

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
FACULDADE DE MEDICINA VETERINÁRIA E ZOOTECNIA
CAMPUS DE BOTUCATU

BIODISPONIBILIDADE DE FONTES ORGÂNICA E INORGÂNICA DE ZINCO PARA
LEITÕES RECÉM-DESMAMADOS

THAÍS FERREIRA DOS SANTOS ZULLO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-
graduação em Zootecnia como parte das
exigências para obtenção do título de Mestre em
Zootecnia

BOTUCATU – SP
Dezembro de 2025

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
FACULDADE DE MEDICINA VETERINÁRIA E ZOOTECNIA
CAMPUS DE BOTUCATU

BIODISPONIBILIDADE DE FONTES ORGÂNICA E INORGÂNICA DE ZINCO PARA
LEITÕES RECÉM-DESMAMADOS

THAÍS FERREIRA DOS SANTOS ZULLO

Orientador: Prof. Dr. Marcos Lívio Panhoza Tse

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-
graduação em Zootecnia como parte das
exigências para obtenção do título de Mestre em
Zootecnia

BOTUCATU – SP

Dezembro de 2025

Z94b Zullo, Thaís Ferreira dos Santos
Biodisponibilidade de fontes orgânica e inorgânica de zinco para leitões recém-desmamados / Thaís Ferreira dos Santos Zullo. -- Botucatu, 2025
57 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Medicina Veterinária e Zootecnia, Botucatu
Orientador: Marcos Livio Panhoza Tse

1. Desempenho. 2. Microbiota cecal. 3. Minerais. 4. Suínos. I. Título.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Botucatu



ATESTADO DE APROVAÇÃO - DEFESA

Atestamos que **THAÍS FERREIRA DOS SANTOS ZULLO**, RA nº: ZNP230171, RG nº 43.135.891-6, expedido pela SSP/SP, defendeu, no dia 06/11/2025, a dissertação intitulada **BIODISPONIBILIDADE DE FONTES ORGÂNICA E INORGÂNICA DE ZINCO PARA LEITÕES RECÉM DESMAMADOS**, junto ao Programa de Pós Graduação em Zootecnia, Curso de Mestrado Acadêmico, tendo sido 'APROVADA'.

Atestamos ainda que a obtenção do título dependerá de homologação pelo Órgão Colegiado competente.

Botucatu, 06 de novembro de 2025

Documento assinado digitalmente
gov.br CLAUDIA CRISTINA MORECI
Data: 27/11/2025 17:57:49-0300
Verifique em <https://validar.fti.gov.br>

BIOGRAFIA DO AUTOR

Thaís Ferreira dos Santos Zullo, nascida na cidade de São Manuel/SP, em 14 de julho de 1995, filha de Claudemir Zullo e Fabiana Maria Ferreira dos Santos Zullo. Ingressou na Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” - UNESP - Faculdade de Medicina Veterinária e Zootecnia, Campus de Botucatu, no curso de Zootecnia no início do ano de 2017. Em agosto de 2023 ingressou no Curso de Mestrado em Zootecnia, pelo Programa de Pós Graduação da FMVZ – UNESP também no Campus de Botucatu, sob orientação do Prof. Assoc. Dr. Marcos Livio Tse, quando foi bolsista pela CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior), atuando na área de nutrição e produção de suínos.

DEDICATÓRIA

Dedico esta dissertação a Deus, aos meus pais, Claudemir Zullo e Fabiana Maria Ferreira dos Santos Zullo, aos meus irmãos Leticia Ferreira dos Santos Zullo e João Guilherme Ferreira dos Santos Zullo e ao meu noivo Luís Antônio Villas Bôas.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por me sustentar durante toda esta jornada.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela bolsa concedida.

Ao Programa de Pós-graduação em Zootecnia da Faculdade de Medicina Veterinária e Zootecnia, pela oportunidade.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Marcos Lívio Panhoza Tse, pela oportunidade de realizar o mestrado sob sua orientação, pelos ensinamentos compartilhados, pelos conselhos e pelo apoio.

À secretária da Seção de Pós-graduação, Cláudia Cristina Moreci, por toda atenção, paciência e pelos esclarecimentos.

Aos professores do Programa de Pós-graduação em Zootecnia, pelos ensinamentos, conversas e exemplos que contribuíram para minha formação profissional e pessoal.

À Prof.^a Dr.^a Margarida Maria Barros, por todo o suporte durante este período, pelas contribuições à dissertação, pelo exemplo, pela oportunidade de ministrar aulas de sua disciplina, por acreditar e confiar em mim e no meu trabalho, e por ter sido fundamental em todo este caminho.

Ao Prof. Dr. Luis Edivaldo Pezzato, pelas contribuições à dissertação, pelas conversas, pelo carinho, pela atenção, pelos direcionamentos, por me acalmar nos momentos de aflição e por ser essa pessoa iluminada.

Ao Prof. Dr. Urbano dos Santos Ruiz, pelas contribuições à dissertação, pela disponibilidade e pelo conhecimento compartilhado.

À equipe do Centro de Estudos e Pesquisas Aplicadas em Suínos, pela ajuda na condução dos experimentos.

À minha família, por estar sempre ao meu lado, me apoiando, me encorajando e me dando forças para continuar.

À minha avó, Maria Aparecida Ferreira dos Santos, por todas as orações.

Ao meu noivo, Luís Antônio Villas Bôas, por ser meu alicerce, meu equilíbrio, meu refúgio e minha segurança em todos os momentos; pelo amor, cuidado e dedicação que tornaram este sonho realidade.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), pelo apoio financeiro, concedido por meio do Processo nº 2024/12919-3

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

EPÍGRAFE

*“Entrega o teu caminho ao Senhor;
confia nele, e ele tudo fará.”*

Salmos 37:5

RESUMO GERAL

O objetivo deste estudo foi avaliar os efeitos da suplementação de zinco (Zn) nas formas inorgânica (sulfato de zinco) e orgânica (quelato Zn-aminoácidos) em dietas de leitões recém-desmamados, sobre o desempenho, parâmetros hematológicos e microbiota cecal. Foram utilizados 126 leitões recém-desmamados com idade média de 21 dias, distribuídos em delineamento em blocos casualizados (por peso), com sete tratamentos, seis repetições e três animais por unidade experimental. Os tratamentos foram: Zn0 - Dieta basal (DB) sem adição de zinco; ZnS50 - DB com a suplementação de 50mg/kg de Zn inorgânico; ZnS100 - DB com a suplementação de 100mg/kg de Zn inorgânico; ZnS150 - DB com a suplementação de 150mg/kg de Zn inorgânico; ZnQ50 - DB com a suplementação de 50mg/kg de Zn orgânico; ZnQ100 - DB com a suplementação de 100mg/kg de Zn orgânico; ZnQ150 - DB com a suplementação de 150mg/kg de Zn orgânico. Não houve diferença de desempenho para nenhuma das variáveis analisadas ($P>0,05$) em nenhum dos períodos. Os animais alimentados com ZnS100 apresentaram maiores teores séricos de hemoglobina e hematócrito em comparação aos grupos ZnS50 e ZnQ50 no 28º dia. Os índices de VCM, CHCM e HCM não diferiram entre as fontes e os níveis de zinco ($P>0,05$). Entretanto, houve diferença quando comparado o 14º dia e 28º dia de coleta, com a diminuição do VCM para os tratamentos ZnQ100 e ZnQ150, aumento da CHCM para todos os tratamentos, exceto para ZnQ50 e aumento do HCM apenas no grupo ZnS50. A contagem de plaquetas foi reduzida nos animais que receberam ZnQ150 entre os momentos de coleta. Para o leucograma, não foram verificadas diferenças entre os tratamentos nem entre as formas de suplementação para nenhuma das variáveis avaliadas independentemente do momento de coleta. Entretanto, houve diferença quando comparado o 14º dia e 28º dia de coleta, com o aumento da contagem total de leucócitos e linfócitos nos animais dos tratamentos ZnS50 e ZnQ100, aumento dos segmentados nos animais do tratamento ZnS50 e aumento dos monócitos nos animais dos tratamentos ZnQ50 e ZnQ100. Para microbiota intestinal, ao 35º dia de experimento, as fontes de Zn não influenciaram a concentração cecal ($P>0,05$) de *Clostridium*, *Escherichia coli* e bactérias ácido-láticas. Conclui-se que a suplementação de Zn na forma orgânica não foi mais biodisponível que o Zn inorgânico, não influenciando desempenho, parâmetros sanguíneos e microbiota cecal.

Palavras-chave: desempenho; microbiota cecal; minerais; suínos.

ABSTRACT

“Bioavailability of organic and inorganic zinc sources for newly weaned piglets”

The objective of this study was to evaluate the effects of zinc (Zn) supplementation in inorganic (zinc sulfate) and organic (Zn–amino acid chelate) forms in diets for newly weaned piglets on growth performance, hematological parameters, and cecal microbiota. A total of 126 newly weaned piglets with an average age of 21 days were used, distributed in a randomized block design (by weight), with seven treatments, six replicates, and three animals per experimental unit. The treatments were: Zn0 – Basal diet (BD) without added zinc; ZnS50 – BD supplemented with 50 mg/kg of inorganic Zn; ZnS100 – BD supplemented with 100 mg/kg of inorganic Zn; ZnS150 – BD supplemented with 150 mg/kg of inorganic Zn; ZnQ50 – BD supplemented with 50 mg/kg of organic Zn; ZnQ100 – BD supplemented with 100 mg/kg of organic Zn; ZnQ150 – BD supplemented with 150 mg/kg of organic Zn. No differences in growth performance were observed for any of the variables analyzed ($P>0.05$) in any of the periods. The animals fed ZnS100 showed higher serum hemoglobin and hematocrit values compared to ZnS50 and ZnQ50 groups on day 28. The MCV, MCHC, and MCH indices did not differ among zinc sources and levels ($P>0.05$). However, differences were observed when comparing day 14 and day 28 of sampling, with decreased MCV for the ZnQ100 and ZnQ150 treatments, increased MCHC for all treatments except ZnQ50, and increased MCH only in the ZnS50 group. Platelet counts were reduced in animals that received ZnQ150 between sampling times. For the leukogram, no differences were observed among treatments or between Zn sources for any of the variables evaluated, regardless of sampling time. However, differences were observed when comparing day 14 and day 28 of sampling, with increased total leukocyte and lymphocyte counts in animals from the ZnS50 and ZnQ100 treatments, increased segmented cells in animals from the ZnS50 treatment, and increased monocytes in animals from the ZnQ50 and ZnQ100 treatments. Regarding intestinal microbiota, on day 35 of the experiment, Zn sources did not influence the cecal concentrations ($P>0.05$) of *Clostridium*, *Escherichia coli*, or lactic acid bacteria. It is concluded that Zn supplementation in organic form was not more bioavailable than inorganic Zn, and did not influence growth performance, blood parameters, or cecal microbiota.

Keywords: cecal microbiota; growth performance; minerals; swine.

LISTA DE TABELAS**CAPÍTULO 2**

Tabela 1. Composição percentual das dietas experimentais Pré-inicial I (referência), Pré inicial II e Inicial	23
Tabela 2. Valores nutricionais calculados das dietas experimentais	24
Tabela 3. Especificações do Zn quelatado com aminoácidos utilizado no estudo	24
Tabela 4. Níveis de zinco analisados nas dietas experimentais	26
Tabela 5. Ganho diário de peso (GDP, Kg), consumo diário de ração (CDR, Kg) e conversão alimentar (CA) dos leitões durante o período experimental (35 dias)	27
Tabela 6. Média e desvio-padrão dos valores de Eritrograma e plaquetas dos leitões alimentados com fontes de zinco, ao 14º e 28º dia de experimento	28
Tabela 7. Média e desvio-padrão dos valores do Leucograma dos leitões alimentados com fontes de zinco, ao 14º e 28º dia de experimento	30
Tabela 8. Medidas descritivas de bactérias cecais dos leitões suplementados com fontes de zinco	31
Tabela 9. Análise descritiva das populações de Salmonella de acordo com os tratamentos ...	32

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

A	Alfa
B	Beta
°C	Graus Celsius
µg	Micrograma
µL	Microlitro
µm	Micrômetro
APT	Água peptonada tamponada
CA	Conversão alimentar
Ca ²⁺	Cátion cálcio (íon divalente)
CDR	Consumo diário de ração
CEUA	Comitê de ética
Co	Cobalto
Cu	Cobre
Cu ²⁺	Cátion cobre (íon divalente)
DB	Dieta Basal
DNA	Ácido Desoxirribonucleico
<i>E. Coli</i>	<i>Escherichia Coli</i>
ESG	Environmental, Social and Governance
EUA	Estados Unidos
Fe	Ferro
Fe ²⁺	Cátion ferro (íon divalente)
FMVZ	Faculdade de Medicina Veterinária e Zootecnia
G	Gramma
g/cc	Gramma por centímetro cúbico
g/dL	Gramma por decilitro
GDP	Ganho diário de peso
HCM	Hemoglobina Corpuscular Média

IgA	Imunoglobulina A
Kg	Quilograma
M	Metros
Mg	Magnésio
Mn	Manganês
Mg	Miligrama
Min	Mínimo
Ppm	Parte por milhão
RBP	Retinol Binding Protein (Proteína Ligadora de Retinol)
S	Enxofre
Se	Selênio
SOD	Superóxido Dismutase
SP	São Paulo
Spp	Espécies
T3	Triiodotironina
T4	Tiroxina
TGI	Trato Gastrintestinal
TiO ₂	Dióxido de titânio
TNF- α	Fator de Necrose Tumoral Alfa
UE	União Europeia
UFC/g	Unidades Formadoras de Colônias por grama
Ui	Unidade internacional
UNESP	Universidade Estadual Paulista
VCM	Volume Corpuscular Médio
Vit	Vitamina
W	Wattz
Zn	Zinco
Zn ₀	Dieta Basal sem adição de Zinco
Zn ²⁺	Cátion zinco (íon divalente)

Zn-AA	Zinco quelato com aminoácidos
Zn-Met	Zinco quelato com metionina
ZnO	Óxido de Zinco
ZnQ50	Zinco quelato 50ppm
ZnQ100	Zinco quelato 100ppm
ZnQ150	Zinco quelato 150ppm
ZnS50	Zinco Sulfato 50ppm
ZnS100	Zinco Sulfato 100ppm
ZnS150	Zinco Sulfato 150ppm
ZnSO4	Sulfato de Zinco

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	1
1. Considerações Iniciais	2
2. Revisão de Literatura	3
2.1 Desafios da fase pós-desmame	3
2.2 Zn na nutrição de leitões recém-desmamados	4
2.3 Metabolismo do Zn em leitões recém-desmamados	6
2.4 Excreção de Zn e Impacto Ambiental	6
2.5 Biodisponibilidade do Zn	7
Referências Bibliográficas	10
CAPÍTULO 2. "Efeito de fontes orgânicas e inorgânicas de zinco dietético sobre o desempenho produtivo, microbiota cecal e parâmetros sanguíneos de leitões recém-desmamados"	17
Resumo	19
1. Introdução	20
2. Material e Métodos	21
2.1 Instalação experimental	22
2.2 Delineamento e Dietas Experimentais	22
2.3 Variáveis Analisadas	25
2.4 Análises Estatísticas	25
3. Resultados	26
3.1 Níveis de Zinco na dieta	26
3.2 Desempenho	27
3.3 Parâmetros Hematológicos	28
3.4 Microbiologia Cecal	31
4. Discussão	32
4.1 Desempenho	32
4.2 Parâmetros hematológicos	34
4.3 Microbiota cecal	35
5. Conclusões	36
Referências bibliográficas	37
IMPLICAÇÕES	42

CAPÍTULO 1

Revisão de Literatura

1. Considerações Iniciais

O Brasil ocupa o quarto lugar na produção e exportação mundial de carne suína, precedido pela China, União Europeia e Estados Unidos. A produção brasileira passou de 5,156 milhões de toneladas em 2023 para 5,305 milhões de toneladas em 2024, acompanhado do crescimento do consumo per capita de 18,3 para 18,6 kg/habitante (ABPA, 2025). Para otimizar a produtividade da indústria suinícola, utiliza-se a prática do desmame precoce, realizado em média aos 21 dias, responsável pelo aumento do número de leitões produzidos por matriz por ano (Santos *et al.*, 2021).

