

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
CENTRO DE ESTUDOS E PESQUISAS EM AGRONEGÓCIOS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONEGÓCIOS**

GABRIELA ALLEGRETTI

***INSECT AS FEED*: UMA ANÁLISE BIOECONÔMICA DO USO DE INSETOS
COMO FONTE PROTEICA ALTERNATIVA À AVICULTURA DE CORTE
BRASILEIRA**

**PORTO ALEGRE - RS- BRASIL
2017**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
CENTRO DE ESTUDOS E PESQUISAS EM AGRONEGÓCIOS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONEGÓCIOS**

GABRIELA ALLEGRETTI

***INSECT AS FEED*: UMA ANÁLISE BIOECONÔMICA DO USO DE INSETOS
COMO FONTE PROTEICA ALTERNATIVA À AVICULTURA DE CORTE
BRASILEIRA**

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós Graduação em Agronegócios do Centro de Estudos e Pesquisas em Agronegócios da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial para obtenção do título de Doutora em Agronegócios.

Orientadora: Prof^ª Dr^a Verônica Schmidt
Co-orientador: Prof. Dr. Edson Talamini

**PORTO ALEGRE – RS – BRASIL
2017**

CIP - Catalogação na Publicação

Allegretti, Gabriela

INSECT AS FEED: UMA ANÁLISE BIOECONÔMICA DO USO DE INSETOS COMO FONTE PROTEICA ALTERNATIVA À AVICULTURA DE CORTE BRASILEIRA / Gabriela Allegretti. -- 2017. 177 f.

Orientadora: Verônica Schmidt.

Coorientador: Edson Talamini.

Tese (Doutorado) -- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Centro de Estudos e Pesquisas em Agronegócios, Programa de Pós-Graduação em Agronegócios, Porto Alegre, BR-RS, 2017.

1. Bioeconomia. 2. Ecologia Industrial. 3. Entomologia. 4. Emergia. 5. Termodinâmica. I. Schmidt, Verônica, orient. II. Talamini, Edson, coorient. III. Título.

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
CENTRO DE ESTUDOS E PESQUISAS EM AGRONEGÓCIOS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONEGÓCIOS**

GABRIELA ALLEGRETTI

***INSECT AS FEED: UMA ANÁLISE BIOECONÔMICA DO USO DE INSETOS
COMO FONTE PROTEICA ALTERNATIVA À AVICULTURA DE CORTE
BRASILEIRA***

**Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em
Agronegócios do Centro de Estudos e Pesquisas em Agronegócios da
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial
Para obtenção do título de Doutora em Agronegócios.**

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Enrique Ortega – UNICAMP

Dr. Paulo Cezar Bogorni – BUG do BRASIL

Prof. Dr. Antônio Domingos Padula – UFRGS

Orientadora: Prof. Dra. Verônica Schmidt – UFRGS

Co-Orientador: Prof. Dr. Edson Talamini - UFRGS

Abril de 2017

FOLHA DE APROVAÇÃO

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronegócios do Centro de Estudos e Pesquisas em Agronegócios da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial para obtenção do título de Doutora em Agronegócios.

Aprovada em 04/04/2017.

COMISSÃO EXAMINADORA

Orientadora: Prof.(a) Dr.(a) Verônica Schmidt
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Co-Orientador: Prof. Dr. Edson Talamini
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Prof. Dr. Enrique Ortega
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Doutor Paulo Cezar Bogorni
BUG DO BRASIL

Prof. Dr. Antônio Domingos Padula
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

AGRADECIMENTOS

Poder chegar a este momento de escrever os agradecimentos de um trabalho como uma tese é poder voltar no tempo, para mim, no mínimo 6 anos, quando fui aprovada na seleção do mestrado. O primeiro dia de aula, após muitos anos longe do meio acadêmico, eu passei a entender porque devemos correr atrás dos nossos sonhos e buscar o que realmente faz sentido, e, a partir daquele dia, pela primeira vez, fazia sentido somente para mim.

Chegar até o dia de hoje é resultado de muito esforço, muitas descobertas, muitos tropeços, frustrações, mas se pudesse resumir tudo em uma única palavra seria COMPARTILHAR. Compartilhar é se doar, é receber, mas a cima de tudo é transformar tudo isso em algo muito melhor e mais grandioso.

Para mim ciência é um processo coletivo, onde uma opinião é válida, mas a contestação dela e o surgimento de um novo questionamento é muito mais rico. Não foi à toa que escolhi um programa interdisciplinar para continuar minha formação acadêmica e, tenho certeza, será assim daqui para a frente sempre.

Nesta sessão de agradecimentos venho somente externar meu muito obrigada às pessoas fundamentais que COMPARTILHARAM cada momento desta etapa da minha vida. Alguns doaram conhecimento, outros, tempo, outros mais, paciência, companheirismo, amizade, sabedoria, indignação, questionamentos e até revolta. Tudo isso foi acolhido e de alguma forma contribuiu para minha formação.

Primeiramente e não poderia deixar de ser, tenho muito a agradecer a minha orientadora, prof. (a) Verônica Schmidt que desde o mestrado me acolheu aceitando todos os meus desafios, que não foram poucos, não contestando minhas ideias com limitações, mas acolhendo meus questionamentos e me levando à outras reflexões. A cada visita em sua sala minha cabeça sai com novas ideias e desejos, que, com certeza, nortearão minha vida profissional. Muito obrigada Prof. Verônica.

Ao prof. Edson Talamini que ao me indicar o livro “O decrescimento – entropia, ecologia e economia”, fez perceber que uma veterinária poderia fazer parte de debates em economia. A partir da leitura deste livro e da disciplina de Bioeconomia, com uma turma excepcional, esta etapa da minha formação se modificou, permitindo-me olhar o agronegócio com outros olhos. Faltava um objeto de pesquisa e, de uma conversa despreziosa, nasceu uma sugestão “maluca” – insetos como alimento. Ele só não contava que estava propondo este desafio para a pessoa que naquele momento ansiava por um. Muito obrigada prof. Edson pela sua instigação, dedicação, conhecimento e disponibilidade em ensinar e ensinar a pensar.

Ao passar pelo processo de qualificação fui desestimulada a trabalhar com a metodologia proposta o que me obrigou a continuar a busca por um meio de responder meus questionamentos. Talvez foi o melhor não que recebi, pois dessa nova busca eu tive o prazer de conhecer uma pessoa única a quem devo os mais sinceros agradecimentos: o prof. Enrique Ortega. Nunca vou esquecer a forma como fui acolhida, desde o momento que encaminhei o primeiro e-mail até o último dia que me recebeu no LEIA -UNICAMP. Professor a simplicidade e vontade de compartilhar o seu conhecimento, que não é pouco, comigo, e com todos os seus orientados, são um exemplo a ser seguido e com certeza já faz parte da minha formação profissional. Cada ida na sua sala com o computador, o caderno e muitas dúvidas eram esclarecidas sempre com novos questionamentos e novos desafios. O senhor é um compartilhador de ciência. Muito obrigada pela confiança e principalmente pelos seus ensinamentos.

Agradeço profundamente aos membros da banca Prof. Dr. Antônio Domingos Padula, Dr. Paulo Cesar Bogorni e prof. Dr. Enrique Ortega que aceitaram participar desta etapa de minha formação. Seu conhecimento com certeza já contribuiu e contribuirá ainda mais, após esta tese, para o aprimoramento de minha pesquisa e minha formação como pesquisadora.

No decorrer do doutorado tive o privilégio de conhecer e compartilhar ideias e amizade com muitos professores do CEPAN e aqui desejando agradecer a cada um eu cito o mestre Homero Dewes. Desde o processo seletivo, com certeza ele não lembra, mas ao saber brevemente minha história de vida ele me questionou: E quem garante que tu não vai nos abandonar no caminho? Minha resposta foi: Eu garanto professor, pois chegar até aqui é parte do meu projeto de vida. Eu cheguei professor Homero e sou infinitamente grata ao senhor por tudo. Quando a gente referencia alguém por mestre não precisa dizer mais. Pode passar o tempo que for que seus ensinamentos nas aulas de construção do conhecimento, interdisciplinariedade e tópicos jamais serão esquecidos. Muito obrigada.

O desafio de me aventurar num tema novo, principalmente para a realidade brasileira, me fez conhecer pessoas muito competentes nas suas áreas a quem eu devo profundo agradecimento pelo conhecimento compartilhado e pela sua disponibilidade de ensinar. Meu muito obrigada ao Sr. Gilberto Schickler, Sr. João, Pisa, Dr. Paulo Bogorni. Sem a sua disponibilidade em compartilhar informações referentes a criação de insetos no Brasil, a presente pesquisa não teria sido possível. Espero poder retribuir por meio do conhecimento gerado a cada um de vocês e, num futuro, podermos dar seguimento em novas pesquisas.

Além de compartilhar conhecimento no decorrer destes 4 anos algumas pessoas me ensinaram também a compartilhar amizade. Obrigada colegas mestrandos e doutorandos da

turma 2013, em especial para Valeria da Veiga um exemplo de profissional e uma amiga para a vida.

Quando digo que COMPARTILHAR é a palavra-chave deste agradecimento estou me referindo ao NEB-AGRO (Núcleo de Estudos em Bioeconomia aplicada ao Agronegócio) que nasceu das produtivas discussões de um grupo ímpar e interdisciplinar em Bioeconomia. Omar, Felipe, Fabi, Glênio, Giana, Heinrich, Ivandro e prof. Edson, e aos demais colegas que a cada semestre passaram a fazer parte, meu muito obrigada. As nossas reuniões de quarta-feira com certeza fizeram a diferença na minha história. Espero que nossas reflexões e trabalhos muito tenham a contribuir para a ciência.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo financiamento da bolsa de doutorado junto ao Centro de estudos e pesquisas em agronegócios (CEPAN).

Por fim existem pessoas sem as quais o início de tudo isso não seria possível. Muito obrigada à minha mãe e amiga Vera Arioli por compartilhar paciência, sabedoria, amizade e, a cima de tudo, por acreditar nesse meu sonho. Aos meus irmãos Fernanda Vaccaro e Alexandre Allegretti que mesmo distantes sempre fazem parte das minhas escolhas e decisões.

A construção deste sonho que hoje se materializa na forma de tese também diz respeito a uma pessoa muito especial a quem eu nunca terei palavras para agradecer: Raymundo Borin Júnior. Ray tu sempre estive ao meu lado na hora das dúvidas, das frustrações e das incertezas, mas também dos acertos e vitórias, por isso hoje te convido a celebrar, pois você é parte desta minha conquista! A ti e toda tua família meu muito obrigada, sempre!

RESUMO

O aumento do consumo mundial de carnes, em função do crescimento da renda, principalmente nos países em desenvolvimento, alerta para o crescente uso de recursos naturais e geração de resíduos resultante destes processos. A carne de frango surge como a principal opção para suprir esta demanda, e o Brasil apresenta-se como um dos maiores *players* mundiais deste mercado. O Sul do Brasil, principal região produtora de frangos, enfrenta hoje questões ambientais relacionadas ao tratamento e destinação dos dejetos e a consequente contaminação do solo e dos lençóis freáticos, o que vem limitando a expansão do setor. Atualmente, a principal fonte proteica para nutrição animal é o farelo de soja, que por ser uma fonte nobre de alimento e energia (biocombustíveis), tem apresentado preços elevados no mercado mundial. O uso de insetos como fonte proteica alternativa à dieta de frangos de corte vem sendo estudado, a fim de suprir, pelo menos em parte, esta demanda. As larvas da mosca *Black Soldier Fly* (BSF) possuem capacidade para digerir grandes quantidades de matéria orgânica, tanto de substratos com origem vegetal como animal. Deste bioprocessamento resulta o farelo de insetos, rico em proteína e lipídios; a quitina, composto para uso farmacêutico; e o composto orgânico, com potencial para ser utilizado como biofertilizante. Apesar das limitações de ordem cultural, sanitárias e de escala de produção, para implantação desta tecnologia no curto prazo, seu potencial vem sendo confirmado. Visando aproximar o uso de insetos à realidade brasileira, primeiramente, identificaram-se as espécies que mais se adaptam as condições edafoclimáticas, e aquelas com maior potencial para processar substratos menos nobres como resíduos de grãos e dejetos animais. De acordo com as 5 características desejáveis na escolha das espécies de insetos, proposta pela *Food and Agriculture Organization* (FAO), identificaram-se as larvas de BSF e de mosca doméstica, conforme discutido no Capítulo 3 da presente tese. A fim de identificar o *status quo* da avicultura brasileira do Sul do país, realizou-se a análise emergética de uma típica propriedade em sistema convencional de produção, com alto nível tecnológico. A discussão dos índices emergéticos e possibilidades de incremento em sustentabilidade foi apresentada no quarto capítulo da tese. Já o Capítulo 5, apresenta os resultados da análise emergética realizada num projeto piloto de criação e processamento de larvas de BSF no Brasil. A partir da análise bromatológica do substrato (resíduo de grãos), farelo de insetos e composto orgânico, provenientes deste projeto, determinou-se a transformidade do farelo de insetos. Esta contribuição inédita alimentará o banco de dados do *International Society for the Advancement of Emergy Research* (ISAER). Os demais índices emergéticos do processo foram calculados e, por meio de uma análise comparativa com o farelo de soja, também foram discutidos no terceiro artigo. Demonstrou-se os ganhos em sustentabilidade que esta inovação tecnológica pode provocar, tendo o farelo de insetos apresentado os melhores índices. Visando responder ao problema de pesquisa da presente tese: o uso de farelo de inseto pode aumentar a sustentabilidade da avicultura brasileira?; realizou-se a análise emergética comparativa de uma típica propriedade avícola em Chapecó, Santa Catarina, no ano de 2015, modificando somente a fonte proteica da dieta das aves. Foram identificados ganhos em transformidade (emergia por joule do produto), renovabilidade e nos demais índices emergéticos, demonstrando, que a inserção desta tecnologia, mesmo que no longo prazo, tem potencial para melhorar a sustentabilidade da produção de carne de frango. O apelo mundial por sustentabilidade na

produção de carne é um constante desafio para os agronegócios. Mesmo com as limitações identificadas, que ainda requerem investigações e regulamentações, a tecnologia de produção de farelo de insetos apresenta-se como uma oportunidade para melhorar aspectos sociais e ambientais, além dos econômicos, voltados à sustentabilidade.

