

Daniela Tatiana Silva Rodrigues

Análise do Ciclo de Vida de Duas Fórmulas de Alimentos Compostos para Acabamento de Frangos

Orientadora: Luísa Chambel Leitão Martín

Tutor: Amadeu Silva

Coimbra, 2025

Daniela Tatiana Silva Rodrigues

Análise do Ciclo de Vida de Duas Fórmulas de Alimentos Compostos para Acabamento de Frangos

Relatório de estágio apresentado à Escola Superior
Agrária de Coimbra para cumprimento dos requisitos
necessários à obtenção do grau de mestre em
ENGENHARIA AGROPECUÁRIA

Orientadora: Luísa Chambel Leitão Martín

Tutor: Amadeu Silva

Coimbra, 2025

Agradecimentos

À minha avó, que apesar de ter falecido pouco tempo depois de eu iniciar esta aventura, tenho a certeza que estaria com o olhar brilhante por ver a neta concluir o mestrado.

Aos meus pais, por todas as vezes que me aconselharam a descansar e cuidaram de mim, com carinho e "colo". Um aplauso a todas as vezes que disseram que estavam orgulhosos de mim.

Ao meu companheiro, o meu amor, por ter estado comigo em todas as minhas crises existenciais. Por me ter trazido à Terra, mesmo quando eu não sabia que precisava. Por me ter ajudado em tudo o que podia. Por ter limpo as minhas lágrimas, e me ter colocado um sorriso na cara, sempre que era preciso. Por ter sido o meu "orientador especial". Ele viveu esta aventura tanto quanto eu!

À professora Luísa Martín, por me ter sugerido o mundo das ACV e me ter orientado neste trabalho final. Agradeço-lhe todas as correções e sugestões que permitiram retirar o melhor de mim. Obrigada!

Ao eng.º Amadeu Silva, por se ter prontificado rapidamente a ser o meu tutor.

Ao eng.º Costa, que me permitiu o contacto com os avicultores, aos quais agradeço por me terem aberto as portas.

À Ana Patrícia, que prontamente se disponibilizou a ajudar-me com o software *SimaPro*, e me ensinou todos os truques.

À M.C.Rios S.A., e a todos os meus colegas, por nunca me terem colocado entraves ao tempo que dediquei ao mestrado, e me terem ajudado a conciliar os dois mundos, sempre que era necessário. Um agradecimento especial às colegas que, mesmo não estando ligadas à minha tese, me perguntavam como é que corria, me ajudavam a gerir o pouco tempo que eu tinha, e a espairecer.

Aos meus colegas de curso, parceiros de viagem. Estou a torcer por vocês.

Por fim, um obrigada a todos os que, de alguma forma se cruzaram comigo durante este processo, e o permitiram acontecer.

O meu muito obrigada!

Daniela

Análise do Ciclo de Vida de Duas Fórmulas de Alimentos Compostos para Acabamento de Frangos

Resumo

O objetivo principal deste trabalho foi a elaboração da Análise do Ciclo de Vida (ACV) de duas fórmulas de alimento composto para o acabamento de frangos. Para tal, recorreu-se a fórmulas já existentes, e fez-se a ACV com recurso ao software *SimaPro*. Para uma melhor fundamentação do estudo, abordou-se nos capítulos 2 e 3 a disponibilidade das matérias-primas e a sua adequação às necessidades nutritivas das aves. Nos capítulos 4 e 5 verificou-se quais eram as ferramentas de análise que permitiam avaliar alternativas mais sustentáveis para a produção animal. Nos capítulos finais, avaliou-se o impacto ambiental das fórmulas, através da ACV, e verificou-se se as diferenças de formulação tinham consequências no desempenho das aves. Uma das principais conclusões retirada deste estudo foi que o transporte das matérias-primas até à fábrica é um dos fatores que mais impacta a produção do alimento composto. No desempenho das aves, não se verificou grandes diferenças nas 2 formulações já que, atualmente, as fórmulas se encontram otimizadas para que esse não seja um fator diferenciador.

Palavras-chave: Matérias-primas; Impacte ambiental; Transporte; Aves; *SimaPro*;

Abstract

The main objective of this study was to conduct a Life Cycle Assessment (LCA) of two compound feed formulations for broiler finishing. For this purpose, existing formulations were used, and the LCA was carried out with the *SimaPro* software. To provide a stronger foundation for the study, Chapters 2 and 3 addressed the availability of raw materials and their suitability for meeting the birds' nutritional requirements. Chapters 4 and 5 examined the analytical tools that allow the assessment of more sustainable alternatives for animal production. In the final chapters, the environmental impact of the formulations was evaluated through

the LCA, and it was assessed whether formulation differences had consequences on broiler performance. One of the main conclusions drawn from this study was that the transportation of raw materials to the feed mill is one of the factors with the greatest impact on compound feed production. Regarding bird performance, no significant differences were observed between the two formulations, since current feed formulations are optimized to prevent this from being a differentiating factor.

Keywords: Feed materials; Environmental impact; Transportation; Poultry; *SimaPro*;

Índice

1. Introdução.....	1
2. Disponibilidade das matérias-primas para aves	6
2.1. Concentrados energéticos.....	7
2.1.1. Milho.....	10
2.2. Concentrados proteicos.....	14
2.2.1. Soja	15
2.3. Aditivos.....	22
3. Necessidades nutritivas dos frangos	26
4. Modelos de formulação.....	29
5. Metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV)	33
5.1. Definição do objetivo e âmbito	38
5.2. Análise do inventário	39
5.3. Avaliação do impacte.....	41
5.4. Interpretação	41
6. Caso de Estudo	43
6.1. Comparação do milho dos EUA com o da Ucrânia.....	48
6.2. Comparação do óleo de soja do Brasil com o da Argentina	50
6.3. Bagaço de soja.....	51
6.4. Aditivos.....	51
6.4.1. Carbonato de Cálcio.....	51
6.4.2. Fosfato monocalcico	52
6.4.3. L-Lisina, DL-Metionina e L-Treonina	52
6.4.4. Bicarbonato de sódio.....	52
6.4.5. Sal.....	53

6.5. Transporte das matérias-primas	53
7. ACV de cada uma das fórmulas e comparação de resultados	54
7.1. Resultados individuais das fórmulas	55
7.2. Combinações entre fórmulas e origens das matérias-primas.....	59
7.2.1. Comparação entre origens, mantendo a formulação	60
7.2.2. Comparação entre fórmulas, com a mesma origem de matérias-primas	63
7.2.3. Cenários nacionais N1 e N2.....	64
8. Discussão	69
9. Conclusões	73
Referências Bibliográficas.....	75
Anexos	84
Anexo 1: Descrição dos parâmetros apresentados nas tabelas das matérias-primas	85
Anexo 2: Descrição dos indicadores ambientais utilizados para a ACV.	86
Anexo 3: Características nutricionais das fórmulas apresentadas	88
Anexo 4: ACV de F1 vs. ACV de F'1	89
Anexo 5: ACV de F2 vs. ACV de F'2	91
Anexo 6: ACV de F'1 vs. ACV de F'2	91
Anexo 7: ACV de F1 vs. ACV de F2	92
Anexo 8: ACV de N1 vs. F1	92
Anexo 9: ACV de N2 vs. F1	93
Anexo 10: ACV de N1 vs. N2	93

Índice de Figuras

Figura 1 - Comparação das emissões de dióxido de carbono equivalente (CO ₂ eq.) associadas às diferentes espécies pecuárias, e evolução dos indicadores ambientais na produção de frango na União Europeia (UE) entre 2003 e 2018. Adaptado de Association of Poultry Processors and Poultry Trade in the EU [AVEC], (2022).....	2
Figura 2 - Evolução do efetivo de aves em Portugal, de 1993 a 2019. Adaptado de Instituto Nacional de Estatística [INE], (2019)	4
Figura 3 - Partição e fluxo de energia na nutrição avícola. Adaptado de: (Pesti e Choct, 2023).....	28
Figura 4 – Etapas gerais até à obtenção das culturas agrícolas, que funcionarão como matérias-primas dos ACs. Adaptado de (Tamburini et al., 2015)	32
Figura 5 - Fluxograma do processo produtivo do AC para frangos. Adaptado de (Amin e Sobhi, 2023).....	33
Figura 6 - Fases do ciclo de vida de um produto. Adaptado de (Golsteijn, 2022)	34
Figura 7 - Fases da metodologia da ACV. Adaptado de (Golsteijn, 2022)	36
Figura 8 - Visão geral das categorias de impacte abrangidas pelo método <i>ReCiPe 2016</i> e da sua relação com as áreas de proteção. A linha a tracejado indica que não existe um fator de conversão constante de <i>midpoint</i> para <i>endpoint</i> no caso dos recursos fósseis. Adaptado de (Huijbregts et al., 2017)	38
Figura 9 - Esquema das combinações entre as fórmulas e as origens das matérias-primas.....	46
Figura 10 - ACV da Fórmula 1. Adaptado de <i>SimaPro</i>	56
Figura 11 - ACV da Fórmula'1. Adaptado de <i>SimaPro</i>	57
Figura 12 - ACV da Fórmula 2. Adaptado de <i>SimaPro</i>	58
Figura 13 - ACV da Fórmula' 2. Adaptado de <i>SimaPro</i>	59
Figura 14 - ACV da F1 vs. ACV da F'1. Adaptado de <i>SimaPro</i>	61

Figura 15 - ACV da F2 vs. ACV da F'2. Adaptado de <i>SimaPro</i>	62
Figura 16 - ACV de F'1 vs. ACV de F'2. Adaptado de <i>SimaPro</i>	63
Figura 17 - ACV de F1 vs. ACV de F2. Adaptado de <i>SimaPro</i>	64
Figura 18 - ACV da N1. Adaptado de <i>SimaPro</i>	65
Figura 19 - ACV de F1 vs. ACV de N1. Adaptado de <i>SimaPro</i>	66
Figura 20 - ACV da N2. Adaptado de <i>SimaPro</i>	67
Figura 21 - ACV de F1 vs. ACV de N2. Adaptado de <i>SimaPro</i>	68
Figura 22 - ACV de N1 vs. ACV de N2. Adaptado de <i>SimaPro</i>	69

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Composição química do milho nacional. Adaptado de Monteiro et al., (2022).....	11
Tabela 2 - Macrominerais do milho nacional. Adaptado de Monteiro et al., (2022)	11
Tabela 3 - Oligoelementos do milho nacional. Adaptado de Heuzé et al., (2017); Monteiro et al., (2022)	12
Tabela 4 - Aminoácidos do milho nacional. Adaptado de Monteiro et al., (2022)	12
Tabela 5 - Ácidos gordos do milho nacional. Adaptado de Monteiro et al., (2022)	12
Tabela 6 - Valores nutritivos das aves, em energia metabolizável aparente, corrigida para o azoto (EMAn). Adaptado de Heuzé et al., (2017)	13
Tabela 7 - Composição química da soja. Adaptado de Monteiro et al., (2022)	16
Tabela 8 - Macrominerais da soja. Adaptado de Monteiro et al., (2022)	17
Tabela 9 - Oligoelementos da soja. Adaptado de Monteiro et al., (2022).....	17
Tabela 10 - Quantificação dos aminoácidos na soja. Adaptado de Monteiro et al., (2022).....	17
Tabela 11 - Quantificação de ácidos gordos na soja. Adaptado de Monteiro et al., (2022).....	18
Tabela 12 - Composição química do bagaço de soja 44-46%. Adaptado de Heuzé et al., (2020)	20
Tabela 13 - Macrominerais do bagaço de soja 44-46%. Adaptado de Heuzé et al., (2020)	20
Tabela 14 - Oligoelementos do bagaço de soja 44-46%. Adaptado de Heuzé et al., (2020)	21
Tabela 15 - Quantificação de aminoácidos no bagaço de soja 44-46%. Adaptado de Heuzé et al., (2020)	21

Tabela 16 - Quantificação de ácidos gordos no bagaço de soja 44-46%. Adaptado de Heuzé et al., (2020).....	21
Tabela 17 - Valores nutritivos das aves, em energia metabolizável aparente, corrigida para o azoto. Adaptado de Heuzé et al., (2020)	22
Tabela 18 - Métodos de produção e teor de proteína bruta (%) dos 3 aminoácidos sintéticos utilizados. Adaptado de (Evonik, 2024)	24
Tabela 19 - Diferentes necessidades nutricionais dos frangos de carne, conforme a sua idade. Adaptado de Korver e Stewart-Brown, (2023)	27
Tabela 20 - Utilização de ingredientes para rações com baixo impacte nas alterações climáticas. Adaptado de The European Feed Manufacturers' Federation [FEFAC] (2023)	43
Tabela 21 - Composição da Fórmula 1 (F1).....	44
Tabela 22 - Composição da Fórmula 2 (F2).....	44
Tabela 23 - Características do sistema de produção de frangos considerados neste estudo.....	47
Tabela 24 - Consumo de ração (F1 versus F2) por quilograma de frango produzido (índice de conversão).	48
Tabela 25 - Consumo de ração (F1 versus F2) por cada frango produzido.	48
Tabela 26 - Diferenças na produção de milho entre os EUA e o Brasil. Adaptado do <i>SimaPro</i>	49
Tabela 27 - Diferenças na produção de óleo de soja no Brasil e na Argentina. Adaptado do <i>SimaPro</i>	50
Tabela 28 - Distâncias percorridas pelas matérias-primas das diferentes origens até à fábrica.....	53
Tabela 29 - Quadro-resumo para a realização da ACV.....	55
Tabela 30 - Combinações das fórmulas em estudo.	60

Abreviaturas

AC	Alimento composto
AA	Aminoácido
ACV	Análise do Ciclo de Vida
AG	Aquecimento global
ALA	Alanina
AP	Aditivos + premix
ARG	Arginina
ASP	Ácido aspártico
AT	Acidificação terrestre
ATP	Adenosina Trifosfato
AVEC	Association of Poultry Processors and Poultry Trade in the EU
BS	Bagaço de soja
CA	Consumo de água
CYS	Cisteína
DCOE	Depleção da camada de ozono estratosférico
EAD	Eutrofização de águas doces
EcAD	Ecotoxicidade de água doce
EcM	Ecotoxicidade marinha
EcT	Ecotoxicidade terrestre
ED	Energia digestível
EL	Energia líquida
ELCD	European Reference Life-Cycle Database
EM	Energia metabolizável
EMAn	Energia metabolizável aparente, corrigida para o azoto
ERF	Escassez de recursos fósseis
ERM	Escassez de recursos minerais
EUA	Estados Unidos da América
EuM	Eutrofização marinha
F1	Fórmula 1
F'1	Fórmula ' 1
F2	Fórmula 2
F'2	Fórmula ' 2
FAO	Food and Agriculture Organisation
FB	Fibra bruta
FEDNA	Fundación Española para el Desarrollo de la Nutrición Animal
FEFAC	The European Feed Manufacturers' Federation
FEPASA	Federação Portuguesa das Associações Avícolas
FOET	Formação ozono, ecossistemas terrestres
FOSH	Formação ozono, saúde humana
FPF	Formação de Partículas Finas
GB	Gordura Bruta
GEE	Gases com Efeito de Estufa
GFLI	Instituto Global Feed ACV
GLU	Ácido glutâmico
GLY	Glicina
GPP	Gabinete de planeamento, políticas e administração geral
HIS	Histidina

IACA	Associação Portuguesa dos Industriais de Alimentos Compostos para Animais
IFIF	International Feed Industry Federation
ILCD	International Reference Life Cycle Data System
ILE	Isoleucina
INE	Instituto Nacional de Estatística
ISO	Organização Internacional de Normalização
LEU	Leucina
LYS	Lisina
MAPA	Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación
MET	Metionina
MPS	Matérias-primas
MS	Matéria seca
N1	Nacional 1
N2	Nacional 2
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
PAO	Pegada Ambiental da Organização
PAP	Pegada Ambiental do Produto
PB	Proteína bruta
PF	Porto de Aveiro - Fábrica
PHE	Fenilalanina
PM	Material particulado
PRO	Prolina
RI	Radiação ionizante
SAU	Superfície Agrária Útil
SER	Serina
THC	Toxicidade humana cancerígena
THNC	Toxicidade humana não cancerígena
THR	Treonina
TYR	Tirosina
UE	União Europeia
UF	Unidade Funcional
US	Uso do solo
USSEC	U. S. Soybean export council
UV	Ultravioleta
VAL	Valina

Página propositadamente em branco

1. Introdução

Desde meados do século XX, que a melhoria do desempenho produtivo das aves tem constituído um dos principais desafios da avicultura moderna. Aumentar a velocidade de crescimento das aves foi um dos primeiros objetivos alcançados, já que permite atingir o peso para abate num menor período de tempo, e, consequentemente, reduzir a quantidade de alimento ingerido por cada quilograma (kg) de aumento de peso vivo (Soares, 2023).

Esta otimização de crescimento permitiu baixar o custo de produção e diminuir o impacto ambiental, uma vez que a menor produção do alimento composto (AC) implica uma menor necessidade de área para cultivar os ingredientes utilizados. Paralelamente, o melhoramento genético complementou outras variáveis como a maior resistência a doenças, a melhoria da estrutura óssea, o aumento da percentagem de peito, entre outras (Soares, 2023).

A avicultura apresenta vantagens relativamente aos outros setores pecuários (Figura 1), devido a um menor índice de conversão (quilo de alimento ingerido por quilo de carne produzida), a uma maior eficiência hídrica, ao melhor tratamento dos efluentes líquidos e à adoção crescente de práticas de economia circular, ou seja, valorização dos recursos locais e redução da dependência de matérias-primas importadas (Agrogarante, 2023; Food and Agriculture Organisation [FAO], 2025).

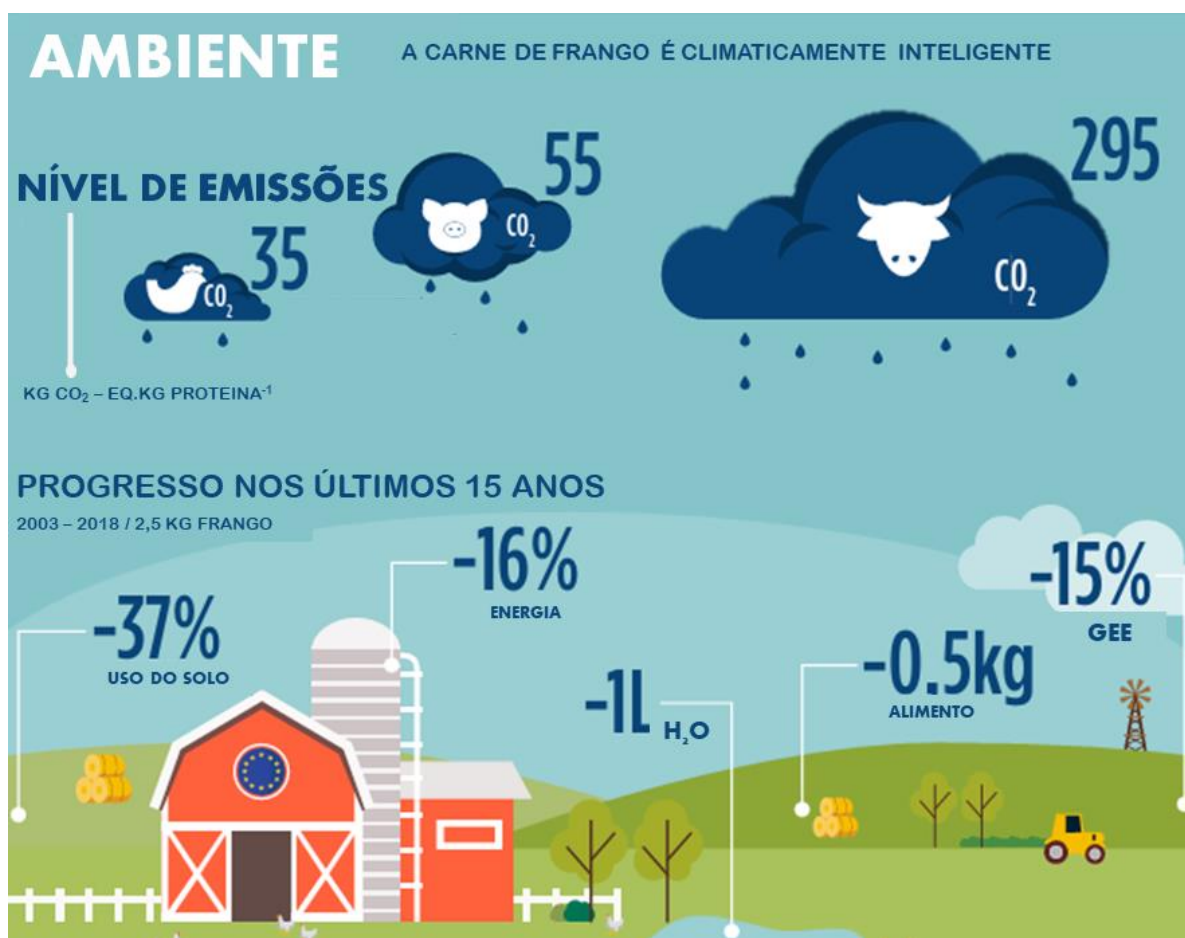


Figura 1 - Comparação das emissões de dióxido de carbono equivalente (CO₂eq.) associadas às diferentes espécies pecuárias, e evolução dos indicadores ambientais na produção de frango na União Europeia (UE) entre 2003 e 2018. Adaptado de Association of Poultry Processors and Poultry Trade in the EU [AVEC], (2022)

A carne de aves de capoeira é considerada a fonte proteica de origem animal com menores emissões de gases com efeito de estufa (GEE). Contudo, a formulação do AC permanece como o principal fator de impacto ambiental da produção avícola, representando cerca de 70% dos custos de produção, e mais de 55% do total das emissões de GEE associadas (Federação Portuguesa das Associações Avícolas [FEPASA], 2023; Youssef, 2025).

O grande custo associado à produção do AC deve-se ao aumento significativo dos preços dos alimentos, por isso, é importante maximizar a utilização dos mesmos e utilizar alternativas mais económicas. Por este motivo, na nutrição avícola tem-se aumentado a utilização de enzimas, que são consideradas um dos maiores avanços nutricionais dos últimos anos (Youssef, 2025).

A produção de alimentos é responsável por aproximadamente 26% das emissões globais de GEE, das quais 31% provêm da produção animal e da pesca. A produção vegetal representa cerca de 27% das emissões alimentares, sendo 21% resultantes da produção de culturas destinadas ao consumo humano direto, e os restantes 6% destinados à alimentação animal (FEPASA, 2023).

O uso do solo constitui outro fator relevante, responsável por 24% das emissões de GEE. Destes, 16% estão associados à produção de alimentos para animais. A superfície agrícola útil (SAU) tem aumentado, frequentemente, à custa da conversão de florestas, prados e outros “sumidouros” de carbono em áreas agrícolas, situação particularmente evidente em regiões produtoras de soja, com consequências negativas para a biodiversidade e para as emissões de carbono (FEPASA, 2023).

A redução do preço da carne de frango ao consumidor, aliada ao seu valor nutricional e palatabilidade, contribuiu para que, de 1960 a 2023, o consumo de carne de frango em Portugal, aumentasse de 1,4 kg para 42,5 kg/habitante/ano (Soares, 2023). A nível mundial, a FAO prevê um aumento de 16% no consumo desta carne até 2031, impulsionado pelo seu baixo custo, pela elevada eficiência produtiva e pela ausência de restrições culturais e/ou religiosas evidentes ao seu consumo (Alkhtib et al., 2023; Soares, 2023).

O Recenseamento Agrícola de 2019 demonstrou que as explorações avícolas portuguesas têm vindo a gerar maior valor por área útil. Verifica-se que a maior parte da produção do setor avícola corresponde a frangos de carne e ovos, sobretudo criados no solo ou em gaiolas melhoradas, mas sem acesso ao exterior (Figura 2).