O desmame é um período crítico para os leitões, caracterizado por mudanças abruptas na dieta, no ambiente e nas interações sociais, que provocam estresse e redução significativa na ingestão alimentar nos primeiros dias pós-desmame (Campbell; Crenshaw; Polo, 2013). Estes fatores, associados à imaturidade fisiológica e imunológica dos animais na idade de desmame, podem tornar o ambiente gastrointestinal propício à proliferação de bactérias patogênicas, levando à ocorrência de quadros diarreicos e danos ao epitélio, com redução da área absorptiva e, conseqüentemente, comprometimento do desempenho produtivo (Pluske *et al.*, 2013).

A suplementação de zinco (Zn) na dieta de leitões tem sido utilizada para minimizar os efeitos adversos causados pelo desmame, devido à capacidade de modular a microbiota intestinal, reduzir a incidência de diarreia e melhorar o desempenho produtivo (Shannon; Hill, 2019; Bonetti *et al.*, 2021). O Zn é um micromineral essencial que atua como cofator em mais de 300 enzimas, desempenhando funções estruturais, catalíticas e regulatórias, importantes para crescimento, desenvolvimento, imunidade e manutenção da homeostase celular (Kambe *et al.*, 2015). Este mineral está relacionado à melhoria da morfologia intestinal, por estimular a expressão de proteínas associadas às junções oclusivas e vilosidades intestinais, promovendo aumento da área absorptiva e redução da permeabilidade paracelular (Bonetti *et al.*, 2021).

Tradicionalmente, o Zn é suplementado na nutrição animal em formas inorgânicas, principalmente óxido de Zn (ZnO) e sulfato de Zn (ZnSO₄). No entanto, fatores dietéticos e fisiológicos, como a formação de complexos insolúveis com fitatos e fibras, competição com cátions divalentes, como Ca²⁺, Fe²⁺ e Cu²⁺ (Gessler *et al.*, 2018; Joudaki *et al.*, 2023) e a imaturidade do sistema transportador intestinal, podem reduzir a biodisponibilidade do Zn inorgânico (Hill; Murphy; Williams, 2019). A fração não absorvida é excretada nas fezes, aumentando a excreção ambiental e impactos negativos sobre o meio ambiente, como contaminação do solo e da água (Van Sprang *et al.*, 2009), além de contribuir para resistência microbiana (Ekhlash *et al.*, 2023). Por esta razão, a suplementação de ZnO na dieta de suínos

tem sido restringida ao redor do mundo (Wang *et al.*, 2021), principalmente pela União Europeia, que impôs o limite de 150mg/kg de ZnO na ração (Commission Implementing Decision of 26.6.2017, C (2017) 4, 529 Final).

Dentre as alternativas para reduzir o impacto ambiental provocada pela produção suinícola, está a adoção de estratégia nutricional, como minimizar a suplementação de minerais e maximizar a eficiência de utilização dos nutrientes (Murphy; Lange, 2004). Os minerais organicamente complexados são formados por íons metálicos e uma estrutura complexa com aminoácidos, peptídeos proteínas ou polissacarídeos (Mendéz *et al.*, 2021). Nestas formas, o mineral é protegido contra interações com componentes da dieta, competição com outros minerais e a utilização de rotas alternativas facilita a absorção (Nitrayova *et al.*, 2012), aumentando a biodisponibilidade. Estudos demonstram que a suplementação com Zn orgânico melhora o desempenho produtivo, pois favorece a absorção intestinal e, conseqüentemente, reduz a excreção fecal do mineral em comparação às fontes inorgânicas (Veum *et al.*, 2004; Buff *et al.*, 2005), contribuindo para menor impacto ambiental.

2.Revisão de Literatura

2.1 Desafios da fase pós-desmame

O período pós-desmame é considerado crítico na suinocultura, devido à exposição dos leitões a fatores estressantes, como separação da porca, mudança de ambiente, tensões sociais ocasionadas pelo reagrupamento e transição da dieta líquida para a dieta sólida (Arantes, 2005). Estes fatores, associados à imaturidade fisiológica e imunológica dos leitões, podem desencadear disfunções gastrintestinais, desequilíbrios da microbiota intestinal e comprometimento da resposta imune (Schokker *et al.*, 2014), impactando negativamente a saúde e o desempenho produtivo.

O estresse aumenta a secreção de cortisol e catecolaminas, hormônios que estimulam a produção de citocinas pró-inflamatórias, promovem mobilização energética e proteica e reduzem a disponibilidade de nutrientes para crescimento e síntese proteica (Squires, 2010; Tizard, 2014). Leitões recém-desmamados frequentemente apresentam redução nos valores de parâmetros hematológicos como hemoglobina, hematócrito e eritrócitos, sugerindo menor capacidade de transporte de oxigênio e predisposição à anemia funcional transitória (Miller; Ullrey; Gade, 2007; Pluske, 2013). Observa-se também a diminuição dos neutrófilos e

linfócitos, além de alterações em monócitos e macrófagos, comprometendo a resposta imune adaptativa e a ativação da fagocitose (Rooke; Bland 2002).

Durante o aleitamento, são fornecidos elevados níveis de lactose, substrato essencial para a proliferação de bactérias ácido-láticas, principalmente *Lactobacillus spp.*, as quais produzem ácido láctico suficiente para diminuir o pH gástrico e proteger o intestino delgado contra microrganismos patogênicos (Tannock; Fuller; Pedersen, 1992; Utiyama *et al.*, 2014). Após o desmame, as principais fontes de energia e proteína são modificadas, sendo que a lactose e a proteína do leite passam a ser substituídas por amido, óleo vegetal e fontes proteicas de menor digestibilidade (Quadros *et al.*, 2002). Esta transição, associada à imaturidade fisiológica dos leitões caracterizada por insuficiência na secreção de enzimas digestivas, ácido clorídrico, bicarbonato e muco, bem como a mudanças histológicas no intestino delgado, como atrofia de vilosidades e hiperplasia de criptas, resulta em redução da digestibilidade da dieta (Pluske; Henderson; Fahey, 1997; Molly, 2001).

O baixo consumo e a redução da digestibilidade, principalmente das frações proteicas, intensifica a fermentação intestinal e favorece a proliferação exacerbada de bactérias patogênicas oportunistas como *Escherichia coli* e *Salmonella spp.* (Chamone *et al.*, 2010). O desequilíbrio da microbiota intestinal compromete o desenvolvimento do sistema imunológico intestinal, reduzindo a produção de IgA secretória, aumentando a permeabilidade da mucosa e, conseqüentemente, tornando os leitões mais susceptíveis a infecções (Pié *et al.*, 2004). Estes eventos podem comprometer a saúde e o desempenho dos leitões recém-desmamados, resultando em baixo desempenho produtivo, uma vez que a integridade da mucosa, a morfologia intestinal e a eficiência da digestão estão diretamente ligadas à absorção de nutrientes e à produtividade animal (Collett, 2012; Cabrera *et al.*, 2013).

2.2 Zn na nutrição de leitões recém-desmamados

O Zn é um micromineral essencial, pertencente ao grupo 12 da tabela periódica, com número atômico 30 e massa atômica de 65,4 u (Maret, 2013). No organismo animal, predomina na forma de cátion divalente (Zn^{2+}) e, sendo cofator em mais de 300 enzimas, desempenha funções estruturais, catalíticas e regulatórias, que participam de processos vitais, como crescimento, desenvolvimento, imunidade e manutenção da homeostase celular (Roohani *et al.*, 2013; Kambe; Fukada; Sekiro, 2015).

Os níveis de suplementação de Zn para leitões na fase de creche são estimados em relação ao sistema de fases (Pré-Inicial 1: 21 a 35 dias; Pré-Inicial 2: 35 a 49 dias e Inicial: 49 a 63 dias) e à fonte mineral (inorgânica e orgânica), sendo sugeridos 165,6 mg/Kg de ração (Pré-Inicial 1), 149,7 mg/Kg de ração (Pré-Inicial 2) e 124,9 mg/Kg de ração (Inicial) para fontes inorgânicas e 74,5mg/Kg de ração (Pré-Inicial 1), 67,3 mg/Kg de ração (Pré-Inicial 2) e 56,2 mg/Kg de ração (Inicial) para fontes orgânicas (Rostagno, 2024).

No sistema imunológico, o Zn é necessário para a maturação e ativação de neutrófilos, macrófagos e células natural killer, responsáveis pela imunidade inata que age na defesa do organismo contra patógenos (Roth; Rink; Pieper, 2012). Além disto, a timulina, peptídeo essencial para a maturação e diferenciação de linfócitos T, depende do Zn para manter a estrutura e função (Prasad, 2008). Em situações de deficiência de Zn, a produção e atividade da timulina são comprometidas, resultando em menor ativação dos linfócitos T, redução da resposta imune adaptativa e maior susceptibilidade a infecções, especialmente no período pós-desmame, quando o sistema imunológico dos leitões ainda é imaturo (Fraker; King, 2004; Kim *et al.*, 2013; Dai *et al.*, 2025).

Além de seu papel imunológico, o Zn é fundamental para a mineralização óssea, estimulando a diferenciação e proliferação de osteoblastos, participando da síntese da matriz óssea (Mcdowell, 2003; Yamaguchi, 2010). O mineral também participa da regulação da expressão gênica, da síntese proteica e da modulação da atividade de metaloproteínas, enzimas que degradam a matriz extracelular, permitindo a renovação do tecido ósseo (Ceylan; Akdas; Yazihan, 2021; Molenda *et al.*, 2023).

No sistema endócrino, o Zn é essencial para a síntese e conversão dos hormônios tireoidianos T3 e T4, modulando a taxa metabólica basal, o crescimento corporal e a eficiência energética dos leitões (Nishiyama, 1994; Cominetti; Franciscato, 2009). No sistema antioxidante, o Zn atua como cofator da superóxido dismutase (SOD), catalisando a conversão de radicais superóxido em espécies menos reativas além de regular a expressão de metalotioneínas, inibindo NADPH oxidases, reduzindo estresse oxidativo e protegendo células contra danos oxidativos (Powell, 2000; Cousins; Liu; Olson 2006). O Zn é essencial para a síntese hepática e secreção de RBP (Retinol Binding Protein), proteína que transporta a vitamina A, e a deficiência de Zn reduz a RBP sérica, mesmo quando os níveis hepáticos de vitamina A são adequados (Sartre *et al.*, 2001).

O Zn atua na formação da hemoglobina e na maturação das células sanguíneas, necessárias para o transporte do oxigênio para os tecidos (Underwood; Suttle, 1999). Em leitões, a suplementação de Zn aumentou os níveis de hemoglobina e glóbulos vermelhos,

refletindo a melhora na oxigenação, saúde e desempenho dos animais (Kerr *et al.*, 2000; Biswas; Dang; Kim, 2024). O efeito do Zn na modulação da microbiota dos leitões está relacionado com a capacidade de acidificação intestinal, que promove o crescimento de bactérias benéficas e minimiza a proliferação de patógenos, fortalecendo a integridade das junções oclusivas entre enterócitos e aumentando a resistência a distúrbios gastrintestinais no período pós-desmame (Roselli *et al.*, 2003; Vahjen *et al.*, 2011; Wang *et al.*, 2019). A deficiência de Zn em suínos provoca retardo no crescimento, redução do apetite, piora na conversão alimentar e paraqueratose (Macdonald, 2000), além de elevar a produção de citocinas pró-inflamatórias, como IL-1 β , IL-6 e TNF- α , comprometendo a integridade intestinal e aumentando a suscetibilidade a infecções (Gammoh *et al.*, 2017).

2.3 Metabolismo do Zn em leitões recém-desmamados

Na nutrição de leitões recém-desmamados, o Zn é tradicionalmente suplementado na forma inorgânica, principalmente como ZnO ou sulfato de Zn (ZnSO₄). Como o Zn não pode ser armazenado no corpo de forma permanente, o fornecimento de Zn na dieta é necessário diariamente (Rink; Gabriel 2001). Após a ingestão, o Zn é liberado no lúmen intestinal na forma de íons Zn²⁺, cuja entrada nos enterócitos é mediada por transportadores da família ZIP, principalmente o ZIP4, que é o principal responsável pela captação do mineral (Palmiter; Huang, 2004; Rink, 2007). No interior da célula, o Zn pode se ligar à metalotioneína, funcionando como reserva transitória e protegendo contra efeitos tóxicos do excesso de Zn livre (Maret; Sandstead, 2006). A exportação do Zn para a corrente sanguínea ocorre por transportadores da família ZnT, principalmente o ZnT1, e o mineral circula associado a proteínas plasmáticas como albumina, α 2-macroglobulina ou metalotioneína (Hara *et al.*, 2017). Após a absorção, o Zn é distribuído principalmente para fígado, pâncreas, ossos e músculos, atuando no fígado como reservatório e regulador homeostático e nos ossos e músculos em funções estruturais e enzimáticas (Gammoh; Rink, 2017). A excreção ocorre principalmente pelas fezes, incluindo a fração não absorvida e o Zn secretado via bile e suco pancreático, e em menor quantidade pela urina (Maret, 2013).

2.4 Excreção de Zn e Impacto Ambiental

Estudos demonstram que a suplementação de ZnO em doses farmacológicas (2.000 a 3.000 ppm) pode reduzir a incidência de diarreia pós-desmame, o estresse oxidativo, a atrofia de vilosidades intestinais e melhorar o desempenho zootécnico dos animais (Jensen-Waern *et*

al, 1998; Xia *et al.*, 2017). Entretanto, cerca de 80% do ZnO é excretado nas fezes (Kim *et al.*, 2013). Nos dejetos, o Zn pode trazer riscos à natureza e se tornar tóxico aos microrganismos, às plantas e ao homem, devido aos acúmulos deste mineral no solo, pela rápida distribuição via águas superficiais e subterrâneas (Gräber; De Vries; Fischbach, 2005). Por esta razão, a suplementação de ZnO em níveis farmacológicos na dieta de suínos tem sido restringida ao redor do mundo (Wang *et al.*, 2021), principalmente pela União Europeia, em que não pode ultrapassar o limite de 150mg/kg de ZnO na ração (Commission Implementing Decision of 26.6.2017, C (2017) 4, 529 Final).