Palavras-chave: Bioeconomia; Ecologia industrial; Entomologia; Emergia, Termodinâmica.

ABSTRACT

The worldwide increase of meat consumption due to growing income, especially in developing countries, alerts us to the escalating use of natural resources and waste generation from these processes. Poultry meat appears as the main option to meet this demand and Brazil represents the biggest world player in this market. The main Brazilian poultry production region, in the South, faces environmental concerns related to destination and treatment of this organic waste which is contaminating soil and groundwater. These issues are limiting the expansion of the poultry sector. Currently, soybean meal, the main protein source for animal nutrition and a noble source of energy (biofuels), is facing increasing prices in the world market. The use of insects as an alternative protein source for poultry diet has been studied, aiming to supply, at least in part, this demand. Black Soldier Fly (BSF) larvae have the capacity to digest huge volumes of organic material from both animal and vegetal origin. The products from this bioprocessing are insect meal, rich in protein and lipids; chitin, a pharmaceutical compound; and the organic compound that can be used as biofertilizer. Despite cultural, sanitary and scale production limitations to insert this technology in the short term, its potential is already confirmed. In Brazil, the species most adaptable to edaphoclimatic conditions and those with the greatest potential to bioprocess 'poorer' substrates such as grain residues and animal waste were identified as BSF and domestic fly larvae. These species show the five desirable characteristics proposed by the Food and Agriculture Organization (FAO) as discussed in Chapter Three of the thesis. An emergent analysis of a typical farm in a conventional production system with an advanced technological level was conducted to identify the *status quo* of Brazilian poultry production in the Southern region. Emergent index and the possibilities to increase sustainability of the sector are presented in Chapter Four. Chapter Five presents results from an emergent assessment of a pilot project of rearing and processing BSF larvae in Brazil. Through bromatological analysis of the substrate (grain residue), insect meal and organic compound from this project, the transformity of insect meal was determined. This unpublished contribution can feed into the database of the International Society for the Advancement of Emergent Research (ISAER). Remaining emergent index from the process was calculated and discussed in the third article. Gains in sustainability and better index was demonstrated in favor of insect meal. The research study was designed to answer the question: Can use of insect meal increase sustainability in Brazilian poultry production? A comparative emergent assessment was carried out on a typical poultry farm in Chapecó, Santa Catarina, in 2015, in which only the protein source of the poultry diet was modified. Transformity (emergent per joule of product), renewability and remaining index was calculated. It demonstrated that, even over a longer period of time, this technology has the potential to improve sustainability in poultry production. The worldwide appeal for sustainability in meat production is a constant challenge to agribusiness. Even with some limitations that still require research, the technology of insect meal is an opportunity to improve social and environmental aspects, as well as economic, while directed at sustainability.

Keywords: Bioeconomics; Industrial ecology; Entomology; Emergent; Thermodynamics.

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 2

Figura 1. Sistemas homem-ambiente e ecologia industrial	34
Figura 2. Sistema de produção de insetos para avicultura de corte	40
Figura 3. Possibilidades de processamento para insetos	41

CAPÍTULO 3

Figura 4. Principais símbolos utilizados na construção dos diagramas da tese	53
Figura 5. Diagrama sistêmico hipotético com descrição dos elementos constituintes	55

CAPÍTULO 4

Figure 1. Diagram showing insect larvae rearing and processing in poultry production	71
Figure 2. Black Soldier Fly (<i>Hermetia illucens</i>) larval and adult phases	73
Figure 3. Housefly (<i>Musca domestica</i>) larval and adult phases	74

CAPÍTULO 5

Figure 1. Diagram of energy, material and information flows of conventional poultry farm system with 1,200m ² shed building in Chapecó, SC, Brazil, in 2015	97
--	----

CAPÍTULO 6

Figure 1. Energy, material and information diagram of rearing, fattening and processing Black Soldier Fly Larvae in a production system located in São Paulo state – Brazil	120
---	-----

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 2

Tabela 1. Características-chave das visões de bioeconomia29

Tabela 2. Eficiência de produção de carnes convencionais e grilos38

CAPÍTULO 3

Tabela 3. Modelo de tabela para análise emergética54

CAPÍTULO 4

Table 1. Comparison between the larval and pupae composition of housefly bred on different substrates (based on DM)75

CAPÍTULO 5

Table 1. Productive data from poultry farm with 1,200 m² building in Chapecó, SC, Brazil93

Table 2. Economic data from poultry farm in Chapecó, SC, Brazil, in October 2015 94

Table 3. Emergy indicators used in environmental accounting96

Table 4. Annual Emergy flows in Conventional Brazilian poultry system99

Table 5. Emergy indicators of conventional poultry farm in Chapecó, SC, Brazil, in 2015.....101

Table 6. Emergy exchange ratio (EER) of economic inputs in a Brazilian poultry production system101

CAPÍTULO 6

Table 1. Description of emergy indicators115

Table 2. Bromatological analysis of BSFL meal, organic compound and grain residues (calculated in dry matter)117

Table 3. Zootchnical and economic data from poultry farm with 1,200m² building in Chapecó, Santa Catarina, Brazil, in October, 2015..... 118

Table 4. Annual emergy flows of BSFL rearing and processing from grain residues in São Paulo state – Brazil122

Table 5. Emergy indicators of insect meal (IM) and soybean meal (SBM) production and processing in Brazil125

Table 6. Comparative energy indicators of conventional Brazilian poultry production system that used different protein sources in broilers diet.....	127
--	-----

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 – APRESENTAÇÃO DA PROPOSTA DE TESE	17
1. INTRODUÇÃO	17
1.1 PROBLEMA DE PESQUISA	22
1.1.2 Objetivo Geral	22
1.1.3 Objetivos Específicos	22
CAPÍTULO 2 – CONTEXTUALIZAÇÃO TEÓRICA	25
1. BIOECONOMIA	25
1.1 ECOLOGIA INDUSTRIAL	32
2. INSETOS COMO RAÇÃO ANIMAL	35
2.1 ESPÉCIES DE INSETOS	37
2.2 VALOR NUTRICIONAL E PROCESSAMENTO.....	40
2.3 SEGURANÇA ALIMENTAR	42
2.4 QUESTÕES AMBIENTAIS	44
2.5 DESAFIOS INSTITUCIONAIS	45
3. PRESSUPOSTOS DE PESQUISA	47
3.1 PRESSUPOSTO A	47
3.2 PRESSUPOSTO B	47
CAPÍTULO 3 – PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	48
1. ETAPAS DA PESQUISA	48
1.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	48
1.2 EXPLORATÓRIA A CAMPO	49
1.3 PROCESSAMENTO E ANÁLISE DE DADOS	50
1.3.1 Análise emergética	50
<i>1.3.1.1 Emergia total</i>	<i>55</i>
<i>1.3.1.2 Transformidade solar</i>	<i>56</i>
<i>1.3.1.3 Emergia específica</i>	<i>56</i>
<i>1.3.1.4 Renovabilidade</i>	<i>57</i>
<i>1.3.1.5 Taxa de eficiência emergética</i>	<i>57</i>

<i>1.3.1.6 Taxa de investimento emergético e taxa de investimento emergético considerando as externalidades</i>	57
<i>1.3.1.7 Taxa de carga ambiental</i>	58
<i>1.3.1.8 Taxa de intercâmbio de energia</i>	59
<i>1.3.1.9 Cálculo da área de absorção de impacto para mitigação das externalidades negativas</i>	60
1.3.2 Demais considerações da análise e processamento dos dados	63

CAPÍTULO 4 - INSECTS AS FEED: SPECIES SELECTION AND THEIR POTENTIAL USE IN BRAZILIAN POULTRY PRODUCTION 65

1. INTRODUCTION	66
2. INSECT INDUSTRIAL SCALE PRODUCTION TO THE BROILER INDUSTRY	68
3. THE DESIRABLE FEATURES FOR DETERMINING INSECT SPECIES COMPARED TO HOUSEFLY AND BSF LARVAE BRED TO POULTRY PRODUCTION IN BRAZIL	72
4. CONCLUSION	81
5. REFERENCES	81

CAPÍTULO 5 - EMERGY ASSESSMENT OF CONVENTIONAL POULTRY PRODUCTION SYSTEM IN BRAZIL 89

1. INTRODUCTION	89
2. MATERIAL AND METHODS	92
2.1 POULTRY PRODUCTION SYSTEM	92
2.2 POULTRY DATA	93
2.3 EMERGY ASSESSMENT	94
3. RESULTS	96
4. DISCUSSION	102
5. CONCLUSION	105
5. ACKNOWLEDGEMENTS	106
6. REFERENCES	106

CAPÍTULO 6 - INSECT AS FEED: AN EMERGY ASSESSMENT OF INSECT MEAL AS A SUSTAINABLE PROTEIN SOURCE FOR BRAZILIAN POULTRY INDUSTRY.....	109
1. INTRODUCTION	110
2. METHODS	113
2.1 EMERGY ASSESSMENT	113
2.2 INSECT REARING AND PROCESSING	116
2.3 SOYBEAN MEAL AS PROTEIN SOURCE	117
2.4 THE BRAZILIAN POULTRY PRODUCTION SYSTEMS	117
3. RESULTS AND DISCUSSION	119
4. CONCLUSION	131
5. ACKNOWLEDGEMENTS	132
6. REFERENCES	132
CAPÍTULO 7 – CONSIDERAÇÕES FINAIS	139
REFERÊNCIAS	145
APÊNDICE A - Material Suplementar submetido ao Journal of Cleaner Production – Capítulo 5	161
APÊNDICE B - Material suplementar a ser submetido ao Journal of Industrial Ecology - Capítulo 6	169
ANEXO A	174
ANEXO B	175
ANEXO C	176

CAPÍTULO 1

APRESENTAÇÃO DA PROPOSTA DE TESE

1. INTRODUÇÃO

O aumento da população mundial e as mudanças nos padrões de consumo alimentar vêm alertando a comunidade científica mundial para a necessidade de pesquisas sobre fontes proteicas alternativas, de origem animal ou vegetal, e que sejam capazes de suprir, de forma viável e sustentável, esta demanda por alimentos.

O incremento na renda dos países em desenvolvimento, associado aos crescentes números relacionados ao consumo nas economias emergentes como China, Índia e Brasil inseriram no cenário mundial, nos últimos anos, um grupo de consumidores dispostos a dispendar parte de sua renda na inserção de proteínas de origem animal na sua dieta diária (GANDHI & ZHOU, 2014; MOTTET et al., 2017).

Segundo dados do *USDA Agricultural Projections to 2025*, a demanda mundial por alimentos e produtos agrícolas tem expectativa de crescimento mesmo com as projeções de um crescimento econômico reduzido nos países em desenvolvimento. O aumento da renda fez aumentar a classe média, surgindo, com ela, o fenômeno da diversificação das dietas em favor de carnes, leites e derivados e produtos processados (USDA, 2016). A produção global de carnes deverá ser 16% maior em 2025 do que no período base (2013-15) (OECD/FAO, 2016). A carne de frango, por ser a opção mais barata entre as três principais fontes de proteína animal, apresenta a maior taxa de crescimento com projeções de 1,8% ao ano até 2025 (USDA, 2016).

O Brasil deverá se manter como o maior exportador de produtos da avicultura em função da competitividade de seus custos de produção, sendo responsável por 46% do aumento das exportações de aves do mundo. A África e o Oriente Médio representarão mais de 40% do aumento global da importação de carne. Este aumento da oferta mundial de frangos será suprido tanto pelo aumento no número de aves como no aumento do peso médio ao abate (USDA, 2014).

Atualmente, 36% das calorias produzidas por meio da agricultura no mundo são destinadas à alimentação animal e apenas 12% dessas contribuem para a dieta humana, por meio de carnes e outros produtos de origem animal (CASSIDY et al., 2013). Já Mottet et al. (2017) afirmam que um terço da produção mundial de cereais é destinada à criação comercial de animais. Concorrencialmente, entre os anos de 2000 e 2010, grãos como milho e soja, destinados, até então, para o consumo humano e animal, ganharam um uso alternativo, a

produção de biocombustíveis, representando um aumento de 1% para 4% na destinação à produção de energia renovável e, conseqüentemente, uma redução líquida dos alimentos disponíveis (CASSIDY et al., 2013).

Os sistemas de produção cada vez mais intensivos dos rebanhos bovino e, principalmente, suíno e avícola, têm exigido uma produção crescente de farelo de soja, o que demanda, cada vez mais, áreas para produção deste grão (WEIS, 2013). Para suprir esta demanda crescente as produções agrícolas e industriais estão utilizando mais recursos naturais e provocando impactos ambientais tais como emissões de gases do efeito estufa (GEE) (CAVALLET, 2008), poluição das águas (HOEKSTRA e WIEDMANN, 2014; MEKONNEN e HOEKSTRA, 2012) e geração de resíduos. Tais fatos expõem a fragilidade ambiental destas atividades, contrastando com um mundo em busca de sistemas mais sustentáveis de produção (GODFRAY et al. 2014).

