr., J. X. Chaparro, T. A. Olson, R. A. Brenneman, and R. P. Niedz. 2007. The slick hair coat locus maps to chromosome 20 in Senepol-derived cattle. *Anim. Genet.* 38:54–59.
- Martin, J., Harner, J., & Smith, J. (2012). Water system design considerations for modern dairies. Kansas State University Extension. [http://refhub.elsevier.com/S1537-5110\(20\)30202-6/sref112](http://refhub.elsevier.com/S1537-5110(20)30202-6/sref112)
- Maya-Soriano, M.J., Lopez-Gatius, F., Andreu-Vazquez, C., Lopez-Bejar, M., 2013. Bovine oocytes show a higher tolerance to heat shock in the warm compared with the cold season of the year. *Theriogenology* 79, 299–305. [http://refhub.elsevier.com/S1871-1413\(21\)00410-8/sbref0052](http://refhub.elsevier.com/S1871-1413(21)00410-8/sbref0052)
- McArthur, A.J. Thermal interaction between animal and microclimate: A comprehensive model. *J. Theor. Biol.* 1987, 126, 203–238. [http://doi.org/10.1016/S0022-5193\(87\)80229-1](http://doi.org/10.1016/S0022-5193(87)80229-1)
- McGuire, M.A.; Beede, D.K.; Collier, R.J.; Buonomo, F.C.; DeLorenzo, M.A.; Wilcox, C.J.; Huntington, G.B.; Reynolds, C.K. Effects of acute thermal stress and amount of feed intake on concentrations of somatotropin, insulin-like growth factor (IGF)-I and IGF-II, and thyroid hormones in plasma of lactating Holstein cows. *J. Anim. Sci.* 1991, 69, 2050–2056. <http://dx.doi.org/10.2527/1991.6952050x>
- Melendez, P.; Donovan, G.; Risco, C.; Littell, R.; Goff, J. Effect of calcium-energy supplements on calving-related disorders, fertility and milk yield during the transition period in cows fed anionic diets. *Theriogenology* 2003, 60, 843–854. [http://dx.doi.org/10.1016/S0093-691X\(03\)00103-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0093-691X(03)00103-1)
- Mistafog. (2019). Misting and Fogging, 2019. [http://refhub.elsevier.com/S1537-5110\(20\)30202-6/sref118](http://refhub.elsevier.com/S1537-5110(20)30202-6/sref118)
- Moghaddam, A., I. Karimi, and M. Pooyanmehr. 2009. Effects of short-term cooling on pregnancy rate of dairy heifers under summer heat stress. *Vet. Res. Commun.* 33:567–575.
- Monteiro APA, Tao S, Thompson IM, Dahl GE. Effect of heat stress during late gestation on immune function and growth performance of calves: isolation of altered colostral and calf factors. *J Dairy Sci.* (2014) 97:6426–39. <http://doi.org/10.3168/jds.2013-7891>
- Mormède, P.; Andanson, S.; Aupérin, B.; Beerda, B.; Guémené, D.; Malmkvist, J.; Manteca, X.; Manteuffel, G.; Prunet, P.; van Reenen, C.G.; et al. Exploration of the hypothalamic–pituitary–adrenal function as a tool to evaluate animal welfare. *Physiol. Behav.* 2007, 92, 317–339. <http://doi.org/10.1016/j.physbeh.2006.12.003>
- Mudroň, P. Prevalence of sole ulcer in dairy cows. *Med. Vet.* 2022, 66, 17–21. <http://doi.org/10.2478/fv-2022-0013>
- Müschner-Siemens, T.; Hoffmann, G.; Ammon, C.; Amon, T. Daily rumination time of lactating dairy cows under heat stress conditions. *J. Therm. Biol.* 2020, 88, 102484 <http://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2019.102484>

- Naderi N, Ghorbani GR, Sadeghi-Sefidmazgi A, Nasrollahi SM, Beauchemin KA (2016) Shredded beet pulp substituted for corn silage in diets fed to dairy cows under ambient heat stress: feed intake, total-tract digestibility, plasma metabolites, and milk production. *J Dairy Sci* 99(11):8847–8857. <https://doi.org/10.3168/jds.2016-11029>
- N'egron-Pérez, V.M., Fausnacht, D.W., Rhoads, M.L., 2019. Invited review: management strategies capable of improving the reproductive performance of heat-stressed dairy cattle. *J. Dairy Sci.* 102, 10695–10710. <https://doi.org/10.3168/jds.2019-16718>.