Um dos princípios adotados globalmente com o objetivo de diminuir os impactos ambientais é o ESG (Ambiental, Social e Governança Corporativa, do inglês *Environmental, Social, and Governance*) compreende as recomendações práticas a serem implementadas por uma organização para fazer a gestão de riscos ambientais, sociais e éticos, assim como de governança corporativa (Son; Kim, 2022). As práticas de ESG podem ajudar a reduzir o impacto ambiental da produção animal e tornar o processo mais eficaz, por meio da otimização de processos, implementação de novas tecnologias, ou ainda do uso mais eficiente das tecnologias já existentes (Dumont *et al.*, 2013). Sendo assim, é possível aplicar as práticas de ESG na nutrição animal aumentando a capacidade de retenção de nutrientes no organismo, levando a menor excreção no meio ambiente. Para que isto seja possível, faz-se necessária utilização de dietas com ingredientes mais biodisponíveis.

2.5 Biodisponibilidade do Zn

A biodisponibilidade de um mineral pode ser definida como a fração da quantidade ingerida que está efetivamente disponível para absorção pelos enterócitos (Nielsen *et al.*, 2022) e, portanto, disponível para utilização no organismo animal. A biodisponibilidade do Zn na forma inorgânica pode ser reduzida por fatores dietéticos e fisiológicos. Compostos presentes nos ingredientes de origem vegetal, como fitatos, fibras insolúveis e taninos, podem se ligar aos íons Zn^{2+} formando complexos insolúveis, impedindo sua absorção no intestino delgado (Lonnerdal, 2000). Além disto, cátions divalentes como Ca^{2+} , Fe^{2+} e Cu^{2+} competem pelos mesmos transportadores, reduzindo a captação do mineral (Turnlund, 2002).

Em leitões recém-desmamados, a expressão das proteínas transportadoras ZIP e ZnT é reduzida, devido à imaturidade do trato gastrointestinal, dificultando a absorção do Zn

(Skoglund *et al.*, 2013; Zhang *et al.*, 2017). Como consequência, uma parcela significativa do Zn ingerido permanece não absorvida e é excretada pelas fezes, contribuindo para perdas nutricionais e potencial aumento da pressão seletiva para resistência microbiana (Hojberg *et al.*, 2005). O ZnSO₄ apresenta maior solubilidade em água que o ZnO, favorecendo a liberação de íons de Zn no intestino delgado (Nitrayova *et al.*, 2012) contudo, a biodisponibilidade ainda pode ser limitada por fatores dietéticos e competição com outros minerais.

Na forma de Zn quelatado com aminoácidos (Zn-AA), os íons de Zn (Zn²⁺) encontram-se ligados a aminoácidos ou pequenos peptídeos, formando complexos estáveis que protegem o mineral de interações e antagonismo no trato gastrointestinal, como complexação com fitatos, e outros componentes da dieta (Wedekind *et al.*, 1992; Krebs, 2000; Ao *et al.*, 2006). Diferentemente das fontes inorgânicas, o Zn-AA utiliza rotas alternativas de absorção, por meio de transportadores de aminoácidos e peptídeos (PEPT-1), reduzindo a competição com outros minerais pelos sítios de absorção (Mroz, 2002). A menor susceptibilidade dos minerais orgânicos às interações com componentes da dieta e a utilização de rotas alternativas para absorção podem aumentar a biodisponibilidade do mineral em relação às fontes inorgânicas (Mazzoni *et al.*, 2010).

Entretanto, os resultados disponíveis na literatura científica ainda são controversos quanto à eficácia comparativa entre fontes orgânicas e inorgânicas do Zn. Buff *et al.* (2005) relataram que o desempenho de leitões alimentados com dietas contendo 300 ou 450 ppm de Zn-polissacarídeo não diferiu daquele observado em animais alimentados com 2.000 ppm de Zn na forma de ZnO. Revy *et al.* (2002) relataram que não houve influência no desempenho, atividade da fosfatase alcalina, concentração de Zn no fígado ou balanço de Zn quando se comparou uma fonte orgânica (Zn-met) e uma fonte inorgânica (ZnSO₄). Case e Carlson (2002) também não observaram diferenças significativas no desempenho produtivo entre leitões alimentados com 500 mg/kg de Zn na forma de quelato de zinco-aminoácido e os animais do grupo controle. Por outro lado, Ma *et al.* (2021) relataram que leitões desmamados alimentados com Zn-quitosana nas doses de 50, 100 e 150 mg/kg apresentaram maior ganho de peso, maior consumo de ração, além de melhor conversão alimentar em comparação ao ZnSO₄. Lee *et al.* (2001) verificaram maior ganho de peso em suínos alimentados com ração contendo 120 ppm de Zn na forma de metionina, em relação àqueles que receberam a mesma suplementação de Zn na forma de sulfato na ração. Zhang *et al.* (2017) não tiveram diferenças nos parâmetros hematológicos ao suplementar 80 ou 800 mg/kg com Zn-AA. Rupic *et al.* (1998) verificaram que a fonte inorgânica de Zn (ZnSO₄) determinou aumento em alguns parâmetros hematológicos, como eritrócitos, hemoglobina e plaquetas, enquanto o Zn de

fonte orgânica (Zn-met) aumentou o volume corpuscular médio. Essa variabilidade pode ser atribuída a fatores que modulam a biodisponibilidade e o metabolismo do Zn, como nível de inclusão, composição da dieta basal, status sanitário dos animais e condições ambientais.

Assim, esse estudo traz a hipótese de que o Zn na forma orgânica (ligado a aminoácidos) em menores doses poderia ser mais biodisponível em relação à forma inorgânica com a vantagem de menor interação entre nutrientes, menor excreção e, conseqüentemente, menor contaminação ambiental.

No Capítulo 2 encontra-se o trabalho intitulado: “Efeito de fontes orgânicas e inorgânicas de zinco dietético sobre o desempenho produtivo, microbiota cecal e parâmetros sanguíneos de leitões recém-desmamados”, o qual foi redigido segundo as normas **Livestock Science**.

Referências Bibliográficas

- ABPA – Associação Brasileira de Proteína Animal. **Relatório anual 2025**. São Paulo: ABPA, 2025.
- AO, T. T.; PIERCE, J. L.; PESCATORE, A. J.; CANTOR, A. H.; DAWSON, K. A.; FORD, M. J.; SHAFER, B. L. Evaluation of Bioplex Zn® as an organic zinc source for chicks. **International Journal of Poultry Science**, v. 5, p. 808–811, 2006. DOI: 10.3923/ijps.2006.808.811
- ARANTES, V. M.; THOMAZ, M. C.; KRONKA, R. N.; MALHEIROS, E. B.; BARROS, V. M.; PINTO, E. S.; BUDIÑO, F. E. L.; FRAGA, A. L.; RUIZ, U. S.; HUAYNATE, R. A. R. Níveis de zinco na dieta de leitões recém-desmamados: desempenho, incidência de diarreia, isolamento de *E. coli* e análise econômica. **Boletim de Indústria Animal**, Nova Odessa, v. 62, n. 3, p. 189–201, 2005.
- BISWAS, S.; DANG, D. X.; KIM, I. H. Comparison of the effects of zinc oxide and zinc aspartic acid chelate on the performance of weaning pigs. **Journal of Animal Science and Technology**, Seoul, v. 62, n. 1, p. 125-134, 2024. DOI:10.5187/jast.2023.e39.
- BONETTI, A.; TUGNOLI, B.; PIVA, A.; GRILLI, E. Towards zero zinc oxide: feeding strategies to manage post-weaning diarrhea in piglets. **Animals**, v. 11, n. 3, art. 642, fev. 2021. DOI: 10.3390/ani11030642.
- BUFF, C. E.; BOLLINGER, D. W.; ELLERSIECK, M. R.; BROMMELSIEK, W. A.; VEUM, T. L. Comparison of growth performance and zinc absorption, retention, and excretion in weanling pigs fed diets supplemented with zinc-polysaccharide or zinc oxide. **Journal of Animal Science**, Oxford, v. 83, n. 1, p. 189-201, 2005.
- CABRERA, R. A.; USRY, J. L.; ARRELLANO, C.; NOGUEIRA, E. T.; KUTSCHENKO, M.; MOESER, A. J.; ODLE, J. Effects of creep feeding and supplemental glutamine or glutamine plus glutamate (Aminogut) on pre- and post-weaning growth performance and intestinal health of piglets. **Journal of Animal Science and Biotechnology**, London, v. 4, n. 29, p. 1–11, 2013. DOI: 10.1186/2049-1891-4-29.
- CAMPBELL, J. M.; CRENSHAW, J. D.; POLO, J. The biological stress of early- weaned piglets. **Journal of Animal Science and Biotechnology**, v. 4, n. 19, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1186/2049-1891-4-19>.
- CASE, C. L.; CARLSON, M. S. Effect of feeding organic and inorganic sources of additional zinc on growth performance and zinc balance in nursery pigs. **Journal of Animal Science**, v. 80, n. 7, p. 1917–1924, 2002. DOI: 10.2527/2002.8071917x.
- CEYLAN, M. N.; AKDAS, S.; YAZIHAN, N. Is zinc an important trace element on bone-related diseases and complications? A meta-analysis and systematic review from serum level, dietary intake, and supplementation aspects. **Biological Trace Element Research**, New York, v. 199, n. 2, p. 535-549, 2021.

CHAMONE, J. M. A.; MELO, M. T. P.; AROUCA, C. L. C.; BARBOSA, M. M.; SOUZA, F. A.; SANTOS, D. Fisiologia digestiva de leitões. **Revista Eletrônica Nutritime**, v.7, p.1353-1363, 2010.

COLLETT, S. R. Nutrition and gut health in poultry. In: **LYONS, T. P.; KAISER, C. (Ed.). Proceedings of Alltech's 28th Annual Symposium**. Lexington, USA: Alltech, p. 129–134, 2012.

COMINETTI, C. A.; FRANCISCATO, Célia Regina. Zinc and thyroid hormone metabolism. **Nutrition Research**, v. 29, n. 3, p. 205–212, 2009.

COMMISSION IMPLEMENTING DECISION of 26 June 2017 concerning the withdrawal from the market of veterinary medicinal products containing zinc oxide. C (2017) 4, 529 Final. Bruxelas: European Commission, 2017.

COUSINS, R. J.; LIU, L.; OLSON, A. Zinc in antioxidant defense. **Journal of Nutrition**, v. 136, n. 9, p. 2740–2743, 2006.

DAI, F.; ZHAO, F.; HUANG, X.; JIN, M.; ZHOU, Q.; LIN, T.; ZUO, J.; ZHU, Y. Effects of replacing zinc oxide with different levels of zinc lactate on growth performance, serum indexes, intestinal health and gut microbiota in weaned piglets. **Frontiers in Microbiology**, v. 16, jul. 2025. DOI: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2025.1622700>.

DUMONT, B.; FORTUN-LAMOTHE, L.; JOUVEN, M.; THOMAS, M.; TICHIT, M. Sustainability and efficiency in livestock production systems. **Animals**, v. 7, p. 1327–1339, 2013.

EKHLAS, D.; SANJUÁN, J. M. O.; MANZANILLA, E.G.; LERONARD, F. C.; ARGÜELLO, H.; BURGESS, C. M. Comparison of antimicrobial resistant *Escherichia coli* isolated from Irish commercial pig farms with and without zinc oxide and antimicrobial usage. **Gut Pathogens**, v. 15, n. 1, p. 8, 24 fev. 2023. DOI: 10.1186/s13099-023-00534-3.

FRAKER, P. J.; KING, J. C. A perspective on zinc requirements and the risk of zinc deficiency in infants and young children. **Nutrition Reviews**, Oxford, v. 62, n. 4, p. 113-119, 2004.

GAMMOH, N. Z.; RINK, Lr. Zinc in infection and inflammation. **Nutrients**, Basel, v. 9, n. 6, p. 624, 2017. DOI: <https://doi.org/10.3390/nu9060624>.

GESSLER, N.N.; SERDYUK, E.G.; ISAKOVA, E.P. *et al.* Fitases and the Prospects for Their Application (Review). **Appl. Biochem. Microbiol.**, v. 54, p. 352–360, jul. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0003683818040087>.

GRÄBER, J.; DE VRIES, W.; FISCHBACH, O. Zinc in agricultural soil and the environment. **Environmental Science and Pollution Research**, Heidelberg, v. 12, n. 3, p. 139-146, 2005.

HARA, T.; TAKEDA, T.; TAKAGISHI, T.; FUKUE, K.; KAMBE, T.; FUKADA, T. Physiological roles of zinc transporters: molecular and genetic importance in zinc homeostasis. **Journal of Physiological Sciences**, [s.l.]: Springer, v. 67, n. 2, p. 283–301, 2017.

HILL, G. M.; MURPHY, M.; WILLIAMS, P. E. Zinc supplementation in swine diets: Effects on growth performance and mineral status. **Journal of Animal Science**, v. 97, n. 4, p. 1485-1495, 2019.

HOJBERG, O.; CANIBE, N.; POULSEN, H. D.; HEDEMANN, M. S.; JENSEN, B. B. Influence of dietary zinc oxide and copper sulfate on the gastrointestinal ecosystem in newly weaned piglets. **Journal of Animal Science**, v. 83, p. 1389–1398, 2005.

JENSENWAERN, M.; MELIN L.; LINDBERG R.; JOHANNISSON A.; PETERSSON L.; WALLGREN P. Dietary zinc oxide in weaned pigs--effects on performance, tissue concentrations, morphology, neutrophil functions and faecal microflora. **Research in Veterinary Science**, v. 63, n. 3, p. 225-231, mai./jun. 1998. DOI: 10.1016/s0034-5288(98)90130-8.

JOUDAKI, H.; ARIA, N.; MORAVEJ, R.; REZAEI YAZDI, M.; EMAMI-KARVANI, Z.; HAMBLIN, M. R. Microbial Phytases: Properties and Applications in the Food Industry. **Current Microbiology**, v. 80, art. 374, 2023. DOI: 10.1007/s00284-023-03471-1.

KAMBE, T.; TSUJI, T.; HASHIMOTO, A.; ITSUMURA, N. The physiological, biochemical, and molecular roles of zinc transporters in zinc homeostasis and metabolism. **Physiological Reviews**, v. 95, n. 3, p. 749–784, jul. 2015. DOI: <https://doi.org/10.1152/physrev.00035.2014>

KERR, B. J.; KELLER, D. H.; KELLER, M. E. Effects of dietary zinc supplementation on piglet hematology and performance. **Journal of Animal Science**, v. 78, n. 3, p. 820–828, 2000.

KIM, K.; SOHN, K.; LEE, C. Pharmacokinetics, tissue distribution, and excretion of zinc oxide nanoparticles. **Toxicological Sciences**, Cary, v. 134, n. 2, p. 286-295, 2013.

KREBS, N. F. Overview of zinc absorption and metabolism in pigs. **Journal of Nutrition**, v. 130, p. 138S–145S, 2000.

LARSEN, T.; SKOGLUND, E.; SANDBERG, A.; ENGBERG, R. M. Soaking and pelleting of pig diets alters the apparent absorption and retention of minerals. **Canadian Journal of Animal Science**, p. 447-483, set. 1999.

LEE, S.H.; CHOI, S.C.; CHAE, B.J.; LEE, J.K.; ACDA, S.P. Evaluation of metalamino chelated and complexes at various levels of copper and zinc in weanling pigs and broiler chicks. **Journal of Animal Science**, v.14, p.1734-1740, 2001.