Outro fator, foco de discussões mundiais e ávido por soluções, diz respeito ao impacto da produção de proteína animal sobre o ambiente. A pegada hídrica proposta por Mekonnen e Hoekstra (2010) em um estudo sobre produção animal e produtos de origem animal, demonstrou, numa média mundial, a necessidade de 15.400, 6.000 e 3.400 litros de água para a produção de um quilo de carne bovina, suína e de aves, respectivamente. Aproximadamente 98% da pegada hídrica dos produtos de origem animal vêm do uso da água para produção de alimentos tais como forragem e ração (MEKONNEN & HOESKSTRA, 2010). Em pesquisa referente a pegada hídrica da avicultura brasileira para a década 2000-2010, Palhares (2012) relatou entre os Estados e anos do estudo, que a soma da contribuição do milho e da soja para o total da pegada hídrica foi de 99,6%.

Neste sentido, identificar alternativas menos demandantes deste recurso torna-se premente à produção mundial de carnes e, em especial, para o Brasil, importante *player* deste exigente mercado. A busca por fontes de proteína, seja diretamente para alimentação humana ou indiretamente, para a produção animal, que sejam menos demandantes de recursos naturais e menos geradoras de resíduos nos aponta para uma alternativa proposta pela Food and Agricultural Organization (FAO) desde o ano de 2003, que é a criação e processamento de insetos.

Em recente pesquisa, Oonincx et al. (2010) compararam a produção de bovinos e suínos frente à criação de cinco espécies de insetos, dentre elas três consideradas comestíveis (larva de *Tenebrio molitor*, larva de mosca doméstica - *Acheta domesticus* e gafanhoto - *Locusta migratória*), quanto à emissão de gases do efeito estufa e amônia. Os autores verificaram que os dados referentes à emissão de gases totais e de CO₂ de insetos foram muito semelhantes ou

até um pouco inferiores aos dados encontrados para suínos, porém muito inferiores aos níveis da produção de bovinos. Já no tocante à produção de amônia (NH_3), a produção de insetos apresentou dados inferiores às criações das outras duas espécies. Quanto à emissão de metano (NH_4) não foi identificada a produção deste gás para os insetos considerados comestíveis, apesar da produção já ter sido relatada em pesquisas com outras espécies como baratas, cupins e escaravelhos (HACKSTEIN e STUMM, 1994).

Um dos desafios encontrados pelos estudos relacionados à avaliação de impactos ambientais diz respeito à construção ou escolha das metodologias ou indicadores a serem utilizados. Critérios como eficiência produtiva levam à otimização no uso do recurso terra e demais recursos naturais resultando tanto na redução da pegada hídrica como na de carbono. Esta eficiência de produção pode ser medida sob o ponto de vista de diversos recursos (econômicos, humanos, sociais e naturais), porém somente o equilíbrio destas variáveis é capaz de determinar a plena eficiência (MEISSNER et al., 2013).

A conversão alimentar (quantidade de alimento necessário para produção de um quilo de carne, proteína ou caloria) além de ser um índice de otimização de ganhos econômicos, também representa um excelente indicador quando se busca uma melhor eficiência ambiental (MOTTET et al., 2017). Destinar alimentos como grãos para animais de limitada capacidade de conversão alimentar é o meio menos eficiente de fornecer calorias ao ser humano (CASSIDY et al., 2013).

Apesar de diferentes culturas ao redor do mundo fazerem uso de insetos como parte da alimentação humana (DEFOLIART, 1997; RAMOS-ELORDUY, 2005) e inúmeros estudos relacionados ao uso destes como alternativa para redução da fome no mundo (VAN HUIS et al., 2013, VAN HUIS, 2015; TABASSUM-ABBASI et al., 2016), a entomofagia¹ também vem sendo estudada como alternativa para o arraçamento de rebanhos, direcionando grãos, como a soja, diretamente à alimentação humana ou produção de energia.

Apesar dos elevados custos ainda praticados no mercado de insetos no mundo, em função da pequena escala de produção (RUMPOLD e SCHLÜTER, 2013), estes surgem como uma fonte de proteínas em substituição ao farelo de soja na dieta dos rebanhos. Insetos como os gafanhotos possuem grande potencial para serem transformados em ração animal, em função de seu metabolismo (animais de sangue frio) que os torna mais eficientes na conversão de biomassa vegetal em biomassa animal. Estudos relatam que esta espécie chega a ser dez vezes

¹ Entomofagia: prática humana ou animal de alimentar-se de insetos (VAN HUIS et al., 2013)

mais eficiente que bovinos em conversão alimentar, além de requerer áreas muito menores para sua criação (SCHABEL, 2010).

A digestibilidade e o valor nutricional dos insetos dependem das espécies a serem utilizadas podendo variar de 50 a 82% de proteína bruta na matéria seca (SCHABEL, 2010). Espécies como a mosca doméstica (*Musca domestica*) apresentam níveis entre 43 e 68% de proteína bruta e o tenébrio – “bicho da farinha” (*Tenebrio molitor*), valores entre 44 e 69%, muito próximos aos verificados no farelo de soja - 49 a 56% (VELDKAMP et al., 2012). Já o teor de gordura é superior ao encontrado no farelo de soja, podendo variar de menos de 10% até 30% com base no peso vivo, sendo identificados valores ainda superiores nos estágios de larva e pupa do que na fase adulta (DEFOLIART, 1991; DEFOLIART, 1995).

Em estudo comparativo, Siriamornpun & Thammapat (2008) demonstraram que 100g de inseto, quando comparados a 100g de carne fresca, fornecem o mesmo conteúdo energético perdendo, somente, para a carne suína em função de seu teor superior de gordura. Já ao verificar o valor proteico, os insetos são superiores a todos os tipos de carne animal. Rumpold & Schlüter (2013) relataram diversos experimentos utilizando insetos como fonte proteica, total ou parcial, na dieta de frangos em diversos países, demonstrando não haver diferenças significativas na taxa de crescimento, ganho de peso, eficiência de conversão e volume consumido o que representa uma alternativa potencial em substituição à farinha de peixe e ao farelo de soja. Estas informações são confirmadas em estudos mais recentes com larvas da mosca *Black Soldier Fly* (BSF) na dieta de frangos de corte (CULLERE et al., 2016; MAKKAR et al., 2014; JOSEFIAK et al., 2016; AL-QAZZAZ et al., 2016).

A importância da criação de insetos para a humanidade reside desde a capacidade de polinização, vital à sobrevivência de algumas espécies de plantas, até a capacidade de reciclagem de resíduos orgânicos de origem vegetal e, principalmente, animal (VAN HUIS et al., 2013). Aproveitar esta vantagem produtiva dos insetos em converter resíduos orgânicos, considerados limitadores da produção de várias atividades como suinocultura ou avicultura, em proteína animal, faz parte de um projeto elaborado pela FAO em cooperação com a Universidade de Wageningen, na Holanda, e que resultou no relatório *Edible insects: future prospect for food and feed security*.

Um estudo proposto por Nguyen et al. (2015) demonstrou a capacidade da larva de BSF em reciclar resíduos orgânicos das mais distintas origens (ração de frangos de corte, fígado suíno, dejetos suíno, resíduos domésticos, frutas e vegetais e “rendered fish”) demonstrando a possibilidade de utilizar este “bioconversor” como uma ferramenta de gestão ambiental (DIENER et al., 2011; NGUYEN et al., 2015). Sheppard et al. (1994), em um estudo de um

sistema em escala industrial de larvas de BSF, apresentaram reduções de mais de 50% nos volumes de dejetos de aves poedeiras.

Este somatório de fatores, aliado às limitações que estão sendo identificadas, principalmente, de cunho técnico e econômico para a produção em larga escala de insetos, despertam para a necessidade de investimento e evolução da pesquisa científica relacionada ao tema. Como toda pesquisa precursora, este tema ainda está restrito a um reduzido número de instituições e pesquisadores em todo o mundo caracterizando-se, assim, por contribuições inéditas e de caráter exploratório.

A representatividade do Brasil no cenário mundial do agronegócio, seja por meio da produção e processamento de grãos, ou das principais proteínas de origem animal (frangos, suínos, peixes e bovinos), remete a necessidade de avaliação do impacto bioeconômico que a inserção desta inovação tecnológica alimentar – farelo de insetos – pode provocar na cadeia produtiva da avicultura brasileira. Da mesma forma que, futuramente, pode alterar a percepção de sustentabilidade do setor pelo consumidor brasileiro e mundial, como já vem sendo investigado em países europeus onde a tecnologia está mais disseminada (VERBEKE et al., 2015; LAUREATI et al., 2016).

Em função de o tema ser contemporâneo e ainda despertar debates de ordem ética (bem-estar animal), sanitária (contaminações, zoonoses e alergias) e cultural (destinação final para alimentação humana) optou-se, para o presente estudo, pela análise exclusivamente da inserção de proteínas de insetos na alimentação de aves de corte, apesar de esta fonte proteica também poder ser utilizada em sistemas produtivos de outras espécies como suínos, bovinos, peixes, etc.

O atual modelo de produção da avicultura de corte brasileira e mundial baseia-se no uso do farelo de soja como principal componente proteico da ração (ROSTAGNO et al., 2005; VELDKAMP et al., 2012). Este ingrediente, inclusive, é utilizado como padrão entre as diferentes fontes de proteína na nutrição animal (LEESON & SUMMERS, 2009). Desta forma, o presente estudo propõe uma análise comparativa dos índices emergéticos da avicultura brasileira com a fonte proteica básica na dieta de frangos de corte – farelo de soja, e a fonte alternativa – farelo de insetos.

A característica de alimentação das aves ser naturalmente baseada em insetos, a representatividade e relevância da avicultura de corte no agronegócio brasileiro e mundial, da mesma forma que os significativos impactos ambientais provocados pela atividade, em função do volume de dejetos gerados, levaram à escolha da cadeia da avicultura de corte como objeto

da análise conforme problema de pesquisa, objetivo geral e objetivos específicos apresentados a seguir.

1.1 PROBLEMA DE PESQUISA

A criação de larvas de BSF a partir de resíduos orgânicos (resíduos de grãos), e o subsequente processamento em farelo de insetos é uma alternativa mais sustentável que o farelo de soja como fonte proteica à ração animal? O uso de farelo de insetos como fonte proteica pode melhorar os índices de sustentabilidade da produção de frangos de corte no Brasil?

1.1.1 Objetivo Geral

- Analisar, por meio da análise emergética, a sustentabilidade da criação e processamento de farelo de insetos como fonte proteica à ração animal, e comparar os índices emergéticos desta alternativa proteica frente ao farelo de soja para a avicultura de corte no Sul do Brasil.

1.1.2 Objetivos específicos

- Identificar, dentre as espécies de insetos criadas no mundo, qual(is) possuem potencial para o uso na avicultura de corte do Brasil;

- Avaliar, por meio da análise emergética, os índices de sustentabilidade da avicultura de corte convencional no sul do Brasil, tendo a fonte proteica da dieta baseada em farelo de soja;

- Avaliar, por meio da análise emergética, a sustentabilidade da criação e processamento de larvas de BSF em um projeto piloto de escala industrial no Brasil;

- Comparar os índices emergéticos do farelo de inseto com os do farelo de soja produzido no Brasil;

- Calcular os índices emergéticos de produção de frangos de corte no Brasil substituindo o farelo de soja pelo farelo de insetos;

- Comparar os índices emergéticos da avicultura utilizando as duas opções proteicas na dieta de frangos de corte no sul do Brasil.

Considerando o tema proposto e seu caráter contemporâneo o estudo desenvolveu-se de forma exploratória buscando adequar o objeto, produção de farelo de insetos e seu uso na alimentação de aves de corte, à realidade brasileira. O ineditismo desta tecnologia em escala industrial de produção no Brasil e o sigilo que envolve esta etapa da pesquisa pela empresa

avaliada, não permitem a publicidade de alguns dados, porém em nada atrapalharam o desenvolvimento da presente pesquisa.

A tese está estruturada em 7 capítulos. O primeiro capítulo refere-se à apresentação da proposta de tese sendo composto pela introdução e justificativa, problema de pesquisa, objetivo geral e objetivos específicos.

O capítulo dois apresenta uma contextualização teórica da bioeconomia como forma de compreender e avaliar, por meio de seus instrumentos de avaliação quantitativa, o objeto da pesquisa e a problemática proposta. A partir das reflexões resultantes desta etapa são propostos os dois pressupostos da pesquisa.

O terceiro capítulo descreve a metodologia utilizada no decorrer das etapas da pesquisa. Um enfoque mais detalhado é dado à análise emergética, ferramenta metodológica que fundamentou os artigos dos capítulos 5 e 6. Apesar desta metodologia também ser descrita dentro dos respectivos materiais e métodos propostos pelos periódicos internacionais, esta fica restrita a poucos caracteres, sendo necessário um aprofundamento dos memoriais de cálculo, bem como as demais fórmulas utilizadas.

O capítulo quatro é composto pelo artigo "*Insects as feed: species selection and their potential use in Brazilian poultry production*" submetido, e em fase de publicação, para o *World's Poultry Science Journal*. Este artigo fez parte da primeira etapa de pesquisa que buscou identificar a espécie de inseto que melhor se adapta ao propósito do estudo. Especificidades como o valor nutricional (proteico); características edafoclimáticas do Brasil; disponibilidade no uso de recursos, tanto naturais (água, terra, etc.) como da economia (eletricidade), para sua criação; capacidade de reciclagem de resíduos orgânicos; e as 5 características desejáveis propostas pela FAO para escolha da espécie de inseto para produção em escala industrial (VANTOMME et al. 2012), fundamentaram os debates que levaram à indicação das melhores espécies.