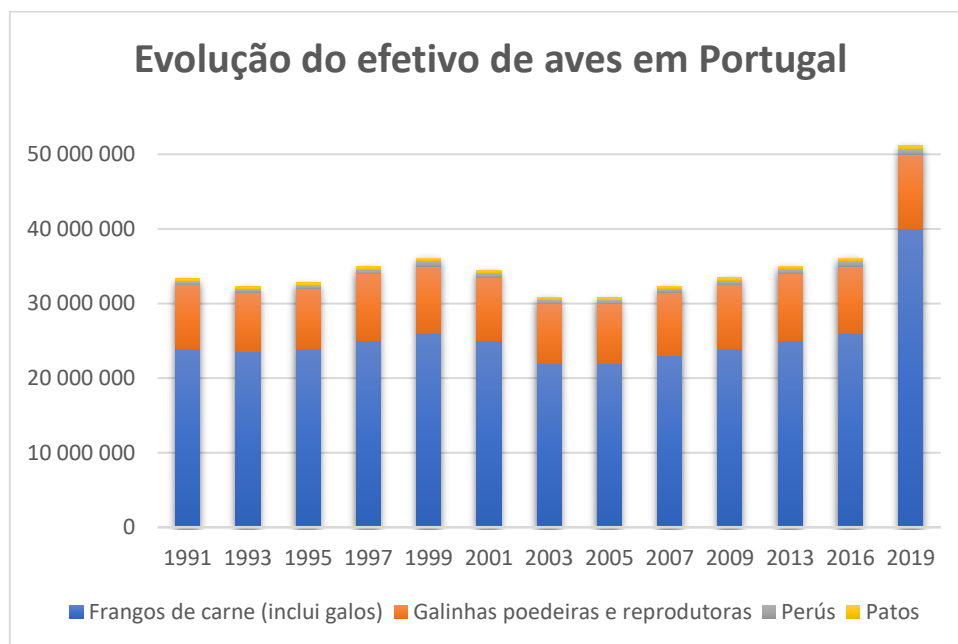


Figura 2 - Evolução do efetivo de aves em Portugal, de 1993 a 2019. Adaptado de Instituto Nacional de Estatística [INE], (2019)

Em 2022, os frangos de carne representaram cerca de 81% do peso total de aves abatidas, correspondendo a 299 619 toneladas. O aumento no peso total de abates é superior ao aumento registado no número total de cabeças abatidas, demonstrando um aumento de produtividade nas explorações avícolas. Este aumento deve-se sobretudo ao aumento do peso médio (1,32 kg/cabeça em 2013/2014 para 1,38 kg/cabeça em 2021/2022) com que os frangos passaram a ser abatidos (Agrogarante, 2023).

Globalmente, o mercado da carne de aves tem como principais intervenientes os Estados Unidos da América (EUA), o Brasil, a China e a União Europeia (UE) totalizando 56% da produção desta carne. Em relação ao preço, a UE apresenta os valores mais elevados, mas estáveis, enquanto nos EUA os preços oscilam acentuadamente (Fradinho, 2023).

Nos últimos anos, os padrões de consumo alimentar têm alterado, acompanhados por uma maior preocupação pelo impacto ambiental de cada

alimento. A produção intensiva de matérias-primas, muito usadas na alimentação para aves, como o milho e a soja, estão associadas a desflorestação, elevados níveis de desperdício e a más condições de trabalho, o que levanta questões de sustentabilidade nutricional, ambiental e social do atual sistema alimentar (Delgado, 2021; Lucas e Kebreab, 2024).

Embora a produção de carne de aves apresente um menor impacto ambiental, o seu impacto continua a ser superior ao da produção de proteína vegetal, como a soja (Alkhtib et al., 2023). Além disso, a avicultura contribui de forma significativa para a libertação de amoníaco (NH_3), responsável pela acidificação do solo e atmosfera (Ogino et al., 2021; Wangui et al., 2025).

A pecuária é uma das atividades que é colocada à prova pela procura de sustentabilidade já que problemáticas como as alterações climáticas, a eutrofização e a acidificação se tornam prioritárias. Apesar da produção de carne de frango deter um menor impacto, o aumento da sua procura e consumo, torna necessária uma redução do impacto ambiental da mesma (Alkhtib et al., 2023).

Uma ferramenta cada vez mais utilizada para avaliar o impacto ambiental de um determinado produto é a Análise do Ciclo de Vida (ACV), que considera todas as fases por que este passou, desde a origem da matéria-prima até à confeção do AC. Para tal, são considerados aspetos como a emissão de GEE provenientes do cultivo das matérias-primas, do transporte das mesmas até à fábrica e do fabrico do AC (Hagenaars, 2022).

Uma das estratégias mais relevantes é a melhoria da eficiência do azoto na alimentação das aves, uma vez que a excreção de compostos azotados origina emissões de óxidos nitrosos e amoníaco. A redução do teor de proteína bruta (PB) nas rações, mantendo o equilíbrio de aminoácidos essenciais, tem-se revelado uma medida eficaz (Ogino et al., 2021).

Para produzir um AC, é necessário que o mesmo passe por diversas fases, a produção, o armazenamento, o embalamento e a distribuição. Estas fases são

exigentes em energia, e, potencialmente, encontram-se associadas à emissão de GEE e formação de partículas finas (González-García et al., 2014).

O presente trabalho pretende avaliar o impacto ambiental de duas fórmulas de AC para frangos em acabamento, através da aplicação da metodologia de ACV, com recurso ao software *SimaPro*. Para contextualizar o estudo, são analisadas as disponibilidades das matérias-primas adequadas às necessidades nutritivas das aves (Capítulos 2 e 3), os modelos de formulação e as ferramentas de apoio (Capítulos 4 e 5). Posteriormente, são avaliadas as diferenças de impacto entre as fórmulas, bem como um cenário hipotético em que todas as matérias-primas são de origem nacional (Capítulos 6 e 7).

2. Disponibilidade das matérias-primas para aves

A diversidade de matérias-primas, atualmente, disponíveis para a utilização em alimentação animal é considerável. Contudo, apenas uma fração é efetivamente utilizada na formulação de ACs. Esta restrição resulta da variabilidade associada a estes ingredientes, tanto em termos nutricionais, como também pela presença de contaminantes resultantes do cultivo ou do processamento industrial (Monteiro et al., 2022).

A composição química das matérias-primas pode variar significativamente devido às condições edafoclimáticas, à variedade da cultura, ao manejo agrícola e ao modo de processamento. Esta variabilidade pode afetar a uniformidade nutricional dos alimentos e, consequentemente, o desempenho animal (McNab e Boorman, 2002).

O Regulamento (CE) nº767/2009 define como matérias-primas os produtos de origem vegetal ou animal que têm por objetivo satisfazer as necessidades alimentares dos animais, podendo estar no seu estado natural, fresco ou conservado, bem como os produtos resultantes da sua transformação industrial

e as substâncias orgânicas ou inorgânicas, com ou sem aditivos, destinadas a serem utilizadas na alimentação animal por via oral, quer diretamente, quer após transformação, ou para a preparação de alimentos compostos para animais ou como excipiente em pré-misturas. (Parlamento Europeu, 2009)

A disponibilidade real de matérias-primas no mercado depende de diversos fatores, como a sazonalidade das culturas, a relação entre as produções nacionais e a disponibilidade no mercado, pela logística e custos de transporte, bem como pelas políticas comerciais e cenários geopolíticos. A globalização e os avanços tecnológicos têm, contudo, permitido estimar mais precisamente o fluxo e utilização destes ingredientes (subpromais, 2021).

As matérias-primas foram divididas em concentrados energéticos, como o milho e o trigo, em concentrados proteicos, com destaque para o bagaço de soja, e em aditivos, como é o caso do carbonato de cálcio.

As secções seguintes descrevem as matérias-primas envolvidas nas fórmulas avaliadas neste trabalho, realçando-se o seu valor nutricional, a origem, a variabilidade e os principais impactes ambientais associados.

2.1. Concentrados energéticos

Os concentrados energéticos são matérias-primas com menos de 20% de PB, constituindo a principal fonte de energia na alimentação das aves. Na Europa, os mais utilizados são essencialmente os cereais e os seus subprodutos, como o milho, o trigo, a cevada, o centeio e a aveia (McNab e Boorman, 2002). Estes cereais fornecem amido, proteína, vitamina E e tiamina, no entanto, são pobres em vitamina D, riboflavina e em provitaminas A, à exceção do milho amarelo (Mcdonald et al., 2011).

Os concentrados energéticos apresentam elevada digestibilidade, desempenhando um papel essencial na eficiência alimentar e na formulação económica de ACs. As suas características físico-químicas influenciam não só o valor energético da dieta, mas também a textura, a granulometria e o comportamento do alimento durante o processo de fabrico (McDonald et al., 2011; McNab e Boorman, 2002).

Além do milho, existem outros cereais que são utilizados como fontes de energia para as aves. O milho é o concentrado energético utilizado nas formulações em estudo, por isso, será apresentado numa subsecção, com mais detalhe. De seguida, apresenta-se as principais características do trigo, cevada, centeio e aveia.

O trigo, *Triticum aestivum* Linnaeus, 1753, caracteriza-se por possuir um teor de proteína bruta entre os 10 e os 14%, apresentando valores energéticos ligeiramente inferiores aos do milho. É uma boa fonte de fósforo, potássio e magnésio, mas pode causar problemas digestivos, devido ao seu elevado teor em polissacarídeos não amiláceos. Para controlar este problema, utiliza-se enzimas exógenas que tem demonstrado eficácia na melhoria da digestibilidade e eficiência alimentar nestas dietas (Heuzé et al., 2015; Youssef, 2025).

O trigo utilizado em Portugal, é proveniente de países como a França, Bulgária e Espanha (Monteiro et al., 2022). No país vizinho, a produção de trigo foi de 6,25 milhões de toneladas, e o consumo interno foi de apenas 431 mil toneladas, o que revela um grande excedente, que poderia ser exportado para Portugal, e diminuir a pegada associada ao transporte (Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación [MAPA], 2023). Em termos de impacto ambiental, o seu cultivo pode causar erosão e salinização dos solos (nos casos de regadio), além da possível lixiviação do azoto, associada à fertilização (Heuzé e Tran, 2015).

A cevada, *Hordeum vulgare* Linnaeus, 1753, apresenta um teor de amido inferior ao do milho e do trigo, mas um maior teor em fibra e em algumas das vitaminas do grupo B. O seu teor em proteína é de cerca de 11%, com níveis elevados de lisina, metionina, treonina e triptofano (Santini et al., 2025).

Portugal não possui tanta cevada quanto a que consome, sendo os seus maiores fornecedores a Espanha, o Reino Unido e a França (Monteiro et al., 2022). A produção de cevada em Portugal concentra-se nas regiões do Alentejo e Beira Interior, demonstrando o potencial deste cereal para ser uma alternativa ao milho na dieta das aves. A valorização dos cereais nacionais contribui para reduzir a dependência do exterior e minimizar o impacto ambiental (INE, 2019).

A cevada tem a vantagem de os subprodutos resultantes do processamento dos seus grãos também poderem ser utilizados como matérias-primas dos ACs. No que toca ao impacto ambiental é uma cultura que tolera a salinidade podendo ser utilizada para a recuperação de solos salinos (Heuzé V., Tran G., Nozière P., Noblet J., et al., 2016).

O centeio, *Secale cereale* Linnaeus, 1753, é produzido sobretudo em condições de invernos frios e verões quentes e secos, o que o torna uma alternativa interessante num cenário de alterações climáticas. Comparando-o com o trigo, já que os seus grãos são muito semelhantes, possui um teor em lisina semelhante, mas menor em aminoácidos como a metionina, a cisteína e o triptofano. O teor em proteína deste grão é de cerca de 10% e é considerado o grão com menor palatabilidade (Heuzé V. et al., 2015; Mcdonald et al., 2011). A sua utilização em avicultura é limitada devido à presença de substâncias que conferem elevada viscosidade ao quimo e afetam o desempenho zootécnico (Santini et al., 2025; Youssef, 2025).

A aveia, *Avena sativa* Linnaeus, 1753, fornece menos energia que a cevada e o milho, devido aos teores de fibra e gordura bruta serem mais elevados. O uso do grão com as cascas aumenta o teor de fibra, pelo que o grão a “nu” tem melhor densidade energética e valor nutricional. Relativamente aos níveis de proteína, também são cerca de 10% (Heuzé V., Tran G., Nozière P., Renaudeau D., et al., 2016), e a aveia é rica em aminoácidos essenciais como a metionina, a histidina e o triptofano (Mcdonald et al., 2011).

De um modo geral, cereais como o trigo e a cevada, representam alternativas viáveis ao milho, especialmente em regiões onde se pretende valorizar as

produções locais e minimizar o impacto ambiental associado ao transporte. Contudo, as variações associadas ao seu conteúdo energético e a presença de fatores antinutricionais exigem formulações otimizadas e a inclusão de enzimas que permitam maximizar a digestibilidade, o índice de conversão e a velocidade de crescimento (Santini et al., 2025; Youssef, 2025).

2.1.1. Milho

O milho, *Zea mays* Linnaeus, 1753, é um dos cereais mais cultivados em todo o mundo, sendo utilizado tanto para a alimentação humana, como animal. É uma gramínea anual, de porte robusto e que enraíza nos nós inferiores. O seu fruto é uma cariopse, também conhecido como grão, e a sua cor pode apresentar variações entre o branco, o amarelo e o vermelho (Monteiro et al., 2022).

Na alimentação de aves, destaca-se por ser o principal concentrado energético utilizado, devido ao seu elevado valor energético, boa palatabilidade, baixa variabilidade na sua composição química e baixo teor em fatores antinutricionais. Além disso, possui elevada digestibilidade e, de um modo geral, não existem limitações à utilização de milho na alimentação de monogástricos (Monteiro et al., 2022).

Em 2022, a produção nacional de milho para grão foi de aproximadamente 682 mil toneladas, e o consumo de milho na produção de ACs foi de 1,6 milhões de toneladas, o que corresponde a cerca de 76% do consumo total de cereais. Para satisfazer estas necessidades, foram importadas cerca de 2,07 milhões de toneladas de milho, segundo Monteiro e colaboradores (2022) oriundo de:

- Ucrânia: 38,4% ($\approx$ 796 mil toneladas);
- Brasil: 26,9% ($\approx$ 550 mil toneladas);
- Roménia: 14,7% ($\approx$ 305 mil toneladas).

Em Espanha, a produção de milho para grão totalizou 3,59 milhões de toneladas, com um consumo interno de 371 mil toneladas, o que a torna um potencial fornecedor, de proximidade, que se traduz em menor dependência de importações, e, conseqüentemente, menores emissões associadas ao transporte de longa distância (MAPA, 2023).

As Tabelas abaixo (Tabela 1 a 6) apresentam as principais características nutricionais do milho dentado nacional, sendo os resultados apresentados em percentagem de produto fresco. No Anexo 1 é possível encontrar a descrição dos parâmetros apresentados nas Tabelas desta secção, e seguintes.

Tabela 1 - Composição química do milho nacional. Adaptado de Monteiro et al., (2022)

Valores em %	Humidade	Cinzas	PB	GB	FB	Açúcares solúveis	Amido
Média	11,9	1,0	7,3	2,9	2,4	3,0	65,8
Desvio Padrão	0,4	0,1	0,3	0,1	0,2	0,4	0,7
Mínimo	11,4	0,9	6,7	2,8	2,1	2,7	64,6
Máximo	12,3	1,1	7,6	3,2	2,8	3,5	66,7

Tabela 2 - Macrominerais do milho nacional. Adaptado de Monteiro et al., (2022)

Macrominerais (%)	Cálcio	Fósforo	Sódio	Potássio	Magnésio
Média	0,0	0,3	0,0	0,3	0,1
Desvio Padrão	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Mínimo	0,0	0,2	0,0	0,3	0,1
Máximo	0,0	0,3	0,0	0,4	0,1

Tabela 3 - Oligoelementos do milho nacional. Adaptado de Heuzé et al., (2017); Monteiro et al., (2022)

Oligoelementos (mg/kg)	Cobre	Ferro	Zinco	Manganês
Média	2,0	20,1	12,7	5,0
Desvio Padrão	0	2,9	1,3	2,0
Mínimo	2,0	17,0	11,0	3,0
Máximo	3,0	25,8	14,4	9,0

Tabela 4 - Aminoácidos do milho nacional. Adaptado de Monteiro et al., (2022)

AA	Asp	Glu	Ser	His	Gly	Thr	Arg	Ala	Pro	Tyr	Val	Met	Cys	Ile	Phe	Leu	Lys
Média	0,4	1,2	0,3	0,1	0,3	0,2	0,3	0,5	0,9	0,2	0,3	0,1	0,1	0,9	0,3	0,7	0,2
DP	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Mín.	0,4	1,1	0,3	0,1	0,3	0,2	0,3	0,4	0,8	0,2	0,3	0,1	0,0	0,2	0,3	0,7	0,2
Máx.	0,5	1,3	0,4	0,2	0,3	0,2	0,3	0,5	1,0	0,2	0,3	0,1	0,1	0,2	0,3	0,8	0,2

Tabela 5 - Ácidos gordos do milho nacional. Adaptado de Monteiro et al., (2022)

Ácidos Gordos	C12:0	C14:0	C16:0	C16:1	C18:0	C18:1	C18:2	C18:3
Média	0,0	0,1	13,2	0,1	2,0	27,8	53,9	1,6
Desvio Padrão	0,0	0,0	1,0	0,0	0,2	2,1	1,4	0,1
Mínimo	0,0	0,0	12,2	0,1	1,8	25,4	52,3	1,5
Máximo	0,0	0,1	14,3	0,1	2,3	30,1	55,5	1,7

Tabela 6 - Valores nutritivos das aves, em energia metabolizável aparente, corrigida para o azoto (EMAn). Adaptado de Heuzé et al., (2017)

EMAn (MJ/ kg MS)	Frango	Galo
Média	15,1	15,4
Desvio Padrão	-	0,2
Mínimo	15,1	15,4
Máximo	15,6	16,1

Estes valores demonstram a eficácia do milho enquanto principal fonte energética nas formulações de acabamento para frangos.

Em termos de impacto ambiental, o milho é uma cultura exigente já que é suscetível a numerosas pragas e doenças. Como consequência, para obtermos grandes rendimentos, necessitamos de aplicar adubos, herbicidas, inseticidas e fungicidas, em grandes quantidades, que são prejudiciais para a biodiversidade e conservação do solo. A lixiviação do azoto, a erosão do solo e a contaminação dos lençóis freáticos são alguns dos possíveis impactos (Heuzé et al., 2017).

Apesar disto, o milho continua a ser o concentrado energético de eleição nas formulações para aves, devido à sua disponibilidade, digestibilidade e relação custo-benefício. Por isso, é importante privilegiar fontes nacionais, ou de maior proximidade, para reduzir a pegada ambiental associada ao transporte (González-García et al., 2014).

2.2. Concentrados proteicos

Os concentrados proteicos são matérias-primas com mais de 20% de PB. A sua importância deve-se ao facto de serem ingredientes ricos em aminoácidos, que são essenciais para o crescimento e desenvolvimento dos frangos (McNab e Boorman, 2002).

Ao longo dos tempos, têm-se desenvolvido estudos que procuram encontrar concentrados proteicos que melhorem o valor nutritivo dos alimentos, mas a um custo reduzido, já que estes alimentos são, tipicamente, mais dispendiosos. A qualidade da proteína influencia diretamente a capacidade do AC de satisfazer as necessidades nutricionais das aves (Fatima et al., 2024).

Os concentrados proteicos podem ter origem vegetal ou animal. Na avicultura as proteínas vegetais têm mais importância, já que o Regulamento (UE) n.º 2021/1372 restringe a utilização das proteínas animais. Entre as vegetais, destacam-se a soja, a colza, o girassol, o linho e o algodão. Estas culturas são ricas em óleo que, normalmente, é extraído para a alimentação. Os bagaços, que são um produto resultante da extração dos óleos, possuem um elevado teor proteico (Monteiro et al., 2022).

A avicultura depende fortemente da inclusão de soja nas formulações, já que satisfaz as elevadas necessidades proteicas das aves. Para muitos países, isto implica importar grandes quantidades de soja, que é produzida com práticas pouco sustentáveis. Adicionalmente, percorre grandes distâncias até chegar ao destino, o que agrava o impacto ambiental da mesma (Wangui et al., 2025).

Nas formulações em estudo, a soja também é o concentrado proteico de eleição, e abaixo são apresentadas algumas das alternativas à soja.

A colza é a terceira fonte de óleo vegetal utilizada na alimentação animal, e constitui uma alternativa à soja em formulações que pretendem reduzir a dependência de matérias-primas externas e diminuir o impacto ambiental associado ao transporte e desflorestação (Heuzé et al., 2019; Monteiro et al., 2022). É uma importante fonte de proteína e lípidos, possuindo um baixo teor em

fibra. O seu bagaço possui um teor de proteína bruta entre os 32 e 36%, sendo especialmente rico em aminoácidos como a metionina e a cistina, que é uma vantagem em relação ao bagaço de soja. Em contrapartida, possui um baixo teor de lisina, que é um aminoácido limitante para os frangos (FAO, 2004; Heuzé et al., 2019).

O bagaço de algodão pode ser uma boa fonte de proteína para os monogástricos, desde que se considerem as limitações ao seu consumo, como o teor de fibra e a presença de gossipol (um inibidor de polimerização para os monogástricos). Este bagaço é suscetível ao desenvolvimento de fungos, pelo que é necessário controlar a humidade para que se mantenha entre os 5 e os 11%. É viável de ser utilizado como substituição parcial do bagaço de soja (Heuzé V., Tran G., Hassoun P., Bastianelli D., et al., 2019). A proteína do bagaço de algodão é de boa qualidade, contudo possui baixo teor de cistina, metionina e lisina, sendo a última o primeiro aminoácido limitante (Mcdonald et al., 2011).

O bagaço de girassol está entre os bagaços mais utilizados, e possui menor proteína e mais fibra que o bagaço de soja, apresentando boa palatabilidade (Heuzé V., Tran G., Hassoun P., Lessire M., et al., 2019). Este bagaço é pobre em lisina, mas tem cerca do dobro da metionina do bagaço de soja (Mcdonald et al., 2011).

2.2.1. Soja

A soja, *Glycine max* (L.) Merrill, 1917, pertence à família Fabaceae, e é uma cultura de elevado valor nutricional, sendo utilizada tanto em alimentação humana, como na alimentação animal (Monteiro et al., 2022).

Além da sua elevada concentração em proteína, é uma fonte importante de minerais como o potássio, o cálcio, o magnésio, o fósforo, o cobre e o zinco. Possui ainda bons teores de algumas vitaminas tais como a niacina, a riboflavina

e a vitamina C, embora apresente carências em vitamina A e ausência de vitaminas D e B12 (Heuzé e Tran, 2016; Monteiro et al., 2022).

Em termos de aminoácidos essenciais, a soja possui limitações nos teores de metionina e lisina, que frequentemente, são os aminoácidos limitantes das rações para monogástricos. De destacar que, as oleaginosas, normalmente, não são utilizadas em grão na alimentação animal, mas sim através de bagaços (McNab e Boorman, 2002).

A produção nacional de soja é praticamente inexistente, portanto Portugal está totalmente dependente da importação, que em 2022, foi de:

- 737 mil toneladas do Brasil (52,3%);
- 305 mil toneladas da Alemanha (21,6%);
- 267 mil toneladas dos Estados Unidos da América (18,9%).

O consumo total de soja na produção de ACs foi de 4161 toneladas, que corresponde a cerca de 83% do consumo total de oleaginosas em grão (Monteiro et al., 2022).

Tabela 7 - Composição química da soja. Adaptado de Monteiro et al., (2022)

Valores em %	Humidade	Cinzas	PB	GB	FB	Açúcares solúveis	Amido
Média	9,6	4,5	35,2	20,0	7,1	11,5	3,4
Desvio Padrão	0,9	0,1	0,3	1,8	1,0	1,8	1,1
Mínimo	8,2	4,5	34,7	17,6	6,0	9,6	2,1
Máximo	10,7	4,7	35,6	22,1	9,2	14,2	5,4

Tabela 8 - Macrominerais da soja. Adaptado de Monteiro et al., (2022)

Macrominerais (%)	Cálcio	Fósforo	Sódio	Potássio	Magnésio
Média	0,3	0,5	0,0	1,3	0,2
Desvio Padrão	0,1	0,1	0,0	0,2	0,0
Mínimo	0,2	0,3	0,0	1,0	0,2
Máximo	0,4	0,5	0,0	1,7	0,3

Tabela 9 - Oligoelementos da soja. Adaptado de Monteiro et al., (2022)

Oligoelementos (mg/kg)	Cobre	Ferro	Zinco	Manganês
Média	9,81	85,68	29,45	19,87
Desvio Padrão	1,889	13,849	3,04	3,23
Mínimo	7,19	64,35	23,2	14,35
Máximo	11,55	106,5	32,9	24,15

Tabela 10 - Quantificação dos aminoácidos na soja. Adaptado de Monteiro et al., (2022)

AA	Asp	Glu	Ser	His	Gly	Thr	Arg	Ala	Pro	Tyr	Val	Met	Cys	Ile	Phe	Leu	Lys
Média	3,8	6,1	1,8	0,6	1,3	1,2	2,1	1,4	2,5	1,1	1,4	0,3	0,2	1,4	1,7	2,4	2,0
DP	0,4	0,7	0,2	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,4	0,1	0,2	0,0	0,1	0,2	0,2	0,3	0,2
Mín.	3,0	5,2	1,4	0,5	1,1	1,0	1,8	1,1	1,8	0,9	1,1	0,3	0,0	1,1	1,4	1,9	1,6
Máx.	4,3	7,0	2,0	0,8	1,5	1,4	2,4	1,6	3,1	1,3	1,6	0,4	0,2	1,6	1,9	2,7	2,3

Tabela 11 - Quantificação de ácidos gordos na soja. Adaptado de Monteiro et al., (2022).