LÖNNERDAL, B. Dietary Factors Influencing Zinc Absorption. **The Journal of Nutrition**, v. 130, n. 5, p. 1378S–1383S, mai. 2000. DOI: <https://doi.org/10.1093/jn/130.5.1378S>

MA, X.; QIAN, M.; YANG, Z.; XU, T.; HAN, X. Effects of zinc sources and levels on growth performance, zinc status, expressions of zinc transporters, and zinc bioavailability in weaned piglets. **Animals**, Basel, v. 11, n. 9, p. 2515, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/ani11092515>.

MACDONALD, R. S. The role of zinc in growth and cell proliferation. **Journal of Nutrition**, Bethesda, v. 130, n. 5, p. 1500S-1508S, mai. 2000. DOI: 10.1093/jn/130.5.1500S.

- MARET, W. Zinc in human nutrition. **Journal of Trace Elements in Medicine and Biology**, v. 27, p. 1–7, 2013.
- MAZZONI, M.; MERIALDI, G.; SARLI, G.; TREVISI, P.; BOSI, P. Effect of two doses of different zinc sources (inorganic vs. chelated form) on the epithelial proliferative activity and the apoptotic index of intestinal mucosa of early-weaned pigs orally challenged with e. coli k88. **Asian-Australasian Journal of Animal Sciences**, v. 23, p. 777-785, 2010.
- MCDOWELL, L. R. **Minerals in animal and human nutrition**. 2. ed. San Diego: Academic Press, 2003.
- MENDÉZ, M. C. C.; AFONSO, A. K.; KIPPER, M.; DOS SANTOS, L. S.; ANDRETTA, I.; HAUSCHILD, L. **Minerais orgânicos na nutrição de frangos de corte e suínos: uma revisão**. In: OELKE, C. A.; MORAES, G.; CALCATI, R. **Zootecnia: Pesquisa e práticas contemporâneas**. São Paulo: Editora Científica Digital, 2017, p. 156-172.
- MILLER, E. R.; ULLREY, D. E.; GADE, P. Anemia prevention in piglets: a comparative study. **Journal of Animal Science**, Oxford, v. 85, n. 4, p. 963-970, 2007.
- MOLENDÁ, M.; KOLMAS, J. The role of zinc in bone tissue health and regeneration—a review. **Biological Trace Element Research**, v. 201, n. 12, p. 5640–5651, 2023. DOI: 10.1007/s12011-023-03631-1.
- MOLLY, K. Digestive physiology of weaned piglets: enzyme secretion and nutrient absorption. **Animal Feed Science and Technology**, v. 93, n. 1–2, p. 3–26, 2001.
- MROZ, Z. Absorption of zinc-amino acid complexes in pigs. **Journal of Animal Science**, v. 80, p. 1689–1695, 2002.
- MURPHY, J.; DE LANGE, K. Nutritional strategies to minimize nutrient output. In: London Swine Conference – Building Blocks for the Future, 2004, Londres, Ontário, Canadá. **Anais [...] Londres: Ontario Ministry of Agriculture and Food**, 2004.
- NIELSEN, T. S.; ENGELSMANN, M. N.; HANSEN, S. V.; MARIBO, H. Comparative bioavailability of zinc sources in weaned pigs. **Journal of Animal Science**, v. 100, p. 1234–1245, 2022.
- NISHIYAMA, S.; FUTAGOISHI-SUGINOHARA, Y.; MATSUKURA, M.; NAKAMURA, T.; HIGASHI, A.; SHINOHARA, M.; MATSUDA, I. Zinc supplementation alters thyroid hormone metabolism in disabled patients with zinc deficiency. **Journal of the American College of Nutrition**, New York, v. 13, n. 1, p. 62–67, fev. 1994. DOI: 10.1080/07315724.1994.10718373.
- NITRAYOVA, S.; WINDISCH, Wilhelm.; VON HEIMENDAHL, Elke; MÜLLER, A.; BARTELT, Jörg. Bioavailability of zinc from different sources in pigs. **Journal of Animal Science**, v. 90, suppl. 4, p. 185-187, dez. 2012. DOI: 10.2527/jas.53895.
- PALMITER, R. D.; HUANG, L. Nutrition: transporters and zinc uptake. **Nature Reviews Molecular Cell Biology**, v. 5, p. 346–355, 2004.

PIÉ, S.; LALLÈS, J.; BLAZY, F.; LAFFITTE, J.; SÈVE, B.; OSWALD, I. P. Weaning is associated with an upregulation of expression of inflammatory cytokines in the intestine of piglets. **Journal of Nutrition**, Bethesda, v. 134, n. 3, p. 641–647, 2004. DOI: 10.1093/jn/134.3.641.

PLUSKE, J. R.; LE DIVIDICH, J.; VERSTEGEN, M. W. A. **Weaning the pig: Concepts and consequences**. Wageningen Academic Publishers, 2003, 432 p.

PLUSKE, J. R.; PETHICK, D. W.; HOPWOOD, D. E.; HAMPSON, D. J. Nutritional influences on some major enteric bacterial diseases of pigs. **Nutrition Research Reviews**, Cambridge University Press, v. 15, n. 2, p. 333-371, fev. 2013. DOI: <https://doi.org/10.1079/NRR200242>.

PLUSKE, J.R.; HENDERSON, G.; FAHEY, G. C. Maintenance of villous height and crypt depth in piglets after weaning. **Animal Science**, v. 64, p. 383–392, 1997. DOI: 10.1017/S1357729800014417.

POWELL, S. R. The antioxidant properties of zinc. **The Journal of Nutrition**, Bethesda, v. 130, n. 5S, p. 1447S–1454S, maio 2000. DOI: 10.1093/jn/130.5.1447S.

PRASAD, A. S. Zinc in human health: effect of zinc on immune cells. **Molecular Medicine**, Manhasset, v. 14, n. 5-6, p. 353-357, 2008. DOI: 10.2119/2008-00033.

QUADROS, A. R. B.t; KIEFER, C.; HENN, J. D.; SCARIOT, G.; SILVA, J. H. S. Dietas simples e complexa sobre o desempenho de leitões na fase de creche. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 32, n. 1, fev. 2002. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0103-84782002000100019>.

REVY, P.; JONDREVILLE, C.; DOURMAD, J.; GUINOTTE, F.; NYS, Y. Bioavailability of two sources of zinc in weanling pigs. **Animal Research**, v.51, p.315- 326, 2002.

RINK, L. Zinc and the immune system. **Cambridge University Press**, Cambridge, v. 59, n. 4, p. 541-552, fev. 2007. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0029665100000781>.

RINK, L.; GABRIEL, P. Extracellular and immunological actions of zinc. **Biometals**, v. 14, p. 367–383, set. 2001. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1012986225203>.

ROOHANI, N.; HURRELL, R.; KELISHADI, R.; SCHULIN, Rainer. Zinc and its importance for human health: An integrative review. **Journal of Research in Medical Sciences**, Isfahan, v. 18, n. 2, p. 144-157, fev. 2013.

ROOKE, J. A.; BLAND, I. M. The acquisition of passive immunity in the new-born piglet. **Livestock Production Science**, Amsterdam, v. 78, n. 1, p. 13-23, 2002.

ROSELLI, M.; FINAMORE, A.; GARAGUSO, I.; BRITTI, M. S.; MENGHERI, E. Zinc supplementation in piglet diet prevents the decrease of small intestine integrity induced by *Escherichia coli* K88. **The Journal of Nutrition**, Bethesda, v. 133, n. 5, p. 1378-1383, 2003.

ROSTAGNO, H. S.; ALBINO, L. F. T. **Tabelas brasileiras de composição de alimentos e exigências nutricionais para suínos**. 4. ed. Viçosa: UFV, 2024.

- ROTH, H.; RINK, L.; PIEPER, R. Zinc and its role in the immune system of pigs. **Veterinary Immunology and Immunopathology**, Amsterdam, v. 145, n. 3-4, p. 120- 134, 2012.
- RUPIC, Vlatko; IVANDIJA, L; LUTEROTTI, S.; DOMINIS-KRAMARIC, M.; BOZAC, R. Plasma proteins and haematological parameters in fattening pigs fed different sources of dietary zinc. **Acta Veterinaria Hungarica**, v.46, p.111-123, 1998.
- SANTOS, G. A.; SILVA, A. S.; RIBEIRO JUNIOR, V.; OLIVEIRA, C. J. P.; VALE, P. A. C. B.; ZANCANELA, V. T.; BRITO, C. O.; ROCHA, G. C. Impacto do tipo de desmame sobre os leitões: revisão de literatura. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v. 7, n. 9, p. 92351-92366, set. 2021. DOI: 10.34117/bjdv7n9-413.
- SARTRE, M. A.; JESSEN, K. A.; CLEGG, M. S.; KEEN, C. L. Retinol binding protein expression is induced in HepG2 cells by zinc deficiency. **Febes Letters**, v. 491, n. 3, p. 266-271, mar. 2001. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0014-5793\(01\)02211-6](https://doi.org/10.1016/S0014-5793(01)02211-6).
- SCHOKKER, C. L.; VOS, H.; VAN DE POEL, J. J.; MAERTENS, L.; DE BOER, J.; VAN DER MEER, I. M.; JONGEJAN, J. A.; VAN DER HEIJDEN, M. A. The piglet gut microbiota and its role in gastrointestinal function and health. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, Boca Raton, v. 54, n. 11, p. 1478-1489, 2014.
- SHANNON, M. C.; HILL, G. M. Trace mineral supplementation for the intestinal health of young monogastric animals. **Frontiers in Veterinary Science**, v. 6, art. 73, mar. 2019. DOI: 10.3389/fvets.2019.00073.
- SON, S.; KIM, J. Environment, social, and governance performance and financial performance with national pension fund investment: evidence from Korea. **Frontiers in Psychology**, Lausanne, v. 13, p. 835210, 2022.
- SQUIRES, E. J. **Applied animal endocrinology**. 2. ed. Wallingford: CABI, 2010.
- TANNOCK, G.W.; FULLER, R.; PEDERSEN, K. Lactobacillus succession in the piglet digestive tract demonstrated by plasmid profiling. **Applied and Environmental Microbiology**, Washington, D.C., v. 58, n. 4, p. 1310-1316, Apr. 1992.
- TIZARD, I. R. **Imunologia veterinária: uma introdução**. 9. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014.
- TURNLUND, J. R. Human zinc requirements: the role of dietary factors and interactions. **Journal of Nutrition**, v. 132, p. 3155–3160, 2002.
- UNDERWOOD, E. J.; SUTTLE, Neville F. **The mineral nutrition of livestock**. 3. ed. Wallingford: CAB International, 1999.
- UTIYAMA, C. E.; MIKAMI, C. R. E.; UTIYAMA, L.E. F.; ALMEIDA, E. A.; GOMES, P. C.; FALCÃO E SILVA, V. S.; OLIVEIRA, R. F. M.; ZANGERONIMO, M. G.; BERTECHINI, R. A. Increased microbial phytase increased phytate destruction, plasma inositol, and feed efficiency of weanling pigs, but reduced dietary calcium and phosphorus did not affect gastric pH or fecal score and reduced growth performance and bone ash. **Journal of Animal Science and Biotechnology**, London, v. 5, n. 1, p. 57, 2014.

VAHJEN, W.; DREWER, J.; SCHWARZ, T.; BORGES, A. Increased dietary zinc oxide changes the bacterial core and enterobacterial composition in the ileum of piglets. **Journal of Animal Science**, Oxford, v. 89, n. 8, p. 2430-2439, 2011.

VAN SPRANG, P. A.; VERDONCK, F. A. M.; VAN ASSCHE, F.; REGOLI, L.; DE SCHAMPHELAERE, K.A. C. Environmental risk assessment of zinc in European freshwaters: a critical appraisal. **Science of the Total Environment**, v. 407, n. 20, p. 5373-5391, out. 2009. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2009.06.029.

VEUM, T. L.; NADEAU, K. J.; PATERSON, David W.; ELLERSIECK, Mark R. Effect of source and level of copper on growth performance and copper retention and excretion in nursery pigs. **Journal of Animal Science**, Oxford, v. 82, n. 1, p. 308-315, 2004.

WANG, J.; MAO, X.; LUO, Y.; HU, J.; GAO, P. Effects of zinc on growth and metabolism in piglets. **Animal Nutrition**, v. 5, n. 3, p. 285–293, 2019.

WANG, H., KIM, K. P., Kim, I. H. Evaluation of the combined effects of different dose levels of zinc oxide with probiotics complex supplementation on the growth performance, nutrient digestibility, faecal microbiota, noxious gas emissions and faecal score of weaning pigs. **Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition**. 2021;105:286–93. DOI: 10.1111/jpn.13493.

WEDEKIND, K. J.; HORTIN, A. E.; BAKER, D. H. Methodology for assessing zinc bioavailability: efficacy estimates for zinc-methionine, zinc sulfate, and zinc oxide. **Journal of Animal Science**, v. 70, n. 1, p. 178–187, 1992. DOI: 10.2527/1992.701178x.

XIA, C.; WANG, J.; ZHANG, H.; ZHANG, Y.; ZHANG, Y.; ZHANG, J.; ZHANG, Z.; LI, Z. High dietary zinc oxide improves intestinal morphology and reduces diarrhea in weaned piglets. **Animal Feed Science and Technology**, v. 226, p. 1– 10, 2017.

YAMAGUCHI, M. Role of zinc in bone formation. **Biological Trace Element Research**, v. 134, n. 2, p. 85–92, 2010.

ZHANG, Y.; WARD, T. L.; JI, F.; PENG, C.; ZHU, L.; GONG, L.; DONG, B. Effects of zinc sources and levels of zinc amino acid complex on growth performance, hematological and biochemical parameters in weanling pigs. **Journal of Animal Sciences**, v. 31, n. 8, p. 1267-1274, dez. 2017. DOI: <https://doi.org/10.5713/ajas.17.0739>.

CAPÍTULO 2

Efeito de fontes orgânicas e inorgânicas de zinco dietético sobre o desempenho produtivo, microbiota cecal e parâmetros sanguíneos de leitões recém-desmamados

Efeito de fontes orgânicas e inorgânicas de zinco dietético sobre o desempenho produtivo, microbiota cecal e parâmetros sanguíneos de leitões recém-desmamados

T. F. S. Zullo; J. C. Pereira*; M. Z. Evangelista*; M. L. P. Tse*.

*UNESP, Faculdade de Medicina Veterinária e Zootecnia, Botucatu, 18618-687, São Paulo, Brasil.