O quinto capítulo apresenta o artigo "*Emergy assessment of conventional poultry production system in Brazil*" formatado e submetido ao *Journal of Cleaner Production*. A análise emergética de uma propriedade hipotética de avicultura de corte em Santa Catarina foi fundamental nessa etapa da pesquisa para embasar futuros debates comparativos quanto ao uso alternativo da fonte proteica de insetos. Da mesma forma, a análise emergética proporcionou reflexões referentes a renovabilidade e sustentabilidade de outros insumos envolvidos neste sistema de produção ou mesmo a comparação com outros sistemas de produção de frango no mundo.

O capítulo seis apresenta o artigo “*Insect as feed: an emergy assessment of insect meal as a sustainable protein source for the Brazilian poultry industry*” que está em fase de submissão ao Journal of Industrial Ecology. O referido artigo visou responder o problema de pesquisa da tese, assim como apresenta dados inéditos de pesquisa relativa à tecnologia de produção de farelo de insetos no Brasil. Além das análises emergéticas propostas, são apresentados laudos de análises bromatológicas do farelo de insetos (BSFL), composto orgânico e substrato em que as larvas foram criadas (resíduos de grãos). A parceria com a empresa BUG do Brasil possibilitou o acesso a estes materiais que, além de enriquecer a publicação, permitiram cálculos emergéticos mais precisos, principalmente, relacionados a transformidade dos produtos em função do valor energético das amostras.

O último e derradeiro capítulo apresenta as conclusões da pesquisa, assim como as limitações encontradas e sugestões de futuras pesquisas.

CAPÍTULO 2

CONTEXTUALIZAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo de contextualização teórica tem por finalidade fundamentar as discussões e análises propostas no decorrer da tese. Conceitos teóricos de bioeconomia, com foco voltado à ecologia industrial, e sua aplicabilidade junto ao objeto de pesquisa - produção e processamento de insetos para ração animal, são discutidos de forma inter-relacionada e apresentados em duas seções: bioeconomia e insetos como ração animal.

1. BIOECONOMIA

Na contramão das teorias clássica e neoclássica de economia debatidas e difundidas, até então, nasce uma inovadora vertente, na década de 1960 (maior parte formulada após este período), pelas mãos de Nicholas Georgescu-Roegen, a bioeconomia, a qual inseriu na análise do processo econômico dois fatores até então ignorados: a escassez de recursos e as instituições sociais (GOWDY & MESNER, 1998; MAYUMI, 2009).

O termo bioeconomia, propriamente dito, foi cunhado na década 1970 no intuito de se reportar à origem biológica do processo econômico e, portanto, destacar o problema da existência da humanidade como uma loja limitada de recursos acessíveis, localizados de forma irregular e desigualmente disponíveis (GOWDY & MESNER, 1998).

Levando em consideração o caráter sistêmico e aberto do processo econômico ante as análises de modelos fechados e baseados no diagrama circular produção–consumo, até então apresentados pelos economistas, Georgescu-Roegen (1965) fez uso das leis da termodinâmica, dentre elas a segunda lei – Lei da Entropia, para explicar a atividade econômica. Diversas características da termodinâmica como a irreversibilidade, as mudanças qualitativas, a verdadeira escassez e a indeterminabilidade, foram utilizadas pelo autor para compreensão e explicação do sistema econômico (GOWDY & MESNER, 1998).

Em sua obra “O decrescimento: entropia, ecologia e economia”, Georgescu-Roegen (2012) refere-se àquilo que entra no processo econômico, como os recursos naturais de valor, e aquilo que é rejeitado, como resíduos sem valor. Por meio da física, mais precisamente da termodinâmica, ele busca explicar a diferença qualitativa que ocorre no processo econômico provocado pela transformação da matéria-energia absorvida de um estado de baixa entropia a outro estado de alta entropia a ser liberado pelo sistema.

A crítica de Georgescu-Roegen, apresentada no livro-coletânea *Analytical Economics*, em 1966, refere-se ao fato que o processo econômico analisado pelos economistas neoclássicos se baseia nas leis da mecânica que desconsideram lugar e momento histórico, porém na sua ótica a economia pode ser mais bem compreendida e explicada pelas leis da termodinâmica, onde o processo de troca de energia e matéria dá-se de forma irreversível e sempre tendendo a uma entropia máxima.

Fazendo uso dos estudos e conhecimentos compilados por Rudolf Clausius (1822-1888), formalizador das duas primeiras leis da termodinâmica e introdutor da noção de entropia, e a partir de estudos de Sadi Carnot sobre potência motriz do calor em motores de combustão, Georgescu-Roegen, pela primeira, vez aproxima estes conhecimentos teóricos do mundo das ciências econômicas confrontando ideias e validando a teoria frente a um novo objeto: a economia.

A 1ª Lei da termodinâmica afirma que a quantidade de energia num sistema isolado é constante, enquanto a 2ª Lei refere-se à qualidade da energia num sistema isolado que tende à degradação, tornando-se indisponível para a realização de trabalho (CECHIN, 2008). Conceitos como energia livre ou utilizável e energia presa ou não utilizável tornam-se fundamentais na definição da unidade de medida entropia, sendo esta, a medida de energia não utilizável num sistema termodinâmico.

A energia livre é aquela sobre a qual o homem pode exercer um domínio quase completo, porém, se degrada contínua e irreversivelmente em energia presa podendo, desta transformação, gerar calor e conseqüentemente trabalho. Este processo de transformação da energia livre utilizável em energia presa não utilizável dá origem à Lei da Entropia que estipula que, em um sistema fechado, a energia presa aumenta constantemente e a ordem desse sistema se transforma continuamente em desordem (GEORGESCU-ROEGEN, 2012).

Neste contexto, o homem, assim como todo organismo vivo, faz uso dos recursos ambientais disponíveis (de baixa entropia) transformando-os em produtos de valor econômico (de maior entropia) e resíduos. Segundo expõe Georgescu-Roegen (2012), “o custo de todo empreendimento biológico ou econômico é sempre maior do que o produto. Em termos de entropia tais atividades se traduzem necessariamente por um déficit”. Esta necessidade de utilização dos recursos aliada à escassez destas fontes de baixa entropia vem obrigando o homem a descobrir meios e tecnologias que lhe permitam captar melhor esta baixa entropia.

Esta natureza entrópica do processo econômico e da própria manutenção da vida nos leva a refletir sobre as fontes de recursos de baixa entropia disponíveis no ambiente e a busca pela melhor forma de aproveitamento destes recursos. A energia livre disponível advém de duas

fontes distintas: os minérios, sob a forma de estoques e com potencial de extração quase a totalidade sob o domínio do homem, portanto, com característica de finitude; e a radiação solar, considerada um fluxo de energia a ser interceptada pela terra para geração da vida (fotossíntese), porém de controle ainda limitado pelo homem tanto para uso atual como para uso futuro.

A inevitabilidade e irreversibilidade destes processos, tendendo sempre a uma entropia máxima do universo, alertam para reflexões acerca das escolhas e investimentos tecnológicos e científicos das ciências que lidam diretamente com o uso destes recursos, como é o caso do agronegócio.

O fluxo de energia solar aliado ao uso do recurso terra e seus estoques minerais determinam tanto a produção de plantas como de animais, dependentes diretos das mesmas como alimento. A eficiência de utilização destes recursos naturais pelas diferentes espécies de plantas e animais deve ser um determinante na escolha das atividades agropecuárias na busca por processos menos entrópicos.

Outro ponto importante levantado por Georgescu-Roegen, além da escassez dos recursos de baixa entropia, diz respeito à geração de resíduos resultantes dos processos biológicos e econômicos. Atualmente, algumas atividades econômicas no mundo deixaram de ser praticadas não necessariamente pela finitude dos recursos, já percebida, mas sim pelo excessivo volume de resíduos gerados. Os relatórios de aquecimento global, mensuração da eutrofização de rios, contaminações de lençóis freáticos, dentre outros passivos ambientais, vêm obrigando a sociedade e os gestores públicos a aumentar o rigor das legislações ambientais interferindo, assim, diretamente em questões sociais relacionadas à geração de empregos, desenvolvimento regional e sistema econômico como um todo.

O tema reciclagem também foi contemplado na obra de Georgescu-Roegen como forma de compreender o sistema econômico por meio da termodinâmica. Diferentemente do proposto por Odum (1971), que considerava somente o excedente energético como critério de determinação da eficiência produtiva, reciclando toda a matéria como num ecossistema, Georgescu-Roegen propõe que, além do excedente energético, o processo econômico também dissipa matéria (CECHIN, 2008).

A partir da criação da 4ª Lei da Termodinâmica, muito contestada quanto à sua aplicabilidade e necessidade de criação, Georgescu-Roegen diferencia matéria utilizável (num estado em que pode sofrer manipulações físico-químicas) e matéria não utilizável (representada pelas partículas de matéria que se encontram dissipadas, sem possibilidade de reunirem-se em matéria utilizável).

Nas palavras do próprio autor:

... a análise da degradação irreversível da matéria conduz a uma dualidade de leis que concernem, de um lado, a energia, do outro, a matéria.

Para energia temos:

- I. Nenhum trabalho mecânico pode ser obtido sem gasto de energia.
- II. Nenhum trabalho pode ser obtido realmente sem que uma quantidade de energia utilizável seja desperdiçada em energia não utilizável.
- III. Nenhum sistema real pode ser completamente purificado de energia não utilizável.

Para a matéria temos:

- I. Nenhum trabalho pode ser obtido sem que se utilize matéria.
- II. Nenhum trabalho pode ser obtido sem que alguma matéria utilizável se degrade em matéria não utilizável.
- III. Nenhuma substância pode ser completamente purificada de seus elementos contaminantes.

(GEORGESCU-ROEGEN, 2012, p.170).

Independente da fonte de energia utilizada não se pode ignorar a depleção dos depósitos terrestres de materiais disponíveis causada pelos processos produtivos. Considerando o planeta como um sistema fechado em que não entra matéria (apenas energia) no longuíssimo prazo, em função da dissipação material e do declínio da qualidade no uso dos recursos naturais, alguns elementos materiais se tornarão mais críticos que a energia (GEORGESCU-ROEGEN, 1979).

A matéria utilizável dentro dos sistemas fechados analisados pela termodinâmica possui papel fundamental ao rarefazer-se constantemente gerando energia, porém o processo inverso, exclusivamente energia gerando matéria, é considerado uma reação impossível. A ideia de reciclagem completa proposta por ecologistas e contestada por Georgescu-Roegen (2012) refere-se à necessidade de tempo para a reversibilidade que seria praticamente infinita, tornando o tema da reciclagem completa, uma perigosa miragem.

No livro *“The Entropy Law and the Economic Process”*, Georgescu-Roegen (1971) relata a importância da matéria mais que a energia diferenciando os fluxos, fundos e estoques disponíveis em um sistema que não troca matéria com o ambiente, somente energia (subsistema não aberto). Os fundos são os agentes produtivos que entram e saem do processo de maneira inalterada (ex. trabalho); já os fluxos são alterados pelos fundos (agentes) ao adentrar o processo produtivo gerando os produtos sendo o objeto de investigação econômica (ex. energia solar); os estoques são um tipo de entrada produtiva que pode gerar fluxos (ex. recursos minerais) (GOWDY & MESNER, 1998). Em suma, os fundos são os “agentes de produção” que transformam os fluxos de recursos naturais em fluxos de produtos de valor econômico (DALY, 1995).

O legado de Georgescu-Roegen, apesar de bastante ignorado pelo grande público, situa-se nas origens históricas da epistemologia das esferas interdisciplinares inovadoras, como a

economia ecológica ou a ecologia industrial, oferecendo uma demonstração clara que não é mais possível tratar de “crescimento durável” ou “estado estacionário”. A sobrevivência da humanidade na Biosfera do planeta Terra clama por um decrescimento (GRINEVALD & RENS, 2012).

Georgescu-Roegen não ignorava a importância da tecnologia, só não admitia a visão de que ela permite substituir recursos naturais por capital construído. E muito menos admitia modelos que consideram o sistema econômico como um moto-perpétuo, em que não há necessidade de entrada de energia nem de matéria (CECHIN, 2008).

Considerando as ideias de Georgescu-Roegen, porém numa perspectiva mais atual e por meio de um estudo exploratório sobre pesquisas científicas envolvendo bioeconomia, Buge et al. (2016) propõem uma distinção entre três tipos de visão quando se aborda termo: i) visão da biotecnologia; ii) visão dos recursos biológicos e, iii) visão da bio-ecologia. As duas primeiras visões são influenciadas pela perspectiva técnica e são focadas na tecnologia e P&D, já a última destaca a importância dos processos ecológicos a fim de otimizar o uso de energia e nutrientes. Na Tabela 1 são descritas as características-chave de cada visão, permitindo identificar a visão de recurso biológico e a visão de bio-ecologia como embasamento para as discussões do objeto e metodologia da presente tese, respectivamente.

Tabela 1. Características-chave das visões de bioeconomia

	Visão da Biotecnologia	Visão dos Recursos biológicos	Visão da Bio-ecologia
Propósitos e objetivos	Crescimento econômico e criação de trabalho	Crescimento econômico e sustentabilidade	Sustentabilidade, biodiversidade, conservação dos ecossistemas, evitar a degradação do solo
Criação de valor	Aplicação da biotecnologia, comercialização da pesquisa & tecnologia	Conversão e modernização de bio-recursos (orientados para o processo)	Desenvolvimento de sistemas de produção integrados e produtos de alta qualidade com identidade territorial
Drivers e mediadores da inovação	P&D, patentes, fundações e conselhos de pesquisa	Interdisciplinaridade, otimização do uso da terra, inclusão da degradação da terra na produção de biocombustíveis, uso e disponibilidade de bio-recursos, gestão de resíduos, engenharia, ciência e mercado (modos de	Identificação de práticas orgânicas e agroecológicas favoráveis, ética, risco, sustentabilidade transdisciplinar, interações ecológicas, uso reuso e reciclagem de resíduos, uso da terra, modos de produção circular e autossustentados.

	produção interativos e em rede)		
Foco espacial	Clusters globais/ Regiões centrais	Rural/Regiões periféricas	Rural/ Regiões periféricas

Fonte: Adaptado de BUGE et al. (2016).