Ácidos Gordos	C12:0	C14:0	C16:0	C16:1	C18:0	C18:1	C18:2	C18:3
Média	0,0	0,1	12,5	0,1	3,5	21,2	55,1	6,0
Desvio Padrão	0,0	0,0	0,6	0,0	0,7	5,0	1,6	3,0
Mínimo	0,0	0,0	11,7	0,1	2,3	15,4	52,9	0,8
Máximo	0,1	0,1	13,5	0,1	4,2	29,8	57,4	9,5

As sementes de soja em cru contêm fatores antinutricionais como os inibidores de tripsina, a urease, as lectinas e os fitatos, que são termolábeis, ou seja, são destruídos pela temperatura. Por isso, a soja é submetida a processos de tostagem antes de ser utilizada em alimentação animal. Existem ainda fatores antinutricionais termoestáveis, como os fatores antigénicos, as saponinas e os oligossacarídeos (Heuzé et al., 2020; Monteiro et al., 2022).

Os fatores antigénicos colocam limitações na utilização da soja devido aos impactos negativos na saúde e bem-estar animal, tais como danos na mucosa intestinal e problemas digestivos em animais jovens. As saponinas afetam o consumo em todas as espécies. Os ruminantes, devido ao rúmen, que digere parcialmente os alimentos, são menos sensíveis que os monogástricos a estes fatores antinutricionais (Heuzé et al., 2020; Monteiro et al., 2022).

Em aves, o limite de incorporação da soja varia entre os 10% em alimentos para reprodutoras e pintos de iniciação, e os 16% em alimentos para pintos de recria. Sendo bagaço de soja, o limite passa a ser de 40% para a engorda de pintos (Monteiro et al., 2022).

O bagaço de soja é o principal concentrado proteico utilizado na alimentação de aves, sendo um subproduto da extração do óleo de soja. Essa extração pode ser realizada por 3 processos, a extração por solvente (mais comum), a extração

mecânica e, uma combinação entre extrusão e prensagem. Normalmente, as sementes de soja processadas são parcialmente descascadas, com vista a aumentar o seu valor nutricional na alimentação de leitões e pintos de primeira idade (Heuzé et al., 2020; Monteiro et al., 2022).

Existem bagaços com diferentes percentagens de proteína e é consoante essas diferenças que são classificados. Após a extração do óleo, o teor de proteína no bagaço é elevado, 47-49%, e o teor de fibra é baixo, cerca de 3%. Por vezes, adiciona-se cascas de soja para se obter o bagaço de soja com um teor em proteína mais baixo (42-44%). Este produto é rico em aminoácidos, tais como a lisina, o triptofano, a treonina e a isoleucina. Por a cistina e a metionina não se encontrarem nas concentrações ótimas para os monogástricos, a suplementação de metionina é necessária (Monteiro et al., 2022).

O bagaço de soja tem cerca de 60 a 70% de fósforo na sua composição, porém, este está ligado ao ácido fítico, não se encontrando disponível para os monogástricos, o que também compromete a absorção de outros minerais. Deste modo, é necessário suplementar as formulações com fósforo inorgânico, podendo a fitase solucionar este problema (Heuzé et al., 2020).

O bagaço de soja é um produto muito consistente e uma das fontes de proteína menos variáveis para a nutrição animal. Contudo, as condições edafoclimáticas da soja e as condições de armazenamento causam variações na composição e qualidade nutricional (Monteiro et al., 2022). Por isso, vamos apresentar, nas seguintes tabelas, Tabela 12 a 17, as características para o bagaço de soja com 44-46% de proteína, que é o que mais tipicamente surge.

Tabela 12 - Composição química do bagaço de soja 44-46%. Adaptado de Heuzé et al., (2020)

Valores em %	Humidade	Cinzas	PB	FB	Açúcares solúveis	Amido
Média	12,3	7,4	49,5	7,2	10,6	0,9
Desvio Padrão	0,9	0,7	1,7	0,9	1,2	
Mínimo	6,5	5,8	44,1	4,9	8,3	0,8
Máximo	14,9	10,0	54,9	11,2	12,6	1,1

Tabela 13 - Macrominerais do bagaço de soja 44-46%. Adaptado de Heuzé et al., (2020)

Macrominerais (g/kg de MS)	Cálcio	Fósforo	Sódio	Potássio	Magnésio
Média	3,9	7,1	0,1	24,5	3,3
Desvio Padrão	1,1	0,6	0,1	1,3	0,3
Mínimo	1,7	6,2	0,0	22,4	2,4
Máximo	7,4	9,1	0,2	27,0	3,4

Tabela 14 - Oligoelementos do bagaço de soja 44-46%. Adaptado de Heuzé et al., (2020)

Oligoelementos (mg/kg)	Cobre	Ferro	Zinco	Manganês
Média	16	274	41	36
Desvio Padrão	-	-	8	11
Mínimo	12	-	28	23
Máximo	18	-	48	53

Tabela 15 - Quantificação de aminoácidos no bagaço de soja 44-46%. Adaptado de Heuzé et al., (2020)

AA	Asp	Glu	Ser	His	Gly	Thr	Arg	Ala	Pro	Tyr	Val	Met	Cys	Ile	Phe	Leu	Lys
Média	11,3	17,8	4,8	2,7	4,2	1,4	7,3	4,4	5,0	3,5	4,8	1,4	1,5	4,6	5,1	7,6	6,2
DP	0,6	1,4	0,3	0,2	0,2	0,1	0,4	0,4	0,3	0,3	0,3	0,2	0,1	0,4	0,2	0,4	0,3
Mín.	10,0	14,4	4,4	2,3	3,4	1,3	6,0	3,6	4,5	3,1	4,2	1,1	1,1	4,2	4,5	6,4	5,6
Máx.	12,9	23,3	5,5	3,1	4,8	1,4	8,2	53,0	5,7	4,3	5,5	1,8	1,6	6,1	5,5	8,6	6,6

Tabela 16 - Quantificação de ácidos gordos no bagaço de soja 44-46%. Adaptado de Heuzé et al., (2020)

Ácidos Gordos	C14:0	C16:0	C16:1	C18:0	C18:1	C18:2	C18:3
Média	0,2	11,2	0,1	3,8	23,1	54,0	7,2
Desvio Padrão	0,3	2,2	0,1	0,4	1,6	2,9	0,9
Mínimo	0,0	9,6	0,0	3,2	19,8	42,9	4,8
Máximo	1,1	20,8	0,2	4,8	27,3	58,2	8,7

Tabela 17 - Valores nutritivos das aves, em energia metabolizável aparente, corrigida para o azoto. Adaptado de Heuzé et al., (2020)

EMAn (MJ/ kg MS)	Frango	Galo
Média	10,6	10,8
Desvio Padrão	-	-
Mínimo	-	-
Máximo	-	-

Em termos de impacto ambiental, como a soja é uma oleaginosa, é uma cultura que fixa o azoto atmosférico, podendo ser utilizada como adubo verde. Por outro lado, a sua produção, muitas vezes, é praticada como monocultura, tendo impactos nos habitats naturais e na biodiversidade. A intensificação da cultura causa erosão e esgotamento do solo. O cultivo da soja também está associado a uma grande desflorestação, em países como o Brasil e a Argentina (Heuzé et al., 2020). O impacto do bagaço de soja varia significativamente com a sua origem e método de produção. O bagaço de soja europeu possui menor impacto, considerando o que resulta como subproduto, contra o que é produzido em países latino-americanos (Alkhtib et al., 2023).

2.3. Aditivos

O Regulamento (CE) nº1831/2003 define aditivos como “substâncias, microrganismos ou preparados, que não sejam intencionalmente aditados aos alimentos para animais ou à água, a fim de desempenharem uma função específica”.

Os aditivos dividem-se em diversas categorias, que consideram a função para que qualquer substância foi adicionada, ou seja:

- Aditivos tecnológicos: efeitos tecnológicos;
- Aditivos organoléticos: a sua adição melhora ou altera as propriedades organoléticas do alimento;
- Aditivos nutritivos;
- Aditivos zootécnicos: influenciam favoravelmente o rendimento dos animais ou o ambiente;
- Coccidiostáticos e histomonostáticos (Parlamento Europeu, 2003).

Como em secções anteriores, dar-se-á destaque aos aditivos utilizados nas formulações seleccionadas, que foram, os aditivos nutricionais, os aditivos organoléticos e os aditivos zootécnicos.

As formulações de AC para aves que têm por base cereais e fontes de proteína vegetal são tipicamente suplementadas com aminoácidos sintéticos, especialmente, com lisina, metionina e treonina, que são aminoácidos limitantes (Mcdonald et al., 2011).

Os aminoácidos sintéticos suplementares podem ser utilizados para reduzir o teor de PB nas rações, mantendo a quantidade ideal de aminoácidos. As formulações para frangos com o menor teor de proteína bruta, mas com um equilíbrio adequado de aminoácidos, resultam, por um lado, num melhor índice de conversão, e por outro, em menores emissões de azoto provenientes dos dejetos dos animais (Heidari et al., 2021; Korver e Stewart-Brown, 2023).

Estes aminoácidos são produzidos por processos biotecnológicos que utilizam microrganismos em fermentação. Por isso, os aminoácidos produzidos por fermentação contêm sempre a forma biológica, o enantiómero L. Estes aminoácidos são frequentemente adicionados na forma purificada, para possibilitar a redução da proteína total e dos custos (Santini et al., 2025). A Tabela 18 apresenta as características dos aminoácidos utilizados.

Tabela 18 - Métodos de produção e teor de proteína bruta (%) dos 3 aminoácidos sintéticos utilizados. Adaptado de (Evonik, 2024)

Aminoácido sintético	Proteína bruta (%)	Teor de aminoácido ativo (mg/g)	Método de produção
L-Lisina	95,4	798 (Lys)	Fermentação
DL-Metionina	58,4	990 (Met)	Carbonato (Processo petroquímico)
L-Treonina	73,1	990 (Thr)	Fermentação

Além dos aminoácidos, existem minerais que são essenciais para o desenvolvimento ósseo e equilíbrio eletrolítico das aves, tais como o cálcio, o fósforo e o sódio. O carbonato de cálcio é adicionado como uma das fontes de cálcio. O fosfato monocalcico permite às aves a absorção de fósforo, já que o que se encontra presente nas matérias-primas vegetais, normalmente, se encontra na forma de fitato. Deste modo, apenas se considera disponível o fósforo proveniente da formulação, e é importante que a relação cálcio: fósforo, seja de 2:1, para as aves em crescimento. Por fim, o bicarbonato de sódio é adicionado com o intuito de permitir o equilíbrio metabólico ácido-base nas aves. (Korver e Stewart-Brown, 2023).

O cálcio e o fósforo são os dois minerais mais abundantes no corpo, devido à sua presença nos ossos. O cálcio é fundamental para a formação da casca dos ovos, para a contração muscular, para a transmissão de impulsos nervosos, e para a regulação dos batimentos cardíacos e hormonal. O fósforo é imprescindível para o crescimento muscular, para a formação dos ovos, para a

composição dos ácidos nucleicos, para o metabolismo energético (ATP), entre outros (McNab e Boorman, 2002).

As decisões tomadas têm de considerar a saúde dos animais, a produção e a economia, sobretudo porque o fósforo é caro, quando comparado com o cálcio. Além disso, é necessário considerar o fósforo que é libertado nos dejetos dos animais, já que a sua libertação nos solos e água tem impacte ambiental (McNab e Boorman, 2002).

Estes ingredientes são exemplos de aditivos nutritivos, e podem ser classificados com base no seu custo. Os ingredientes de baixo custo são aqueles que requerem menos processamento tais como o sal, o carbonato de cálcio e o bicarbonato de sódio. Já os aminoácidos sintéticos, as vitaminas e as enzimas são aditivos, normalmente, com custos elevados (Heidari et al., 2021).

Os pigmentantes são considerados aditivos organoléticos. São substâncias utilizadas para intensificar a coloração da carne de frango, de modo a satisfazer as preferências do consumidor. A utilização de pigmentantes não tem influência no desempenho produtivo das aves, contribui para a valorização comercial do produto final (Monteiro et al., 2022).

Nos aditivos zootécnicos, uma das categorias considerada, é a de substâncias melhoradoras de digestibilidade dos alimentos ingeridos. Outra das categorias é a de substâncias que afetem favoravelmente o ambiente (Parlamento Europeu, 2003).

As enzimas são reconhecidas por melhorarem a digestibilidade e utilização dos nutrientes presentes na dieta. São proteínas que catalisam reações bioquímicas, e quando adicionadas à formulação das aves, estimulam a degradação de substâncias que os animais não conseguem digerir, como os fatores antinutricionais (Youssef, 2025).

A fitase é a enzima que degrada o fitato, um composto naturalmente presente nos ingredientes vegetais das dietas (Youssef, 2025). Esta enzima permite

melhorar a digestibilidade do fósforo vegetal, reduzir a necessidade de adição de fosfatos inorgânicos, como o fosfato monocálcico e diminuir a excreção de fósforo para o meio ambiente, diminuindo o risco de eutrofização das águas (Korver e Stewart-Brown, 2023; Ogino et al., 2021).

A fitase potencia também a disponibilidade de outros minerais essenciais, como o cálcio, o zinco e o ferro. Com isto, permite reduzir o custo da formulação das aves, promove ganhos de peso mais elevados, melhorar a eficiência alimentar e a saúde dos frangos (Youssef, 2025).

3. Necessidades nutritivas dos frangos

Uma nutrição adequada é determinante para garantir o crescimento, o desempenho e o bem-estar dos frangos. As aves necessitam de um conjunto equilibrado de nutrientes essenciais, como a água, macro e micronutrientes, aminoácidos, vitaminas e minerais (Korver e Stewart-Brown, 2023). Estas necessidades variam com a idade, o peso e a finalidade produtiva. Geralmente, aves em crescimento necessitam de mais energia do que aves adultas (Heidari et al., 2021).

A Tabela 19 apresenta as necessidades nutricionais para os frangos, tendo por base as dietas mais típicas, em que o milho e a soja são os ingredientes principais. Estes requisitos podem ser ajustados quando são utilizados aminoácidos sintéticos, permitindo reduzir o teor de proteína bruta, sem comprometer o equilíbrio nutricional (Korver e Stewart-Brown, 2023).

Tabela 19 - Diferentes necessidades nutricionais dos frangos de carne, conforme a sua idade. Adaptado de Korver e Stewart-Brown, (2023)

Idade	0-3 semanas (%)	3-6 semanas (%)	6-8 semanas (%)
kcal EM/kg dieta	3200	3200	3200
Proteína bruta	23	20	18
Arginina	1,25	1,1	1
Glicina + serina	1,25	1,14	0,97
Histidina	0,35	0,32	0,27
Isoleucina	0,8	0,73	0,62
Leucina	1,2	1,09	0,93
Lisina	1,1	1	0,85
Metionina	0,5	0,38	0,32
Metionina + cisteína	0,9	0,72	0,6
Fenilalanina	0,72	0,65	0,56
Fenilalanina + tirosina	1,34	1,22	1,04
Prolina	0,6	0,55	0,46
Treonina	0,8	0,74	0,68
Triptofano	0,2	0,18	0,16
Valina	0,9	0,82	0,7

A água é o nutriente mais importante, as aves consomem-na em cerca do dobro da quantidade de alimento. Contudo, fatores como a temperatura, a humidade e a composição do alimento podem influenciar esta ingestão. Privar as aves de água por longos períodos é prejudicar o seu crescimento, a produção e aumentar a mortalidade (Korver e Stewart-Brown, 2023).

A energia é o primeiro parâmetro a considerar na formulação de rações. A energia disponível é, normalmente, expressa como energia metabolizável (EM), que resulta da subtração entre a energia bruta e as perdas pela urina e dejetos (Figura 3). A energia metabolizável aparente corrigida para o azoto (EMAn) é a

mais utilizada mundialmente. O nível energético de uma formulação condiciona a inclusão dos restantes ingredientes, uma vez que dietas mais concentradas em energia tendem a reduzir o consumo voluntário e, consequentemente, a ingestão global de proteína, minerais e vitaminas (Heidari et al., 2021).

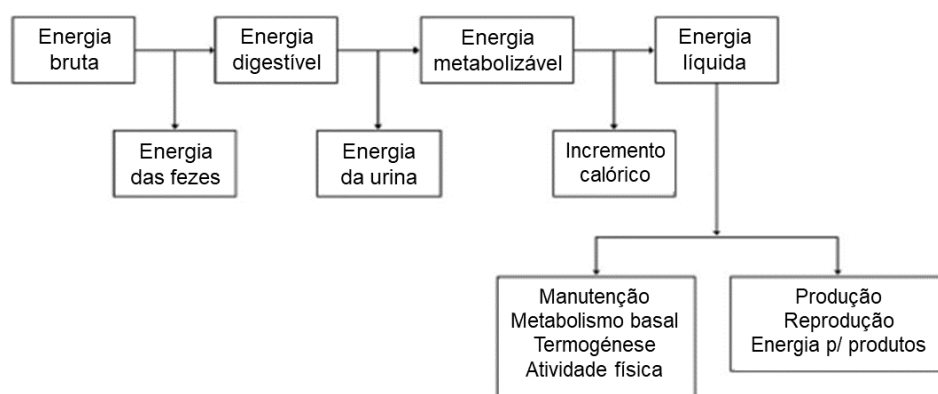


Figura 3 - Partição e fluxo de energia na nutrição avícola. Adaptado de: Pesti e Choct, (2023)

As proteínas fornecem os aminoácidos, que são essenciais à síntese e renovação de tecidos. Como as aves não conseguem sintetizar todos os aminoácidos necessários ao seu metabolismo, estes têm de ser obtidos através da alimentação (McNab e Boorman, 2002). Os aminoácidos essenciais, normalmente limitantes nas misturas para os frangos são a arginina, a isoleucina, a leucina, a lisina, a metionina, a fenilalanina, a treonina, o triptofano e a valina (Korver e Stewart-Brown, 2023).

A utilização de aminoácidos sintéticos permite reduzir o teor de proteína bruta, mantendo o equilíbrio nutricional e reduzindo a excreção de azoto. A

biodisponibilidade e digestibilidade dos aminoácidos variam com o tipo de matérias-primas utilizadas e o seu processamento, tornando-os fatores críticos na formulação (McNab e Boorman, 2002; Santini et al., 2025).

As vitaminas são essenciais ao funcionamento metabólico adequado e ao crescimento. Embora possam estar naturalmente presentes nas matérias-primas, as quantidades são frequentemente insuficientes, sendo necessário suplementar, sobretudo as vitaminas A, D₃, E e K. Esta suplementação também se deve ao facto de existirem perdas durante o armazenamento (McNab e Boorman, 2002).

Os macronutrientes mais relevantes são o cálcio, o fósforo, o sódio, o potássio, o magnésio, o cloro e o enxofre. Por sua vez, os micronutrientes cruciais são o cobre, o iodo, o ferro, o manganês, o selénio e o zinco. Podem ainda existir necessidades residuais de boro, cromo, flúor, molibdénio, silício e vanádio, embora seja improvável que as formulações apresentem carência destes nutrientes (Korver e Stewart-Brown, 2023).

4. Modelos de formulação

A formulação de um AC é um processo que integra, simultaneamente, variáveis nutricionais, económicas, tecnológicas e operacionais. O objetivo é identificar combinações de ingredientes que satisfaçam os requisitos nutricionais das aves, ao menor custo possível, e assegurando a qualidade da dieta e a viabilidade produtiva (Dooren, 2018; Pesti e Choct, 2023).

A formulação começa com a especificação dos requisitos nutricionais, a energia, a proteína e os aminoácidos, e depois os restantes parâmetros. As matérias-primas disponíveis são caracterizadas, avalia-se a sua composição nutricional e digestibilidade. Estes dados são essenciais já que a variabilidade das matérias-

primas impacta diretamente o desempenho zootécnico e as possibilidades de formulação consideradas (Pesti e Choct, 2023).

Segundo McNab e Boorman (2002) a escolha dos ingredientes depende de vários fatores, como:

- a disponibilidade sazonal e o seu custo;
- a digestibilidade e ausência de fatores antinutricionais;
- a composição nutricional e a complementaridade entre ingredientes (ex.: combinação do milho com a soja);
- o impacte ambiental ao longo do ciclo de vida, quando essa informação se encontra disponível.

Na alimentação de frangos, o milho é frequentemente selecionado como a fonte energética, e a soja como fonte proteica, e desta forma consegue-se um teor em aminoácidos equilibrado, já que se complementam (McNab e Boorman, 2002). As gorduras e óleos permitem reduzir o pó nos moinhos da fábrica de ACs e promovem a palatabilidade das misturas (Heidari et al., 2021).

A presença de fatores antinutricionais ou um processamento inadequado podem comprometer a biodisponibilidade de aminoácidos, afetando o crescimento e a eficiência alimentar. Ingredientes de maior digestibilidade permitem reduzir o custo total da dieta e minimizar a excreção de nutrientes, sobretudo azoto (McNab e Boorman, 2002).

Neste trabalho, as duas fórmulas de AC utilizadas foram obtidas através de um modelo técnico-industrial, tendo sido desenvolvidas por um técnico especializado em nutrição animal, e com base em modelos de programação linear, com recurso a software adequado. Esta programação é considerada “a ferramenta ideal para converter rigorosamente restrições de nutrientes em combinações alimentares” (Dooren, 2018).

A programação linear é amplamente utilizada na indústria dos ACs, e a sua aplicação prática em formulação implica a definição da unidade funcional, a

especificação dos nutrientes alvo, bem como a inclusão das suas restrições, a introdução de preços e disponibilidade das matérias-primas e a definição de objetivos (menor custo, menor impacto ambiental ou modelos multiobjetivo, que consideram custo e sustentabilidade) (Dooren, 2018; Olugbenga O et al., 2015).

Atualmente, a indústria rumo para a inclusão da sustentabilidade nas formulações, considerando parâmetros como a pegada de carbono e o consumo de água, e para restrições de origem, dando preferência aos ingredientes de proximidade. A integração de dados de ACV no desenvolvimento dos ACs permite dietas com melhor desempenho ambiental, mas requer bases de dados robustas e maior capacidade tecnológica por parte da indústria (Dooren, 2018; Olugbenga O et al., 2015).

Para obtermos o AC para os frangos, este passa por diversos processos antes de ser enviado para o avicultor, como, a receção das matérias-primas, a moagem, a mistura e a granulação que transformam matérias-primas heterogéneas num produto final uniforme, seguro e com valor nutricional consistente (Amin e Sobhi, 2023; FAO e International Feed Industry Federation [IFIF], 2010).

A receção das matérias-primas inspeciona as características físico-químicas, verificando teores como os de proteína e gordura, na chegada e durante o armazenamento nos silos. Esta operação permite assegurar a higiene e segurança do AC, e a proteção dos equipamentos (Amin e Sobhi, 2023; FAO e IFIF, 2010).

Posteriormente, estes ingredientes são pesados antes de seguirem para os moinhos, onde são sujeitos a trituração e enviados para o misturador. A moagem reduz o tamanho das partículas o que permite melhorar a digestibilidade. A mistura resultante é enviada para granulação, e de seguida, o produto final é arrefecido. Ao longo destes processos é necessário controlar a temperatura e humidade (Amin e Sobhi, 2023).

Nas Figuras 4 e 5, encontram-se resumidos os processos necessários para a produção do AC, desde a cultura em campo das matérias-primas, até à granulação do AC.