Autor correspondente: M. L. P. Tse, Email: marcos.tse@unesp.br

Resumo

O objetivo deste estudo foi avaliar os efeitos da suplementação de zinco (Zn) nas formas inorgânica (sulfato de zinco) e orgânica (quelato Zn-aminoácidos) em dietas de leitões recém-desmamados, sobre o desempenho, parâmetros hematológicos e microbiota cecal. Foram utilizados 126 leitões recém-desmamados com idade média de 21 dias, distribuídos em delineamento em blocos casualizados (por peso), com sete tratamentos, seis repetições e três animais por unidade experimental. Os tratamentos foram: Zn0 - Dieta basal (DB) sem adição de zinco; ZnS50 - DB com a suplementação de 50mg/kg de Zn inorgânico; ZnS100 - DB com a suplementação de 100mg/kg de Zn inorgânico; ZnS150 - DB com a suplementação de 150mg/kg de Zn inorgânico; ZnQ50 - DB com a suplementação de 50mg/kg de Zn orgânico; ZnQ100 - DB com a suplementação de 100mg/kg de Zn orgânico; ZnQ150 - DB com a suplementação de 150mg/kg de Zn orgânico. Não houve diferença de desempenho para nenhuma das variáveis analisadas ($P>0,05$) em nenhum dos períodos. Para o eritrograma, o ZnS100 determinou valores significativamente mais elevados de hemoglobina e hematócrito em comparação aos grupos ZnS50 e ZnQ50 no 28º dia. Os índices de VCM, CHCM e HCM não diferiram entre as fontes e os níveis de zinco ($P>0,05$). Entretanto, houve diferença quando comparado o 14º dia e 28º dia de coleta, com a diminuição do VCM para os tratamentos ZnQ100 e ZnQ150, aumento da CHCM para todos os tratamentos, exceto para ZnQ50 e aumento do HCM apenas no grupo ZnS50. A contagem de plaquetas foi reduzida nos animais que receberam ZnQ150 entre os momentos de coleta. Para o leucograma, não foram verificadas diferenças entre os tratamentos nem entre as formas de suplementação para nenhuma das variáveis avaliadas independentemente do momento de coleta. Entretanto, houve diferença quando comparado o 14º dia e 28º dia de coleta, com o aumento da contagem total de leucócitos e linfócitos nos animais dos tratamentos ZnS50 e ZnQ100, aumento dos segmentados nos animais do tratamento ZnS50 e aumento dos monócitos nos animais dos tratamentos ZnQ50 e ZnQ100. Para microbiota intestinal, ao 35º dia de experimento, as fontes de Zn não influenciaram a concentração cecal ($P>0,05$) de *Clostridium*, *Escherichia coli* e bactérias ácido-láticas. Conclui-se que a suplementação de Zn na forma orgânica não foi mais biodisponível que o Zn inorgânico, não influenciando desempenho, parâmetros sanguíneos e microbiota cecal.

Palavras-chave: desempenho; microbiota cecal; minerais; suínos.

1. Introdução

O zinco (Zn) é um micromineral essencial que atua como cofator em mais de 300 enzimas, desempenhando funções fisiológicas e nutricionais para o crescimento, a reprodução e a imunidade, além de promover o crescimento celular (Bonaventura *et al.*, 2015). Em condições normais, a ingestão adequada de Zn na dieta pode minimizar os danos causados pelo estresse oxidativo, infecções bacterianas e diarreia, aumentando a expressão de proteínas de junção estreita intestinal, diminuindo a permeabilidade intestinal, reduzindo a apoptose das células das vilosidades intestinais e modulando a resposta imune (Sturniolo *et al.*, 2001, Crane *et al.*, 2007; Zhang e Guo, 2009).

Tradicionalmente, o Zn é suplementado na dieta de leitões em formas inorgânicas, principalmente óxido de zinco (ZnO) e sulfato de zinco (ZnSO₄), devido ao seu baixo custo. No entanto, fatores dietéticos e fisiológicos, como a formação de complexos insolúveis com fitatos e fibras, competição com cátions divalentes, como Ca²⁺, Fe²⁺ e Cu²⁺ e a imaturidade do sistema transportador intestinal, podem reduzir a biodisponibilidade do Zn inorgânico (Hill *et al.*, 2019; Upadhaya e Kim, 2020).

O óxido de zinco farmacológico (3000 ppm) tem sido amplamente aplicado na indústria suinícola nas últimas décadas para amenizar distúrbios intestinais, diarreias e retardos de crescimento induzidos pelos eventos de desmame (Bonetti *et al.*, 2021; Zhang *et al.*, 2021). De acordo com as recomendações do Conselho Nacional de Pesquisa (NRC) de 2012, a adição de Zn na ração é de 100 mg/kg para leitões desmamados com peso entre 7 e 11 kg; e de 80 mg/kg para aqueles com peso entre 11 e 25 kg. Consequentemente, grande quantidade de íons de zinco não absorvidos é excretada nas fezes, o que leva ao desperdício de fontes de zinco e à poluição ambiental (Xiao *et al.*, 2013). Por esta razão, a suplementação de ZnO na dieta de suínos tem sido restringida ao redor do mundo (Wang *et al.*, 2021), principalmente pela União Europeia, a qual foi limitada a 150mg/kg de ZnO na ração (Commission Implementing Decision of 26.6.2017, C (2017) 4, 529 Final).

Dentre as fontes inorgânicas, o ZnSO₄ é mais biodisponível que o ZnO (Schell; Kornegay, 1996). O ZnSO₄ é caracterizado por uma ligação molecular lábil que permite alta solubilidade em água e soluções ácidas e é comumente usado como referência para comparar a biodisponibilidade de diferentes fontes minerais (Wedekind *et al.*, 1992). Contudo, a biodisponibilidade ainda pode ser limitada por fatores dietéticos e competição com outros minerais (Gao; Zhang, 2018), aumentando a excreção de Zn.

Os minerais orgânicos, formados pela ligação de elementos metálicos com proteínas, pequenos peptídeos, aminoácidos ou ácidos orgânicos por meio de ligações covalentes ou iônicas, apresentam maior estabilidade e menor reatividade no trato digestivo, facilitando a melhor absorção intestinal (Panda; Lal, 2018; Byrne; Murphy, 2022). Diferentemente das fontes inorgânicas, o Zn-AA utiliza rotas alternativas de absorção, por meio de transportadores de aminoácidos e peptídeos (PEPT-1), reduzindo a competição com outros minerais pelos sítios de absorção (Huang *et al.*, 2009; Mroz *et al.*, 2002). A menor susceptibilidade dos minerais orgânicos às interações com componentes da dieta e a utilização de rotas alternativas para absorção podem aumentar a biodisponibilidade do mineral em relação às fontes inorgânicas (Mazzoni *et al.*, 2010), mas a eficiência pela qual isso ocorre pode depender do aminoácido (Sauer *et al.*, 2017).

Estudos recentes demonstram que a suplementação com Zn orgânico pode melhorar o desempenho produtivo, favorecer a absorção intestinal e reduzir a excreção fecal do mineral em comparação às fontes inorgânicas (Xu *et al.*, 2024; Choi *et al.*, 2025). Níveis crescentes de complexo de zinco-AA (220 e 320 mg/kg) aumentaram a integridade do trato gastrintestinal em comparação com animais de controle, que foram alimentados com 120 mg/kg de sulfato de zinco (Pearce *et al.*, 2015). Entretanto, há resultados controversos em relação a biodisponibilidade do Zn entre as formas orgânicas e inorgânicas. Nielsen *et al.* (2022), ao suplementar 100mg/kg de seis fontes de Zn, orgânicas e inorgânicas, não obtiveram diferenças no status sérico de Zn, consumo de ração, ganho de peso ou probabilidade de diarreia. Hollis *et al.* (2005) verificaram que a suplementação com 500 ppm de Zn, seja na forma de ZnO ou orgânica, não melhorou o ganho de peso, o consumo e a conversão em comparação à dieta controle.

Desta maneira, o objetivo deste estudo foi avaliar a biodisponibilidade da suplementação de Zn na forma inorgânica (ZnS) e orgânica (ZnQ) em diferentes níveis na dietas de leitões recém-desmamados, sobre o desempenho, parâmetros hematológicos e microbiota cecal.

2. Material e Métodos

O experimento foi realizado no Laboratório de Ensino Pesquisa e Extensão de Suínos, da Faculdade de Medicina Veterinária e Zootecnia (FMVZ), Câmpus de Botucatu – SP e os procedimentos experimentais foram aprovados pelo Comitê de Ética para o Uso Animal

(CEUA) da FMVZ/UNESP/Botucatu, sob protocolo número 0336/2023.

2.1 Instalação experimental

Os animais foram alojados em galpão de alvenaria (pé-direito de 3,5m) com paredes laterais de 1,80m, fechamento total por cortinas e ventilador com nebulizador. Os animais ficaram em baias suspensas, com piso anterior concretado e posterior em estrado plástico, medindo 1,0 x 1,70m equipadas com bebedouro tipo chupeta de inox, comedouro tipo canaleta de plástico e campânula com resistência elétrica de 300W alojadas acima dos animais. Todas as grades de separação das baias foram forradas com chapas de madeira para se evitar qualquer contato dos animais com material de metal que contivessem zinco, exceto pelos tratamentos experimentais.

2.2 Delineamento e Dietas Experimentais

Foram utilizados 126 leitões (63 machos castrados e 63 fêmeas) desmamados com 21 dias de idade e peso médio inicial de $5,49 \pm 0,53$ kg. Durante a condução do experimento, todos os animais receberam tratamento preventivo com antibiótico para controle de enfermidades entéricas e respiratórias para garantir saúde dos animais. Todos os animais, de 21 a 35 dias de idade (14 dias) receberam uma única dieta (Pré-inicial 1), contendo 500FTU de fitase (fitase fúngica de *Aspergillus niger*), sem suplementação de zinco (para depleção de zinco no organismo). A dieta basal sem suplementação de zinco teve como objetivo promover a depleção nos níveis séricos de zinco nos animais que receberão as dietas experimentais. Após os 14 dias de adaptação, iniciou-se o experimento, com a pesagem dos animais que foram distribuídos em delineamento em blocos casualizados, com sete tratamentos, seis repetições (blocos por peso) e três animais por unidade experimental (baia). Os tratamentos foram: Zn0 - Dieta basal (DB) sem adição suplementar de zinco; ZnS50 - DB com a suplementação de 50mg/kg de Zn inorgânico na forma de sulfato de zinco; ZnS100 - DB com a suplementação de 100mg/kg de Zn inorgânico na forma de sulfato de zinco; ZnS150 - DB com a suplementação de 150mg/kg de Zn inorgânico na forma de sulfato de zinco; ZnQ50 - DB com a suplementação de 50mg/kg de Zn orgânico na forma de quelato-aminoácidos; ZnQ100 - DB com a suplementação de 100mg/kg de Zn orgânico na forma de quelato-aminoácidos; ZnQ150 - DB com a suplementação de 150mg/kg de Zn orgânico na forma de quelato-aminoácidos. Durante o experimento, os animais foram alimentados com as dietas

experimentais pelo sistema de fases, sendo Fase 1 (Pré-Inicial 2) do 1 aos 14 dias de experimento e Fase 2 (Inicial) dos 15 aos 21 dias de experimento. Todas as dietas experimentais foram formuladas de acordo com Rostagno *et al.* (2024), exceto para zinco (de acordo com os tratamentos) (Tabela 1 e 2). O nível de 150mg de zinco/kg de dieta, proposto como dose máxima, foi baseado na recomendação de suplementação deste mineral na forma inorgânica para leitões de 8,4 a 17,9kg, que é de 149,7mg/kg (Rostagno *et al.*, 2024) e foram adicionadas ao premix. As fontes de Zn, na forma de ZnSO₄ e Zn quelatado com aminoácidos (Zn-AA), utilizadas neste estudo, foram adquiridas de empresa comercial e continham respectivamente, 35% de Zn e 22% de Zn com 92% de quelação. As especificações completas do produto de zinco quelatado com aminoácidos utilizado no estudo estão detalhadas na Tabela 3.

Tabela 1. Composição percentual das dietas experimentais Pré-inicial I (referência), Pré inicial II e Inicial

Ingredientes	Pré-Inicial 1	Pré-Inicial 2	Inicial
Milho, Grão	50,836	56,625	60,575
Soja, Farelo 45	19,000	22,000	27,200
Farinha de vísceras de aves	3,000	2,000	1,400
Plasma sanguíneo	5,000	5,000	-
Soro de leite seco	10,500	3,500	-
Açúcar	5,000	5,000	4,000
Óleo de soja	3,000	2,400	2,250
Calcário	0,420	0,650	0,750
Fosfato Bicálcico	0,800	0,800	0,840
Sal	0,104	0,250	0,715
L-Lisina HCl	0,500	0,340	0,460
DL-Metionina	0,225	0,210	0,225
L-Treonina	0,240	0,180	0,235
L-Triptofano	0,060	0,060	0,055
L-Valina	0,100	0,020	0,080
Sulfato de Cobre penta	0,060	0,060	0,060
Cloreto de colina	0,090	0,090	0,090
Adsorvente de micotoxina ¹	0,200	0,200	0,200
Sílica	0,500	0,250	-
Antioxidante	0,015	0,015	0,015
Mistura mineral ²	0,100	0,100	0,100
Mistura vitamínica ³	0,150	0,150	0,150
Caulim ⁴	0,100	0,100	0,600
TOTAL	100,000	100,000	100,000

¹Nutria Safe +®; ²Premix mineral fornecendo por kg de ração (sem inclusão de Zn): 100mg Fe, 10mg Cu, 0,45mg, Se, 40mg, Mn, 1mg Co, 1,5mg I, 79,70mg S, 0,30mg Mg; ³Premix vitamínico fornecendo por kg de ração: 9000 UI vit. A, 2700 UI vit. D3, 48 UI vit. E, 2,5mg vit. K, 2,03mg vit. B1, 6mg vit. B2, 3mg vit. B6, 30mg vit. B12, 0,9mg ácido fólico, 14,03mg ácido pantotênico, 30mg niacina, 0,12mg biotina; ⁴Fontes de Zn utilizadas para compor as dietas experimentais de acordo com cada tratamento: Zn0 - Dieta basal (DB) sem adição de Zn; ZnS50 - DB com a suplementação de 50mg/kg de Zn inorgânico;

ZnS100 - DB com a suplementação de 100mg/kg de Zn inorgânico; ZnS150 - DB com a suplementação de 150mg/kg de Zn inorgânico; ZnQ50 - DB com a suplementação de 50mg/kg de Zn orgânico; ZnQ100 - DB com a suplementação de 100mg/kg de Zn orgânico; ZnQ150 - DB com a suplementação de 150mg/kg de Zn orgânica.

Tabela 2. Valores nutricionais calculados das dietas experimentais¹

Nutrientes	Pré-Inicial 1	Pré-Inicial 2	Inicial
Energia metabolizável (kcal/kg)	3,450	3,404	3,336
Proteína Bruta (%)	20,105	20,238	18,748
Fibra bruta (%)	1,915	2,173	2,503
Cálcio (%)	0,753	0,754	0,757
Fósforo disponível (%)	0,516	0,452	0,411
Lisina DIE ² (%)	1,457	1,337	1,217
Metionina DIE (%)	0,489	0,476	0,472
Treonina DIE (%)	0,978	0,921	0,826
Triptofano DIE (%)	0,281	0,285	0,245
Aminoácidos sulfurados DIE (%)	0,814	0,809	0,730
Isoleucina DIE (%)	0,684	0,694	0,669
Valina DIE (%)	1,000	0,939	0,851
Lactose (%)	12,060	7,020	3,600
Sódio (%)	0,301	0,301	0,301

¹Valores nutricionais dos ingredientes propostos por Rostagno et al., 2024. ²DIE: Digestível ileal estandardizada

Tabela 3. Especificações do Zn quelatado com aminoácidos utilizado no estudo

Especificações do produto			
Zinco	≥220g/kg		
Umidade	≤8%		
Densidade	≥0,50g/cc		
Cor	Creme claro a creme escuro		
Textura	Pó fino		
Análise química			
Chumbo	≤75ppm		
Arsênico	≤25ppm		
Cádmio	≤8ppm		
Mercúrio	≤0,1ppm		
Características microbiológicas			
Bolores e leveduras	≤1x10 ⁸ UFC/g		
<i>Salmonella</i> (25g)	Ausente		
Perfil de aminoácidos (Típico)			
Ácido glutâmico	3,51%	Alanina	0,91%
Ácido aspártico	2,23%	Glicina	0,85%
Leucina	1,48%	Treonina	0,73%
Arginina	1,44%	Tirosina	0,67%
Lisina	1,21%	Histidina	0,53%
Prolina	1,02%	Cistina	0,28%
Fenilalanina	0,99%	Metionina	0,22%
Serina	0,98%	Triptofano	0,13%
Valina	0,93%	Taurina	ND ¹
Isoleucina	0,92%		

¹ND: Não detectado.