A visão da bioeconomia baseada no recurso biológico relaciona a busca por crescimento econômico aliada à sustentabilidade ambiental (LEVIDOW et al., 2013). No tocante à criação de valor esta visão destaca o processamento e conversão de fontes biológicas em novos produtos, sendo a gestão de resíduos uma das principais áreas abordadas. Esforços na busca de tecnologias e recursos que permitam maximizar a eficiência de uso da biomassa estão entre as principais discussões (KEEGAN et al., 2013).

Em termos de foco espacial deste tipo de pesquisa, a visão de bioeconomia voltada aos recursos biológicos enfatiza o potencial de estimular o desenvolvimento rural por meio da produção de novos bio-produtos o que promove o desenvolvimento regional por meio da diversificação e maior agregação de valor aos produtos (HORLINGS & MARSDEN, 2014).

Já a visão de bioeconomia baseada em bio-ecologia preocupa-se mais com discussões voltadas à sustentabilidade deixando em segundo plano temas como crescimento econômico ou geração de emprego e renda. Quanto à criação de valor, esta visão enfatiza em suas discussões e análises a promoção da biodiversidade, conservação de ecossistemas, promoção de serviços ecossistêmicos e prevenção de degradação de solo e outros recursos naturais (LEVIDOW et al. 2013). O uso de resíduos biológicos tanto de produção animal como humana são explorados nestes debates trazendo à discussão sistemas circulares ou dínssustentáveis, onde há pouca ou nenhuma inserção de recursos externos. Em termos de foco espacial esta visão também considera as oportunidades para desenvolvimento do meio rural e da região assim como a visão baseada em recursos biológicos o que se alinha com a busca pela sustentabilidade no modelo bioeconomico proposto.

Segundo as palavras de Buge et al. (2016), “a noção de bioeconomia é multifacetada: na amplitude, por exemplo, em termos de origens e setores representados; e em profundidade, isto é, em termos de razões, visões de valores, direção e condutores”. “A bioeconomia é um termo amplo e profundo que abrange muitos setores e significados ...permitindo aplicar biotecnologia a bio-recursos a fim de colher novos produtos... da mesma forma que permite uma melhor compreensão dos ecossistemas em busca de soluções sustentáveis e conhecimentos que o permitam”.

Aproximando a teoria proposta por Georgescu-Roegen ao presente estudo, a produção de proteínas oriundas da criação de insetos para uso na dieta de aves de corte representa uma forma de aproveitamento desta energia livre. Os grãos normalmente utilizados no arraçamento de frangos de corte possuem um potencial energético que não pode ser totalmente aproveitado pelo animal, em função da capacidade de conversão alimentar de cada espécie (MOTTET et al., 2017), sendo liberado no ambiente sob a forma de resíduos de menor valor energético (dejetos). Este subproduto, com todas suas limitações de ordem ambiental e alto valor entrópico, ao ser depositado no ambiente ainda possui um valor energético livre (utilizável) que pode ser melhor aproveitado por outros seres vivos antes de atingir sua entropia máxima (energia não utilizável).

Os avanços tecnológicos e a pesquisa científica demonstram que as larvas de alguns insetos, como moscas, possuem a capacidade de transformar a biomassa presente nos resíduos orgânicos de dejetos em massa corporal, otimizando o aproveitamento da energia disponível neste substrato e gerando um conteúdo altamente proteico que, ao ser processado, originará o farelo de insetos para uso na ração animal e um composto orgânico que pode ser aproveitado como biofertilizante (NGUYEN et al., 2015; SALOMONE et al., 2017)

Considerando que as aves não possuem esta capacidade de conversão do resíduo orgânico diretamente, a criação de insetos mostra-se como uma alternativa viável ao melhor aproveitamento energético da ração. Seguindo a lógica proposta pela teoria bioeconômica, sempre restarão resíduos do processo produtivo de aves de corte, independente da fonte proteica da dieta, porém, a partir da inserção das larvas de insetos no processamento destes dejetos, maior retorno produtivo será obtido com uma menor geração de resíduos de alta entropia.

Diferentes análises bioeconômicas como exergia e emergia podem ser propostas para verificação do conteúdo energético destes produtos e processos, a fim de mensurar os impactos ambientais e contribuições bioeconômicas da inserção destas tecnologias (SCIUBBA & ULGIATI, 2005; ROMERO & LINARES, 2014).

Com a tecnologia atual, a reciclagem de materiais está muito longe de ser completa, sendo materiais valiosos constantemente dissipados sob formas que não podem ser reutilizadas. Para a reciclagem total da matéria num sistema fechado, seria necessário não apenas energia quase infinita, mas também tempo infinito (GEORGESCU-ROEGEN, 2012).

Apesar desta constatação, devem-se considerar as diversas formas propostas pela inovação tecnológica no sentido de melhorar o aproveitamento dos recursos a partir do melhor uso da energia livre. A irreversibilidade e os resíduos finais de matéria são inegáveis dentro do sistema. Porém, a qualidade dos fundos (agentes) na busca de meios que melhor utilizem os

fluxos (inserindo menos elementos de baixa entropia como a energia solar) para geração de alimentos no processo econômico, fundamental à manutenção das espécies, é o grande desafio para o prolongamento do prazo deste processo entrópico e irreversível que é a vida.

1.1 ECOLOGIA INDUSTRIAL

Estamos vivendo, atualmente, o chamado período Antropoceno onde a humanidade e as atividades humanas agem como forças geofísicas globais capazes de modificar o ambiente (STEFFEN et al., 2007). Anteriormente a este período, a biomassa, juntamente com a turfa, supriam suficientemente as demandas de energia do homem não havendo necessidade de qualquer consumo de combustíveis fósseis (exceto carvão), urânio ou calor geotérmico (LIAO et al., 2012). Com a revolução industrial e as mudanças de padrões de consumo da humanidade houve uma troca gradual de fontes de energia renováveis por não renováveis (combustíveis fósseis) com todas as consequências ambientais advindas deste *trade off*. Apesar de mais recentemente países desenvolvidos investirem maciçamente em fontes renováveis como energia solar, energia eólica e utilização de biomassas renováveis, estas ainda respondem por uma pequena fração da produção de energia mundial, mas com potencial de atingir 39% em 2050 (BHATTACHARYA et al., 2016).

Tradicionalmente os estudos relacionados ao ambiente são objeto da disciplina de ecologia que investiga os fluxos de energia e matéria da ecosfera. Já a disciplina de economia estuda tais fluxos na antroposfera, onde homem e ambiente já interagem há milhões de anos de maneira cada vez mais intensa e interdependente. Para avaliar os impactos desta relação ambiente – homem surgem, nas últimas décadas, áreas de pesquisa interdisciplinares que relacionam aspectos sociais, ecológicos e econômicos em escalas multiespaciais e multitemporais (CLARK, 2010) como a ecologia industrial (LIAO et al., 2012).

Podemos entender a ecologia industrial como uma abordagem acadêmico-científica onde uma visão ecossistêmica global do modo de produção industrial visa analisar e reduzir o impacto ecológico, minimizando o caráter entrópico dos fluxos de energia e matérias que atravessam o “metabolismo industrial” ligando o sistema econômico à Terra (GRINEVALD & RENS, 2012). Este campo científico emergiu nas últimas décadas focado nas interações entre a sociedade industrial e o seu ambiente, considerando as sociedades industriais como sistemas (ALLENBY & GRAEDEL, 1993).

A ecologia industrial surgiu no momento em que as abordagens tradicionais relacionadas a despoluição (*end-of-pipe*) já não eram mais suficientes, fazendo com que as

companhias passassem a investir em estratégias de prevenção a poluição. Assim como ocorre nos processos biológicos os processos industriais inevitavelmente são geradores de resíduos. Porém, a abordagem da ecologia industrial busca, através da prevenção a poluição ou da produção mais limpa, agregar valor aos subprodutos de processos industriais servindo, estes, de matéria prima para novos processamentos. A matéria e a energia remanescentes podem, então, ser melhor aproveitadas antes do descarte sob a forma de resíduo. A integração das abordagens de *end-of-pipe* e prevenção à poluição são o objeto da ecologia industrial.

Há uma necessidade de se desmitificar a ideia que na natureza não há resíduos, ou que devemos mimetizar a natureza como solução ao desenvolvimento industrial. A perspectiva da ecologia industrial nos leva a buscar inspiração na biosfera e a desenhar estruturas humanas compatíveis com seu funcionamento normal o que não significa, necessariamente, desenhar estruturas e objetos com *design* orgânico utilizando somente materiais naturais (ERKMAN, 1997).

Compreender a natureza, entender seus fluxos, produtos e resíduos é uma tarefa muito mais elaborada que simplesmente copiá-la. A ecologia industrial por meio das abordagens da ecologia, da gestão industrial, da economia e sociologia (SEURING, 2004, ANDREWS, 2000) visa cumprir esta tarefa. Em função destas áreas da ciência possuírem propósitos, escopo e *frameworks* extremamente distintos, a avaliação das vantagens e desvantagens dos *loops* de reciclagem propostos torna-se uma tarefa difícil (FERNANDEZ-MENA et al., 2016).

A ecologia industrial é uma atividade antropogênica com foco na humanidade e nas atividades de produção e consumo que repercute, de maneira significativa, no ambiente. Segundo Liao et al. (2012), a ecologia industrial é esférica o que inclui a investigação de parte da ecosfera que é modificada pelo homem servindo-lhe como fonte de recursos, da mesma forma que “absorve” as emissões das atividades por ele geradas. Esta ciência tem por finalidade: i) descrever os fluxos de energia e materiais assim como as respectivas conversões ocorridas na antroposfera; ii) descrever os impactos da antroposfera na ecosfera; e, iii) descrever a influência de outros aspectos sociais na antroposfera (Figura 1).



Figura 1. Sistemas homem-ambiente e ecologia industrial.

Fonte: adaptado de LIAO et al. (2012).

Neste contexto, uma abordagem sistêmica é necessária para visualizar as conexões entre o sistema antropológico, o biológico e o ambiente. Desta forma, pode-se dizer que o principal objetivo da Ecologia Industrial é transformar o caráter linear do sistema industrial para um sistema cíclico, em que matérias primas, energia e resíduos sejam sempre reutilizados e os resíduos que não pudessem ser suprimidos no fim de todo o ciclo, seriam antes do descarte tornados o mais compatível com o ambiente (GIANETTI et al., 2003).

Segundo Gianetti et al. (2003), a ecologia industrial implica em: (1) aplicar a teoria dos sistemas e a termodinâmica aos sistemas industriais; (2) definir os limites do sistema incorporando o sistema natural; e, (3) otimizar o sistema. Ela parte do princípio que é possível organizar todo o fluxo de matéria e energia que circula no sistema industrial, de maneira a torná-lo um circuito quase fechado.

A termodinâmica é um ramo da ciência que estuda a energia e suas transformações. Geralmente ela está associada ao calor, mas seu objeto vai mais além, investiga as diferentes formas de energia. Os princípios da termodinâmica estão estabelecidos e fornecem fundamentos para a compreensão dos sistemas físicos, químicos e biológicos.

Liao et al. (2012), discutindo a aplicação da análise termodinâmica à sistemas homem-ambiente com foco na ecologia industrial, afirmam que especialmente a primeira lei da termodinâmica (referente a conservação de energia) e a segunda lei (referente a mudanças na qualidade da energia) podem fundamentar o debate. Os métodos mais comuns de análise termodinâmica são análise de energia (EA), baseada na primeira lei; e análise de entropia (EnA), análise exergética (ExA) e análise emergética (EmA), baseadas na segunda lei. Apesar

de todos métodos compartilharem da mesma fonte eles são baseados em teorias distintas o que torna difícil, e algumas vezes impossível, comparar seus resultados.

Para tanto, é fundamental elegermos um método capaz de responder às questões objeto da pesquisa. A análise emergética, baseada na teoria de Howard Odum, possui suas raízes na ecologia dos sistemas e considera a qualidade da energia envolvida no processo como o diferencial da análise. O valor de um bem (natural ou da economia) depende da quantidade e qualidade da energia investida para fazê-lo e a medida desta qualidade foi definida como transformidade – quantidade de energia de um tipo que é necessária direta ou indiretamente para fazer um produto ou suportar um fluxo (ODUM, 1996).

Sciuba & Ulgiati (2005) afirmam que Odum, ao introduzir o conceito de energia, redirecionou o foco que antes estava na relação homem e fontes fósseis de energia para a relação entre sociedade humana e ambiente. Eles pontuam que o fluxo de energia de um determinado produto ou processo é, por definição, a medida de trabalho de auto-organização do planeta para fazê-lo. A natureza fornece recursos por meio da ciclagem e concentração de matéria interagindo e convergindo padrões. Porém, algumas fontes requerem mais trabalho ambiental que outras, resultando em maiores custos ambientais que não podem ser excluídos dos cálculos avaliativos. O conteúdo de energia deve ser assumido como uma medida de sustentabilidade e/ou pressão do sistema sobre o ambiente. O aprofundamento desta metodologia eleita para avaliar o objeto da presente tese encontra-se descrito no próximo capítulo.