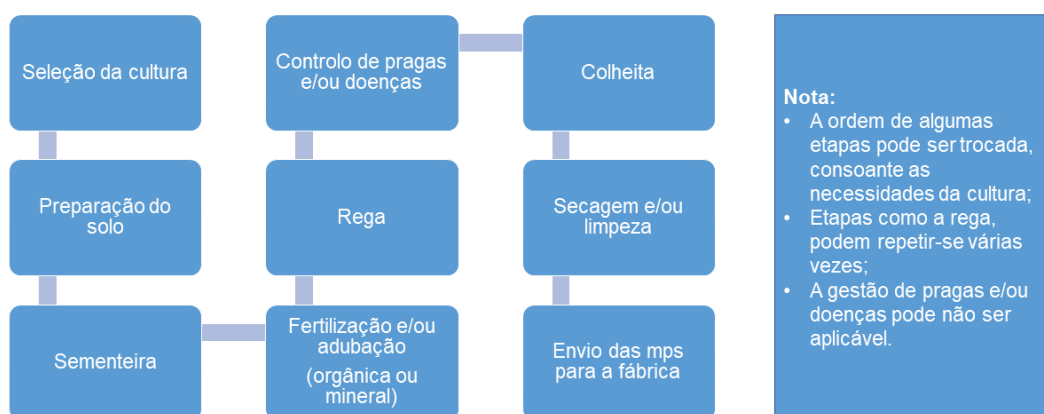


Figura 4 – Etapas gerais até à obtenção das culturas agrícolas, que funcionarão como matérias-primas dos ACs. Adaptado de Tamburini et al., (2015)

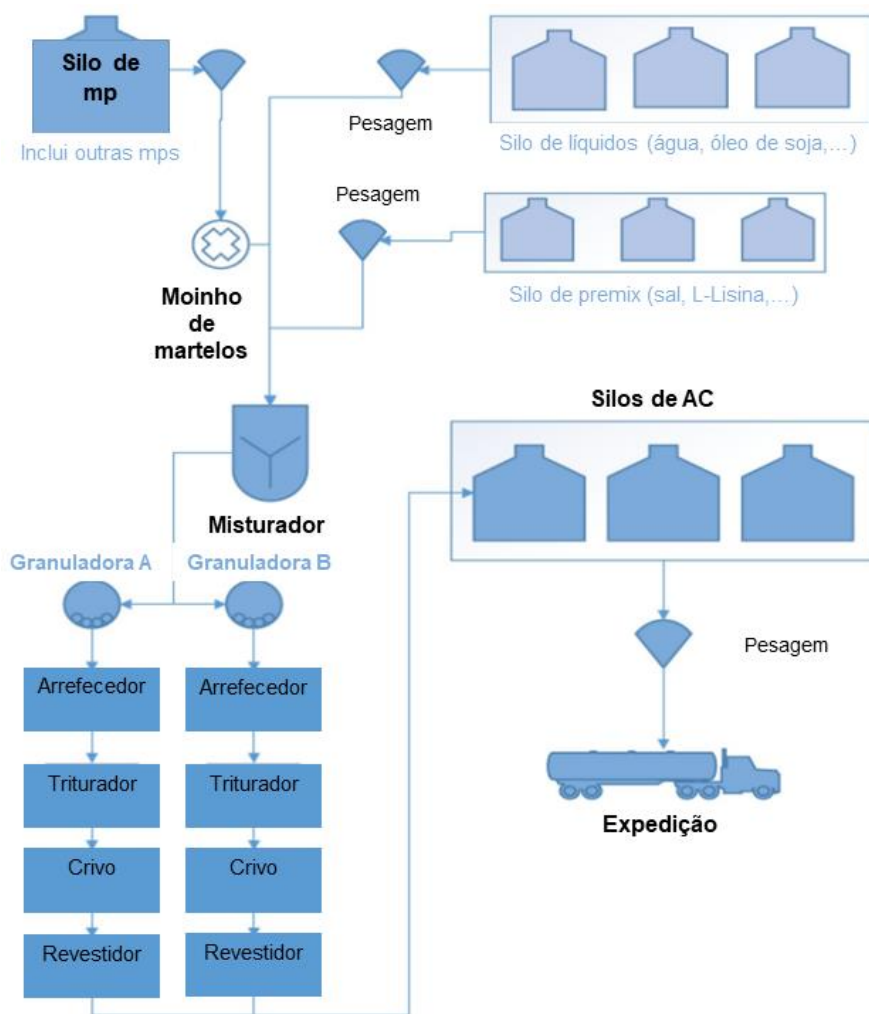


Figura 5 - Fluxograma do processo produtivo do AC para frangos. Adaptado de (Amin e Sobhi, 2023)

5. Metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV)

AACV é uma metodologia normalizada internacionalmente, utilizada para avaliar os impactos ambientais de um produto, processo ou serviço ao longo de todas as etapas do seu ciclo de vida. As normas ISO 14040 e 14044 estabelecem os princípios, requisitos e procedimentos necessários para garantir a coerência

metodológica e transparência dos resultados (European Commission et al., 2010).

No setor agroalimentar, a ACV permite identificar os principais contributos ambientais ao longo da cadeia de produção, apoiar decisões de formulação, comparar alternativas tecnológicas e fundamentar estratégias de mitigação. No caso da alimentação animal, o uso da ACV assume particular relevância devido ao peso significativo das matérias-primas agrícolas na pegada ambiental de todas as rações (Tamburini et al., 2015). Este método considera as fases de extração de matérias-primas, de produção, de distribuição, de consumo e de fim de vida (Figura 6).

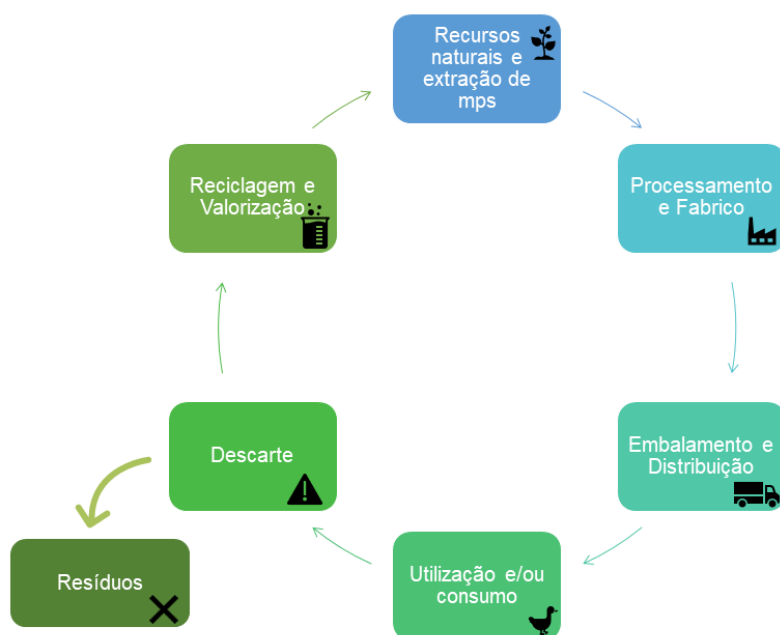


Figura 6 - Fases do ciclo de vida de um produto. Adaptado de Golsteijn, (2022)

AACV tem por base a Pegada Ambiental do Produto (PAP) e a Pegada Ambiental da Organização (PAO). A PAP foca-se na análise do impacto ambiental de produtos específicos, enquanto a PAO avalia a pegada ambiental de organizações inteiras. A sua combinação permite um melhor enquadramento para a tomada de decisão acerca da sustentabilidade dos seus produtos por parte das organizações (European Commission, 2024).

Cada uma destas fases pode causar danos na saúde humana, nos ecossistemas e nos recursos naturais, por isso, a metodologia PAP considera 16 categorias de impacto ambiental. Estas categorias não são estanques, sendo atualizadas com frequência para melhor refletirem a mais recente realidade científica e tecnológica (European Commission, 2024).

No Anexo 2, encontra-se uma tabela que descreve as diferentes 16 categorias, bem como as suas unidades de medida. Por exemplo, a categoria das alterações climáticas mede o impacto em kg CO₂ eq., enquanto o uso do solo é medido em m²crop_{eq.}. A categoria de uso do solo avalia as consequências de se utilizar o solo para a prática agrícola, que pode causar a perda de matéria orgânica dos solos, bem como a sua erosão.

A Organização Internacional de Normalização (ISO) tem normas específicas, como a ISO 14040 e a 14044, que descrevem as quatro principais fases da ACV (Figura 7):

- 1º Definição do objetivo e âmbito;
- 2º Análise do inventário;
- 3º Avaliação do impacto;
- 4º Interpretação.

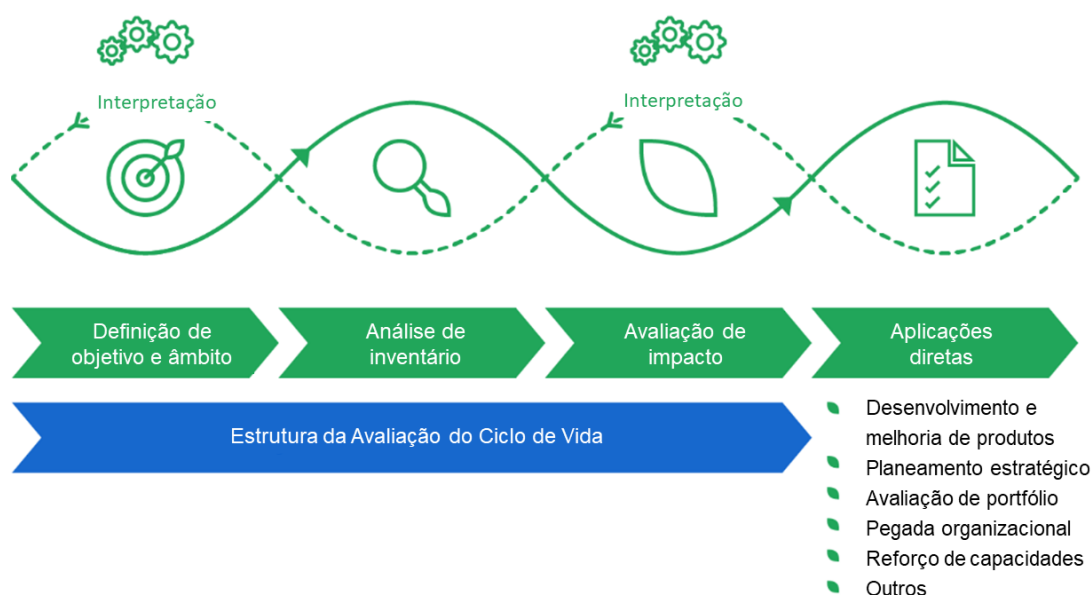


Figura 7 - Fases da metodologia da ACV. Adaptado de Golsteijn, (2022)

Esta análise é uma medida iterativa, já que ao longo do processo são realizados diversos ajustes. Com ela, é possível determinar os efeitos ambientais do AC desde a primeira até à última fase, ou em qualquer ponto intermediário. De acordo com as ISO referidas, existem diferentes âmbitos:

- 1º Da origem (berço) ao portão: Da produção das matérias-primas até ao portão da fábrica de ACs;
- 2º Do portão de entrada ao portão de saída: Foca-se exclusivamente nos processos de fabrico do AC;
- 3º Da origem (berço) ao descarte: Da produção das matérias-primas até à eliminação final do AC.

Para este estudo, selecionou-se o âmbito da origem ao portão, ou seja, da produção dos ingredientes até à saída do AC da fábrica. A ACV pode ser realizada através de diversas metodologias e ferramentas, sendo os softwares os mais amplamente utilizados na prática. Entre os programas mais

reconhecidos destacam-se o *SimaPro*, o *GaBi*, o *OpenLCA* e o *Umberto*. Estes, disponibilizam interfaces para a modelação de sistemas, integração com bases de dados de inventário, como o *Ecoinvent*, *Agri-footprint* ou *ELCD* e aplicação de métodos de avaliação de impacto, tais como o *ReCiPe*, *ILCD*, entre outros (Curran, 2015; Goldáraz-Salamero et al., 2025).

Ao longos dos últimos anos, a prática da ACV evoluiu de um domínio técnico restrito, com bases de dados de acesso limitado, para uma ferramenta amplamente utilizada, com crescente ênfase na transparência e partilha de dados. De realçar que a realização da ACV não está limitada à existência de um software, é possível realizar manualmente com recurso a folhas de cálculo, dados da literatura e recolhas próprias, desde que em conformidade com as ISO 14040 e 14044 (Curran, 2015).

No presente estudo, recorreu-se ao software *SimaPro* (Versão 9.5.0.0), que é amplamente reconhecido pela sua fiabilidade, flexibilidade e compatibilidade com bases de dados e métodos de avaliação (Goldáraz-Salamero et al., 2025; Golsteijn, 2022). O método de avaliação do impacto do ciclo de vida utilizado no *SimaPro* foi o *ReCiPe Midpoint 2016 (Perspetiva Hierarquista - H)* que é bastante reconhecido nos estudos de ACV (Goldáraz-Salamero et al., 2025; Pelaracci et al., 2024).

Quando um método de avaliação se caracteriza por “*midpoint*”, analisa o impacto ambiental, normalmente, ao longo da via causa-impacte, e a partir do momento em que o mecanismo ambiental é idêntico para todos os fluxos ambientais atribuídos a essa categoria de impacto. Já o nível “*endpoint*” reflete, tipicamente, os impactos em três áreas de proteção, a saúde humana, a qualidade dos ecossistemas e a escassez de recursos (Huijbregts et al., 2017).

Estas duas abordagens são complementares, o nível *midpoint* apresenta menor incerteza paramétrica, e uma maior ligação aos fluxos ambientais, enquanto o *endpoint* é mais fácil de interpretar em termos da relevância dos fluxos ambientais (Huijbregts et al., 2017). A Figura 8 elucida melhor estes conceitos, encontrando-se nos anexos a descrição das categorias de midpoint (Anexo 2).



Figura 8 - Visão geral das categorias de impacto abrangidas pelo método *ReCiPe* 2016 e da sua relação com as áreas de proteção. A linha a tracejado indica que não existe um fator de conversão constante de *midpoint* para *endpoint* no caso dos recursos fósseis. Adaptado de Huijbregts et al., (2017)

5.1. Definição do objetivo e âmbito

A primeira etapa é a definição do objetivo e âmbito que, estabelece a base para a realização da ACV, já que é determinante para todas as fases, definindo o propósito e os objetivos do estudo. Esta fase assegura a consistência da ACV (European Commission et al., 2010).

Uma ACV modela o ciclo de vida de um AC, mas é um modelo que simplifica uma realidade mais complexa. Como qualquer simplificação, pode possuir uma margem de distorção da realidade, mas o objetivo é sempre assegurar que essa

distorção seja mínima, para não influenciar drasticamente o resultado (European Commission et al., 2010).

O objetivo e o âmbito condicionam as escolhas mais importantes, e que muitas das vezes são subjetivas. De acordo com Golsteijn (2022) devemos ter presente qual é a finalidade da realização de uma ACV, devemos definir com precisão o produto e o seu ciclo de vida, bem como definir claramente os limites do sistema.

Os limites do sistema definem os processos e parâmetros do ciclo de vida do produto que devem ser considerados, ou seja, os que são necessários para o desempenho, de acordo com a unidade funcional (European Commission et al., 2010). Os ingredientes que se expressam em pequena quantidade, têm um impacto insignificante e podem ser excluídos da ACV (Golsteijn, 2022).

Para tal, a ISO 14040 define a Unidade Funcional (UF) como uma medida que permite quantificar a função que se definiu, e que deve representar os resultados funcionais do sistema do produto. É uma referência para o relacionamento das entradas e saídas da ACV.

Para este estudo, o objetivo é realizar a avaliação do impacto ambiental de duas fórmulas de AC, de acabamento para frangos, e a UF é de 1 tonelada de AC, tendo-se considerado que a ração será entregue aos avicultores a granel. Desta forma, não se contabiliza a fase de utilização do AC pelos frangos, bem como a gestão dos efluentes. Os limites do sistema consideram a produção agrícola das matérias-primas, o seu transporte nacional e internacional, o respetivo processamento e o fabrico do AC.

5.2. Análise do inventário

A segunda fase é a análise do inventário onde são consideradas todas as entradas e emissões ambientais associadas ao ciclo de vida do AC. As entradas

ambientais dizem respeito à extração de recursos naturais e ao consumo de matérias-primas, no caso, os ingredientes que vão funcionar como matérias-primas na produção do AC, e o consumo de água e energia para a produção do AC.

Por outro lado, as saídas ambientais correspondem aos elementos que o ciclo de vida devolve ao ambiente, ou seja, as emissões de gases (como o CO₂, o CH₄ e os óxidos nitrosos), a libertação de nitratos e compostos fosfatados nas águas e a produção de efluentes e resíduos (Curran, 2015; Hauschild et al., 2017; Huijbregts et al., 2017).

O uso intensivo de água na agricultura, pode causar escassez hídrica. A utilização de adubos azotados contribui para as emissões de óxidos nitrosos, que estão associados ao aquecimento global. A conversão de áreas não agrícolas, em agrícolas, com recurso à desflorestação, é responsável pela perda de biodiversidade e alteração do uso do solo. A utilização de recursos fósseis impacta no ambiente e na saúde humana (Curran, 2015; Hauschild et al., 2017; Huijbregts et al., 2017).

Deste modo, o inventário necessita de dados que sejam precisos, abrangentes e representativos, fornecendo um suporte às etapas seguintes (Golsteijn, 2022). A maior parte dos ingredientes utilizados na formulação dos ACs são provenientes da produção agrícola. O cultivo dos ingredientes necessita da utilização de estrumes, adubos, água, fitofármacos, entre outros. O ciclo completo da produção das matérias-primas, incluindo o transporte das mesmas até à fábrica, e a produção do AC, são considerados nas escolhas aplicadas no *SimaPro* (Tamburini et al., 2015).

No inventário, recorreu-se a dados secundários, provenientes de bases de dados especializadas devido à dificuldade de recolha de dados primários em todas as etapas envolvidas, sobretudo numa curta janela temporal. Existem diversos estudos que utilizam dados secundários extraídos de bases como o Ecoinvent (Alkhtib et al., 2023; Méda et al., 2021; Pelaracci et al., 2024).

5.3. Avaliação do impacte

A avaliação do impacte consegue-se através da análise dos potenciais impactes que resultam da etapa anterior, aquando da análise do inventário. Neste momento, os impactes ambientais de todos os processos considerados são classificados e considerados em temas como o aquecimento global e a saúde humana (Golsteijn, 2022).

Uma opção necessária passa por definir como se apresentam os resultados. Os resultados podem ser agregados num único índice que demonstra o quão sustentável é o AC, ou detalhados em dados específicos, como a melhoria nas emissões de CO₂ e os efeitos sobre o uso do solo. Esta decisão está dependente do objetivo da análise, do público-alvo, e consequentemente, da sua capacidade para interpretar os resultados (Golsteijn, 2022).

É necessário compreender que existem metodologias distintas de ACV para diferentes produtos e mercados, por isso, pode ser complexo saber por onde começar. A escolha da metodologia adequada é fulcral para o desenvolvimento da ACV consistentemente (Hagenaars, 2022). Neste estudo, a interpretação baseia-se no método *ReCiPe* 2016, considerando os indicadores de nível midpoint (Anexo 2), com destaque para 5 categorias, o uso do solo (US), o aquecimento global (AG), o consumo de água (CA), a escassez de recursos fósseis (ERF) e a formação de partículas finas (FPF).

5.4. Interpretação

A interpretação é a etapa final da ACV, e deve analisar criticamente os resultados obtidos, identificar os pontos de melhoria e garantir que as conclusões se encontram devidamente fundamentadas nos dados e métodos aplicados. A ISO 14044 defende que esta fase deve assegurar a consistência metodológica do

estudo, a completude dos dados, a sensibilidade das decisões adotadas e a transparência dos resultados (Golsteijn, 2022).

O foco da interpretação será identificar as etapas do ciclo de vida do AC com maior contributo para o impacte ambiental, e qual das formulações possui menor impacte. Para tal, realizar-se-ão testes para verificar como as variações na origem das matérias-primas ou na formulação do AC poderão influenciar os resultados da ACV.

A interpretação dos dados permite extrair conclusões com aplicabilidade prática. Por exemplo, se identificarmos que a produção agrícola de um determinado ingrediente é responsável por grande parte do impacte, será possível recomendar a substituição por outra matéria-prima com menor pegada ambiental. No decurso deste trabalho, esta análise tem particular interesse para a empresa onde o estágio foi realizado, que se dedica à produção de AC.

As vantagens associadas ao conhecimento da ACV são diversas. AACV fornece ferramentas para a tomada de decisões concretas, como a reformulação de dietas com menor impacte ambiental, a alteração das origens das matérias-primas ou a alteração da comunicação ambiental com os clientes e parceiros.

Nos últimos anos, têm surgido iniciativas para apoiar a indústria na integração da ACV nas suas estratégias. Um exemplo é o Instituto Global Feed ACV (GFLI) que disponibiliza uma base de dados padronizada para a avaliação ambiental de ingredientes utilizados em AC. Esta base de dados permite aos fabricantes desenvolverem alimentos com menor pegada de carbono, considerando os critérios de custos e nutrição (Kellon, 2021). A Tabela 20 ilustra como se pode utilizar o GFLI, com vista à utilização de ingredientes com menor impacte ambiental. Contudo, a adoção destas metodologias exige recursos humanos especializados e investimento na recolha de dados, o que representa um desafio adicional para este setor.

Tabela 20 - Utilização de ingredientes para rações com baixo impacte nas alterações climáticas. Adaptado de The European Feed Manufacturers' Federation [FEFAC] (2023)

Desafios	Alterações climáticas (desflorestação, emissões de GEE); gestão de recursos (eficiência na utilização de recursos, redução do défice proteico)
Ação	Utilização de ingredientes para rações com baixa pegada de carbono
Técnica	Utilização da Base de Dados do GFLI para formular dietas com baixa pegada
Modo de implementação	Os fabricantes de AC podem utilizar a Base de Dados GFLI para formular rações com base nas menores emissões de carbono, além das formulações habituais baseadas na otimização nutricional e no menor custo
Requisitos/limitações	Os fabricantes de AC que adotam a quantificação da pegada de carbono geralmente necessitam de contratar pessoal com conhecimentos e competências em sustentabilidade. Além disso, os cálculos da pegada de carbono, incluindo as emissões de GEE associadas ao próprio fabrico do AC, exigem investimento em procedimentos internos para recolha de dados

6. Caso de Estudo

O presente estudo recorreu sobretudo a dados secundários para a realização da ACV das 2 fórmulas de AC, que se apresentam a seguir. Os dados secundários, relativos à produção agrícola, transporte e processos industriais utilizados como base para a ACV das fórmulas, foram recolhidos da base de dados *Ecoinvent*, através do software *SimaPro*.

Os dados referentes ao sistema de produção e desempenho das aves foram recolhidos no ano de 2024, através de cálculos e medições, junto de avicultores.

Foram consideradas 56 explorações, 28 para cada fórmula, de pequena a média escala, com bandos que, normalmente, não ultrapassavam as 25000 aves.

Começamos por apresentar a composição das fórmulas que foram sujeitas à ACV (Tabela 21 e Tabela 22), de seguida, indicar-se-á as origens das matérias-primas. Nos Anexos, é possível encontrar as características nutricionais das fórmulas apresentadas (Anexo 3).

Tabela 21 - Composição da Fórmula 1
(F1).

Matérias-primas	Quantidades (%)
Milho	65,2
Bagaço de soja	27,8
Óleo de soja	3
Carbonato de Cálcio	1,15
Fosfato monocalcico	1,05
Premix e Pigmentante	0,54
L-Lisina	0,38
DL-Metionina	0,35
Bicarbonato de sódio	0,2
L-Treonina 98,5%	0,19
Sal refinado	0,15

Tabela 22 - Composição da Fórmula 2
(F2).

Matérias-primas	Quantidades (%)
Milho	58,14
Bagaço de soja	34,82
Óleo de soja	3,39
Carbonato de Cálcio	1,29
Fosfato monocalcico	1,13
Premix, aglutinante e fitase	0,7
Sal	0,27
DL-Metionina	0,14
Bicarbonato de sódio	0,1

De um modo geral, verifica-se que a F1 corresponde a uma formulação comercial típica para acabamento de frangos, possuindo pigmentante, com vista a agradar o consumidor. Além disso, utiliza aminoácidos sintéticos, para maximizar a eficiência proteica. A F2, possui a fitase, que contribui para um menor impacto

da produção animal no ambiente, além de apresentar um bom equilíbrio mineral, proteico e energético.

Para a origem das matérias-primas considerou-se que o bagaço de soja é nacional, sendo o subproduto duma fábrica nacional produtora de óleo de soja. Os aditivos e premixes também são nacionais. As origens que variam são as do milho e do óleo de soja, e iremos referir-nos a elas como F e F'. Na hipótese F, considera-se que o milho é proveniente da Ucrânia, e o óleo de soja da Argentina. Na hipótese F', o milho é produzido nos EUA e o óleo de soja no Brasil. A Figura 9 esquematiza estas hipóteses.

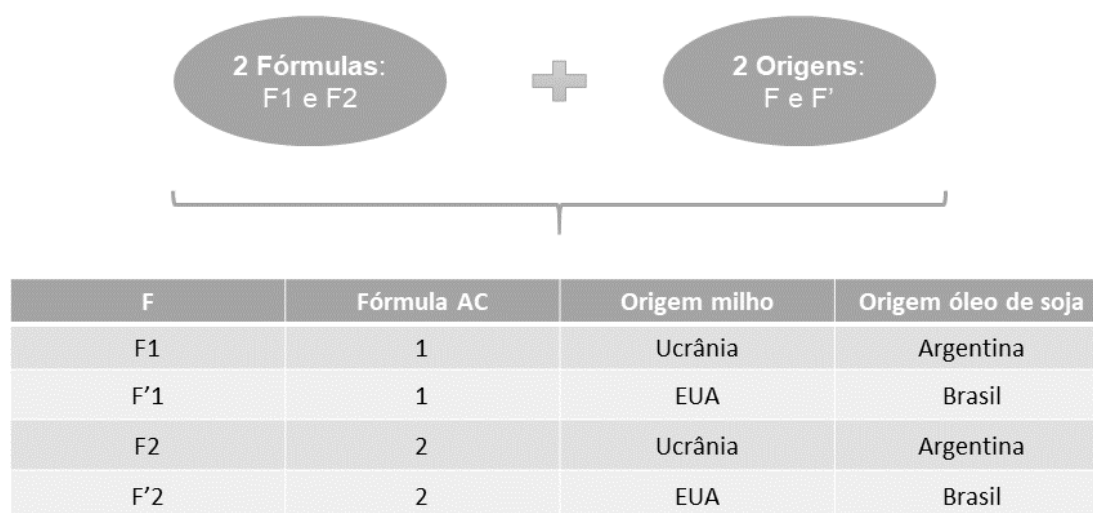


Figura 9 - Esquema das combinações entre as fórmulas e as origens das matérias-primas.