- Nienaber, J. A., G. Hahn, and R. Eigenberg. 1999. Quantifying livestock responses for heat stress management: A review. *Int. J. Biometeorol.* 42:183–188. <https://doi.org/10.1007/s004840050103>.
- Nienaber, J.; Hahn, G. Livestock production system management responses to thermal challenges. *Int. J. Biometeorol.* 2007, 52, 149–157 <http://doi.org/10.1007/s00484-007-0103-x>
- Nikkhah, A., Kianzad, D., Hajhosseini, A., Zalbeyk, A., 2013. Protected methionine prolonged provision improves summer production and reproduction of lactating dairy cows. *Pak. J. Biol. Sci.* 16, 558–563. [http://refhub.elsevier.com/S1871-1413\(21\)00410-8/sbref0059](http://refhub.elsevier.com/S1871-1413(21)00410-8/sbref0059)
- Niu, M., and K. J. Harvatine. 2018. Short communication: The effects of morning compared with evening feed delivery in lactating dairy cows during the summer. *J. Dairy Sci.* 101:396–400.
- Olson, T. A., C. Lucena, C. C. Chase Jr., and A. C. Hammond. 2003. Evidence of a major gene influencing hair length and heat tolerance in *Bos taurus* cattle. *J. Anim. Sci.* 81:80–90.
- Orihuela, A. Some factors affecting the behavioural manifestation of oestrus in cattle: A review. *Appl. Anim. Behav. Sci.* 2000, 70, 1–16 [http://doi.org/10.1016/S0168-1591\(00\)00139-8](http://doi.org/10.1016/S0168-1591(00)00139-8)
- Osorio JS, Trevisi E, Li C, Drackley JK, Socha MT, Looor JJ. Supplementing Zn, Mn, and Cu from amino acid complexes and Co from cobalt glucoheptonate during the peripartal period benefits postpartal cow performance and blood neutrophil function. *J Dairy Sci* 2016;99:1868–83. [http://refhub.elsevier.com/S0739-7240\(22\)00075-3/sbref0053](http://refhub.elsevier.com/S0739-7240(22)00075-3/sbref0053)
- Padilla L, Matsui T, Kamiya Y, Kamiya M, Tanaka M, Yano H (2006) Heat stress decreases plasma vitamin C concentration in lactating cows. *Livest Sci* 101(1):300–304. <https://doi.org/10.1016/j.livprodsci.2005.12.002>
- Palmquist DL, Harvatine KJ. Origin of fatty acids and influence of nutritional factors on milk fat. *Adv Dairy Chem* 2020;2:33–66. [http://refhub.elsevier.com/S0739-7240\(22\)00075-3/sbref0003](http://refhub.elsevier.com/S0739-7240(22)00075-3/sbref0003)
- Pan L, Bu D, Wang J, Cheng J, Sun X, Zhou L, Qin J, Zhang X, Yuan Y (2014) Effects of Radix Bupleuri extract supplementation on lactation performance and rumen fermentation in heat-stressed lactating Holstein cows. *Anim Feed Sci Technol* 187:1–8. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2013.09.008>
- Peng, D.; Chen, S.; Li, G.; Chen, J.; Wang, J.; Gu, X. Infrared thermography measured body surface temperature and its relationship with rectal temperature in dairy cows under different temperature-humidity indexes. *Int. J. Biometeorol.* 2019, 63, 327–336. <http://doi.org/10.1007/s00484-018-01666-x>
- Perano, K. M., Usack, J. G., Angenent, L. T., & Gebremedhin, K. G. (2015). Production and physiological responses of heatstressed lactating dairy cattle to conductive cooling. *Journal of Dairy Science*, 98(8), 5252e5261. [http://refhub.elsevier.com/S1537-5110\(20\)30202-6/sref133](http://refhub.elsevier.com/S1537-5110(20)30202-6/sref133)