2. INSETOS COMO RAÇÃO ANIMAL

A utilização de insetos para a nutrição de diversas espécies animais, incluindo o homem, vem sendo alvo de recentes discussões no âmbito mundial envolvendo instituições como a *Food and Agriculture Organization of the United Nations* (FAO), governos de alguns países da Europa, Ásia e África como a Holanda, China, Lao e Ghana, organizações não governamentais (ONGs) voltadas à busca de alternativas para alimentar a população mundial e instituições privadas relacionadas à produção e comercialização de insetos para nutrição animal e humana.

Insetos possuem características que os tornam potenciais alternativas para o fornecimento de proteínas à humanidade e aos rebanhos. Ramos-Elorduy (2005) descreve sete características dos insetos que proporcionam esta capacidade:

- a) Alta riqueza de espécies, biodiversidade e curto ciclo de vida: a grande diversidade de espécies com seus requerimentos e características peculiares (tamanho, composição

e características estruturais), associadas ao reduzido tempo de vida e alta taxa de fecundidade, permitem a criação em larga escala;

- b) Abundância nos ecossistemas e diversidade de habitats: principalmente em regiões tropicais que favorecem o rápido desenvolvimento possibilitando a produção em maior escala e redução nos custos para a atividade;
- c) Potencial de redução de custos para a criação: o não requerimento de grandes investimentos em infraestrutura facilita a criação, porém medidas relacionadas à higiene são consideradas fundamentais e ainda desafios para o sucesso da atividade;
- d) Grande população e produção de biomassa: o curto tempo de vida e alta taxa de fecundação permite a criação de grandes populações gerando um conteúdo de biomassa capaz de suprir rebanhos comerciais de aves, suínos, peixes ou mesmo bovinos;
- e) Criação pode ser simples e controlada: diferentes escalas de produção e o fácil monitoramento, em função das reduzidas áreas possibilitam estas vantagens.
- f) Possui boa qualidade proteica: insetos possuem qualidade nutricional comparável a outras fontes vegetais, como grãos (ou mesmo animal);
- g) Eficiência na conversão alimentar: insetos possuem melhor conversão alimentar que a maioria dos animais podendo ser utilizados para minimizar custos e, simultaneamente, reduzir desperdícios.

Em um encontro técnico realizado pela FAO, em Roma, em 2012, definiram-se os principais desafios para o uso de insetos na ração animal em todo mundo, sendo estes considerados: i) escolha das espécies adequadas a cada local ou sistema produtivo; ii) encontrar substratos baratos para criação de insetos (se possível utilizando dejetos e resíduos orgânicos oriundos dos próprios sistemas produtivos e sendo assegurada a sanidade dos rebanhos); iii) controle de doenças e determinação dos procedimentos de saneamento; iv) produção e oferta constante de insetos de alta qualidade e garantia de qualidade; v) desenvolvimento de sistemas de produção inovadores e de baixo custo; vi) aumento dos sistemas de automatização e mecanização nas criações de insetos; vii) garantir o bem estar animal (questões éticas); viii) criação de regulamentos e padrões para a atividade; e, ix) elaboração de um código industrial de padrões e práticas (VANTOMME et al., 2012).

2.1 ESPÉCIES DE INSETOS

A escolha da espécie do inseto é a primeira preocupação no planejamento do uso desta fonte proteica como alternativa à produção animal. Deve-se levar em consideração nesta escolha a preferência por espécies locais a fim de reduzir os riscos tanto para o ambiente, ao provocar um desequilíbrio ecológico, como à própria criação, ao inserir espécies que possam não se adaptar às condições locais. Da mesma forma, questões relacionadas à viabilidade de criação, palatabilidade e demais características organolépticas ou nutricionais da ração, conforme a espécie animal a ser arraçoada, deve ser considerada na escolha (VANTOMME et al., 2012).

A seleção das espécies mais adequadas à criação deve ser baseada nas características de produção, teor de proteína e volume de biomassa requerido para a atividade a que se destinam. O custo dos alimentos destinados a estes insetos, sejam de origem vegetal ou mesmo resíduos orgânicos (dejetos), também são decisivos na escolha principalmente por interferir na qualidade da proteína a ser produzida (aminoácidos) (RUMPOLD e SCHLÜTER, 2013).

A grande diversidade de espécies de insetos nos países tropicais amplia o leque de escolhas entre as espécies consideradas comestíveis. No Brasil foram identificadas 23 espécies comestíveis (DEFOLIART, 1997), mas em países do continente Africano já foram identificadas de 246 (VAN HUIS, 2013) a 524 espécies comestíveis (RAMOS-ELORDUY, 1997).

A partir da identificação das espécies disponíveis no Brasil e da escolha para o presente estudo estar relacionada ao uso de inseto na ração de frangos de corte, buscou-se identificar, dentre as pesquisas mundiais relacionadas ao tema, quais espécies são consideradas viáveis, tanto do ponto de vista da produção animal (conversão alimentar, ganho de peso, digestibilidade e teor nutricional) quanto da viabilidade de criação em larga escala (escala industrial).

Segundo o relatório “*Assessing the Potential of Insects as Food and Feed in assuring Food Security*” (FAO, 2012), para uma produção de insetos ser considerada de escala industrial ela deve produzir, no mínimo, uma tonelada de insetos ao dia (especificando se o cálculo é com base na matéria seca ou *in natura*). As espécies mais adequadas à produção em escala industrial são aquelas que possuem: i) alta taxa intrínseca de aumento (ciclo de desenvolvimento curto, alta sobrevivência de imaturos e alta taxa de ovoposição); ii) alto potencial de aumento da biomassa/dia (ganho de peso diário); iii) alta taxa de conversão (kg de biomassa ganho/kg de alimento ingerido); iv) capacidade de viver em ambientes de alta densidade (kg biomassa/m²); e, v) baixa vulnerabilidade a doenças (resistência).

Considerando estas características, aliada ao foco da pesquisa e aos riscos inerentes à criação de uma única espécie, Vantomme et al. (2012) citam como espécies candidatas à criação em larga escala: i) *Black soldier fly* – BSF (*Hermetia illucens*) e ii) larva da farinha (*Tenebrio molitor*). Outras pesquisas relacionadas a alternativas à nutrição, especificamente de aves, apontam a pupa de bicho da seda (*Bombix mori*) na Índia (RAO, 1994) e larva de mosca doméstica criada em dejetos orgânicos (GULLAN & CRANSTON, 2005). Estes estudos demonstraram não haver diferença significativa referente à taxa de conversão alimentar dos frangos, taxa de ingestão do produto, ganho de peso, qualidade de carcaça, palatabilidade da carne e peso de carcaça, quando comparado o uso de insetos frente a rações a base de farelo de soja (NAKAGAKI & DEFOLIART, 1987; PRETORIUS, 2011; KHUSRO et al., 2012).

A característica de alta conversão alimentar de insetos os torna mais eficientes tanto no volume de biomassa produzido em relação ao volume ingerido (Tabela 2), quanto à produção de proteína (154 e 205g de proteína por kg de produto comestível em ninfas e grilos adultos e 200, 150 e 190g das carnes de frango, suínos e bovinos, respectivamente) (FINKE, 2002). Essa maior eficiência pode ser resultado do metabolismo energético destas espécies que, por serem poiquilotérmicos (sangue frio), não dispendem energia para manutenção e adaptação em diferentes temperaturas climáticas.

Tabela 2: Eficiência de produção de carnes convencionais e grilos

	Grilo	Aves	Suínos	Bovinos
Taxa de conversão alimentar (kg alimento/kg PV)	1,7	2,5	5	10
Porção comestível (%)	80	55	55	40
Alimento (kg/kg de comestível)	2,1	4,5	9,1	25

Fonte: adaptado de VAN HUIS, 2013.

As particularidades na escolha da espécie a ser estudada determinarão a magnitude da análise do impacto ambiental a ser avaliado. Quando se menciona a criação de larvas de mosca doméstica (*Musca domestica*), BSF (*Hermetica illucens*) e larva da farinha (*Tenebrio molitor*) inserem-se na análise o aproveitamento de dejetos e resíduos orgânicos, que podem ser de origem animal, vegetal ou mesmo humana, como substrato para criação destes insetos. Este sistema de produção agrega valor a produtos considerados poluidores, transformando-os em fertilizantes e proteína (VELDKAMP et al., 2012) e mitigando as emissões de gases do efeito estufa (OONINCX et al., 2010).

Já a escolha por pupa de bicho da seda como fonte proteica na dieta de frangos insere na análise questões referentes ao uso concorrente deste inseto como nutriente no âmbito da cadeia produtiva do bicho da seda, tendo em vista que a finalidade primária deste inseto é a produção de fibra.

Uma variedade de insetos já vem sendo criada comercialmente na Holanda, porém em pequenas e médias escalas, tendo como principais destinações *petshops* e zoológicos. Dentre as espécies criadas estão: grilos (*Acheta gryllus*, *Gryllus sigillatus*, *Gryllus campestris*), lagartas (*Locusta migratoria*), moscas (*Drosophila spp.*) e baratas (*Shelfordella tarara* e *Blaptica dúbia*) (VELDKAMP et al., 2012).

Questões ambientais prementes no Brasil, como o excesso de dejetos resultantes da atividade da avicultura, vêm sendo foco de debates e preocupações de instituições públicas e privadas. Consequências relacionadas à saúde pública nas regiões produtoras ou mesmo questões sociais resultantes da inviabilização da atividade pela falta de alternativas mitigadoras, com consequente redução da renda e/ou desenvolvimento regional, impactam na sustentabilidade da atividade. Identificar alternativas que viabilizem ambientalmente a atividade sem onerar os custos de produção, ou ainda, com possibilidade de gerar renda ao produtor é o grande desafio da pesquisa.

Dentre as espécies avaliadas na pesquisa elegeu-se a espécie de larva de mosca *Black Soldier Fly* (*Hermetia illucens*) como substrato para a produção de farinha de insetos a ser utilizada na análise da tese. No artigo científico, apresentado no Capítulo 4, debatem-se as vantagens e desvantagens desta espécie que, juntamente com a larva de mosca doméstica (*Musca domestica*), foram as opções que melhor se ajustaram à finalidade proposta, tanto no debate ambiental como nutricional (valor proteico). As larvas de mosca doméstica foram preteridas na análise em função de serem vetores de doenças ao homem, diferentemente da mosca BSF que, por não se alimentar na fase adulta, somente na fase larval, não tem nenhum contato com hábitos humanos (TOMBERLIN et al., 2009).

O sistema produtivo de criação destes insetos baseia-se na utilização de dejetos de aves como substrato (alimento) para crescimento. O grande volume de dejetos gerados na avicultura é aproveitado pelas larvas no seu crescimento, reduzindo a quantidade e, conseqüentemente, seu impacto ambiental. Outra forma de agregar valor a este produto biológico de descarte é pelo uso do conteúdo remanescente como biofertilizante (DIENNER et al., 2011; GREEN & POPA, 2012) para áreas agrícolas (Figura 2).

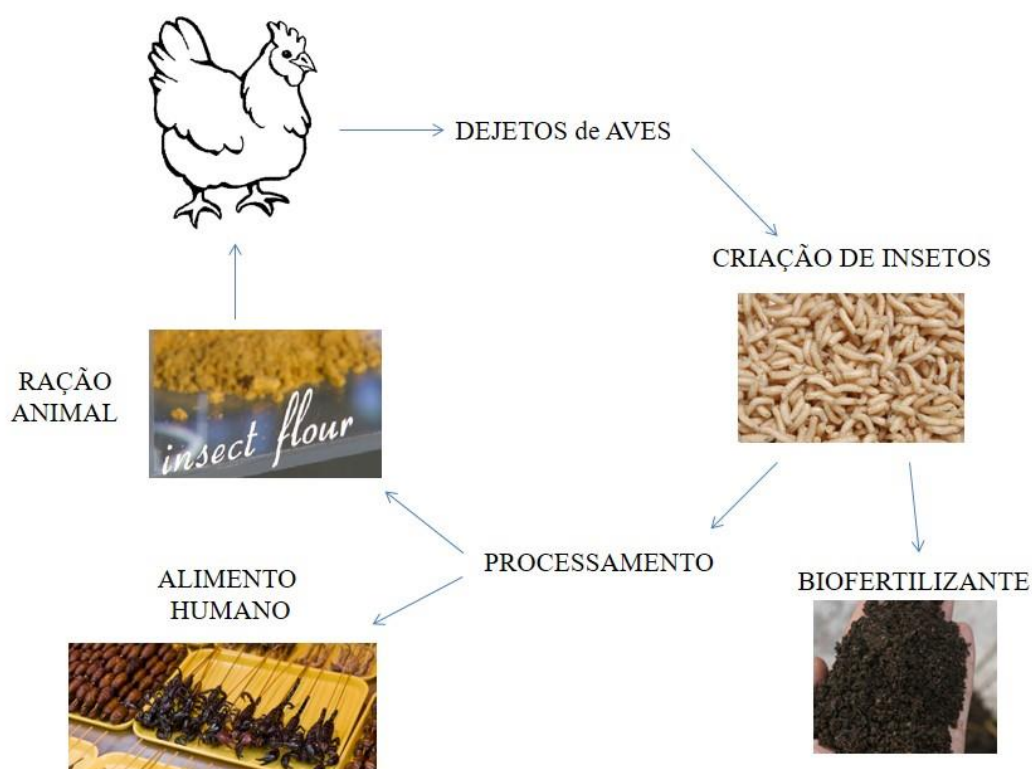


Figura 2: Sistema de produção de insetos para avicultura de corte.

2.2 VALOR NUTRICIONAL E PROCESSAMENTO

Os principais componentes estruturais dos insetos são água, proteína e lipídios, seguidos, em menor quantidade, por quitina, um polissacarídeo formador do exoesqueleto destes insetos. A quitina e seus meios de extração e processamento são muito estudados, já que este componente interfere na ingestão tanto de rações que a contenham como no consumo do inseto inteiro (VELDKAMP et al., 2012).