Podemos assumir, desde já, que uma das desvantagens de ambas as fórmulas, é a grande pegada de carbono, derivada da distância que as matérias-primas

percorrem. Por isso mesmo, analisar-se-á o caso hipotético em que as matérias-primas seriam todas nacionais. Essa análise será realizada com a F1, uma vez que corresponde à formulação mais típica comercialmente.

As fórmulas de ração utilizadas foram disponibilizadas por uma empresa de Albergaria-a-Velha, que importa os ingredientes e produz a ração. As aves foram alimentadas em sistemas convencionais de alojamento, e na Tabela 23 encontram-se resumidas as características gerais dos bandos em estudo. As diferenças de desempenho dos frangos, de um modo geral, não foram expressivas, como se pode verificar pelas Tabelas 24 e 25.

Tabela 23 - Características do sistema de produção de frangos considerados neste estudo.

Sistema de Produção	
Número de animais	10000 - 31500
Densidade animal (aves/m²)	20,5
Genética	Ross 308
Temperatura (°C)	25,8
Ventilação	Dinâmica ou estática
Aquecimento	Por caldeira
Peso ao abate (kg)	1,500 - 1,700
Mortalidade (%)	2,35-3,34
Idade ao abate	30-32 dias
Material de cama	Desperdícios de madeira/serrim

Tabela 24 - Consumo de ração (F1 versus F2) por quilograma de frango produzido (índice de conversão).

Consumo de ração por kg de frango (kg)	F1	F2
Média	1,62 ± 0,13	1,62 ± 0,13
Mínimo	1,42 ± 0,13	1,45 ± 0,13
Máximo	1,88 ± 0,13	2,13 ± 0,13

Tabela 25 - Consumo de ração (F1 versus F2) por cada frango produzido.

Consumo de ração por frango (kg)	F1	F2
Média	2,72 ± 0,38	2,74 ± 0,36
Mínimo	1,96 ± 0,38	1,84 ± 0,36
Máximo	3,41 ± 0,38	3,43 ± 0,36

No próximo capítulo os resultados apresentados serão relativamente às 5 categorias mencionadas anteriormente, o US, o AG, o CA, a ERF e a FPF. Nos anexos será possível encontrar os impactos para o total das categorias do método *ReCiPe* (Anexos 4 a 10). Adiante, encontram-se discriminadas as características dos produtos selecionados no software, como as diferenças entre o milho ser da Ucrânia ou dos EUA.

6.1. Comparação do milho dos EUA com o da Ucrânia

Os projetos selecionados no *SimaPro* utilizam a mesma metodologia para contabilizar o impacto ambiental, nas duas origens diferentes. São considerados recursos naturais, como a água e o solo, bem como a utilização de fertilizantes, de fitofármacos, o consumo de energia, entre outros. Desta forma, são contabilizadas as emissões para o ar, a água e o solo, sejam elas decorrentes das alterações do uso do solo, do uso de pesticidas, de metais pesados, etc.

Os fatores que variam consoante a origem, são apresentados na Tabela 26. Os rendimentos das culturas resultam de dados da FAO, considerando uma média de 5 anos, e é com base neles que são apresentadas as quantidades específicas de fertilização. O uso de efluentes animais é com o objetivo de proporcionar a manutenção do solo, nas culturas arvenses. O consumo total de água baseia-se na “blue water footprint”, já a água da chuva baseia-se na “green water footprint”.

Tabela 26 - Diferenças na produção de milho entre os EUA e o Brasil. Adaptado do *SimaPro*

Comparação		EUA	Ucrânia
Fertilizantes sintéticos	N	167,32 kg	79,34 kg
	P (P ₂ O ₅)	60,39 kg	13,32 kg
	K (K ₂ O)	60,88 kg	11,78 kg
Efluentes animais	N	14,47 kg	6,08 kg
	P (P ₂ O ₅)	7,97 kg	3,47 kg
Consumo de água	"blue water footprint"	63,29 m ³ /ton	86,92 m ³ /ton
	"green water footprint"	522,43 m ³ /ton	1060,57 m ³ /ton

Os dados demonstram que a quantidade de fertilizantes sintéticos aplicada nos EUA é mais do dobro da utilizada na Ucrânia, especialmente no que diz respeito ao azoto. Em contrapartida, o consumo hídrico total é superior na Ucrânia, refletindo características climáticas e práticas agronómicas distintas.

O software contabilizou as emissões de metais pesados resultantes da aplicação de fertilizantes, efluentes e calcário através da metodologia de Nemecek e Schnetzer (2011). O consumo energético e o uso total de pesticidas

foram medidos considerando modelos, o “modelo energético para o cultivo de culturas” e o “modelo de pesticidas”, respetivamente.

6.2. Comparação do óleo de soja do Brasil com o da Argentina

O método de avaliação da soja, é idêntico ao do milho, pelo que nesta secção apenas será apresentada a Tabela 27 com as diferenças entre o Brasil e a Argentina, os restantes parâmetros, são medidos pelos mesmos métodos mencionados para o caso do milho.

Tabela 27 - Diferenças na produção de óleo de soja no Brasil e na Argentina.

Adaptado do *SimaPro*

Comparação		Brasil	Argentina
Fertilizantes sintéticos	N	8,23 kg	3,37 kg
	P (P ₂ O ₅)	82,90 kg	10,83 kg
	K (K ₂ O)	81,05 kg	0,30 kg
Efluentes animais	N	11,81 kg	2,93 kg
	P (P ₂ O ₅)	7,08 kg	1,79 kg
Consumo de água	"blue water footprint"	0,83 m ³ /ton	5,31 m ³ /ton
	"green water footprint"	2181,47 m ³ /ton	2093,58 m ³ /ton

Os resultados indicam que no Brasil se recorre muito mais à fertilização, do que na Argentina, já que nesta apenas se aplica 0,30 kg de K_2O , contra os 81,05 kg no Brasil. Relativamente ao consumo de água, o consumo é maior na Argentina.

6.3. Bagaço de soja

Como mencionado anteriormente, a trituração da soja ocorre através de uma série de etapas, incluindo a remoção da casca dos grãos, a trituração mecânica com extração parcial do óleo e, posteriormente, a extração adicional do óleo utilizando hexano. A opção selecionada no *SimaPro* descreve a trituração da soja na UE, tendo como fonte de dados Schneider e Finkbeiner (2013), que possui informações sobre o balanço de massa e energia do processo de trituração da soja.

6.4. Aditivos

6.4.1. Carbonato de Cálcio

O carbonato de cálcio é o principal componente do calcário, sendo necessário proceder à extração do mesmo em pedreiras. O carbonato de cálcio também pode ser produzido industrialmente, passando a designar-se precipitado. O carbonato de cálcio considerado no software foi o precipitado, que possui uma pureza superior ao que é extraído.

6.4.2.Fosfato monocálcico

Nas diversas bibliotecas do *SimaPro*, disponíveis na versão utilizada, não foi possível encontrar um produto que correspondesse ao fosfato monocálcico, por isso, na tentativa de se obter uma aproximação, recorreu-se ao processo da produção de superfosfato triplo, com uma composição de 80% de $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$.

6.4.3.L-Lisina, DL-Metionina e L-Treonina

Todos estes aminoácidos sintéticos correspondem a processos que foram gerados no modelo *Gabi* e convertidos para o *SimaPro*. A L-Lisina, corresponde ao Biolys®, com 54,6% de L-Lisina, a DL-Metionina corresponde a 99% do MetAMINO®, e a L-Treonina, está presente em 98,5% do ThreAMINO®. Apesar dos diferentes níveis de aminoácidos, todos possuem uma digestibilidade de 100%.

6.4.4.Bicarbonato de sódio

O bicarbonato de sódio, CHNaO_3 , é uma substância inorgânica. Encontra-se no estado sólido, em condições de pressão e temperaturas normais, é branco e solúvel em água, sobretudo água quente. O modelo utilizado considera o transporte até ao consumidor, neste caso, a fábrica.

6.4.5. Sal

O cloreto de sódio, NaCl, conhecido vulgarmente por sal, é uma substância inorgânica. O modelo selecionado considera os materiais e energia necessários, bem como as emissões, para a produção de um quilograma de cloreto de sódio.

6.5. Transporte das matérias-primas

O transporte das matérias-primas faz-se recorrendo a dois tipos de transporte, o fluvial e o rodoviário. Na Tabela 28 encontram-se as distâncias consideradas. O software avalia as distâncias em tonelada-quilómetro (tkm), ou seja, considerando a carga x distância. Por exemplo, um camião que percorra 10 km, com 20 toneladas, percorre 200 tkm.

Tabela 28 - Distâncias percorridas pelas matérias-primas das diferentes origens até à fábrica.

Distância percorrida Navio	Km	Distância percorrida Camião	Km
Milho EUA	7000	Porto de Aveiro - Fábrica	30
Óleo de soja Brasil	8500	Bagaço de soja	235
Milho Ucrânia	7000	Aditivos e premixes	252
Óleo de soja Argentina	11800		

O transporte fluvial é feito por navios a granel, com uma capacidade de carga de 12 000 toneladas. A viagem realiza-se com a carga máxima, mas não temos informações acerca da viagem de regresso, pelo que recorremos ao “*default*” do

software, que considera que parte do percurso até ao próximo ponto de carga está associado à viagem anterior.

O transporte rodoviário faz-se com camiões médios, que, em média, transportam 20 toneladas, de classificação EURO5. Este tipo de classificação europeia, estabelece limites para as emissões de óxidos de azoto, monóxido de carbono e partículas, de acordo com as características dos veículos. Em termos da distância percorrida, o modelo selecionado no software considera:

- 17,5% em áreas urbanas;
- 22,1% em estradas secundárias;
- 60,4% em autoestradas.

A viagem é feita com o camião cheio, e para a viagem de regresso contabiliza-se o “*default*”, que funciona do mesmo modo que no navio, e a unidade de medida também é tkm.

7. ACV de cada uma das fórmulas e comparação de resultados

Nesta secção apresentam-se os resultados da ACV realizada para as fórmulas F1 e F2, considerando as duas origens possíveis para as matérias-primas (F e F'). Começamos por recapitular os dados recolhidos até ao momento, através da Tabela 29.

Tabela 29 - Quadro-resumo para a realização da ACV.

Metodologia	ACV segundo as ISO 14040 e 14044, com recurso ao software <i>SimaPro</i> v.9.5.0.0.
Método de avaliação do impacto	<i>ReCiPe Midpoint 2016</i> - Perspetiva Hierarquista (H)
Objetivo do estudo	Avaliar o impacto ambiental de fórmulas de AC para acabamento de frangos, alterando a formulação e origem das matérias-primas
Âmbito da ACV	Da origem ao portão - desde a produção das matérias-primas até à saída do AC da fábrica
Fórmulas avaliadas	F1 e F2
Origem das matérias-primas	F: Ucrânia e Argentina F': EUA e Brasil
Categorias de impacto analisadas	US, AG, CA, ERF e FPF

7.1. Resultados individuais das fórmulas

A análise individual de cada fórmula revelou que os ingredientes mais impactantes são o milho e o óleo de soja, tanto pelo seu transporte fluvial, como pelas práticas culturais. Como se estabeleceu os consumos de energia e gás natural, através de bibliografia, o impacto deste consumo é igual em todas as formulações. Além disso, os aditivos utilizados nos ACs, têm a mesma proveniência.

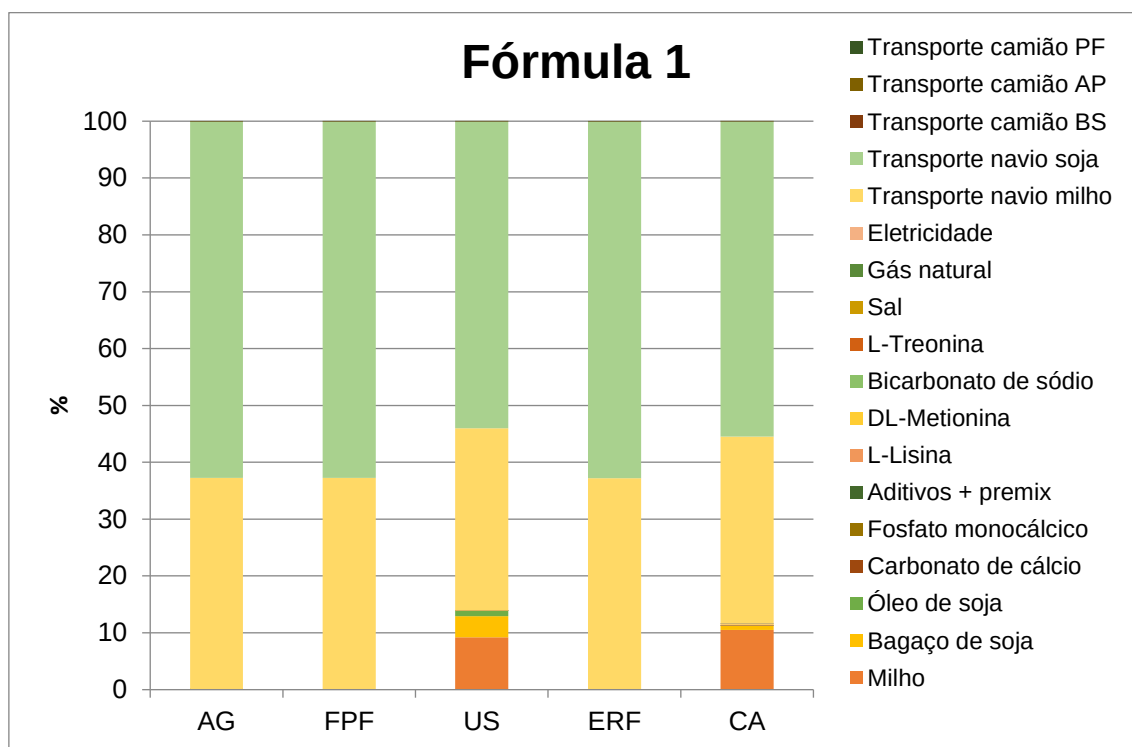


Figura 10 - ACV da Fórmula 1. Adaptado de *SimaPro*

Os resultados mostraram que, na F1 (Figura 10), o transporte do óleo de soja representa mais de 53% do impacto em todas as categorias avaliadas, enquanto o transporte do milho ultrapassa os 32%. Nos indicadores relacionados com os sistemas agrícolas, a cultura do milho destaca-se, com um impacto superior a 10% no CA, e cerca de 9% no US, contra os 5% da soja.

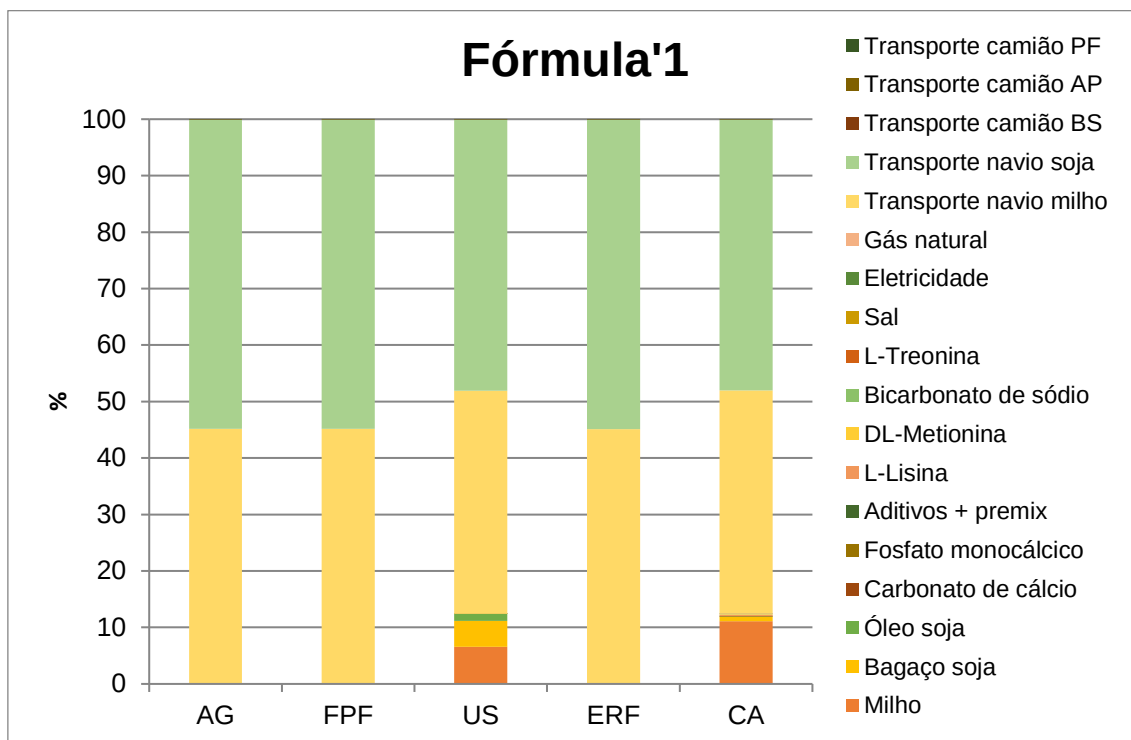


Figura 11 - ACV da Fórmula'1. Adaptado de *SimaPro*

Alterando a origem das matérias-primas (F' – Figura 11), observou-se uma ligeira redução do impacto associado ao transporte do óleo de soja, pelo menos 47%, resultante da menor distância percorrida. Contudo, o transporte do milho tem um valor mais significativo, maior ou igual a 39%. No CA, o milho é responsável por mais de 11% do impacto, enquanto no US é de 6% contra os 5% causados pela soja.

Apesar de não serem muito evidentes, existem diferenças nos impactos gerados pela Fórmula 2 (Figura 12), que serão mais perceptíveis adiante. O transporte fluvial da soja é responsável por mais de 53% do impacto nas 5 categorias, enquanto o transporte do milho impacta 31%. No solo, o efeito da soja é de mais de 5%, contra os cerca de 8% do milho, que ainda é responsável por mais de 9% do consumo de água.

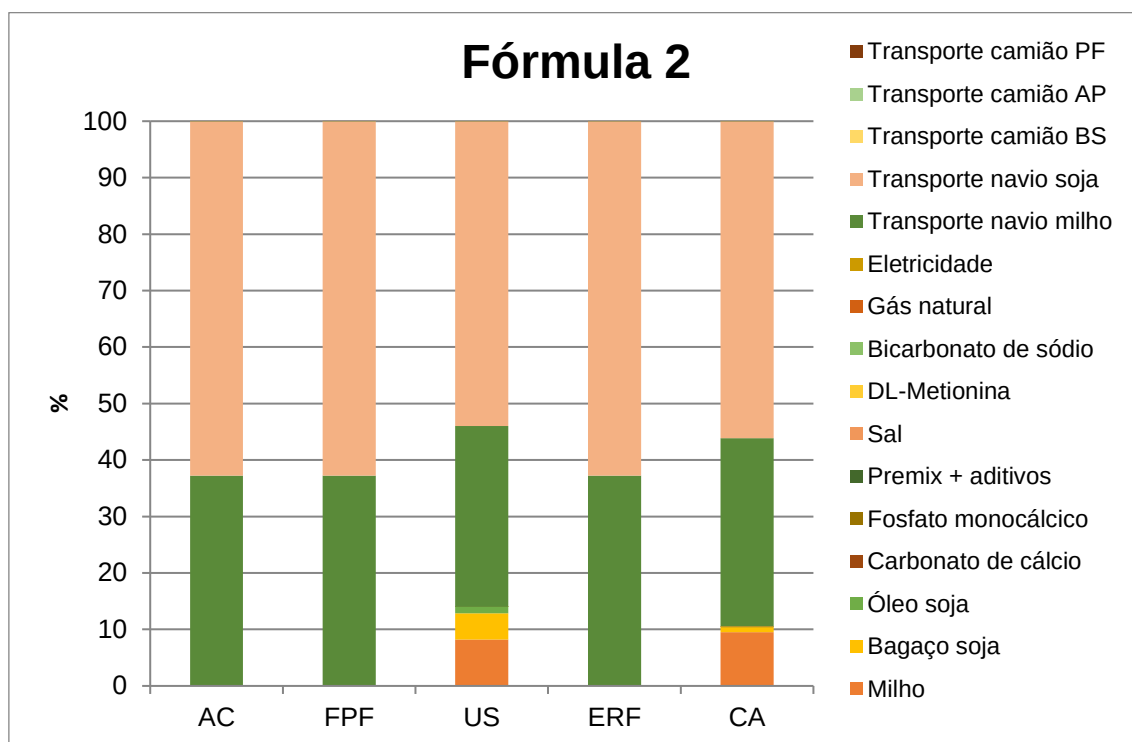


Figura 12 - ACV da Fórmula 2. Adaptado de *SimaPro*

Passando para o caso em que as origens das matérias-primas são mais próximas, o transporte marítimo da soja tem consequências superiores a 47%, nas mais variadas categorias, e o milho impacta em mais de 39% (semelhante a F'1). A soja tem um efeito superior a 6% no US, contra os 5% do milho, que é responsável por mais de 10% do consumo de água (Figura 13).

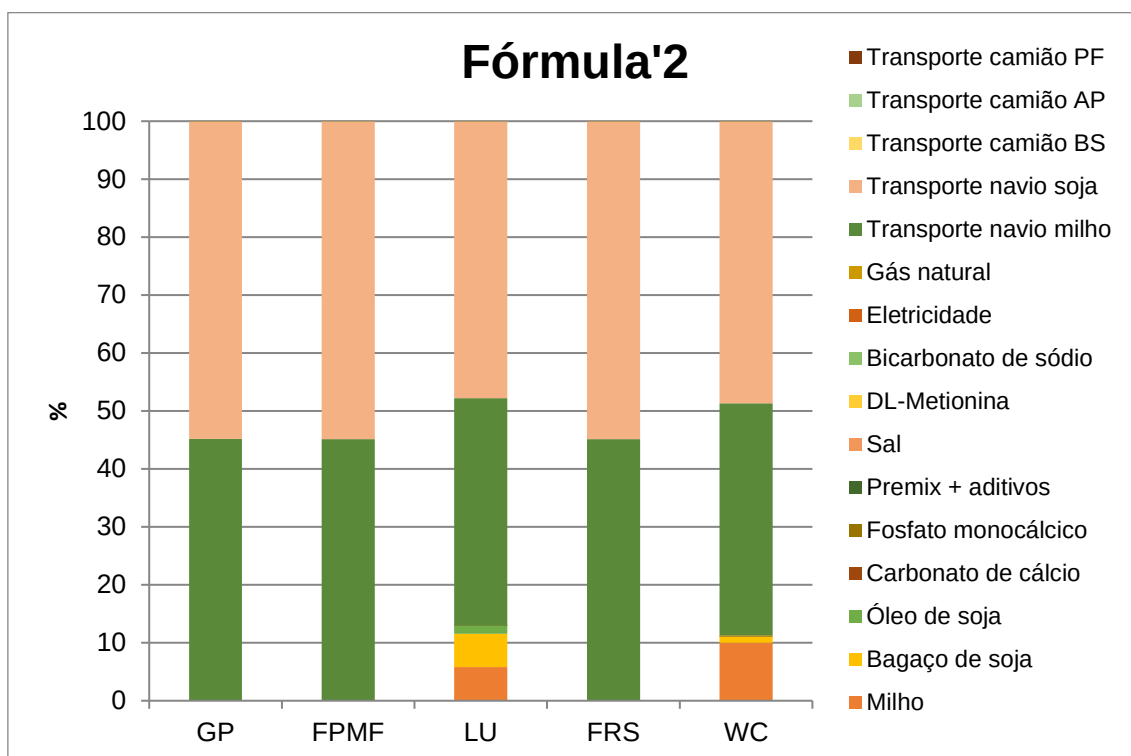


Figura 13 - ACV da Fórmula' 2. Adaptado de *SimaPro*

7.2. Combinações entre fórmulas e origens das matérias-primas

De seguida, serão realizadas combinações entre as fórmulas e origens, para tentar retirar conclusões mais precisas acerca da alteração da formulação e do transporte das matérias-primas. Além das fórmulas apresentadas anteriormente, vamos fazer uma análise diferente, supondo que as matérias-primas teriam todas, origem nacional, para avaliar a diferença que teria no impacto ambiental. Para tal, selecionamos a F1, que é a fórmula mais tipicamente comercial, e para o caso em que as matérias-primas são todas nacionais, passamos a referir-nos a ela como N1.