- Perano, Wu, B., Gebremedhin, K. G., & Wright, P. (2017). Economic returns for different cooling systems for dairy cattle. In *Animal environment and welfare*, Oct 23-26, 2017. [http://refhub.elsevier.com/S1537-5110\(20\)30202-6/sref134](http://refhub.elsevier.com/S1537-5110(20)30202-6/sref134)
- Piccione, G.; Caola, G.; Refinetti, R. Daily and estrous rhythmicity of body temperature in domestic cattle. *BMC Physiol.* 2003, 3, 7. <https://bmcpophysiol.biomedcentral.com/articles/10.1186/1472-6793-3-7>
- Pilatti, J.A.; Vieira, F.M.C.; Rankrape, F.; Vismara, E.S. Diurnal behaviors and herd characteristics of dairy cows housed in a compost-bedded pack barn system under hot and humid conditions. *Animal* 2019, 13, 399–406. <http://doi.org/10.1017/S1751731118001088>
- Pinedo, P.J., De Vries, A., 2017. Season of conception is associated with future survival, fertility, and milk yield of Holstein cows. *J. Dairy Sci.* 100, 6631–6639. [http://refhub.elsevier.com/S1871-1413\(21\)00410-8/sbref0066](http://refhub.elsevier.com/S1871-1413(21)00410-8/sbref0066)
- Polsky, L.; von Keyserlingk, M.A.G. Invited review: Effects of heat stress on dairy cattle welfare. *J. Dairy Sci.* 2017, 100, 8645–8657. <http://doi.org/10.3168/jds.2017-12651>
- Putney, D.J., Drost, M., Thatcher, W.W., 1989. Influence of summer heat stress on pregnancy rates of lactating dairy cattle following embryo transfer or artificial insemination. *Theriogenology* 31, 765–778. [http://refhub.elsevier.com/S1871-1413\(21\)00410-8/sbref0069](http://refhub.elsevier.com/S1871-1413(21)00410-8/sbref0069)
- Radon, J., Bieda, W., Lendelov a, J., & Pogran, S. (2014). Computational model of heat exchange between dairy cow and bedding. *Computers and Electronics in Agriculture*, 107, 29e37. [http://refhub.elsevier.com/S1537-5110\(20\)30202-6/sref138](http://refhub.elsevier.com/S1537-5110(20)30202-6/sref138)
- Rahman, M.B., Schellander, K., Luceno, N.L., Van Soom, A., 2018. Heat stress responses in spermatozoa: mechanisms and consequences for cattle fertility. *Theriogenology* 113, 102–112. [http://refhub.elsevier.com/S1871-1413\(21\)00410-8/sbref0070](http://refhub.elsevier.com/S1871-1413(21)00410-8/sbref0070)
- Reid, E.D.; Fried, K.; Velasco, J.M.; Dahl, G.E. Correlation of rectal temperature and peripheral temperature from implantable radio-frequency microchips in Holstein steers challenged with lipopolysaccharide under thermoneutral and high ambient temperatures. *J. Anim. Sci.* 2012, 90, 4788–4794. <http://doi.org/10.2527/jas.2011-4705>
- Rensis, F. D., & Scaramuzzi, R. J. (2003). Heat stress and seasonal effects on reproduction in the dairy cow: a review. *Theriogenology*, 60(6), 1139-1151. [http://refhub.elsevier.com/S1537-5110\(20\)30202-6/sref139](http://refhub.elsevier.com/S1537-5110(20)30202-6/sref139)