Insetos podem fazer parte da ração por meio do processamento do animal inteiro, porém, atualmente, buscam-se técnicas que permitam o fracionamento destes para uma análise mais precisa do conteúdo nutricional (tipos de aminoácidos, minerais e vitaminas) e sua destinação mais específica nas dietas. A Figura 3 esquematiza os possíveis processamentos e apresenta os fracionamentos que originarão os diferentes subprodutos.

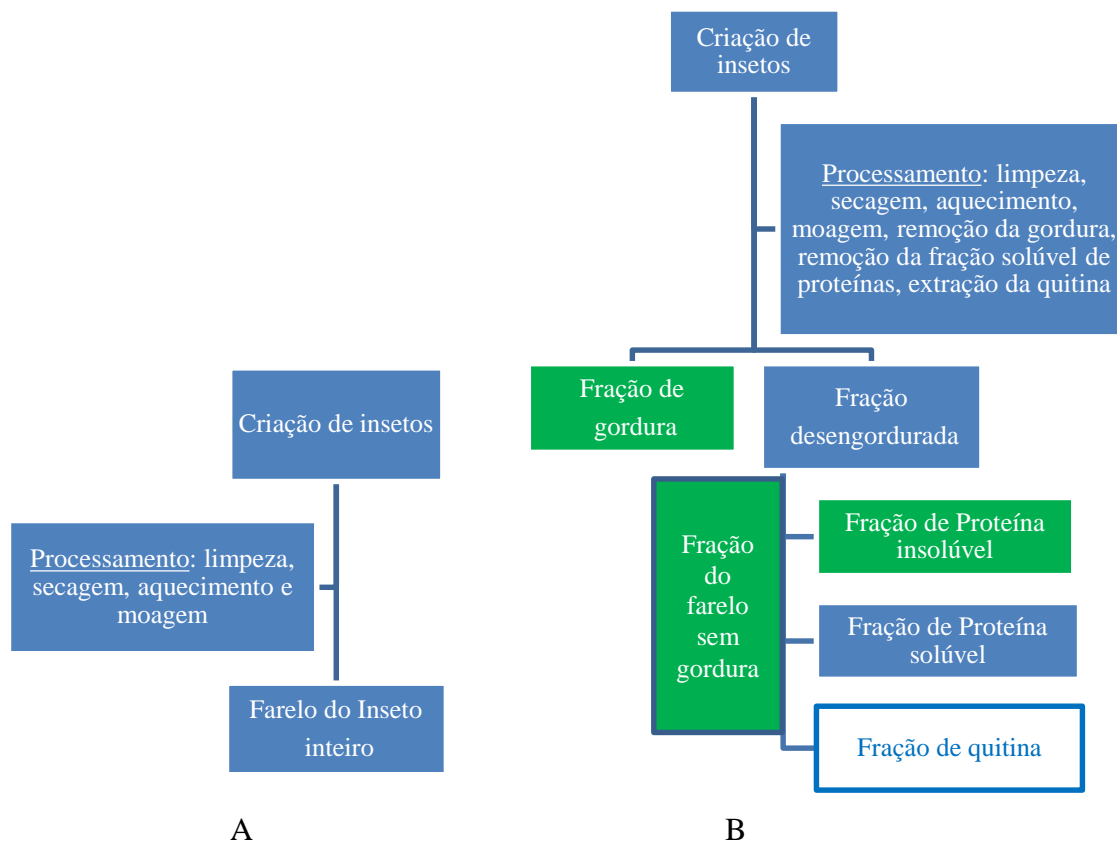


Figura 3. Possibilidades de processamento para insetos: A) Processamento do inseto inteiro; B) Processamento fracionado. Caixas em verde significam potenciais usos na indústria de ração animal.

Fonte: adaptado de VELDKAMP et al. (2012).

No intuito de aumentar o teor proteico das rações animal diversas técnicas de extração da fração lipídica podem ser empregadas como o uso de solventes orgânicos ou por meio de técnicas alternativas já utilizadas em produtos de origem animal (indústria de peixes - cozimento e pressão) (VELDKAMP et al., 2012) e de origem vegetal, como o farelo de soja (prensa mecânica) (RAMALHO & SUARES, 2013).

A quitina é outro componente que vem despertando o interesse de pesquisadores e da indústria em função de seu efeito positivo sobre o funcionamento do sistema imunológico de aves alimentadas com insetos (LEE et al., 2008). Novas pesquisas vêm buscando demonstrar que a inserção de insetos inteiros na dieta de aves poderá resultar na redução do uso de antibióticos na indústria avícola (VELDKAMP et al., 2012).

A composição química e o valor nutritivo das espécies de insetos vêm sendo investigada em diversas partes do mundo e os resultados demonstram concordância referente aos elevados valores proteicos (DEFOLIART, 1997; RAMOS-ELORDUY, 2005; WANG et al., 2007; VAN

HUIS et al., 2013; VAN HUIS, 2015). Porém, este valor nutricional é altamente variável, não somente pela diversidade de espécies de insetos mas, também, em função do seu estágio de metamorfose, da alimentação fornecida ou disponível na natureza (RAMOS-ELORDUY et al., 2002), do modo de processamento dos insetos (desidratado, fervido ou frito), ou mesmo o método de análise empregado (RUMPOLD & SCHLÜTER, 2013).

Além dos altos valores proteicos (SCHABEL, 2010; VELDKAMP et al., 2012), insetos apresentam teor de gordura também variável, sendo os índices mais altos encontrados em cupins e larvas de caruncho de palmeira (BUKKENS, 1997) constituindo-se, em geral, como boa fonte de ácidos graxos essenciais poli-insaturados e fontes significativas de ferro, zinco e vitamina A.

O conteúdo lipídico do corpo dos insetos, quando previamente extraído no processamento, permite um uso alternativo ou complementar à ração, conforme demonstrado em pesquisas de viabilidade na produção de biocombustíveis (LI et al., 2011).

No entanto, a biodisponibilidade de minerais, em especial de ferro, ainda precisa ser demonstrada. Mais pesquisas são necessárias também em alimentos, normas de higiene e alergias causadas por insetos (VAN HUIS, 2013). Esforços por parte da FAO e da *International Network of Food Data Systems* (INFOODS), rede que visa reunir dados de pesquisas sobre valores nutricionais de alimentos de todo planeta, dentre eles insetos, resultaram, recentemente, em um relatório voltado à biodiversidade como forma de alimento (VAN HUIS et al., 2013).

A inserção de insetos na ração animal é um tema recente de pesquisa e faz parte da agenda da *International Feed Industry Federation* (IFIF) e da FAO, a fim de promover ações e pesquisas na busca de fontes proteicas alternativas, sustentáveis e seguras para alimentação animal. Outros projetos como o PROTeINSECT, coordenado pelo *Food and Environmental Research Agency* (FERA), do Reino Unido, vem sendo desenvolvidos na União Européia confluindo conhecimentos na área, por meio de parcerias com entidades da China, África e Europa (PROTEINSECT, 2014).

2.3 SEGURANÇA ALIMENTAR

É consenso entre cientistas que muitos estudos ainda necessitam ser realizados, principalmente, voltados à segurança alimentar (metais pesados, alergenicos, contaminações, higiene e zoonoses) (VANTOMME et al., 2012; VAN HUIS, 2013; SALOMONE, 2016). Apesar de ser um alimento que nutre humanos e animais, das mais ancestrais culturas do

mundo, predominantemente em países tropicais (BODENHEIMER, 1951), a inserção de insetos na nutrição de rebanhos está dentre os temas considerados fronteirícios na ciência atual.

Somente após esta evolução nas pesquisas é que poderão ser determinados padrões nas etapas de produção e processamento, criação de legislações específicas, ações de marketing e conscientização dos diferentes elos da cadeia e das sociedades acerca do tema (KHUSRO et al., 2012; VANTOMME et al., 2012). Limitações, principalmente relacionadas ao aumento da escala de produção e o conseqüente alto custo, reduzem a competitividade desta fonte proteica. A alta demanda por mão de obra para a atividade ainda é um fator limitante que pode ser suplantado por meio da automação (OONINCX et al., 2010; VAN ZANTEN et al., 2015; SMETANA et al., 2016).

Algumas pesquisas têm associado o uso de insetos na alimentação humana ao desenvolvimento de doenças infecciosas, tóxicas ou como precursor de deficiências nutricionais. Atualmente, buscam-se técnicas relacionadas ao processamento, tal como aquecimento - que permite a inativação de microrganismos, exceto quando sob a forma de esporos; métodos de secagem e resfriamento, os quais têm se mostrado eficientes no processamento de lagartas contra fungos (VAN HUIS, 2013), como formas de viabilizar a produção desta fonte proteica. Apesar destes avanços, muito ainda tem que ser feito para garantir as quatro dimensões de segurança alimentar (disponibilidade, acesso, utilização e estabilidade) (VANTOMME et al., 2012).

Quanto ao risco de zoonoses acredita-se que, em função de os insetos serem taxonomicamente mais distantes de humanos que outras espécies de animais domésticos, a expectativa de desenvolvimento de infecções cruzadas seria muito baixa (VAN HUIS, 2013). Entretanto, na escolha da espécie de insetos deve-se considerar seu potencial enquanto vetor de zoonoses e outras enfermidades.

Questões relacionadas à proporção de proteínas de inseto a ser inserida nas dietas animal, técnicas de processamento, assim como níveis seguros relativos à presença de metais pesados ou pesticidas devem ser padronizados. Da mesma forma, a presença de alérgenos derivados de insetos devem ser testadas para evitar danos à saúde humana e à produção animal. As questões levantadas nesta sessão, apesar de fugirem ao escopo da presente pesquisa, não poderiam deixar de ser inseridas no debate ou mesmo mencionadas. Como a criação e o processamento de insetos para ração animal é uma inovação tecnológica, todos os pontos de análise devem ser investigados e ponderados por grupos interdisciplinares de pesquisa que vão desde áreas como a saúde pública, nutrição até engenharia de produção.

2.4 QUESTÕES AMBIENTAIS

Alinhada com os objetivos da presente pesquisa esta sessão discute, de maneira mais ampla, as questões ambientais que devem ser pontuadas na criação e processamento de insetos. A produção em escala industrial pode trazer benefícios significativos ao meio ambiente comparativamente a outros sistemas de produção animal. A eficiência de utilização do recurso água, a redução de odores oriundos de dejetos dos rebanhos, assim como a reduzida emissão de gases do efeito estufa são alguns dos benefícios gerados pela bio-decomposição de dejetos, enquanto substrato à criação de insetos.

Oonincx et al. (2010), em pesquisa visando avaliar os impactos na produção de gases do efeito estufa (GEE) por larvas de *Tenebrio molitor* quando comparado às demais fontes de proteína animal, demonstraram que insetos emitem menos (2-122g/kg ganho de massa) que bovinos (2850g/kg ganho de massa) e suínos (80-1130g/kg ganho de massa). Para tanto, os autores consideraram a produção entérica de CH₄, a taxa de reprodução e a eficiência de conversão alimentar, criando um índice – potencial para o aquecimento global (GWP) – a fim de comparar as espécies. Os autores verificaram, ainda, que o impacto ambiental da produção de larvas para cada kg de proteína comestível produzida (biomassa) foi menor que dos produtos animais oriundos de vacas de leite, suínos, aves e bovinos de corte.

Ao se analisar o impacto sobre o recurso terra, a produção de insetos também apresentou números menores por kg de proteína comestível que todas as outras espécies. O índice uso de energia (EU), diferentemente dos anteriores, apresentou-se acima das demais espécies, quando avaliado por kg de proteína comestível. Os autores argumentam que, em função dos insetos serem espécies poiquilotérmicas e dependerem de temperaturas adequadas para uma maior produção de biomassa, *inputs* energéticos foram agregados ao sistema produtivo.

A criação de insetos em escala comercial ainda é uma atividade recente, mas que pode ser otimizada tal qual a suinocultura e a avicultura vem sendo nas últimas décadas, por meio de avanços genéticos em conversão alimentar, automação de processos, descoberta dos melhores substratos (alimentos) para criação e, conseqüentemente, redução dos impactos ambientais (GEE), de uso da terra e energia (OONINCX et al., 2010).

Na busca por sistemas eficientes de produção a possibilidade de exploração da capacidade de conversão de resíduos orgânicos de origem animal, humana ou mesmo vegetal por espécies como as larvas de BSF e *Musca domestica* não pode ser desperdiçada. A agregação de valor a produtos hoje considerados poluidores como esterco, lixo ou alimentos descartados, transformando-os em biofertilizantes, proteínas (OCIO, VIÑARAS, REY, 1979; EL

BOUSHY,1991; VAN HUIS, 2013) e biocombustíveis (LI et al., 2011) é mais uma forma de se buscar uma produção sustentável de proteína para alimentar a humanidade.

A larva de BSF é uma espécie capaz de converter dejetos de bovinos, aves e suínos em massa corporal, reduzindo o volume (massa seca) de dejetos em até 58% (SHEPPARD et al., 1994), assim como fósforo (61 a 70%) e nitrogênio (30 a 50%) (MYERS et al., 2008). Outras espécies de larvas como a mosca doméstica e o *Tenebrio* possuem eficiência de conversão semelhante, sendo o maior nível proteico encontrado na pupa de mosca doméstica (65,7%) (PROTEINSECT, 2014).