Como sabemos que a opção anterior é um cenário hipotético, já que Portugal não tem capacidade para produzir soja que origine óleo de soja suficiente para ser utilizado pela indústria dos ACs, vamos optar por um cenário mais realista em que o óleo de soja seria proveniente do Brasil. A escolha pelo Brasil deve-se ao facto de se encontrar mais próximo do que a Argentina, permitindo seleccionar a opção com menor impacte associado ao transporte. Assim sendo, esta opção será mencionada por N2. A Tabela 30 esquematiza as combinações de fórmulas que vão ser elaboradas, e o que as relaciona.

Tabela 30 - Combinações das fórmulas em estudo.

Combinação	Objetivo
F1 vs. F'1	Manter a formulação, variar a origem das matérias-primas
F2 vs. F'2	
F1 vs. F2	Para a mesma origem de matérias-primas, alterar a formulação
F'1 vs. F'2	
N1 vs. F1	Ingredientes todos nacionais
N2 vs. F1	Ingredientes nacionais, com exceção para o óleo de soja - Brasil
N1 vs. N2	Alteração apenas da origem do óleo de soja (Brasil)

7.2.1. Comparação entre origens, mantendo a formulação

Começamos por verificar os casos em que fórmula é a mesma, mas a origem das matérias-primas varia.

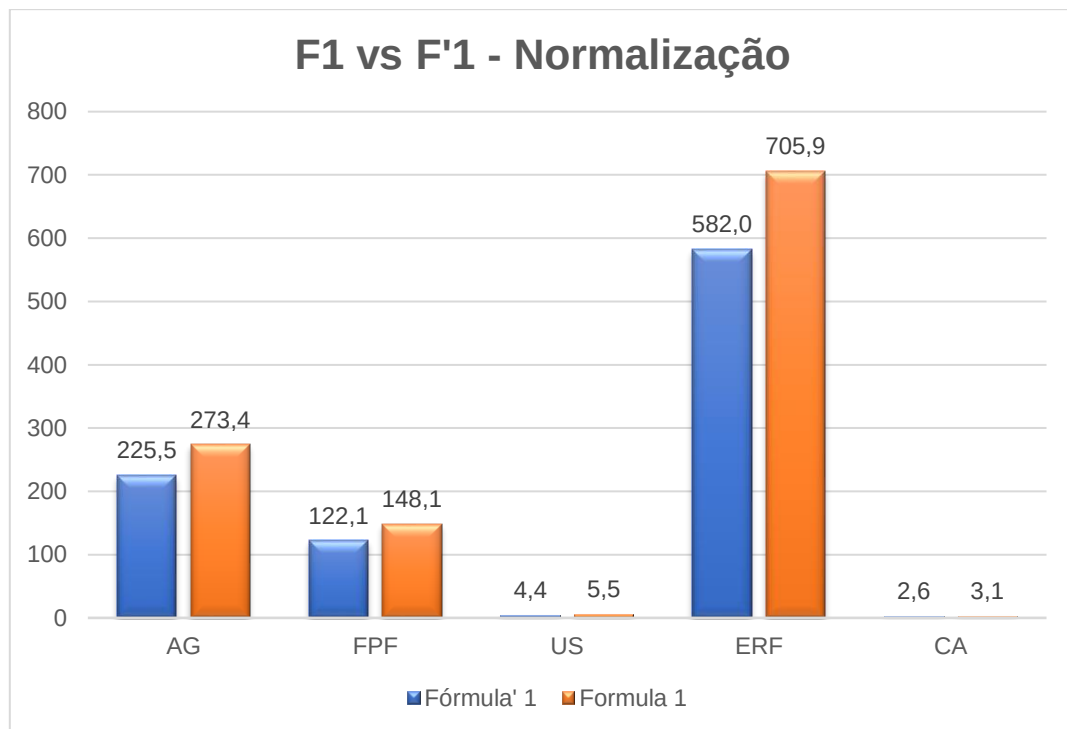


Figura 14 - ACV da F1 vs. ACV da F'1. Adaptado de *SimaPro*

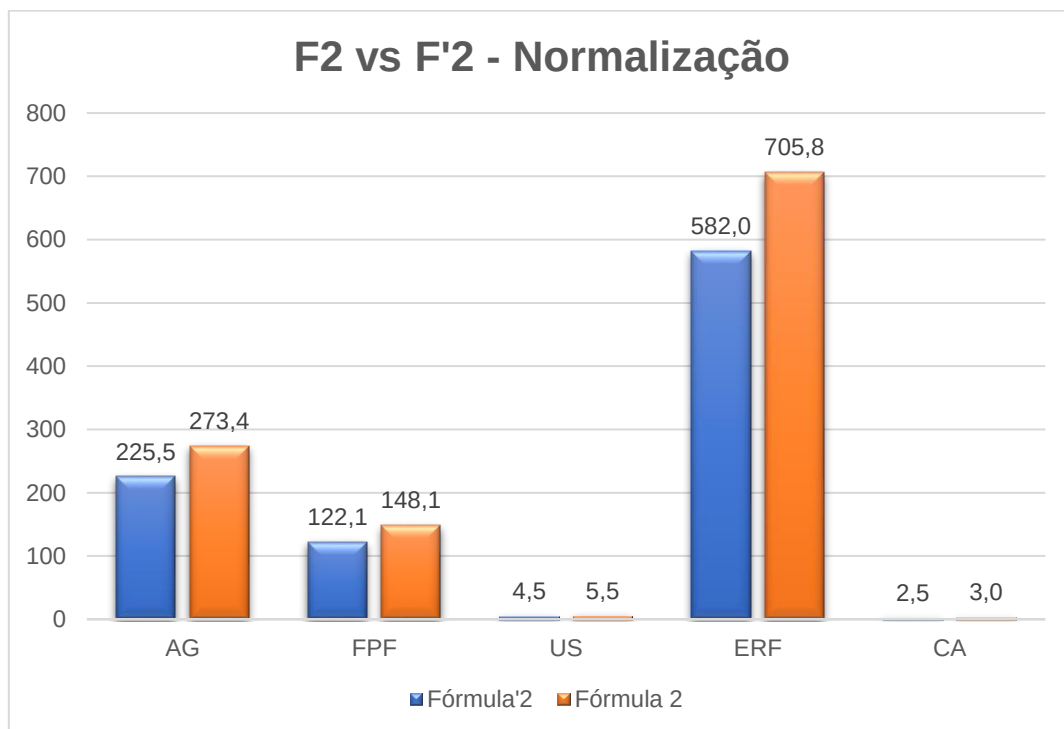


Figura 15 - ACV da F2 vs. ACV da F'2. Adaptado de *SimaPro*

Em ambas as situações, se verifica que a fórmula F' detém menor impacto que a fórmula F. Sendo a F' correspondente ao caso em que o milho é proveniente dos EUA e a soja do Brasil, diz respeito à menor distância percorrida de navio pelos ingredientes (15500 km contra os 18800 km da F). Percorrer uma menor distância, significa um menor consumo de combustível e menores emissões de GEE. De lembrar que os combustíveis fósseis são recursos finitos, e o seu consumo compromete as gerações seguintes.

Além disso, tal como mencionado na secção anterior, os EUA e o Brasil são os países que mais investem na fertilização das culturas. A utilização de fertilizantes tem impacto devido ao consumo de recursos fósseis, além da libertação de GEE durante o seu fabrico e aplicação.

No que toca ao impacto causado pelo consumo de água e uso do solo verifica-se que as diferenças são mínimas, nos dois cenários, o que revela que apesar das origens variarem, as práticas culturais não são muito diferentes entre si. Portanto, podemos concluir que o menor impacto associado ao transporte, compensa o maior impacto gerado pela utilização de fertilizantes.

7.2.2. Comparação entre fórmulas, com a mesma origem de matérias-primas

Analisemos agora os casos em que a origem das matérias-primas se mantém, e as fórmulas são diferentes.

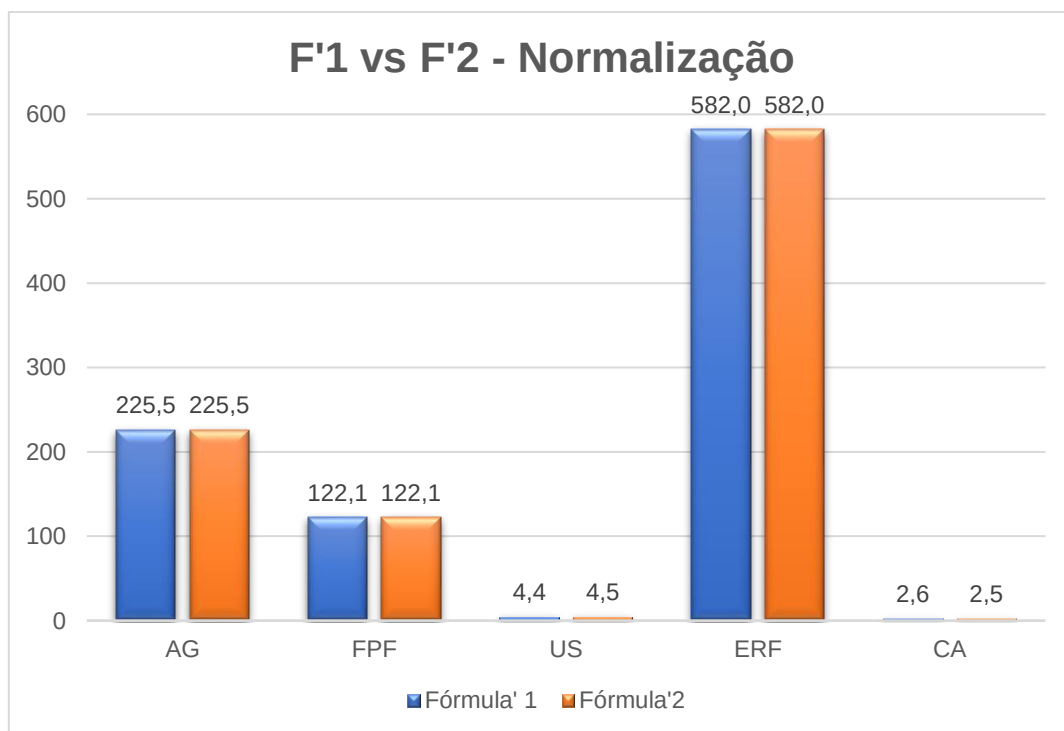


Figura 16 - ACV de F'1 vs. ACV de F'2. Adaptado de *SimaPro*

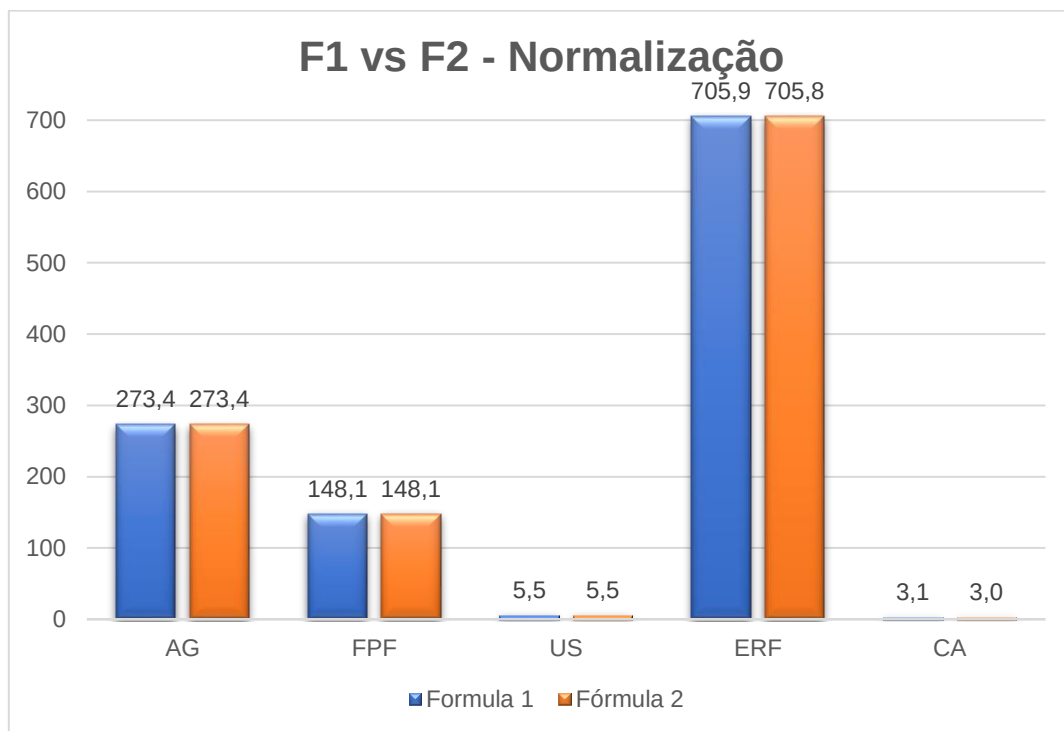


Figura 17 - ACV de F1 vs. ACV de F2. Adaptado de *SimaPro*

Apesar das diferenças na formulação, diferentes teores de milho, óleo de soja e aditivos, por exemplo, os impactos são extremamente idênticos, o que é revelador de que o transporte tem um impacto muito maior que a formulação em si. Portanto, a substituição de pequenas percentagens de ingredientes tem um efeito insignificante no impacto global.

7.2.3. Cenários nacionais N1 e N2

Analisemos agora, o caso em que as matérias-primas seriam todas nacionais.

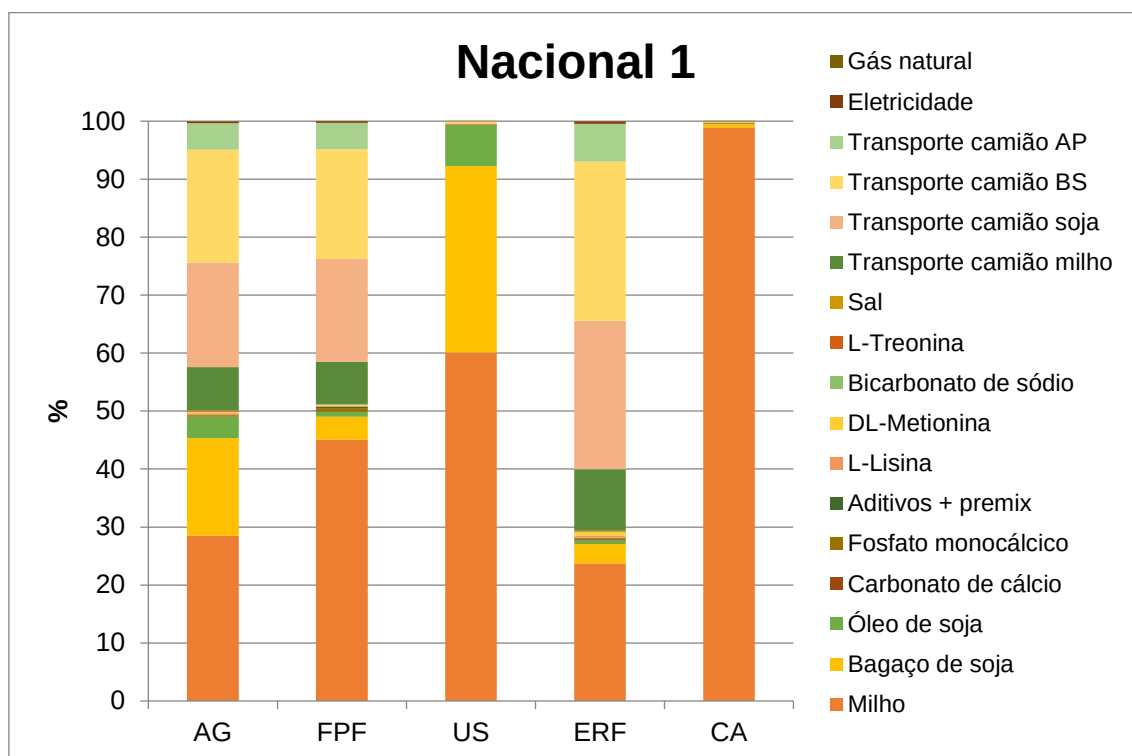


Figura 18 - ACV da N1. Adaptado de *SimaPro*

A produção do milho é a componente com maior impacto ambiental em todas as categorias analisadas, sendo responsável por mais de 98% do impacto no CA. Segue-se pela produção da soja, que é responsável por cerca de 39% do impacto no US, contra 60% do milho. Paralelamente, os transportes de camião são responsáveis pelos maiores impactos no AG, na FPF e na ERF. De seguida, comparamos N1 com F1, para verificar as diferenças no impacto com a aquisição das matérias-primas todas em Portugal.

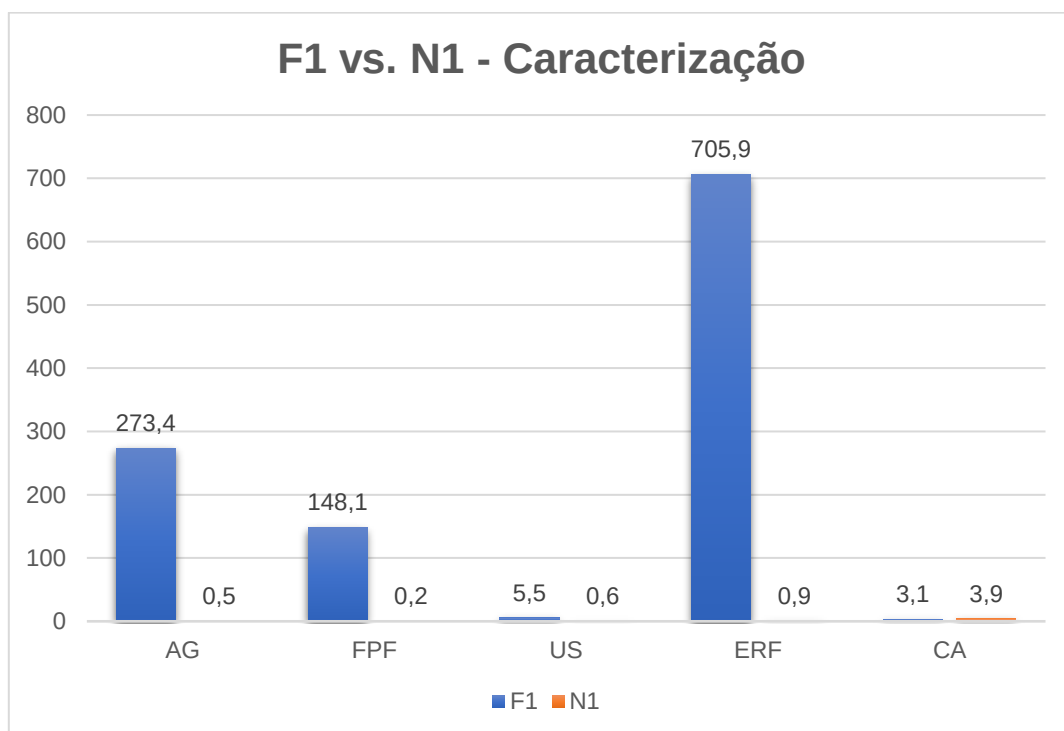


Figura 19 - ACV de F1 vs. ACV de N1. Adaptado de *SimaPro*

Tal como seria expectável, a diferença de impacte é muito significativa, com F1 a deter o maior impacte ambiental. A única categoria em que é notório no gráfico o impacte de N1, é no CA, com cerca de 4%, e sabemos pela Figura 18, que se deve ao milho, que é uma cultura exigente em água.

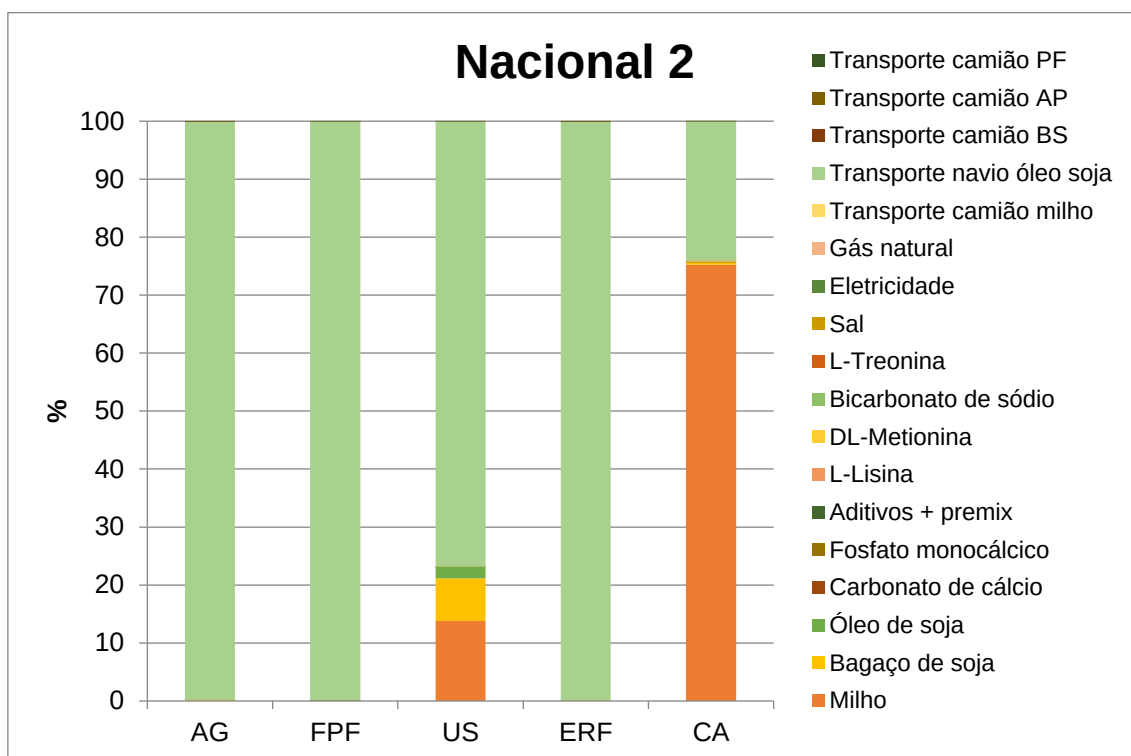


Figura 20 - ACV da N2. Adaptado de *SimaPro*

Tal como se previa, o óleo de soja é o produto com mais impacte, devido ao seu transporte. Em categorias como o AG, a FPF e a ERF, o seu impacte é de mais de 99% (99,59%, 99,73% e 99,71%, respetivamente). No US o seu impacte é de mais de 76%, e no CA é de apenas 24%.

No US os outros elementos a gerar impacte significativo foram o milho com mais de 13%, e os produtos de soja em mais de 9%. No CA o milho é o responsável pela maior fração de impacte, cerca de 75%.

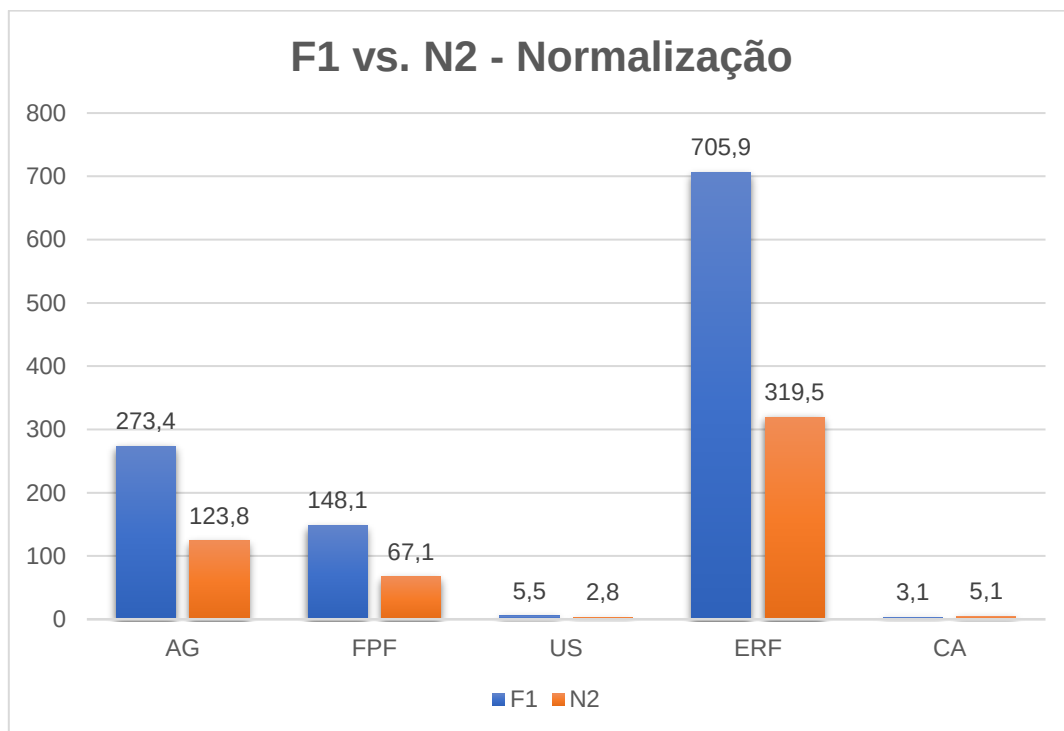


Figura 21 - ACV de F1 vs. ACV de N2. Adaptado de *SimaPro*

Como seria de prever, a F1 apresenta maior impacte ambiental, mas com a aquisição do óleo de soja no Brasil e as restantes matérias-primas em Portugal, é possível reduzir o impacte ambiental para metade, na maior parte das categorias, como demonstra a Figura 21.