- Reynolds, L.P., Ferrell, C.L., Nienaber, J.A., Ford, S.P., 1985. Effects of chronic environmental heat-stress on blood flow and nutrient uptake of the gravid bovine uterus and foetus. *J. Agric. Sci.* 104, 289–297. [http://refhub.elsevier.com/S1871-1413\(21\)00410-8/sbref0072](http://refhub.elsevier.com/S1871-1413(21)00410-8/sbref0072)
- Rhoads, M.L.; Rhoads, R.P.; VanBaale, M.J.; Collier, R.J.; Sanders, S.R.; Weber, W.J.; Crooker, B.A.; Baumgard, L.H. Effects of heat stress and plane of nutrition on lactating Holstein cows: I. Production, metabolism, and aspects of circulating somatotropin. *J. Dairy Sci.* 2009, 92, 1986–1997 <http://dx.doi.org/10.3168/jds.2008-1641>
- Roth, Z.; Arav, A.; Bor, A.; Zeron, Y.; Braw-Tal, R.; Wolfenson, D. Improvement of quality of oocytes collected in the autumn by enhanced removal of impaired follicles from previously heat-stressed cows. *Reproduction* 2001, 122, 737–744. <http://doi.org/10.1530/rep.0.1220737>

- Roth, Z., 2008. Heat stress, the follicle, and its enclosed oocyte: mechanisms and potential strategies to improve fertility in dairy cows. *Reprod Domest Anim* 43, 238e44. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0531.2008.01168.x>.
- Roth, Z., 2020. Cooling is the predominant strategy to alleviate the effects of heat stress on dairy cows. *Reprod Domest Anim*. <https://doi.org/10.1111/rda.13765>.
- Rungruang, S.; Collier, J.; Rhoads, R.; Baumgard, L.; De Veth, M.; Collier, R. A dose-response evaluation of rumen-protected niacin in thermoneutral or heat-stressed lactating Holstein cows. *J. Dairy Sci.* 2014, 97, 5023–5034. <http://doi.org/10.3168/jds.2013-6970>
- Sabés-Alsina, M., Johannisson, A., Lundeheim, N., Lopez-Bejar, M., Morrell, J.M., 2017. Effects of season on bull sperm quality in thawed samples in northern Spain. *Vet. Rec.* 180, 251. [http://refhub.elsevier.com/S1871-1413\(21\)00410-8/sbref0079](http://refhub.elsevier.com/S1871-1413(21)00410-8/sbref0079)
- Sakatani, M., Takahashi, M., Alvarez, N.V., Hansen, P.J., 2012. Consequences of physiological heat shock beginning at the zygote stage on embryonic development and expression of stress response genes in cattle. *J Dairy Sci* 95, 3080e91. <https://doi.org/10.3168/jds.2011-4986>.
- Salles, M.S.V.; da Silva, S.C.; Salles, F.A.; Roma, L.C.; El Faro, L.; Mac Lean, P.A.B.; de Oliveira, C.E.L.; Martello, L.S. Mapping the body surface temperature of cattle by infrared thermography. *J. Therm. Biol.* 2016, 62, 63–69. <http://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2016.10.003>
- Santos, V.; Carvalho, P.; Maia, C.; Carneiro, B.; Valenza, A.; Fricke, P. Fertility of lactating Holstein cows submitted to a DoubleOvsynch protocol and timed artificial insemination versus artificial insemination after synchronization of estrus at a similar day in milk range. *J. Dairy Sci.* 2017, 100, 8507–8517. <http://doi.org/10.3168/jds.2017-13210>
- Satrapa, R. A., T. Nabhan, C. F. Silva, R. A. Simoes, E. M. Razza, R. Z. Puelker, L. A. Trinca, and C. M. Barros. 2011. Influence of sire breed (*Bos indicus* versus *Bos taurus*) and interval from slaughter to oocyte aspiration on heat stress tolerance of in vitro-produced bovine embryos. *Theriogenology* 76:1162–1167.