2.3 Variáveis Analisadas

Desempenho animal: Para avaliação do desempenho, os animais, a ração fornecida e as sobras foram pesados no início e no final de cada fase do experimento, para determinar o ganho diário de peso, o consumo diário de ração e conversão alimentar.

Parâmetros hematológicos: Para análise dos parâmetros hematológicos, foi selecionado um animal de cada unidade experimental pelo critério de peso (peso mais próximo da média da baia), totalizando seis animais por tratamento (42 animais no total). Foi coletado sangue dos animais selecionados no 14º e 28º dias de experimento, por punção da veia cava usando agulhas 25 x 8 mm pelo sistema a vácuo e tubos de coleta apropriados contendo EDTA como solução anticoagulante. As amostras foram mantidas sob refrigeração, sem agitação e imediatamente enviadas ao laboratório. As análises foram realizadas por volumetria por impedância (sft), realizado em analisador automático Hematoclin 2.8 vet.r.666 (Bioclin®, Belo Horizonte). A fórmula leucocitária absoluta foi obtida a partir das contagens global e diferencial das células leucocitárias.

No 35º dia experimental, os mesmos animais selecionados para colheita de sangue, foram insensibilizados por eletronarcose, com posterior sangria e abatidos para a realização da análise de microbiologia cecal.

Microbiologia cecal: Após o abate, os cecos dos animais foram imediatamente retirados encaminhados ao laboratório de pesquisa da Inspeção de Alimentos do Departamento de Higiene Veterinária e Saúde Pública – DHVSP, FMVZ, Unesp, Botucatu, em caixas isotérmicas e refrigeradas, para as contagens de *Escherichia coli*, bactérias ácido-láticas, Clostridium sulfito-redutores (Njongmeta *et al.*, 2013; Andrews *et al.*, 1995). O isolamento de *Salmonella* seguiu conforme a metodologia proposta por Andrews *et al.* (1995).

2.4 Análises Estatísticas

Os dados de desempenho foram submetidos à análise de variância usando o procedimento GLM do SAS (versão 9.4; SAS Institute, Inc., Cary, NC, USA) e as médias comparadas pelo teste de Tukey ($P < 0,05$).

Os dados de sangue foram submetidos à análises de variância multivariada para o modelo de medidas repetidas em grupos independentes, complementada com o teste de comparação de médias múltiplas de Bonferroni ($P < 0,05$). Para a variável eosinófilos não houve normalidade dos dados, assim, foram apresentadas as medianas, seguidas de valor de máximo e mínimo e aplicada análise de variância não paramétrica para o modelo de medidas repetidas em grupos independentes, complementada com o teste de comparação de médias múltiplas de Dunn ($P < 0,05$).

Os dados das unidades formadoras de colônias foi realizado pela técnica de análise e variância paramétrica para as bactérias *E. Coli* e Bactérias ácido-láticas e não-paramétricas para *Clostridium*. No caso paramétrico, verificou-se a aderência à distribuição normal de probabilidadesaos dados, enquanto que para o *Clostridium*, não verificou-se aderência (Norman;Streiner, 2014). Todas as discussões foram realizadas no nível de 5% de significância.

Para análise da ocorrência de *Salmonella*, em função do pequeno número de ensaios de Bernoulli em cada tratamento, foi realizada estatística descritiva empregando-se a distribuição de frequências percentuais das respostas dos tratamentos.

3. Resultados

3.1 Níveis de Zinco na dieta

Os níveis de zinco nas dietas experimentais foram analisados (Tabela 4). Na dieta basal (controle), a quantidade de zinco foi originada dos ingredientes da ração, e a partir dessa dieta, os níveis de zinco nas dietas ZnS50 e ZnQ150 ficaram, respectivamente, abaixo e acima da expectativa de suplementação de acordo com os tratamentos.

Tabela 4. Níveis de zinco analisados nas dietas experimentais^{1,2}

Tratamento	Fonte de Zinco	Nível de Zn na dieta (mg/kg)	Nível de Zn suplementado (mg/kg)
Zn0	Controle	28,68	0,00
ZnS50	Sulfato	66,53	37,85
ZnS100	Sulfato	131,18	102,50

ZnS150	Sulfato	186,38	157,70
ZnQ50	Quelato	71,75	43,07
ZnQ100	Quelato	127,81	99,13
ZnQ150	Quelato	206,11	177,43

¹Nível de zinco calculado na dieta menos o conteúdo de zinco na dieta controle. ²Zn0 - Dieta basal (DB) sem adição de Zn; ZnS50 - DB com a suplementação de 50mg/kg de Zn inorgânico; ZnS100 - DB com a suplementação de 100mg/kg de Zn inorgânico; ZnS150 - DB com a suplementação de 150mg/kg de Zn inorgânico; ZnQ50 - DB com a suplementação de 50mg/kg de Zn orgânico; ZnQ100 - DB com a suplementação de 100mg/kg de Zn orgânico; ZnQ150 - DB com a suplementação de 150mg/kg de Zn orgânico.

3.2 Desempenho

Não houve diferença de desempenho para nenhuma das variáveis analisadas em nenhum dos períodos ($P>0,05$) (Tabela 5).

Tabela 5. Ganho diário de peso (GDP, Kg), consumo diário de ração (CDR, Kg) e conversão alimentar (CA) dos leitões alimentados com diferentes fontes de zinco durante o período experimental (35 dias)^{1,2}

Tratamento	GDP	CDR	CA
14 a 28 dias			
Zn0	0,517(0,054)	0,720(0,055)	1,400(0,109)
ZnS50	0,529(0,050)	0,736(0,036)	1,396(0,090)
ZnS100	0,517(0,035)	0,741(0,007)	1,438(0,088)
ZnS150	0,554(0,060)	0,716(0,060)	1,303(0,159)
Sulfato (Média)	0,533(0,049)	0,731(0,040)	1,379(0,124)
ZnQ50	0,510(0,049)	0,740(0,021)	1,459(0,119)
ZnQ100	0,580(0,039)	0,744(0,018)	1,290(0,100)
ZnQ150	0,556(0,041)	0,746(0,041)	1,345(0,049)
Quelato (média)	0,549(0,050)	0,743(0,027)	1,364(0,115)
29 a 35 dias			
Zn0	0,579(0,054)	1,046(0,129)	1,816(0,264)
ZnS50	0,585(0,134)	1,024(0,141)	1,782(0,211)
ZnS100	0,634(0,038)	1,124(0,091)	1,780(0,200)
ZnS150	0,528(0,083)	0,942(0,108)	1,797(0,180)
Sulfato (Média)	0,583(0,099)	1,030(0,132)	1,786(0,186)
ZnQ50	0,620(0,119)	1,111(0,155)	1,814(0,164)
ZnQ100	0,578(0,067)	0,978(0,114)	1,694(0,129)
ZnQ150	0,628(0,078)	1,056(0,133)	1,680(0,046)
Quelato (média)	0,609(0,088)	1,048(0,139)	1,729(0,131)

¹Zn0 - Dieta basal (DB) sem adição de Zn; ZnS50 - DB com a suplementação de 50mg/kg de Zn inorgânico; ZnS100 - DB com a suplementação de 100mg/kg de Zn inorgânico; ZnS150 - DB com a suplementação de 150mg/kg de Zn inorgânico; ZnQ50 - DB com a suplementação de 50mg/kg de Zn orgânico; ZnQ100 - DB com a suplementação de 100mg/kg de Zn orgânico; ZnQ150 - DB com a suplementação de 150mg/kg de Zn orgânico. ²Média (desvio-padrão). ³Letras minúsculas: comparação entre os sete tratamentos dois a dois com letras diferentes na coluna diferem estatisticamente ($P<0,05$); ⁴Letras maiúsculas: comparação entre as médias das fontes com letras diferentes na linha difere estatisticamente ($P<0,05$).

3.3 Parâmetros Hematológicos

Os animais do tratamento ZnS100 apresentaram valores mais elevados de hemoglobina e hematócrito em comparação aos animais que receberam ZnS50 e ZnQ50 no 28º dia. Os valores de VCM, VCM e HCM não diferiram entre as fontes e os níveis de zinco. Entretanto, houve diferenças entre o 14º dia e 28º dia para alguns parâmetros como diminuição do VCM para os tratamentos ZnQ100 e ZnQ150, aumento da CHCM para todos os tratamentos, exceto para ZnQ50 e aumento do HCM apenas no grupo ZnS50. A contagem de plaquetas foi reduzida nos animais que receberam ZnQ150 entre os momentos de coleta.

Tabela 6. Média e desvio-padrão dos valores de eritrograma e plaquetas dos leitões alimentados com diferentes fontes de zinco, ao 14º e 28º dia de experimento^{1,2,3,4}

Tratamentos	Eritrócitos ($10^6/\text{mm}^3$)	
	14º dia	28º dia
Zn0	6,74(0,54)	6,47(0,40)
ZnS50	6,48(0,28)	6,25(0,34)
ZnS100	6,63(0,87)	6,80(0,18)
ZnS150	6,18(0,57)	6,34(0,43)
ZnQ50	6,38(0,62)	6,29(0,49)
ZnQ100	6,19(0,34)	6,47(0,37)
ZnQ150	6,28(0,57)	6,64(0,33)
Sulfato	6,43(0,62)	6,47(0,40)
Quelato	6,28(0,50)	6,47(0,41)
Tratamentos	Hemoglobina (g/dL)	
	14º dia	28º dia
Zn0	13,00(1,08)	12,80(0,42)
ZnS50	12,53(0,45)	12,23(0,42) $\alpha\alpha$
ZnS100	13,10(0,96)	13,63(0,69) $\beta\alpha$
ZnS150	12,60(0,55)	12,78(1,16)
ZnQ50	12,23(0,70)	12,07 (0,48) $\alpha\alpha$
ZnQ100	12,78(0,89)	12,90(0,54)
ZnQ150	12,42(1,05)	13,27(0,66)
Sulfato	12,74(0,70)	12,88(0,97)
Quelato	12,88(0,97)	12,74(0,74)
Tratamentos	Hematócrito (%)	
	14º dia	28º dia
Zn0	44,58(3,82)	42,80(1,86)
ZnS50	43,37(2,52)	40,78(1,63) $\alpha\alpha$
ZnS100	45,00(3,47)	45,40(2,56) $\beta\alpha$
ZnS150	43,57(2,06)	42,98(3,87)

ZnQ50	42,15 (1,19)	40,85 (1,84) $\alpha\alpha$
ZnQ100	44,13(3,44)	43,17(1,72)
ZnQ150	43,20(3,71)	44,38(2,33)
Sulfato	43,98(2,69)	43,06(3,30)
Quelato	43,17(2,94)	42,80(2,40)
VCM (fL) ⁵		
Zn0	66,34(4,36)	66,53(5,22)
ZnS50	67,02(2,95)	65,45(2,53)
ZnS100	68,50(5,37)	66,83(4,10)
ZnS150	70,95(4,01)	67,83(3,19)
ZnQ50	66,63 (5,79)	65,18 (2,79)
ZnQ100	70,82(2,88) $a\beta^3$	66,88(2,93) $\alpha\alpha$
ZnQ150	69,05(5,08) $a\beta^3$	66,98(3,98) $\alpha\alpha$
Sulfato	68,82(4,31)	66,71(3,29)
Quelato	68,83(4,79)	66,35(3,19)
CHCM (%)⁶		
Zn0	29,13(0,32) $\alpha\alpha A$	29,88(,75) $a\beta A^3$
ZnS50	28,90(0,91) $\alpha\alpha$	29,95 (0,55) $a\beta^3$
ZnS100	29,07(0,56) $\alpha\alpha$	29,98(0,42) $a\beta^3$
ZnS150	28,87(0,44) $\alpha\alpha$	29,72(0,15) $a\beta^3$
ZnQ50	28,95 (1,06)	29,50 (0,56)
ZnQ100	28,93(0,37) $\alpha\alpha$	29,85(0,24) $a\beta^3$
ZnQ150	28,70(1,01) $\alpha\alpha$	29,85(0,30) $a\beta^3$
Sulfato	28,94(0,64)	29,88(0,41)
Quelato	28,86(0,83)	29,73(0,40)
HCM (%)⁷		
Zn0	19,28 (1,24)	19,82 (1,50)
ZnS50	19,28 (0,46) $\alpha\alpha$	19,55 (0,52) $a\beta^3$
ZnS100	19,85(1,38)	19,98(1,07)
ZnS150	20,47(1,26)	20,10(0,93)
ZnQ50	19,22 (1,18)	19,18 (0,77)
ZnQ100	20,47(0,73)	19,92(,94)
ZnQ150	19,77(0,98)	19,97(1,12)
Sulfato	19,87(1,16)	19,88(0,86)
Quelato	19,82(1,06)	19,69(0,97)
Plaquetas (10³/mm³)		
Zn0	547,00 (269,62)	544,50 (101,09)
ZnS50	553,83 (128,67)	581,17 (137,02)
ZnS100	624,50(95,21)	544,83(110,89)
ZnS150	652,67(200,90)	432,68(180,03)

ZnQ50	519,50 (164,37)	606,17 (180,60)
ZnQ100	664,17(95,62)	576,33(137,77)
ZnQ150	679,33(157,02 a β^3)	530,00(117,64) a α
Sulfato	610,33(145,40)	519,56(151,33)
Quelato	621,00(152,91)	570,83(124,45)

¹Zn0 - Dieta basal (DB) sem adição de Zn; ZnS50 - DB com a suplementação de 50mg/kg de Zn inorgânico; ZnS100 - DB com a suplementação de 100mg/kg de Zn inorgânico; ZnS150 - DB com a suplementação de 150mg/kg de Zn inorgânico; ZnQ50 - DB com a suplementação de 50mg/kg de Zn orgânico; ZnQ100 - DB com a suplementação de 100mg/kg de Zn orgânico; ZnQ150 - DB com a suplementação de 150mg/kg de Zn orgânico. ²Média (desvio-padrão). ³Letras gregas diferentes nas linhas, diferem entre os momentos de coleta (P<0,05); ⁴Letras maiúsculas diferentes na coluna diferem para a forma de suplementação (inorgânico e orgânico) e dieta basal (P<0,05). ⁵VCM = Volume corpuscular médio; ⁶CHCM = Concentração de hemoglobina corpuscular média; ⁷HCM= Hemoglobina Corpuscular Média.