A única categoria em que N2 tem um impacte maior, embora essa diferença seja pequena, é no CA, porque o milho nacional é uma cultura associada a grandes consumos de água.

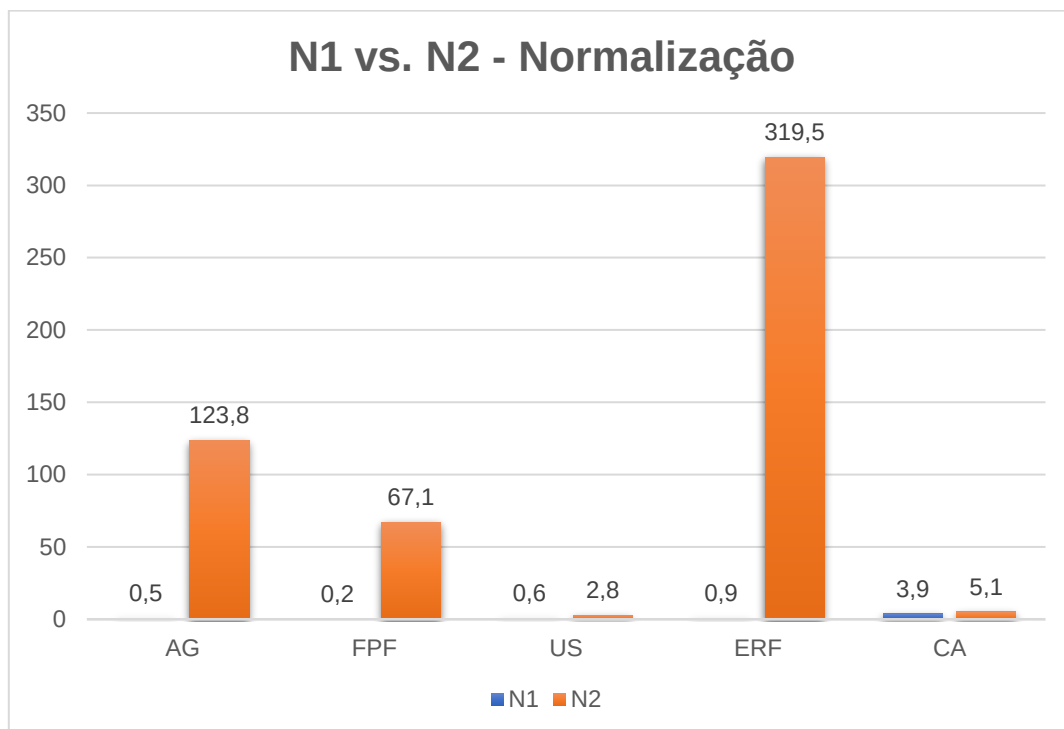


Figura 22 - ACV de N1 vs. ACV de N2. Adaptado de *SimaPro*

Sem grandes surpresas, a categoria em que o impacte ambiental é maior para N2, é na ERF, devido ao transporte da soja. As diferenças de valor entre as categorias devem-se à soja, seja pelo transporte, seja pela sua produção, o que faz com que a Figura 20, revogue as conclusões anteriores.

8. Discussão

Os resultados obtidos neste estudo permitem identificar padrões claros relativamente ao contributo ambiental das diferentes matérias-primas, bem como das suas diferentes origens, o efeito da formulação, o impacte do transporte e o contributo das práticas agrícolas. De forma consistente, verificou-se que a

distância percorrida pelas matérias-primas tem um peso determinante no impacto ambiental global, sobretudo se esse transporte for realizado por meios marítimos. Esta é uma tendência documentada na literatura, já que vários autores destacam que, nos sistemas dependentes das importações de milho e soja, o transporte entre continentes representa uma grande fatia do impacto ambiental dos ACs (González-García et al., 2014; Guðjónsdóttir et al., 2025; Moungsree et al., 2024).

A comparação entre as combinações F e F', para ambas as fórmulas, confirmou esta tendência, já que mostrou que a redução da distância percorrida pelo transporte fluvial tem um efeito mais significativo na diminuição do impacto ambiental do que as diferenças nas práticas culturais entre países. Estudos recentes sobre a produção de milho, por exemplo, demonstraram que o seu impacto ambiental varia, sobretudo, com o transporte e o uso de fertilizantes, do que com as emissões diretas do cultivo (Moungsree et al., 2024). Estes resultados são ainda consistentes com análises de longo prazo que mostram que a intensificação agrícola aumentou o rendimento das culturas, à custa da dependência de fertilizantes e combustíveis fósseis, que têm um impacto significativo na pegada de carbono (Li et al., 2025).

Tongpool et al., (2012) também já tinham demonstrado que a substituição parcial de matérias-primas importadas por ingredientes locais reduz substancialmente o impacto associado ao transporte, reforçando a importância da adoção de ingredientes de proximidade.

O transporte fluvial foi consistentemente identificado como a etapa mais impactante em todas as combinações que dependem deste transporte, visível em categorias como o AG, a ERF e a FPF. Este resultado reforça as conclusões de outros estudos, que indicam que este transporte é responsável por 70% do impacto da produção dos ACs (Youssef, 2025). A dependência de Portugal no óleo de soja externo reforça a relevância deste resultado (U. S. Soybean export council [USSEC], 2024).

As diferenças de formulação entre F1 e F2, mantendo as origens, revelaram-se pouco expressivas. Méda et al., (2021) já tinham demonstrado que, em formulações baseadas em milho e soja, pequenas variações nas proporções dos ingredientes têm um impacto discreto, porque o maior impacto advém das principais matérias-primas. Heidari et al., (2021) reforçaram esta ideia porque formulações com a mesma base energética e proteica revelaram impactos semelhantes, sendo a origem dos ingredientes o principal fator diferenciador.

A produção do milho revela-se um contributo relevante para o US e para o CA. Moungsree et al., (2024) verificou que, na Tailândia, a utilização do milho e do bagaço de soja foram responsáveis pela maior parte das emissões de GEE durante o fabrico do AC. Já Alkhtib et al., (2023) e Méda et al., (2021), enquanto estudos baseados em dados do Ecoinvent, reforçam que o milho é uma cultura com elevada necessidade hídrica e dependência de fertilização azotada.

O cenário totalmente nacional, N1, apresenta um impacto ambiental substancialmente inferior ao de F1, especialmente nas categorias AG, ERF e FPF, devido à não utilização de transporte marítimo. Contudo, as categorias US e CA permanecem elevadas, em particular, devido ao milho. González-García et al., (2014) já tinham demonstrado que, em Portugal, a pegada de carbono associada à produção da carne de frango depende bastante da origem dos ingredientes utilizados no AC.

Em N2, a introdução do óleo de soja brasileiro, revelou que mesmo quando a maioria das matérias-primas é nacional, a introdução de um ingrediente importado, com elevada pegada, aumenta substancialmente o impacto global. Este resultado é revelador do grande impacto dos óleos vegetais, especialmente se estiverem associados a longas distâncias e práticas agrícolas intensivas (Duda et al., 2025).

No seu todo, os resultados demonstraram que a estratégia mais eficaz para a redução da pegada de carbono dos ACs não passa por alterar e/ou ajustar a formulação, mas sim pela redução da dependência de matérias-primas distantes, optando pelas de proximidade, e consequentemente, pelas que se

encontrarem disponíveis (sazonalidade) e, pela adoção de aditivos como os aminoácidos sintéticos (FAO, 2020).

Este estudo apresenta algumas limitações que podem influenciar a interpretação dos resultados. Uma das limitações foi a utilização de dados secundários provenientes do Ecoinvent, que embora seja comum em estudos de ACV, pode introduzir incertezas associadas à representatividade geográfica e temporal dos processos selecionados (Alkhtib et al., 2023; Méda et al., 2021; Pelaracci et al., 2024).

A ausência de dados específicos para determinados ingredientes, como foi o caso do fosfato monocálcico, obrigou à utilização de processos aproximados, o que pode influenciar algumas das categorias de impacto. Além disso, não se contabilizou o impacto associado ao embalamento, já que se optou pela entrega ao avicultor a granel.

AACV, por definição, é um modelo simplificado da realidade e envolve escolhas metodológicas que podem afetar os resultados, especialmente em sistemas complexos, como a produção de ACs (Curran, 2015; European Commission et al., 2010). A análise de cenários nacionais, embora seja útil, representa cenários hipotéticos uma vez que não reflete a disponibilidade agrícola atual.

9. Conclusões

Com o objetivo de avaliar o impacto ambiental associado a duas fórmulas de AC para o acabamento de frangos, recorreu-se ao *SimaPro* para realizar a ACV dos mesmos. Os resultados demonstraram que o transporte fluvial, ou seja, de longa distância, das matérias-primas tem mais impacto que as diferenças percentuais dos ingredientes para a formulação, sendo essa a principal conclusão deste trabalho. As categorias de impacto que mais evidenciaram esta conclusão foram o AG, a ERF e a FPF.

A produção do milho e da soja também contribuíram acentuadamente para o impacto ambiental devido aos seus modos e áreas de produção, já que são produzidos intensivamente, muitas vezes, à custa de desflorestação, um elevado consumo de água e produtos químicos. As categorias de impacto onde é mais notório este impacto é no US e no CA.

A comparação entre as origens das diferentes matérias-primas demonstrou que, embora existam diferenças, em ambas é impactante a distância percorrida até à fábrica. Desta forma, a elaboração dos cenários alternativos com as matérias-primas, totalmente ou praticamente totalmente nacionais, demonstraram uma redução drástica do impacto ambiental, o que revela a relevância da proximidade geográfica. Contudo, observou-se que enquanto o impacto associado ao transporte diminuiu, o CA é superior devido ao milho nacional. Ou seja, é necessário avaliar as diversas categorias de impacto, porque enquanto o impacto de uma categoria diminui, o de outra pode aumentar.

É importante não esquecer que o estudo possui algumas limitações, que condicionam a interpretação dos resultados. O facto de no software utilizado, não ter sido possível inserir corretamente todos os ingredientes envolvidos nas formulações, recorreu-se a dados secundários e não se contabilizou o impacto do embalamento, o que pode ter consequências no verdadeiro resultado da ACV. Apesar disso, permite ter uma maior proximidade com a realidade, compreendendo os fatores que mais condicionam a sustentabilidade da avicultura em Portugal.

No que diz respeito ao desempenho das aves, as diferenças entre as fórmulas mostraram-se reduzidas, refletindo que, na prática industrial atual, a distinção entre formulações de acabamento é cada vez mais determinada pela eficiência económica e pela disponibilidade das matérias-primas, do que pelas diferenças significativas no crescimento das aves.

No futuro, será importante equacionar reduzir a dependência das matérias-primas do exterior, em prol das nacionais e de proximidade, para diminuir o impacto ambiental associado à produção da carne de frango. A escolha de determinados aditivos poderá contribuir igualmente para uma maior eficiência energética e a redução das emissões.

Referências Bibliográficas

- Agrogarante. (2023). *Análise Setorial Avicultura - 2023*.
- Alkhtib, A., Wilson, P., Bedford, M. R., O'Neill, H. 'Nell' M., e Burton, E. (2023). Can the broiler industry rely on results of existing life cycle assessment and environmental assessments studies to inform broilers' nutritional strategies? *Poultry Science*, 102(6), 102667. <https://doi.org/10.1016/J.PSJ.2023.102667>
- Amin, S. A. S., e Sobhi, N. (2023). Process optimization in poultry feed mill. *Scientific reports*, 13(1). <https://doi.org/10.1038/S41598-023-36072-W>
- AVEC. (2022). *SUSTAINABILITY CHARTER, OUR ROADMAP TO A SUSTAINABLE FUTURE FOR THE EUROPEAN POULTRY MEAT SECTOR*. <https://www.fao.org/gleam/results/en/>
- Curran, M. A. (2015). *Life Cycle Assessment Student Handbook*.
- Delgado, A. M. (2021). *Sustentabilidade da Avicultura*. <https://www.anapo.pt/media-room/a-sustentabilidade-da-avicultura>
- Dooren, C. van. (2018). A Review of the Use of Linear Programming to Optimize Diets, Nutritiously, Economically and Environmentally. *Frontiers in Nutrition*, 5, 352128. <https://doi.org/10.3389/FNUT.2018.00048/BIBTEX>
- Duda, P., Łach, M., Mariusz Majka, T., Zdeb, T., De Feo, G., Zhao, S., Yang, S., Huang, Q., Zhu, H., Xu, J., Fu, D., e Li, G. (2025). Comprehensive Review of Life Cycle Carbon Footprint in Edible Vegetable Oils: Current Status, Impact Factors, and Mitigation Strategies. *Waste* 2025, Vol. 3, Page 26, 3(3), 26. <https://doi.org/10.3390/WASTE3030026>
- European Commission. (2024). *Life Cycle Assessment e the EF methods*. https://green-business.ec.europa.eu/environmental-footprint-methods/life-cycle-assessment-ef-methods_en?prefLang=pt

- European Commission, Joint Research Centre, e Institute for Environment and Sustainability. (2010). International Reference Life Cycle Assessment (ILCD) handbook: General guide for life cycle assessment - Detailed guidance (1st ed.). *Publications Office of the European Union*. <https://doi.org/10.2788/38479>
- Evonik. (2024). *Amino Acids in Animal Nutrition: Technical Datasheets*. Evonik Operations GmbH.
- FAO. (2004). *PROTEIN SOURCES FOR THE ANIMAL FEED INDUSTRY*. <https://www.fao.org/4/y5019e/y5019e03.htm>
- FAO. (2020). Environmental performance of feed additives in livestock supply chains - Guidelines for assessment - Version 1. Livestock Environmental Assessment and Performance Partnership (FAO LEAP). Rome. *Environmental performance of feed additives in livestock supply chains. Guidelines for assessment*. <https://doi.org/10.4060/CA9744EN>
- FAO. (2025). The role of livestock in circular bioeconomy systems. Rome. *The role of livestock in circular bioeconomy systems*. <https://doi.org/10.4060/CD6765EN>
- FAO, e IFIF. (2010). *Good practices for the feed industry – Implementing the Codex Alimentarius Code of Practice on Good Animal Feeding*. 9.
- Fatima, A., Singh, P., Pandey, V. K., Singh, R., e Rustagi, S. (2024). Exploring the significance of protein concentrate: A review on sources, extraction methods, and applications. Em *Food Chemistry Advances* (Vol. 5). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.focha.2024.100771>
- Feedtables. (2025). *Parâmetros das tabelas de composição e valores nutricionais de matérias-primas para ração pelo INRAE, CIRAD e AFZ*. <https://www.feedtables.com/content/parameters>
- FEFAC. (2023). *Use of feed ingredients with low climate change impact*.

FEPASA. (2023). «*Revista Aves e Ovos*» nº277.

Fradinho, M. J. (2023). *Estratégias de manejo alimentar*.

Goldáraz-Salamero, N., Blanc, S., Sierra-Perez, J., e Brun, F. (2025). From food loss and waste to feed: a systematic review of life cycle perspectives in livestock systems. *The International Journal of Life Cycle Assessment* 2025 30:7, 30(7), 1586–1606. <https://doi.org/10.1007/S11367-025-02464-5>

Golsteijn, L. (2022, Julho). *Life Cycle Assessment (LCA) explained* . https://pre-sustainability.com/articles/life-cycle-assessment-lca-basics/?__hstc=192357493.5e1ccc22b1337226d3b2158f09633f78.1737917734454.1737917734454.1737917734454.1e__hssc=192357493.8.1737917734454e__hsfp=3741728765

González-García, S., Gomez-Fernández, Z., Dias, A. C., Feijoo, G., Moreira, M. T., e Arroja, L. (2014). Life Cycle Assessment of broiler chicken production: a Portuguese case study. *Journal of Cleaner Production*, 74, 125–134. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2014.03.067>

Guðjónsdóttir, S. B., Vásquez-Mejía, C. M., Shrivastava, S., e Ögmundarson, Ó. (2025). A life cycle assessment of broiler chicken meat and egg production in Iceland. *Poultry Science*, 104(6), 105072. <https://doi.org/10.1016/J.PSJ.2025.105072>

Hagenaars, M. (2022). *O papel da avaliação do ciclo de vida (life cycle assessment) no apoio à transformação da sustentabilidade na indústria de alimentos compostos para animais*.

Hauschild, M. Z., Rosenbaum, R. K., e Olsen, S. I. (2017). Life Cycle Assessment: Theory and Practice. *Life Cycle Assessment: Theory and Practice*, 1–1216. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-56475-3/COVER>

- Heidari, M. D., Gandasasmita, S., Li, E., e Pelletier, N. (2021). Proposing a framework for sustainable feed formulation for laying hens: A systematic review of recent developments and future directions. *Journal of Cleaner Production*, 288, 125585. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2020.125585>
- Heuzé, V., Kaushik, S., e Tran, G. (2020). *Soybean meal. Feedipedia, a programme by INRAE, CIRAD, AFZ and FAO*. <https://www.feedipedia.org/node/674>
- Heuzé, V., e Tran, G. (2015). *Wheat (general). Feedipedia, a programme by INRAE, CIRAD, AFZ and FAO*. <https://www.feedipedia.org/node/6435>
- Heuzé, V., e Tran, G. (2016). *Soybean (general). Feedipedia, a programme by INRAE, CIRAD, AFZ and FAO*. <https://www.feedipedia.org/node/753>
- Heuzé V., Tran G., Hassoun P., Bastianelli D., e Lebas F. (2019). *Cottonseed meal. Feedipedia, a programme by INRAE, CIRAD, AFZ and FAO*. <https://www.feedipedia.org/node/550>.
- Heuzé V., Tran G., Hassoun P., Lessire M., e Lebas F. (2019). *Sunflower meal. Feedipedia, a programme by INRAE, CIRAD, AFZ and FAO*. <https://www.feedipedia.org/node/732>.
- Heuzé, V., Tran, G., e Lebas, F. (2017). *Maize grain. Feedipedia, a programme by INRAE, CIRAD, AFZ and FAO*. <https://www.feedipedia.org/node/556>
- Heuzé, V., Tran, G., Lebas, F., Renaudeau, D., e Lessire, M. (2015). *Wheat grain. Feedipedia, a programme by INRAE, CIRAD, AFZ and FAO*. <https://www.feedipedia.org/node/223>
- Heuzé V., Tran G., Nozière P., Lessire M., e Lebas F. (2015). *Rye grain and by-products. Feedipedia, a programme by INRAE, CIRAD, AFZ and FAO*. <https://www.feedipedia.org/node/225>

- Heuzé V., Tran G., Nozière P., Noblet J., Renaudeau D., Lessire M., e Lebas F. (2016). *Barley Grain. Feedipedia, a programme by INRAE, CIRAD, AFZ and FAO*. <https://www.feedipedia.org/node/227>.
- Heuzé V., Tran G., Nozière P., Renaudeau D., Lessire M., e Lebas F. (2016). *Oats. Feedipedia, a programme by INRAE, CIRAD, AFZ and FAO*. <https://feedipedia.org/node/231>.
- Heuzé, V., Tran, G., Sauvant, D., Lessire, M., e Lebas, F. (2019). *Rapeseeds. Feedipedia, a programme by INRAE, CIRAD, AFZ and FAO*. <https://www.feedipedia.org/node/15617>
- Huijbregts, M. A. J., Steinmann, Z. J. N., Elshout, P. M. F., Stam, G., Verones, F., Vieira, M., Zijp, M., Hollander, A., e van Zelm, R. (2017). ReCiPe2016: a harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 22(2), 138–147. <https://doi.org/10.1007/S11367-016-1246-Y>
- INE. (2019). *Recenseamento Agrícola 2019*.
- Kellon, D. (2021). *Global Feed LCA Institute (GFLI)*. www.globalfeedlca.org
- Korver, D., e Stewart-Brown, B. (2023). *Nutritional Requirements of Poultry - MSD Manual*. <https://www.msdrvetmanual.com/es/avicultura/nutrici%C3%B3n-y-manejo-aves-de-producci%C3%B3n/necesidades-nutricionales-en-aves-de-producci%C3%B3n>
- Li, L., Awada, T., Shi, Y., Jin, V. L., e Kaiser, M. (2025). Global Greenhouse Gas Emissions From Agriculture: Pathways to Sustainable Reductions. *Global Change Biology*, 31(1). <https://doi.org/10.1111/gcb.70015>
- MAPA. (2023). *Anuario de Estadística 2023*. <https://cpage.mpr.gob.es/>

- McDonald, P., Edwards, R. A., Greenhalgh, J. F. D., Morgan, C. A., Sinclair, L. A., e Wilkinson, R. G. (2011). *Animal nutrition - Seventh Edition*.
www.pearson-books.com
- McNab, J. M., e Boorman, N. K. (2002). *Poultry Feedstuffs: Supply, Composition and Nutritive Value (Poultry Science Symposium Series, Vol. 26.)*.
- Méda, B., Garcia-Launay, F., Dusart, L., Ponchant, P., Espagnol, S., e Wilfart, A. (2021). Reducing environmental impacts of feed using multiobjective formulation: What benefits at the farm gate for pig and broiler production? *Animal*, 15(1), 100024.
<https://doi.org/10.1016/J.ANIMAL.2020.100024>
- Monteiro, A. C. G., Gonçalves, R. G., e Piçarra, J. (2022). *Fichas Técnicas - Caracterização de Matérias-Primas para Alimentação Animal*.
www.iaca.pt
- Moungsree, S., Neamhom, T., Polprasert, S., Suwannahong, K., Polprasert, C., e Patthanaissaranukool, W. (2024). Greenhouse gas emissions and carbon footprint of maize-based feed products for animal farming in Thailand. *Environmental science and pollution research international*, 31(2), 2657–2670. <https://doi.org/10.1007/S11356-023-31408-5/TABLES/5>
- Nemecek, T., e Schnetzer, J. (2011). *Methods of assessment of direct field emissions for LCIs of agricultural production systems*.
- Ogino, A., Oishi, K., Setoguchi, A., e Osada, T. (2021). Life cycle assessment of sustainable broiler production systems: Effects of low-protein diet and litter incineration. *Agriculture (Switzerland)*, 11(10).
<https://doi.org/10.3390/agriculture11100921>
- Olugbenga O, S., Abayomi O, O., Taiwo T, A., e Oluseye A, A. (2015). Optimized Nutrients Diet Formulation of Broiler Poultry Rations in

Nigeria Using Linear Programming. *Journal of Nutrition e Food Sciences*, s14. <https://doi.org/10.4172/2155-9600.S14-002>

Parlamento Europeu. (2003). *Regulamento (CE) nº1831/2003*. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/?uri=CELEX:32003R1831>

Parlamento Europeu. (2009). *Regulamento (CE) nº767/2009*.

Pelaracci, S., Paolotti, L., Rocchi, L., Boggia, A., e Castellini, C. (2024). Life cycle assessment of organic and conventional egg production: A case study in northern Italy. *Cleaner Environmental Systems*, 15. <https://doi.org/10.1016/j.cesys.2024.100226>

Pesti, G. M., e Choct, M. (2023). The future of feed formulation for poultry: Toward more sustainable production of meat and eggs. *Animal Nutrition*, 15, 71–87. <https://doi.org/10.1016/J.ANINU.2023.02.013>

Santini, A., Gaviley, O. V, Katerynych, O. O., Ionov, I. A., Griffin, D. K., Dekhtiarova, O. O., e Romanov, M. N. (2025). Comparative Characteristics of Various Cereals in Terms of Fodder Value, Antinutrients and Use for Poultry Feeding. *Encyclopedia 2025, Vol. 5, Page 63, 5(2)*, 63. <https://doi.org/10.3390/ENCYCLOPEDIA5020063>

Schneider, L., e Finkbeiner, M. (2013). *Life Cycle Assessment of EU Oilseed Crushing and Vegetable Oil Refining: Sustainable Engineering*.