- Schaefer, A.L.; Cook, N.J.; Bench, C.; Chabot, J.B.; Colyn, J.; Liu, T.; Okine, E.K.; Stewart, M.; Webster, J.R. The non-invasive and automated detection of bovine respiratory disease onset in receiver calves using infrared thermography. *Res. Vet. Sci.* 2012, 93, 928–935. <http://doi.org/10.1016/j.rvsc.2011.09.021>
- Schieber, M.; Chandel, N.S. ROS function in redox signaling and oxidative stress. *Curr. Biol.* 2014, 24, R453–R462 <http://doi.org/10.1016/j.cub.2014.03.034>
- Sejian V, Valtorta S, Gallardo M, Singh AK (2012) Ameliorative measures to counteract environmental stresses. In: *Environmental stress and amelioration in livestock production*. Springer, Berlin, pp 153–180
- Sellier, N.; Guettier, E.; Staub, C. A Review of Methods to Measure Animal Body Temperature in Precision Farming. *Am. J. Agric. Sci. Technol.* 2014, 2, 74–99. <http://doi.org/10.7726/ajast.2014.1008>
- Shoshani, E., & Hetzroni, A. (2013). Optimal barn characteristics for high-yielding Holstein cows as derived by a new heatstress model. *Animal*, 7(1), 176e182. [http://refhub.elsevier.com/S1537-5110\(20\)30202-6/sref154](http://refhub.elsevier.com/S1537-5110(20)30202-6/sref154)

- Silanikove, N. Effects of heat stress on the welfare of extensively managed domestic ruminants. *Livest. Prod. Sci.* 2000, 67, 1–18. [http://doi.org/10.1016/S0301-6226\(00\)00162-7](http://doi.org/10.1016/S0301-6226(00)00162-7)
- Silanikove, N.; Shapiro, F.; Shinder, D. Acute heat stress brings down milk secretion in dairy cows by up-regulating the activity of the milk-borne negative feedback regulatory system. *BMC Physiol.* 2009, 9, 13. <http://dx.doi.org/10.1186/1472-6793-9-13>
- Silva, R. G.d., Morais, D. A. E. F., & Guilhermino, M. M. (2007). Evaluation of thermal stress indexes for dairy cows in tropical regions. *Revista Brasileira de Zootecnia*, 36(4), 1192-1198. [http://refhub.elsevier.com/S1537-5110\(20\)30202-6/sref157](http://refhub.elsevier.com/S1537-5110(20)30202-6/sref157)
- Soltan, M. A. 2010. Effect of dietary chromium supplementation on productive and reproductive performance of early lactating dairy cows under heat stress. *J. Anim. Physiol. Anim. Nutr. (Berl.)* 94:264–272.
- Spiers, D., Spain, J., Sampson, J., & Rhoads, R. (2004). Use of physiological parameters to predict milk yield and feed intake in heat-stressed dairy cows. *Journal of Thermal Biology*, 29(7), 759e764. [http://refhub.elsevier.com/S1537-5110\(20\)30202-6/sref162](http://refhub.elsevier.com/S1537-5110(20)30202-6/sref162)
- Spiers, D. E., J. N. Spain, M. R. Ellersieck, and M. C. Lucy. 2018. Strategic application of convective cooling to maximize the thermal gradient and reduce heat stress response in dairy cows. *J. Dairy Sci.* 101:8269–8283.
- St-Pierre, N., Cobanov, B., & Schnitkey, G. (2003). Economic losses from heat stress by US livestock industries1. *Journal of Dairy Science*, 86, E52-E77. [http://refhub.elsevier.com/S1537-5110\(20\)30202-6/sref164](http://refhub.elsevier.com/S1537-5110(20)30202-6/sref164)
- Strutzke, S.; Fiske, D.; Hoffmann, G.; Ammon, C.; Heuwieser, W.; Amon, T. Technical note: Development of a noninvasive respiration rate sensor for cattle. *J. Dairy Sci.* 2019, 102, 690–695. <http://doi.org/10.3168/jds.2018-14999>
- Tao S, Monteiro AP, Thompson IM, Hayen MJ, Dahl GE. Effect of late gestation maternal heat stress on growth and immune function of dairy calves. *J Dairy Sci.* (2012) 95:7128–36. <http://doi.org/10.3168/jds.2012-5697>
- Tao, S., and G. E. Dahl. 2013. Invited review: Heat stress effects during late gestation on dry cows and their calves. *J. Dairy Sci.* 96:4079–4093.