Para o leucograma, não foram verificadas diferenças entre os tratamentos nem entre as formas de suplementação para nenhuma das variáveis avaliadas, independentemente do momento de coleta. Entretanto, houve diferença quando comparado o 14º e 28º dia de coleta, com o aumento da contagem total de leucócitos e linfócitos nos animais dos tratamentos ZnS50 e ZnQ100, dos segmentados nos animais do tratamento ZnS50 e dos monócitos nos animais dos tratamentos ZnQ50 e ZnQ100 (Tabela 7).

Tabela 7. Média e desvio-padrão dos valores do leucograma dos leitões alimentados com diferentes fontes de zinco, ao 14º e 28º dia de experimento^{1,2,3,4}

Tratamentos	14º dia	28º dia
Leucócitos10³/mm³		
Zn0	19,27(3,47)	19,95(4,20)
ZnS50	14,03(2,29) a α	19,77(4,53) a β^3
ZnS100	17,00(4,98)	17,77(2,67)
ZnS150	17,08(5,51)	17,35(6,40)
ZnQ50	15,58(4,30)	21,68(6,16)
ZnQ100	14,43(1,52) a α	18,65(4,03) a β^3
ZnQ150	19,38(5,16)	17,48(2,61)
Sulfato	16,04(4,46)	18,29(4,62)
Quelato	16,47(4,33)	19,27(4,61)
Segmentados		
Zn0	7514,17(1002,29)	8088,67(2006,43)
ZnS50	5168,00(668,57) a α	7774,33(2408,39) a β^3
ZnS100	6591,17(2561,17)	6929,17(720,60)
ZnS150	6540,00(1476,08)	6530,50(2058,25)
ZnQ50	6561,17(2201,97)	9711,17(4114,19)
ZnQ100	6191,67(1092,39)	8229,83(2766,65)
ZnQ150	6680,50(1529,78)	6778,83(810,45)
Sulfato	6099,72(1778,10)	7078,00(1841,05)
Quelato	6477,78(1584,68)	8239,78(2990,04)
Linfócitos		

Zn0	10064,00(2112,50)	9849,17(2018,95)
ZnS50	7701,50(1645,69) aα	10081,003(1916,99) aβ ³
ZnS100	9016,67(2249,58)	9275,00(2091,53)
ZnS150	9137,00(3466,58)	9159,83(2235,28)
ZnQ50	7987,00(2301,71)	9996,83(2235,28)
ZnQ100	6993,17(684,89) aα	8600,17(1373,94) aβ ³
ZnQ150	11075,83(3369,64)	8712,50(1807,49)
Sulfato	8642,12(2578,37)	9505,28(2558,59)
Quelato	8685,33(2869,72)	9103,17(1846,80)

Eosinófilos

Zn0	270(0;609)	380(0;732)
ZnS50	118(0;450)	234(0;792)
ZnS100	43(0;956)	0(0;452)
ZnS150	234(0;550)	0(0;822)
ZnQ50	159(0;495)	239(0;584)
ZnQ100	289(0;320)	427(0;570)
ZnQ150	117(0;621)	483(219;716)
Sulfato	131(0;956)	0(0;822)
Quelato	203(0;621)	425(0;716)

Monócitos

Zn0	1395,50(518,23)	1684,33(468,40)
ZnS50	996,83(344,81)	1614,33(415,70)
ZnS100	1165,17(240,23)	1412,67(444,67)
ZnS150	1180,50(528,16)	1475,00(785,69)
ZnQ50	853,50(261,17) aα	1694,17(666,16) aβ ³
ZnQ100	1049,50(242,90) aα	1470,83(356,65) aβ ³
ZnQ150	1438,33(326,37)	1516,50(301,11)
Sulfato	1114,17(375,92)	1500,67(545,96)
Quelato	1113,78(362,34)	1560,50(452,13)

¹Zn0 - Dieta basal (DB) sem adição de Zn; ZnS50 - DB com a suplementação de 50mg/kg de Zn inorgânico; ZnS100 - DB com a suplementação de 100mg/kg de Zn inorgânico; ZnS150 - DB com a suplementação de 150mg/kg de Zn inorgânico; ZnQ50 - DB com a suplementação de 50mg/kg de Zn orgânico; ZnQ100 - DB com a suplementação de 100mg/kg de Zn orgânico; ZnQ150 - DB com a suplementação de 150mg/kg de Zn orgânico. ²Média (desvio-padrão). ³Letras gregas diferentes nas linhas, diferem entre os momentos de coleta (P<0,05); ⁴Letras maiúsculas diferentes na coluna diferem para a forma de suplementação (inorgânico e orgânico) e dieta basal (P<0,05).

3.1 Microbiologia Cecal

Para microbiologia cecal, ao 35º dia de experimento, as fontes de zinco não influenciaram a concentração cecal (P>0,05) de Clostridium, *Escherichia coli* e bactérias ácido-láticas (Tabela 8).

Tabela 8. Medidas descritivas da quantificação de população de bactérias cecais (UFC/g) dos leitões alimentados com diferentes fontes de zinco¹

Variável

Tratamento	Clostridium ²	<i>E. Coli</i> ³	Bactérias láticas ³
Zn0	<10(<10;1220)	7,46(0,55)	7,51(0,55)
ZnS50	44(<10;1770)	6,86(1,05)	7,41(1,37)
ZnS100	375(20;880)	7,09(0,54)	7,10(0,78)
ZnS150	190(<10;3130)	7,29(0,97)	7,00(1,54)
ZnQ50	44(<10;380)	7,30(0,62)	6,61(1,16)
ZnQ100	14(<10;380)	7,71(0,77)	6,78(0,58)
ZnQ150	<10(<10;160)	7,45(0,62)	7,52(0,53)
p-valor	p>0,05	p>0,05	p>0,05

¹Zn0 - Dieta basal (DB) sem adição de Zn; ZnS50 - DB com a suplementação de 50mg/kg de Zn inorgânico; ZnS100 - DB com a suplementação de 100mg/kg de Zn inorgânico; ZnS150 - DB com a suplementação de 150mg/kg de Zn inorgânico; ZnQ50 - DB com a suplementação de 50mg/kg de Zn orgânico; ZnQ100 - DB com a suplementação de 100mg/kg de Zn orgânico; ZnQ150 - DB com a suplementação de 150mg/kg de Zn orgânico. ²Mediana (valor mínimo; valor máximo); ³Média (desvio-padrão).

As fontes e doses de Zn não influenciaram a colonização por *Salmonella*. A análise descritiva das populações de *Salmonella* de acordo com os tratamentos está apresentada na Tabela 9.

Tabela 9. Análise descritiva da população cecal de *Salmonella* dos leitões alimentados com diferentes fontes de zinco ¹

Tratamento	Ausência (%)	Presença (%)	Total (n)
Zn0	4 (66,7)	2 (33,3)	6
ZnS50	3 (50,0)	3 (50,0)	6
ZnS100	3 (50,0)	3 (50,0)	6
ZnS150	1 (16,7)	5 (83,3)	6
ZnQ50	0 (0,0)	6 (100,0)	6
ZnQ100	3 (50,0)	3 (50,0)	6
ZnQ150	4 (66,7)	2 (33,3)	6

¹Zn0 - Dieta basal (DB) sem adição de Zn; ZnS50 - DB com a suplementação de 50mg/kg de Zn inorgânico; ZnS100 - DB com a suplementação de 100mg/kg de Zn inorgânico; ZnS150 - DB com a suplementação de 150mg/kg de Zn inorgânico; ZnQ50 - DB com a suplementação de 50mg/kg de Zn orgânico; ZnQ100 - DB com a suplementação de 100mg/kg de Zn orgânico; ZnQ150 - DB com a suplementação de 150mg/kg de Zn orgânico.

4. Discussão

4.1 Desempenho

No presente estudo, a suplementação de zinco, seja na forma inorgânica ou orgânica e em diferentes níveis de inclusão, não influenciou ($p > 0,05$) o ganho diário de peso (GDP), o consumo diário de ração (CDR) ou a conversão alimentar (CA) dos leitões no período experimental. Os valores obtidos permaneceram semelhantes entre todos os tratamentos, incluindo o grupo sem suplementação adicional de Zn.

Resultados semelhantes foram descritos em outros estudos que também não observaram diferenças no desempenho em leitões suplementados com diferentes níveis ou

fontes de zinco. Lee et al. (2001), ao comparar a suplementação de 120 ppm de sulfato de zinco ($ZnSO_4$), 120 ppm de zinco quelatado a aminoácidos ($Zn-AA$) e 120 ppm de zinco quelatado a metionina ($Zn-Met$), não encontraram diferenças no consumo de ração ou no ganho de peso entre 24 e 38 dias de idade. Da mesma forma, Revy et al. (2002), ao avaliar leitões alimentados com uma dieta basal contendo 28 mg/kg de Zn suplementada com $ZnSO_4$ ou $Zn-Met$ para fornecer 0, 10, 20 ou 30 mg/kg, também não verificaram diferenças de desempenho. Van Heugten et al. (2003) relataram ausência de efeito no desempenho de crescimento de leitões desmamados suplementados com 80 mg/kg de Zn orgânico ($Zn-Met$ ou $Zn-Lisina$) em comparação com animais suplementados com 160 mg/kg de Zn inorgânico ($ZnSO_4$). Esses autores sugerem que os níveis suplementados, independentemente da fonte, foram suficientes para atender às exigências nutricionais de zinco dos animais sob as condições experimentais, o que justificaria a ausência de diferenças no desempenho.

Apesar disso, diversos estudos demonstram efeitos positivos da suplementação de zinco orgânico sobre o desempenho, com aumento do ganho de peso diário, maior consumo de ração e melhor conversão alimentar em comparação com as fontes inorgânicas (Zhang et al., 2017; Diao et al., 2021; Ma et al., 2021; Wang et al., 2021). Esses autores atribuem tais resultados à maior estabilidade do Zn na forma orgânica, protegido de interações com antagonistas dietéticos e à utilização de rotas de absorção de aminoácidos ou peptídeos, o que reduz a competição com outros minerais pelos sítios de absorção e aumenta sua biodisponibilidade.

Entretanto, Milbratz (2019) demonstrou que a suplementação de 225 mg/kg de Zn orgânico para leitões sob desafio sanitário não foi suficiente para reduzir taxas de diarreia ou mortalidade, indicando que a resposta ao mineral também depende das condições ambientais e sanitárias.

A exigência de zinco para leitões desmamados pode variar de 15 ppm em dietas purificadas à base de caseína (Shanklin et al., 1968) a 80 ppm em dietas convencionais de creche (Van Heugten et al., 2003).

A adição de fitase em dietas à base de milho e farelo de soja aumenta a digestibilidade ileal da proteína bruta, dos aminoácidos e a absorção de Ca e P (Silva, 2003). Sabe-se que o excesso de cálcio reduz a utilização do fósforo e aumenta a necessidade de zinco na presença de fitato (Oberleas et al., 1966; Gerlinger et al., 2021). Como as dietas experimentais deste estudo continham fitase, acredita-se que os níveis de fitato complexado ao Zn eram reduzidos, o que pode ter favorecido a absorção do mineral e contribuído para a ausência de diferenças no desempenho.

Por outro lado, a deficiência de zinco está associada a sinais clínicos como diarreia, anorexia, retardo de crescimento (Górniak et al., 2018; Chabaev et al., 2020) e paraqueratose (Tucker; Salmon, 1955). A ausência desses sinais clínicos nos leitões avaliados sugere que não houve deficiência de Zn no período experimental. Os níveis de suplementação variaram de 0 a 150 ppm, gerando dietas com concentrações totais de Zn entre 28,68 mg/kg (Zn0) e 206,11 mg/kg (ZnQ150).

Embora o nível de Zn da dieta controle (Zn0) estivesse abaixo dos 80 ppm sugeridos por Van Heugten et al. (2003) para leitões alimentados com dietas convencionais, é possível que, sob condições de baixo desafio sanitário e com uso de fitase, as exigências nutricionais de zinco tenham sido atendidas independentemente da fonte utilizada. Isso pode explicar a ausência de resposta no desempenho entre os tratamentos experimentais.

4.2 Parâmetros hematológicos

Os parâmetros hematológicos representam indicadores fundamentais do estado metabólico sistêmico dos animais e são amplamente utilizados para avaliar condições gerais de saúde (Al-shinnawy, 2009). No presente estudo, a suplementação de zinco, em diferentes fontes e níveis, não promoveu alterações significativas na maioria das variáveis hematológicas avaliadas. De modo geral, os valores obtidos permaneceram dentro da faixa fisiológica descrita para leitões (Kaneko, 1989; Feldman et al., 2000), indicando que nenhum dos tratamentos comprometeu o status hematológico dos animais.

Apesar disso, foram observadas diferenças pontuais ao longo do período experimental. No 28º dia, o tratamento ZnS100 resultou em valores mais elevados de hemoglobina e hematócrito em comparação aos grupos ZnS50 e ZnQ50. No entanto, os índices hematimétricos (VCM, CHCM e HCM) não diferiram entre fontes e níveis suplementares ($P > 0,05$), sugerindo que a suplementação não alterou o padrão de maturação eritrocitária.

Ao comparar os momentos de coleta, verificou-se redução do VCM nos tratamentos ZnQ100 e ZnQ150, aumento da CHCM para todos os tratamentos, exceto ZnQ50, e aumento do HCM apenas no ZnS50, indicando variações temporais possivelmente associadas ao desenvolvimento fisiológico dos leitões. A redução na contagem de plaquetas observada no grupo ZnQ150 ao longo do tempo também parece refletir modificações fisiológicas relacionadas à idade, uma vez que não houve diferenças entre tratamentos no momento final.

Resultados semelhantes foram relatados por Diao et al. (2021), que também não observaram efeito significativo da suplementação de Zn sobre parâmetros hematológicos em

leitões. Por outro lado, alguns estudos identificaram melhora nos índices hematológicos com o uso de Zn orgânico (Méndez-García et al., 2018; Mendonça et al., 2018), sugerindo que respostas hematológicas ao Zn podem depender do nível basal de Zn da dieta, da forma química, da biodisponibilidade ou do status sanitário dos animais.

Do ponto de vista funcional, Roth et al. (2012) enfatizam que o Zn é essencial para a maturação de linfócitos T e para as atividades de neutrófilos e macrófagos, contudo, alterações no número dessas células tendem a ser pouco expressivas quando os animais não estão sob desafio imunológico. Rooke e Bland (2002), Hu et al. (2021) e Tang et al. (2024) destacam que o período pós-desmame compromete a imunidade celular, mas que a suplementação de Zn influencia principalmente a função imunológica, e não necessariamente o número de células circulantes, o que explica a ausência de diferenças no leucograma obtido no presente estudo.

4.3 Microbiota cecal

A deficiência crônica de zinco pode causar alterações significativas na microbiota intestinal, reduzindo sua riqueza e diversidade e favorecendo perfis associados a condições patológicas (Spenser et al., 2015). No entanto, no presente estudo, a suplementação de Zn, tanto na forma inorgânica (ZnS) quanto na forma orgânica (ZnQ), não promoveu alterações na microbiota cecal. Não foram observadas diferenças entre as fontes e os níveis de suplementação, que variaram de 50 a 150 mg/kg, para nenhuma das populações bacterianas avaliadas (*Clostridium spp.*, *E. coli* e bactérias lácticas).