Soares, M. C. (2023). *Sobre a sustentabilidade da produção de alimentos - O exemplo do frango de carne - Agroportal*. <https://www.agroportal.pt/sobre-a-sustentabilidade-da-producao-de-alimentos-o-exemplo-do-frango-de-carne/>

subpromais. (2021). *Subprodutos*. <https://www.subpromais.pt/conteudo.php?idm=4>

- Tamburini, E., Pedrini, P., Marchetti, M. G., Fano, E. A., e Castaldelli, G. (2015). Life Cycle Based Evaluation of Environmental and Economic Impacts of Agricultural Productions in the Mediterranean Area. *Sustainability* 2015, Vol. 7, Pages 2915-2935, 7(3), 2915–2935. <https://doi.org/10.3390/SU7032915>
- Tongpool, R., Phanichavalit, N., Yuvaniyama, C., e Mungcharoen, T. (2012). Improvement of the environmental performance of broiler feeds: a study via life cycle assessment. *Journal of Cleaner Production*, 35, 16–24. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2012.05.007>
- USSEC. (2024). *Market Snapshot: Portugal*.
- Wangui, J. C., Taylor, J. D., Barraza, H., Hancock, P., e Kyriazakis, I. (2025). One size does not fit all: Are there any sustainable alternatives to soybean in chicken systems? *Poultry Science*, 104(12), 105957. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2025.105957>
- Youssef, I. (2025). Use of Enzymes in Poultry Diets to Improve the Productive Performance and Reduce the Diet Cost. *Journal of Veterinary Medical Research*, 0(0), 0–0. <https://doi.org/10.21608/jvmr.2025.381481.1129>

Página propositadamente em branco

Anexos

Anexo 1: Descrição dos parâmetros apresentados nas tabelas das matérias-primas

Fonte: Feedtables (2025)

Parâmetro	Descrição
Humidade (%)	A humidade é a diferença entre o peso total e a quantidade de matéria seca. Geralmente, é obtida por secagem em estufa, embora existam métodos específicos para produtos específicos, como as silagens, por exemplo.
Cinzas (%)	As cinzas são a matéria mineral remanescente após a incineração. A matéria orgânica é calculada como 100% - % cinzas.
Proteína bruta (%)	Proteína bruta, calculada como $N \times 6,25$, onde N é o azoto obtido por mineralização pelos métodos de Kjeldahl ou Dumas.
Gordura bruta (%)	Gordura bruta pode ser extraída por éter dietílico, éter de petróleo ou hexano.
Fibra bruta (%)	A fibra bruta, também conhecida como celulose de Weende, é o resíduo insolúvel de uma hidrólise ácida seguida de uma alcalina. Este resíduo contém celulose verdadeira e lignina insolúvel.
Amido (%)	O amido, normalmente, é medido por polarimetria. Consoante o método, o valor de amido obtido inclui o amido propriamente dito, e possivelmente outros compostos de hidratos de carbono.
C12:0	Ácido láurico, um ácido gordo saturado.
C14:0	Ácido mirístico, um ácido gordo saturado.
C16:0	Ácido palmítico, um ácido gordo saturado.
C16:1	Ácido palmitoleico, um ácido gordo ómega-7 monoinsaturado.
C18:0	Ácido esteárico, um ácido gordo saturado.
C18:1	Ácido oleico, um ácido gordo ómega-9 monoinsaturado.
C18:2	Ácido linoleico, um ácido gordo ómega-6 polinsaturado.
C18:3	Ácido linolénico, um ácido gordo polinsaturado.

Anexo 2: Descrição dos indicadores ambientais utilizados para a ACV.

Fonte: European Commission (2024a)

Indicador de impacto	Avaliação
Alterações climáticas	- Aumento das temperaturas médias globais, devido às emissões de GEE – combustão de combustíveis fósseis (carvão, petróleo e gás natural); - Potencial de aquecimento global de todas as emissões de GEE medido em kg CO₂ eq.
Destruição da camada de ozono	- A camada de ozono (O₃) estratosférica protege-nos da radiação ultravioleta nociva (UV-B); - A sua destruição aumenta os casos de cancro de pele nos humanos e causa danos às plantas; - Os potenciais impactes são convertidos para o seu equivalente em quilogramas de triclorofluorometano (Freon-11 ou R-11); - Unidade de medida: kg CFC-11 eq
Toxicidade humana, efeitos cancerígenos	- Potenciais impactes na saúde humana, através do ambiente, pela absorção de substâncias presentes no ar, na água e no solo; - Os efeitos diretos na saúde não são atualmente medidos; - Unidade medida: Unidade Toxicológica Comparativa para humanos, baseada no modelo USEtox.
Toxicidade humana, efeitos não cancerígenos	- Potenciais impactes na saúde humana, através do ambiente, pela absorção de substâncias presentes no ar, na água e no solo; - Os efeitos diretos na saúde não são atualmente medidos; - Unidade medida: Unidade Toxicológica Comparativa para humanos, baseada no modelo USEtox.
Material Particulado	- Impactes na saúde humana causados pelas emissões de material particulado (PM) e dos seus precursores – NO_x, SO₂; - Quanto menor a partícula, maior o perigo – maior penetração nos pulmões; - Unidade de medida: Alteração na mortalidade devido às emissões de PM, expressa em incidência de doença por kg PM2.5eq
Radiação ionizante	- Exposição à radiação ionizante tem impactes na saúde humana; - Pegada ambiental considera apenas as emissões em condições normais de funcionamento, não considerando acidentes em centrais nucleares; - Unidade medida: impacto na saúde humana das diferentes radiações ionizantes é convertido para o equivalente em quilobequereis de Urânio-235 (kg U-235 eq).
Formação de ozono fotoquímico	- O O₃ ao nível do solo, troposfera, é prejudicial; - Causa o efeito <i>smog</i>, que podem desencadear problemas respiratórios e degrada compostos orgânicos em animais e plantas; - Unidade de medida: equivalente em quilogramas de Compostos Orgânicos Voláteis não Metânicos – NMVOC, como álcoois e compostos aromáticos (kg NMVOC eq)
Acidificação	- Contribui para a degradação das florestas de coníferas e o aumento da mortalidade de peixes; - Pode ser causada por emissões para a atmosfera e pela deposição dessas emissões na água e no solo;

	- Fontes: processos de combustão na produção de eletricidade, calor e transporte. - Quanto maior o teor de enxofre, maior a contribuição para a acidificação; - Unidade de medida: mol H⁺ eq
Eutrofização terrestre	- Eutrofização = Substâncias que contêm azoto ou fósforo são libertadas nos ecossistemas, promovendo o crescimento excessivo de algas ou determinadas plantas, limitando o desenvolvimento das espécies daquele ecossistema; - Unidade de medida: mol N eq
Eutrofização em água doce	- O desenvolvimento excessivo das algas, reduz a quantidade de oxigénio disponível na água, limitando a vida dos peixes; - Fontes de azoto: utilização de fertilizantes na agricultura, processos de combustão; - Fontes de fósforo: estações de tratamento de esgotos urbanos e industriais e lixiviação dos solos agrícolas; - Unidade de medida: kg P eq.
Eutrofização marinha	- No ambiente marinho, este fenómeno deve-se principalmente ao aumento da concentração de N, pelos mesmos motivos enunciados anteriormente; - Unidade de medida: kg N eq.
Ecotoxicidade em água doce	- Potenciais impactes tóxicos num ecossistema, que podem afetar tanto espécies individuais como o funcionamento geral do ecossistema. Algumas substâncias têm tendência a acumular-se nos organismos vivos; - Unidade medida: Unidade Toxicológica Comparativa para ecossistemas, baseada no modelo USEtox.
Uso do solo	- Uso e transformação do solo: agricultura, estradas, habitação, exploração mineira ou outros fins; - Impactes: perda de espécies, de matéria orgânica do solo e erosão do solo; - Mede os impactes em 4 propriedades do solo – produção biótica, resistência à erosão, regeneração da água subterrânea e filtragem mecânica, expressos em pontos (Pts). - Unidade medida: m²crop_{eq}
Uso da água	- A extração de água de lagos, rios ou águas subterrâneas pode contribuir para o "esgotamento" da água disponível; - Unidade de medida: m³ de utilização de água relacionados com a escassez local de água.
Uso de recursos fósseis	- A Terra contém uma quantidade finita de recursos não renováveis – combustíveis fósseis; - Ideia fundamental desta categoria: extração de recursos hoje forçará as gerações futuras a extrair menos ou diferentes recursos; - A quantidade de materiais que contribuem para o uso de recursos fósseis é convertida em MJ (megajoules). - Unidade medida: kg oil_{eq}
Uso de recursos, minerais e metais	- Esta categoria segue a mesma ideia fundamental da categoria anterior; - A quantidade de materiais que contribuem para o esgotamento de recursos é convertida em equivalentes de quilogramas de antimónio (kg Sb eq).

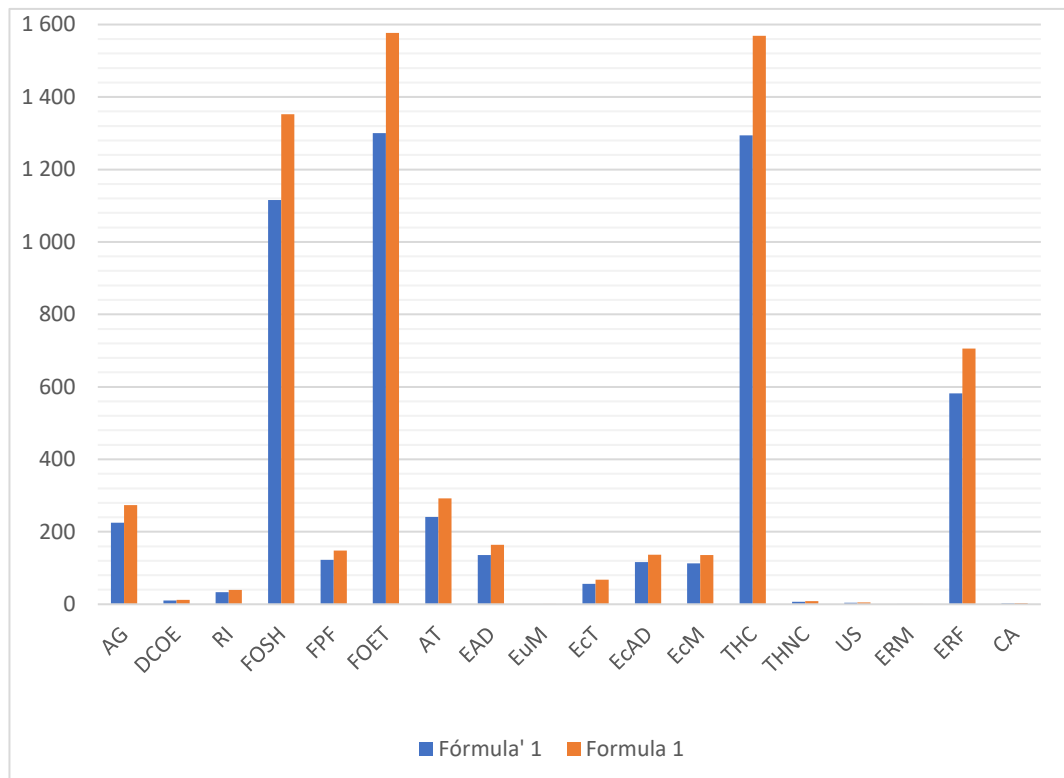
Anexo 3: Características nutricionais das fórmulas apresentadas

Composição nutricional	Fórmula 1	Fórmula 2
kcal EM/kg dieta	3013,11	3020,00
Proteína bruta (%)	18,98	19,79
Humidade (%)	12,45	12,78
Cinzas (%)	5,12	5,53
Gordura Bruta (%)	5,67	5,68
Lisina (%)	1,26	1,11
Metionina (%)	0,65	0,45
Metionina + cisteína (%)	0,97	0,80
Treonina (%)	0,90	0,76

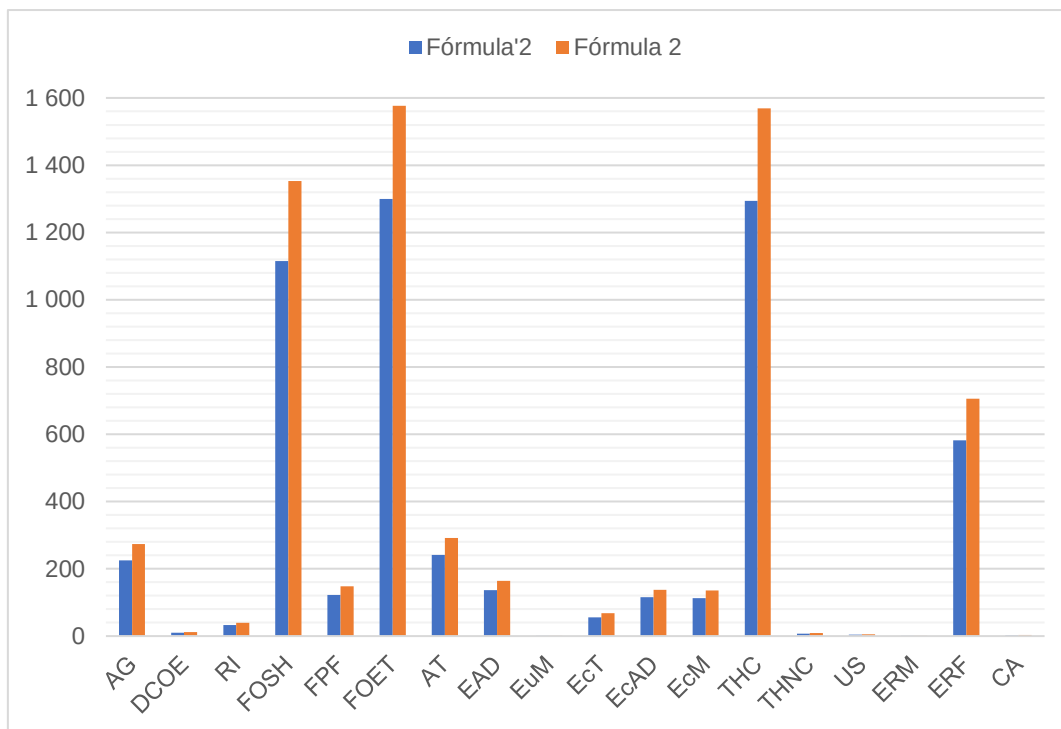
Anexo 4: ACV de F1 vs. ACV de F'1

Neste anexo, e nos seguintes, encontramos os gráficos completos das ACV entre as diversas fórmulas. As 18 categorias de impacto demonstradas nos gráficos são as que se encontram descritas na Tabela seguinte:

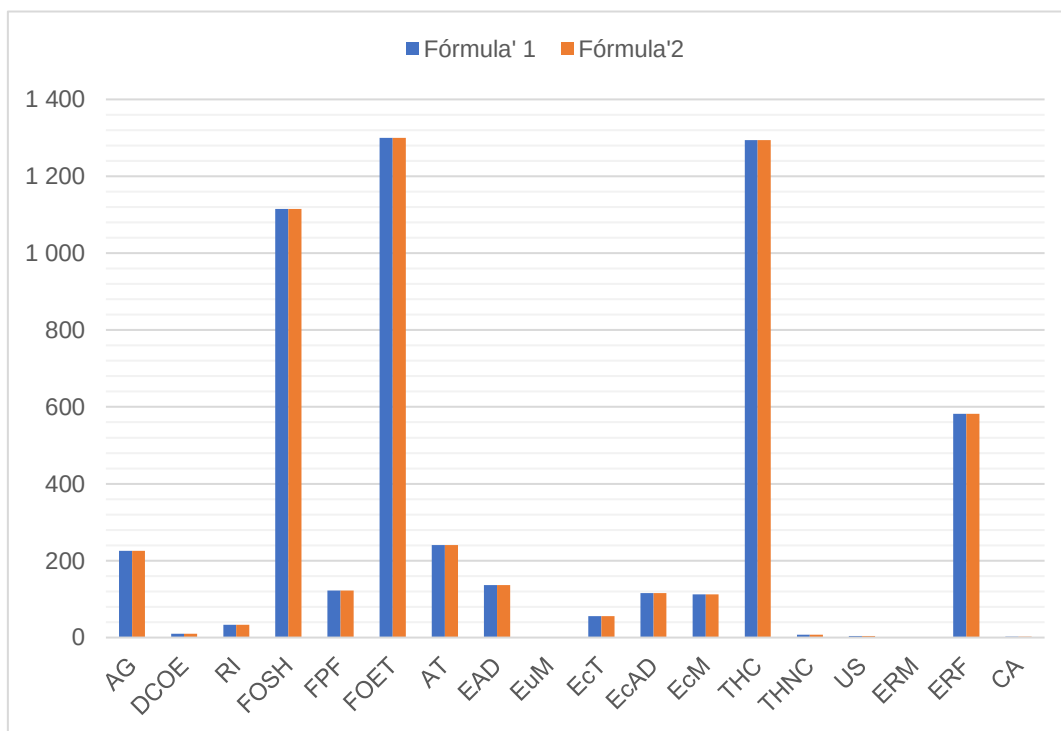
Categoria de impacto	Sigla
Aquecimento Global	AG
Depleção da camada ozono estratosférico	DCOE
Radiação ionizante	RI
Formação ozono, saúde humana	FOSH
Formação de partículas finas	FPF
Formação ozono, ecossistemas terrestres	FOET
Acidificação terrestre	AT
Eutrofização de águas doces	EAD
Eutrofização marinha	EuM
Ecotoxicidade terrestre	EcT
Ecotoxicidade água doce	EcAD
Ecotoxicidade marinha	EcM
Toxicidade humana cancerígena	THC
Toxicidade humana não cancerígena	THNC
Uso do solo	US
Escassez de recursos minerais	ERM
Escassez de recursos fósseis	ERF
Consumo de água	CA



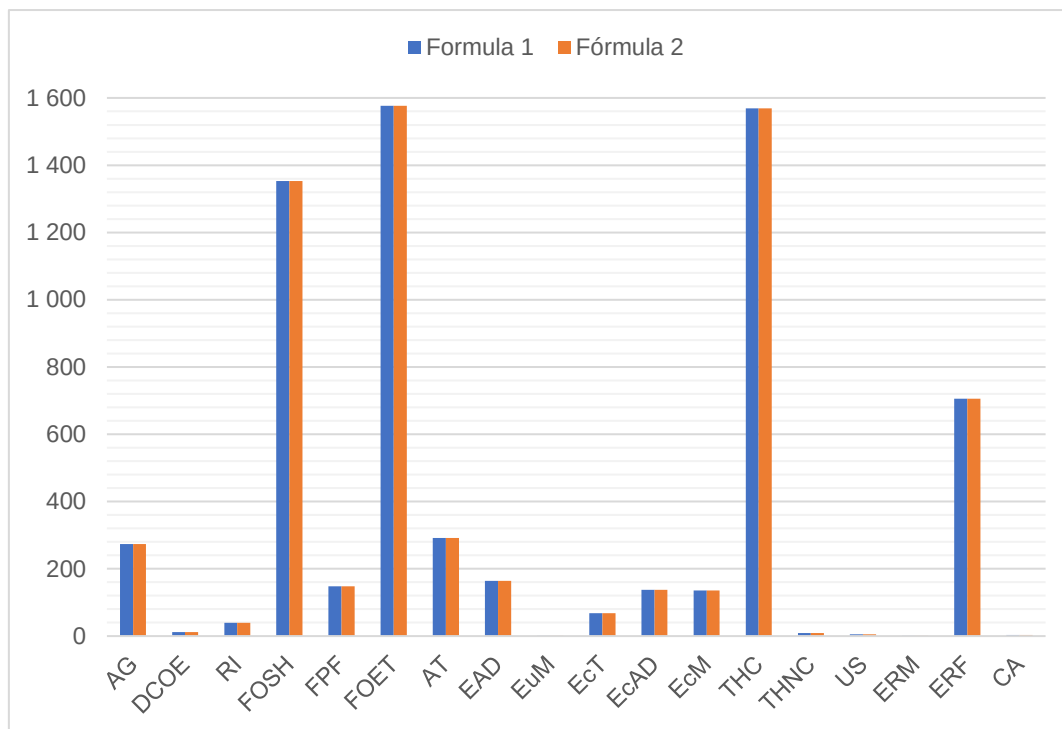
Anexo 5: ACV de F2 vs. ACV de F'2



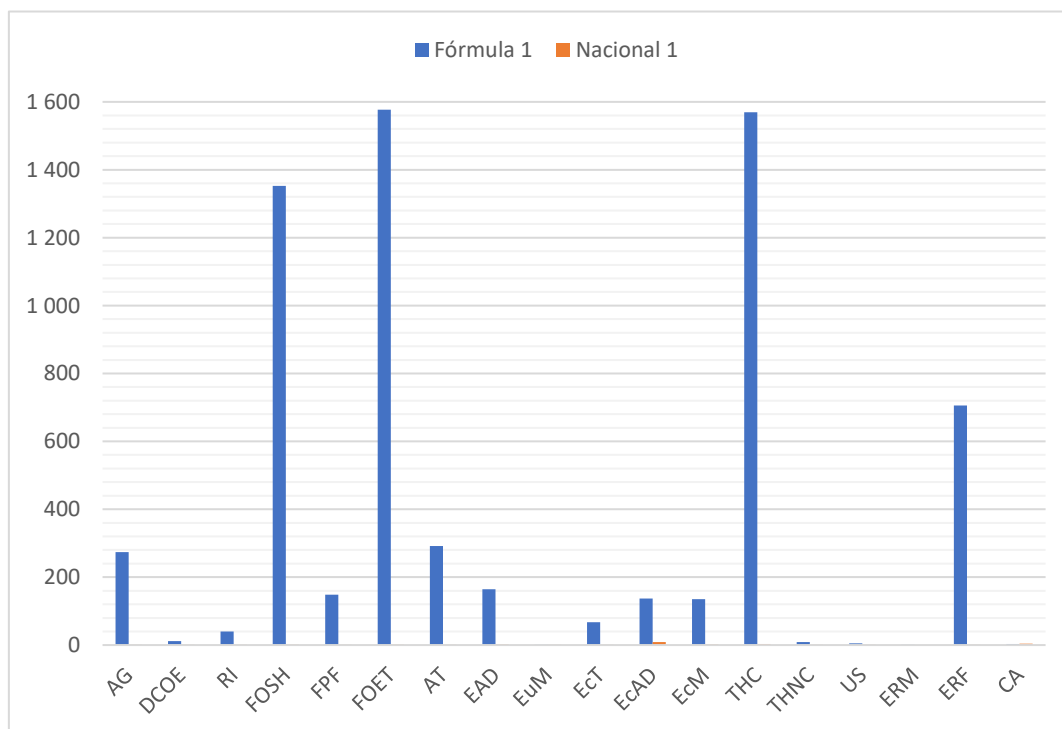
Anexo 6: ACV de F'1 vs. ACV de F'2



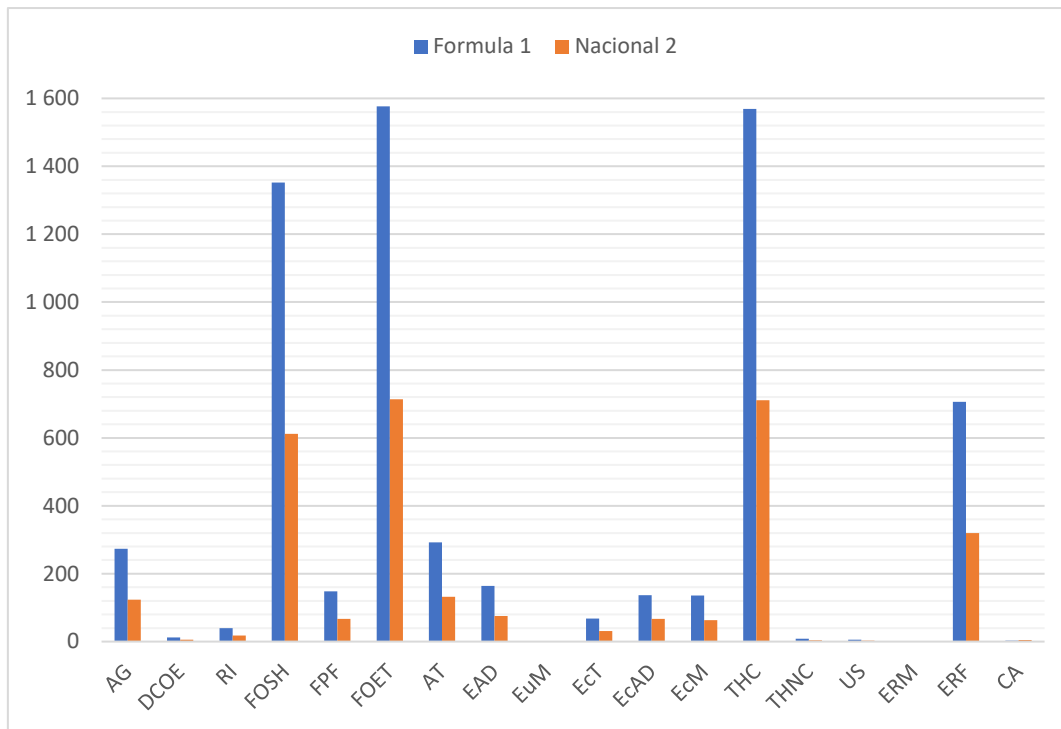
Anexo 7: ACV de F1 vs. ACV de F2



Anexo 8: ACV de N1 vs. F1



Anexo 9: ACV de N2 vs. F1



Anexo 10: ACV de N1 vs. N2