- Thompson, I.M., Dahl, G.E., 2012. Dry-period seasonal effects on the subsequent lactation. *Prof. Anim. Sci.* 28, 628–663. [http://refhub.elsevier.com/S1871-1413\(21\)00410-8/sbref0093](http://refhub.elsevier.com/S1871-1413(21)00410-8/sbref0093)
- Thompson, I.M., Tao, S., Branen, J., Ealy, A.D., Dahl, G.E., 2013. Environmental regulation of pregnancy-specific protein B concentrations during late pregnancy in dairy cattle. *J. Anim. Sci.* 91, 168–173. <https://doi.org/10.2527/jas.2012-5730>.
- Toledo, I.M., Dahl, G.E., Bucklin, R.A., Beede, D.K., 2019. Methods to relieve heat stress for Florida dairies. Univ. Florida EDIS cir782. <https://edis.ifas.ufl.edu/publication/ae022>.

- Tresoldi, G.; Schütz, K.E.; Tucker, C.B. Sampling strategy and measurement device affect vaginal temperature outcomes in lactating dairy cattle. *J. Dairy Sci.* 2020, 103, 5414–5421. [https://www.journalofdairyscience.org/article/S0022-0302\(20\)30250-2/fulltext](https://www.journalofdairyscience.org/article/S0022-0302(20)30250-2/fulltext)
- Turk, R., O. Podpecan, J. Mrkun, Z. Flegar-Mestric, S. Perkov, and P. Zrimsek. 2015. The effect of seasonal thermal stress on lipid mobilisation, antioxidant status and reproductive performance in dairy cows. *Reprod. Domest. Anim.* 50: 595–603.
- Unruh, E.M.; Theurer, M.E.; White, B.J.; Larson, R.L.; Drouillard, J.S.; Schrag, N. Evaluation of infrared thermography as a diagnostic tool to predict heat stress events in feedlot cattle. *Am. J. Veter-Res.* 2017, 78, 771–777. <http://doi.org/10.2460/ajvr.78.7.771>
- Uzal Seyfi, S. (2013a). Hourly and seasonal variations in the area preferences of dairy cows in freestall housing. *Journal of Dairy Science*, 96(2), 906e917. [http://refhub.elsevier.com/S1537-5110\(20\)30202-6/sref173](http://refhub.elsevier.com/S1537-5110(20)30202-6/sref173)
- Uzal Seyfi, S. (2013b). Seasonal variation of the lying and standing behavior indexes of dairy cattle at different daily time periods in free-stall housing. *Animal Science Journal*, 84(10), 708e717. [http://refhub.elsevier.com/S1537-5110\(20\)30202-6/sref174](http://refhub.elsevier.com/S1537-5110(20)30202-6/sref174)
- Van Eenennaam AL (2019) Application of genome editing in farm animals: cattle. *Transgenic Research* 28, 93–100. <http://doi.org/10.1007/s11248-019-00141-6>
- Vizzotto, E.; Fischer, V.; Neto, A.T.; Abreu, A.; Stumpf, M.; Werncke, D.; Schmidt, F.; McManus, C. Access to shade changes behavioral and physiological attributes of dairy cows during the hot season in the subtropics. *Animal* 2015, 9, 1559–1566. <http://doi.org/10.1017/S1751731115000877>
- Vogel, B.; Wagner, H.; Gmoser, J.; Wörner, A.; Löschberger, A.; Peters, L.; Frey, A.; Hofmann, U.; Frantz, S. Touch-free measurement of body temperature using close-up thermography of the ocular surface. *MethodsX* 2016, 3, 407–416. <http://doi.org/10.1016/j.mex.2016.05.002>
- Wang, J.P.; Bu, D.P.; Wang, J.Q.; Huo, X.K.; Guo, T.J.; Wei, H.Y.; Zhou, L.Y.; Rastani, R.R.; Baumgard, L.H.; Li, F.D. Effect of saturated fatty acid supplementation on production and metabolism indices in heat-stressed mid-lactation dairy cows. *J. Dairy Sci.* 2010, 93, 4121–4127. <http://dx.doi.org/10.3168/jds.2009-2635>