De forma semelhante, Oh et al. (2022) também não observaram efeito da suplementação com 100 mg/kg de Zn quelatado sobre as concentrações fecais de *E. coli*. Outros autores, como Li et al. (2020), Diao et al. (2021) e Chen et al. (2022), relataram efeitos positivos do Zn orgânico sobre *Lactobacillus spp.* e redução de bactérias patogênicas, entretanto, tais resultados não foram confirmados nas condições do presente experimento. Entretanto, não foram identificados casos de diarreia em nenhum animal durante o período experimental, o que reforça que os animais não estavam sob desafio.

Considerando que a modulação da microbiota é frequentemente influenciada por fatores ambientais e pelo nível de desafio sanitário, é possível que a condição de baixo

estresse e adequada higiene dos animais neste estudo tenha contribuído para a ausência de alterações significativas no perfil microbiano (Pozza, 1998).

5. Conclusões:

Os resultados obtidos neste estudo permitem concluir que a suplementação de Zn, seja na forma orgânica (quelato Zn-aminoácidos) ou inorgânica (sulfato de Zn), não promoveu diferenças no desempenho zootécnico, nos parâmetros hematológicos ou na microbiota cecal de leitões recém-desmamados.

Referências bibliográficas

- AL-SHINNAWY MS, 2009. Physiological effect of a food additive on some hematological and biochemical parameters of male albino rats. *Egypt Acad J Biol Sci* 2:143–51.
- ARANTES VM, THOMAZ MC, KRONKA RN, MALHEIROS EB, BARROS VM, PINTO ES, BUDIÑO FEL, FRAGA AL, RUIZ US, HUAYNATE RAR, 2005. Níveis de zinco na dieta de leitões recém-desmamados: desempenho, incidência de diarreia, isolamento de E, coli e análise econômica, *Bol Ind Anim* 62(3):189–201.
- BONAVENTURA P, BENEDETTI G, ALBARÈDE F, MIOSSEC P, 2015. Zinc and its role in immunity and inflammation. *Autoimmun Rev* 14(4):277–285.
- BONETTI A, TUGNOLI B, PIVA A, GRILLI E, 2021. Towards zero zinc oxide: feeding strategies to manage post-weaning, diarrhea in piglets. *Animals*,11:642.
- BYRNE L; MURPHY R, 2022. Biodisponibilidade relativa de oligoelementos na nutrição de animais de produção: uma revisão. *Animals* 12(15):1981.
- CRANE J.K., NAEHER T.M., SHULGINA I., ZHU C., BOEDEKER E.C, 2007. Effect of zinc in enteropathogenic Escherichia coli infection. *Infect Immun.* 75:5974–5984.
- CASE CL, CARLSON MS, 2002. Effect of feeding organic and inorganic sources of additional zinc on growth performance and zinc balance in nursery pigs. *J Anim Sci* 80:1917–1924.
- CARLSON MS, BOREN CA, WU C, HUNTINGTON CE, BOLLINGER DW, VEUM TL, 2004. Evaluation of various inclusion rates of organic zinc either as polysaccharide or proteinate complex on the growth performance, plasma, and excretion of nursery pigs. *J Anim Sci*, 82:1359–1366.
- CASE CL; CARLSON MS, 2002. Efeito da alimentação com fontes orgânicas e inorgânicas de zinco adicional no desempenho de crescimento e no balanço de zinco em leitões lactentes. *J Anim Sci* 80:1917–1924.
- CHABAEV MG, NEKRASOV RV, KLEMENTIEV MI, TSIS EY, ANIKIN AS, 2020. Influence of organic and non-organic microelements on productivity and metabolic processes in growing young pigs. *Ukrainian Journal of Ecology* 10:303-310.

CHEN X, CHEN J, YAO K, YIN Y, LONG L, FANG R, 2022, Effects of zinc supplementation on growth performance and gut microbiota in weaned pigs, *Anim Nutr* 8:123–132.

CHOI H, KIM SW, LEE SH, PARK JY, KIM SH, KIM JH, LEE SH, KIM SH, LEE SJ, KIM SJ, 2025. Organic zinc supplementation and piglet performance. *Animals* 15(2):445– 455.

COMMISSION IMPLEMENTING DECISION of 26 June 2017 concerning the withdrawal from the market of veterinary medicinal products containing zinc oxide, 2017, C (2017) 4, 529 Final, Brussels: European Commission

DIAO H, YAN J, LI S, KUANG S, WEI X, ZHOU M, ZHANG J, HUANG C, HE P, TANG W, 2021. Effects of dietary zinc sources on growth performance and gut health of weaned piglets. *J Anim Sci* 99.

GAO F, LI Y, ZHANG L, 2018. Bioavailability of zinc in different chemical forms in weaned piglets. *Anim Feed Sci Technol* 242:93–102.

GERLINGER C, OSTER M, REYER H, POLLEY, C, VOLLMAR B, MURÁNI KW, WOLF, P, 2021. Effects of excessive or restricted phosphorus and calcium intake during early life on markers of bone architecture and composition in pigs. *Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition* 105:52-62.

GÓRNIAK W, CHOLEWIŃSKA P, KONKOL D. 2018. Feed additives produced on the basis of organic forms of micronutrients as a means of biofortification of food of animal origin. *Journal of Chemistry* 2018(5):1-8.

HILL GM, MURPHY M, WILLIAMS PE, 2019. Zinc supplementation in swine diets: Effects on growth performance and mineral status. *J Anim Sci* 97(4):1485–1495.

HOLLIS GR, CARTER SD, CLINE TR, CRENSHAW TD, CROMWELL GL, HILL GM, KIM SW, LEWIS AJ, MAHAN DC, MILLER PS, STEIN HH, VEUM TL, 2005. Effects of zinc supplementation on growth performance and immune response of weanling pigs. *J Anim Sci* 83(9):2123–2130.

HU C, CHEN S, YANG W, LI Q, 2021, Zinc supplementation enhances immune responses in post-weaning piglets, *Front Vet Sci*, v, 8, p, 1–9

HUANG L, LI X, ZHANG H, 2009. Transport of zinc in amino acid-chelated form in the pig intestine. *J Nutr* 139:1946–1951.

KANEKO JJ, 1989. *Clinical biochemistry of domestic animals*. Academic Press, 4. ed. London, Inglaterra.

LEE SH, CHOI SC, CHAE BJ, ACDA Y, HAN K, 2001. Effects of feeding different chelated copper and zinc sources on growth performance and fecal excretions of weanling pigs. *Asian-Australas J Anim Sci* 14:1616–20.

MA X, QIAN M, YANG Z, XU T, HAN X, 2021. Effects of zinc sources and levels on growth performance, zinc status, expressions of zinc transporters, and zinc bioavailability in weaned piglets. *Anim* 11:2515.

MAZZONI M, MERIALDI G, SARLI G, TREVISI P, BOSI P, 2010. Effect of two doses of different zinc sources (inorganic vs, chelated form) on the epithelial proliferative activity and the apoptotic index of intestinal mucosa of early-weaned pigs orally challenged with E. coli K88. *Asian-Australas J Anim Sci* 23:777–785.

MÉNDEZ-GARCÍA R, LÓPEZ JA, RAMÍREZ M, PÉREZ C, 2018, Effects of amino acid chelated zinc supplementation on hematological parameters and antioxidant status in piglets, *J Anim Physiol Anim Nutr* 102(5):1467–1475.

MENDONÇA G, SANTOS T, OLIVEIRA C, MARTINS J, 2018, Organic mineral supplementation and its effects on hematological parameters in piglets, *Rev Bras Zootec* 47:e20170234

MILBRATZ LVA. Avaliação do óxido de zinco e associação do zinco orgânico e mananoligossacarídeos em rações para leitões entre 21 a 49 dias de idade [dissertação]. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa; 2019.

MROZ Z, 2002. Absorption of zinc-amino acid complexes in pigs. *J Anim Sci* 80:1689– 1695.

NIELSEN TS, ENGELSMANN MN, HANSEN SV, MARIBO H, 2022. Comparative bioavailability of zinc sources in weaned pigs. *J Anim Sci* 100:1234–1245.

NRC, 2012. Requisitos nutricionais de suínos , 11^a ed.; National Academies Press: Washington, DC, EUA.

OBERLEAS D, MUHRER ME, O'DELL BL, 1966. Dietary metal-complexing agents and zinc availability in the rat. *The Journal of Nutrition* 90(1):56-62.

OH HJ, KIM MH, YUN W, LEE JH, AN JS, KIM YJ, KIM MJ, KIM HB, CHO JH, 2022, Effect of nano zinc oxide or chelated zinc as alternatives to medical zinc oxide on growth performance, faecal scores, nutrient digestibility, blood profiles and faecal *Escherichia coli* and *Lactobacillus* concentrations in weaned piglets, *Ital J Anim Sci* 21(1):708–716,.

PANDA N, LAL G, 2018. Chelated minerals and its effect on animal production: A review. *Agric Rev* 39:314–320.

PEARCE SC, SANZ FERNANDEZ MV, TORRISON J, WILSON ME, BAUMGARD LH, GABLER NK, 2015. Dietary organic zinc attenuates heat stress–induced changes in pig intestinal integrity and metabolism. *J Anim Sci* 93(11):5156–5168.

REVVY P, JONDREVILLE C, DOURMAD, J, GUINOTTE F, NYS Y, 2002. Bioavailability of two sources of zinc in weanling pigs. *Animal Research* 51:315- 326.

ROOKE JA, BLAND IM, 2002, The acquisition of passive immunity in the new-born piglet, *Livest Prod Sci* 78(1):13–23.

ROTH H, RINK L, PIEPER R, 2012, Zinc and its role in the immune system of pigs, *Vet Immunol Immunopathol* 145(3–4):120–134.

- SAUER AK, PFAENDER S, HAGMEYER S, TARANA L, MATTES AK, BRIEL F, KÜRYS, BOECKERS TM, GRABRUCKER AM, 2017. Characterization of zinc amino acid complexes for zinc delivery in vitro using Caco-2 cells and enterocytes from hiPSC. *BioMetals* 30(5):643–661.
- SCHELL TC, KORNEGAY ET, 1996. Zinc concentration in tissues and performance of weanling pigs fed pharmacological levels of zinc from ZnO, Zn-methionine, Zn-lysine, or ZnSO₄. *J Anim Sci* 74(7):1584–1593.
- SHANKLIN, SH, ER MILLER, DE ULLREY, JA. HOEFER, LUECKE, RW, 1968. Zinc requirement of baby pigs on casein diets. *Journal of Nutrition* 96:101-108.
- SPENSER R, HADAR,N, SHARON M, RAYMOND G, OMRY K, ELAD T, 2015. Chronic zinc deficiency alters chick gut microbiota composition and function. 12th European nutrition Conference. *Nutrients* 7:9768–9784.
- STURNIOLO GC, DI LEO V, FERRONATO A, D'ODORICO A, D'INCA R, 2001. Zinc supplementation tightens “leaky gut” in Crohn's disease. *Inflamm Bowel Dis* 7:94–98.
- TANG X, XIONG K, ZENG Y, FANG R, 2024, The Mechanism of Zinc Oxide in Alleviating Diarrhea in Piglets after Weaning: A Review from the Perspective of Intestinal Barrier Function, *Int J Mol Sci* 25(18):10040.
- TUCKER HF, SALMON WD, 1955. Parakeratosis or zinc deficiency disease in the pig. *Proc Soc Exp Biol Med* 88:613-6.
- UPADHAYA SD, KIM IH, 2020. Importance of micronutrients in bone health of monogastric animals and techniques to improve the bioavailability of micronutrient supplements-a review. *Asian-Australasian Journal of Animal Science* 33:1885-1895.
- VAN HEUGTEN E, SPEARS JW, KEGLEY EB, WARK JD, QURESHU MA, 2003. Effects of organic forms of zinc on growth performance, tissue zinc distribution, and immune response of weanling pigs. *Journal of Animal Science* 81:2063-2071.
- WANG H, KIM KP, KIM IH, 2021. Evaluation of the combined effects of different dose levels of zinc oxide with probiotics complex supplementation on the growth performance, nutrient digestibility, faecal microbiota, noxious gas emissions and faecal score of weaning pigs. *Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition* 105:286–93.
- WANG YX, MAO XB, LUO YB, HU J, GAO P, 2021. Effects of dietary supplementation with zinc oxide on intestinal structure and barrier function in weaned piglets challenged with lipopolysaccharide. *Biol Trace Elem Res* 199(2):745–755.
- WEDEKIND KJ, HORTIN AE, BAKER DH, 1992. Methodology for assessing zinc bioavailability: efficacy estimates for zinc-methionine, zinc sulfate, and zinc oxide. *J Anim Sci*, 70(1):178–187.
- XIAO DF, TANG ZR, YIN YL, ZHANG, B, HU, X, FENG, Z, WANG, J, 2013. Effects of dietary administering chitosan on growth performance, jejunal morphology, jejunal mucosal

sIgA, occluding, claudin-1 and TLR4 expression in weaned piglets challenged by enterotoxigenic *Escherichia coli*. *Int Immunopharmacol* 17:670–676.

XU J, ZHAO Y, GAN L, WANG P, LEI Z, CHOU Y, HOU C, LI M, WANG J, 2024. Effects of organic zinc on intestinal microbiota in piglets. *J Appl Anim Res* 52:101–110.

YAMAGUCHI M, 2010. Role of zinc in bone formation. *Biol Trace Elem Res* 134(2):85–92.

ZHANG B, GUO Y, 2009. Supplemental zinc reduced intestinal permeability by enhancing occludin and zonula occludens protein-1 (ZO-1) expression in weaning piglets. *Br J Nutr* 102:687–693.

ZHANG Y, WARD TL, JI F, PENG C, ZHU L, GONG L, DONG B, 2018. Effects of zinc sources and levels of zinc amino acid complex on growth performance, hematological and biochemical parameters in weanling pigs. *Asian-Australas J Anim Sci* 31(8):1267-1274.

ZHANG Q, WU T, LI S, MENG Y, TAN Z, WU M, YI D, WANG, L, ZHAO, D, HOU, Y, 2021. Protective effect of zinc oxide and its association with neutrophil degranulation in piglets infected with porcine epidemic diarrhea virus. *Oxidative Medicine and Cellular Longevity* 2021:3055810.

IMPLICAÇÕES

O presente estudo contribuirá com produtores de suínos e pesquisadores da área de nutrição de suínos, sugerindo que ambas as fontes de Zn, sulfato de Zn e Zn quelatado com aminoácidos, podem ser usadas em dietas de leitões após o desmame, sem prejudicar o desempenho animal, os parâmetros sanguíneos e a microbiota cecal, em condições normais. Embora os resultados sobre as variáveis analisadas, da fonte orgânica sobre a inorgânica, não tenham interagido estatisticamente, o uso de minerais quelatados podem apresentar relevância do ponto de vista da sustentabilidade, na medida em que pode reduzir a excreção mineral e, assim, o impacto ambiental do setor suinícola.

Outros experimentos podem ser realizados utilizando diferentes níveis e fontes de Zn sobre parâmetros que possam colaborar com a compreensão dos mecanismos de ação, absorção, interação, desempenho e produtividade em leitões recém-desmamados.