- Wang, F. X., Shao, D. F., Li, S. L., Wang, Y. J., Azarfar, A., & Cao, Z. J. (2016). Effects of stocking density on behavior, productivity, and comfort indices of lactating dairy cows. *Journal of Dairy Science*, 99(5), 3709e3717. [http://refhub.elsevier.com/S1537-5110\(20\)30202-6/sref178](http://refhub.elsevier.com/S1537-5110(20)30202-6/sref178)
- Weng X, Monteiro APA, Guo J, Li C, Orellana RM, Marins TN, Bernard JK, Tomlinson DJ, DeFrain JM, Wohlgemuth SE, Tao S (2018) Effects of heat stress and dietary zinc source on performance and mammary epithelial integrity of lactating dairy cows. *J Dairy Sci* 101(3):2617–2630. <https://doi.org/10.3168/jds.2017-13484>
- West, J. (2003). Effects of heat-stress on production in dairy cattle. *Journal of Dairy Science*, 86(6), 2131e2144. [http://refhub.elsevier.com/S1537-5110\(20\)30202-6/sref179](http://refhub.elsevier.com/S1537-5110(20)30202-6/sref179)
- West, J.W.; Mullinix, B.G.; Bernard, J.K. Effects of Hot, Humid Weather on Milk Temperature, Dry Matter Intake, and Milk Yield of Lactating Dairy Cows. *J. Dairy Sci.* 2003, 86, 232–242. [http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(03\)73602-9](http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(03)73602-9)

- Wheelock, J.B.; Rhoads, R.P.; VanBaale, M.J.; Sanders, S.R.; Baumgard, L.H. Effects of heat stress on energetic metabolism in lactating Holstein cows. *J. Dairy Sci.* 2010, 93, 644–655
<http://dx.doi.org/10.3168/jds.2009-2295>
- Wolfenson, D., B. J. Lew, W. W. Thatcher, Y. Graber, and R. Meidan. 1997. Seasonal and acute heat stress effects on steroid production by dominant follicles in cows. *Anim. Reprod. Sci.* 47:9–19.
- Yadav, B.; Singh, G.; Wankar, A. The use of infrared skin temperature measurements for monitoring heat stress and welfare of crossbred cattle. *Indian J. Dairy Sci.* 2017, 70, 127–131.
- Yan, G.; Liu, K.; Hao, Z.; Shi, Z.; Li, H. The effects of cow-related factors on rectal temperature, respiration rate, and temperature-humidity index thresholds for lactating cows exposed to heat stress. *J. Therm. Biol.* 2021, 100, 103041. <http://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2021.103041>
- Zhang, F. J., X. G. Weng, J. F. Wang, D. Zhou, W. Zhang, C. C. Zhai, Y. X. Hou, and Y. H. Zhu. 2014a. Effects of temperature-humidity index and chromium supplementation on antioxidant capacity, heat shock protein 72, and cytokine responses of lactating cows. *J. Anim. Sci.* 92:3026–3034.
- Zhang L, Ying S, An W, Lian H, Zhou G, Han Z (2014) Effects of dietary betaine supplementation subjected to heat stress on milk performances and physiology indices in dairy cow. *Genet Mol Res* 13(3):7577–7586.
<https://doi.org/10.4238/2014.September.12.25>
- Zhou Z, Bulgari O, Vailati-Riboni M, Trevisi E, Ballou MA, Cardoso FC, Luchini DN, Lóor JJ. Rumen protected methionine compared with rumen-protected choline improves immune-metabolic status in dairy cows during the periparturient period. *J Dairy Sci* 2016;99:8956–69. [http://refhub.elsevier.com/S0739-7240\(22\)00075-3/sbref0054](http://refhub.elsevier.com/S0739-7240(22)00075-3/sbref0054)