Dentre os benefícios ambientais do processamento dos dejetos animal, a partir da inserção de larvas de insetos, também foram observadas a redução de odores dos sistemas de tratamento (NEWTON et al., 2005; VAN HUIS et al., 2013) e controle da mosca doméstica (SHEPPARD et al., 1994), importante vetor de patógenos para espécies como aves e suínos (AMARAL et al., 2006). Estudos relatam que as larvas de BSF possuem a capacidade de modificar a microflora de dejetos animal reduzindo, potencialmente, bactérias nocivas como *Escherichia coli* e *Salmonella enterica* (ERICKSON et al., 2004).

2.5 DESAFIOS INSTITUCIONAIS

Por não serem vertebrados, como a maioria das espécies animal domesticadas e criadas comercialmente, os insetos despertam certa dúvida quanto a sua classificação junto às normas e padrões alimentares. No caso da produção de alimentos destinados à nutrição animal, os insetos são inseridos na classificação como proteína animal processada - PAP (farinhas de origem animal). Já a gordura proveniente do processamento de insetos tem seu uso permitido na dieta de não ruminantes (PROTEINSECT, 2014).

Como o *Codex Alimentarius* (padrão de referência internacional para alimentação humana e animal organizado pela FAO e OMS) não estabelece padrões para a categoria insetos como forma de alimento, muito ainda vem sendo discutido e proposto localmente por meio de legislações específicas por países, como é o caso da União Europeia.

Países do continente europeu, como Reino Unido e Holanda, por meio de instituições privadas (PROTEINSECT) e públicas (FAO), vêm buscando dirimir tais limitações através de legislações e pesquisas específicas sobre o tema. Cada etapa da cadeia de produção e processamento de insetos deverá estar de acordo com uma série de requerimentos e regulamentações de diferentes instituições (higiene alimentar, análise de risco e controle de pontos críticos – HACCP, etc.).

A comissão de regulação da União Europeia (EU), por meio da norma 68 (EC, 2013) que regulamenta o catálogo de materiais para ração, não especifica insetos como dieta, apesar de listar como item “parte ou a íntegra de invertebrados terrestres”, sugerindo que esta categoria seria passível de compor a dieta animal. Já a diretiva 32 (EC, 2002) que versa sobre substâncias indesejáveis na ração animal (valores máximos permitidos em função de contaminantes como metais pesados), também regulamenta o setor, impedindo a presença de insetos na ração. Este conflito de normas gera incertezas que acabam por limitar investimentos e atrasar o desenvolvimento do setor.

Atualmente, na União Europeia o uso de insetos como fonte proteica para ração animal e posterior consumo humano, não é permitido em função da regulamentação EC 999/2001. Porém, proteína de insetos criados em substratos vegetais e destinado à indústria *pet* não está coberta por este regulamento, tendo o seu uso autorizado. Apesar de já existirem pesquisas mostrando a possibilidade de criação de larvas de moscas em substratos orgânicos, atualmente os resíduos da agricultura e indústria de alimentos são impedidos pela regulamentação EC 1069/2009 por considerar que insetos são proteína animal processada (PAP) e, portanto, não podem se alimentar de esterco ou dejetos.

Em 2013 foi fundada a *International Platform of Insects for Food and Feed* (IPIFF), uma organização sem fins lucrativos que representa os interesses da fração privada da indústria de insetos. A IPIFF é composta por 27 companhias que atuam por meio de uma rede de colaboração na cadeia de valor de insetos em 15 diferentes países principalmente da Europa, mas também do mundo, promovendo uma eco-indústria sustentável (PROTEINSECT, 2016). No ano de 2016 a IPIFF sugeriu a liberação de proteína de insetos criados, exclusivamente, em substrato vegetal para uso na aquicultura e para não ruminantes. Esta manifestação deu-se em função de projetos exitosos da PROTeINSECT e da avaliação positiva de riscos da *European Food Safety Authority* (EFSA) referente à segurança de proteínas processadas de insetos. Tal instituição afirmou que, quando alimentados com substratos permitidos, a possibilidade de ocorrência de danos microbiológicos de proteína de insetos é comparável a qualquer outra fonte proteica de origem animal.

Boa parte da preocupação advém da forma como estes insetos são criados e o tipo de substrato utilizado para alimentá-los (vegetais, resíduos domésticos ou dejetos animais). A classificação da categoria de substrato determina se os insetos podem ou não serem destinados à ração animal. Apesar das larvas de moscas domésticas, que se alimentam de dejetos, conseguem reduzir em até 60% o substrato trazendo benefícios ambientais, este substrato é

considerado categoria 3 e, portanto, não destinado à ração animal (EC 1069/2009 e EC 767/2009). Já insetos criados sobre o substrato vegetal são permitidos (categoria 1).

Ainda existem muitas lacunas nas legislações por todo mundo sobre o tema, por ser uma temática atual, que acaba limitando a expansão de novos empreendimentos e pesquisas. Como legislações e normas a serem hoje respeitadas, citamos a TSE (*transmissible spongiform encephalopathies*) e as normas de *by products* propostas pela comunidade europeia, porém estas estão somente servindo de paliativo para ajustar a produção desta fonte proteica às normas de saúde, higiene e processamento exigidos, atualmente, pelo mercado.

No Brasil, o Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento (MAPA) não dispõe de regulamentação específica sobre o tema. Porém, projetos pontuais como o de um produtor no estado de Minas Gerais (empresa Nutrinsecta) que já encaminhou pedido de registro, desde 2012, junto ao MAPA, ou mesmo o projeto piloto desenvolvido pela empresa BUG do Brasil, que é o objeto da análise da presente tese, vem obrigando a inserção da discussão sobre a criação de normas de produção e processamento de insetos para alimentação animal e humana no Brasil.

As reflexões resultantes da fundamentação teórica em bioeconomia e ecologia industrial, assim como os conhecimentos científicos compilados sobre produção e processamento de insetos, e suas implicações para a realidade brasileira e mundial, resultaram na proposição dos dois pressupostos de pesquisa apresentadas a seguir. Por meio dos Capítulos 4, 5 e 6 da presente tese são apresentados e discutidos os resultados que permitiram a confirmação ou refutação de tais proposições.

3. PRESSUSPOSTOS DE PESQUISA

3.1 PRESSUPOSTO A

A criação de larvas de BSF a partir de resíduos orgânicos (resíduos de grãos) e o subsequente processamento em farelo de insetos é uma alternativa mais sustentável que o farelo de soja como fonte proteica à ração animal.

3.2 PRESSUPOSTO B

O uso do farelo de insetos melhora os índices de sustentabilidade da produção de frangos de corte no Brasil.

CAPÍTULO 3

PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

1. ETAPAS DA PESQUISA

A presente pesquisa foi dividida cronologicamente em três momentos: i) revisão bibliográfica; ii) exploratória a campo; e, iii) processamento e análise dos dados, os quais serão detalhados a seguir.

1.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta primeira etapa deu-se o primeiro contato com o tema da pesquisa. Por meio da leitura e confrontação das referências bibliográficas mundiais, o tema insetos como fonte proteica para alimentação animal foi identificado e desencadeou a formulação do problema de pesquisa da presente tese. O ineditismo do tema no Brasil e a inexistência de dados de pesquisa publicados levaram à necessidade de adaptação à realidade brasileira. Esta fase resultou no primeiro artigo apresentado no Capítulo 4, onde, a partir das proposições feitas pela FAO no documento "*Assessing the Potential of Insects as Food and Feed in assuring Food Security*", foram identificadas as espécies de insetos com potencial para serem criadas, processadas em escala industrial e destinadas à ração animal no Brasil.

Conforme descrito no segundo capítulo, o desenvolvimento em escala industrial desta inovação tecnológica, principalmente em função de questões ambientais relacionadas à avicultura de corte no Brasil, instigou a busca por uma ferramenta metodológica que pudesse mensurar os impactos comparativamente ao que hoje vem sendo utilizado comercialmente, o farelo de soja.

Dentre as opções de análise termodinâmica identificou-se a análise emergética como uma ferramenta de análise da ecologia dos sistemas (ODUM, 1996) capaz de mensurar, além dos critérios econômicos, critérios ambientais e sociais. Desta forma, buscou-se avaliar a sustentabilidade desta inovação tecnológica frente à opção proteica predominante na avicultura, o farelo de soja e os impactos destas na sustentabilidade da avicultura de corte do Brasil. A análise emergética será pormenorizada na sessão Análise dos Dados, a seguir.

1.2 EXPLORATÓRIA A CAMPO

Nesta etapa foram realizadas entrevistas com *experts* do setor e produtores de insetos no Brasil, mais especificamente no interior de São Paulo, que produzem insetos de forma experimental ou para uso na pesca artesanal (iscas vivas), a fim de conhecer as particularidades do setor e as limitações e potenciais observados para a realidade brasileira.

A escassez de dados e, principalmente, o sigilo que envolve os grupos de pesquisa e instituições privadas no mundo, em função da inovação e valor comercial futuro da tecnologia, limitaram o acesso aos dados. Porém, identificou-se no Brasil o único projeto piloto que vem sendo desenvolvido, em escala industrial, com larvas de mosca BSF (mínimo uma tonelada de larvas por dia), em uma empresa de controle biológico de pragas da agricultura, a BUG do BRASIL.

Apesar de também ser um projeto sigiloso a Empresa permitiu o acesso aos dados primários, desde que não interferissem nos interesses comerciais da mesma. Informações zootécnicas, dados de custos do sistema de criação e processamento das larvas, assim como dados de produtividade foram disponibilizados, inclusive, com acesso a amostras de produtos (farelo de larvas, composto orgânico resultante do processo e substrato para criação de larvas), os quais foram analisadas no Laboratório de Nutrição do Departamento de Zootecnia da UFRGS. Estas análises bromatológicas, além de confirmarem os valores nutricionais dos produtos citados na literatura científica internacional, permitiram, por meio dos valores de energia, o cálculo de transformidade e demais índices emergéticos apresentados na presente tese.

A proibição mundial de uso de resíduos orgânicos (dejetos) como substrato para produção de insetos e os interesses privados da empresa analisada que, atualmente, utiliza como substrato resíduos de grãos (trigo e milho) resultantes de etapas anteriores de seu processo produtivo, não permitiram a avaliação primeiramente proposta para a pesquisa de utilizar dejetos de aves como substrato para criação de larvas de BSF. Porém, por identificar nas análises bromatológicas que estes resíduos de grãos da indústria possuem altos valores nutricionais, semelhante ao que é mencionado nas pesquisas laboratoriais internacionais com dejetos, realizou-se a pesquisa com os dados disponíveis, considerando como fundamental a continuidade da investigação, no futuro, com dados de criação de larvas de BSF em dejetos da indústria avícola.

A proposta de pesquisa futura permitiria inserir na análise, além da redução do impacto ambiental, em função da redução do volume de dejetos e de seu potencial poluidor, questões de

ordem social. A possibilidade de desenvolvimento da etapa de criação das larvas na propriedade rural até a secagem, ou mesmo até a entrega das larvas *in natura* para processamento na indústria, reduziria os custos com o transporte dos dejetos e seria uma forma de geração de renda para o produtor rural e sua família. A incorporação destes aspectos na análise, atuaria como uma externalidade positiva do sistema proposto, interferindo nos indicadores de emergia e na sustentabilidade da produção.

Já para a coleta de dados da avicultura de corte no Brasil, utilizaram-se dados secundários da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – Centro Nacional de Pesquisa em Suínos e Aves (EMBRAPA-CNPSA) de uma propriedade típica de avicultura convencional com alto nível tecnológico, em Chapecó – SC, no ano de 2015. A escolha por Santa Catarina se deu em função de este ser o principal estado produtor e exportador de carne de frango do Brasil e que hoje mais sofre com as questões ambientais supramencionadas. Em função da necessidade de uma referência geográfica para os cálculos emergéticos, elegeu-se o município de Chapecó pela sua relevante contribuição para o setor avícola.

Os dados referentes ao farelo de soja produzido no Brasil, e que serviram de base comparativa para a presente pesquisa, derivaram da tese de Cavallet (2008) que investigou os índices emergéticos do farelo de soja brasileiro exportado para a Europa. O acesso aos dados da pesquisa permitiu o recálculo dos índices emergéticos desconsiderando a etapa de transporte naval para a Europa, considerando, assim, somente as etapas de produção da soja, transporte até a indústria e processamento dentro do país.

1.3. PROCESSAMENTO E ANÁLISE DOS DADOS

Partindo da premissa que somente é possível gerir o que é passível de ser mensurado, a escolha e definição do método de avaliação foi a etapa decisiva e que deve estar consoante com os objetivos da pesquisa. Sendo assim, optou-se pela análise emergética que, por fornecer um meio de avaliação objetivo e compreensível dos bens e serviços do ambiente, da sociedade e da economia permite a avaliação da sustentabilidade do sistema (VOORA & THRIFT, 2010).

1.3.1 Análise Emergética

Dentre as opções metodológicas mais utilizadas de análise termodinâmica destacam-se a análise energética (EA), análise exergética (ExA), análise de entropia (EnA) e análise emergética (EmA) (LIAO et al., 2012). A análise emergética, proposta por Odum (1996),

baseia-se na segunda lei da termodinâmica e dentre as opções supramencionadas é a que possibilita a avaliação ecossistêmica de sistemas de produção agroindustriais.

A análise emergética é um método de contabilidade ambiental utilizado para avaliar, de forma abrangente, a relação de um sistema com o seu ambiente humano e natural, utilizando unidades similares (HIGGINS, 2003). A metodologia consiste na definição dos limites de um sistema representados por meio de diagramas de energia para descrever os recursos, entradas e saídas do processo a ser analisado. O próximo passo envolve a criação de uma tabela de emergia resumindo os valores de emergia dos estoques e fluxos do sistema. Os fluxos e estoques serão, então, convertidos de unidades de energia ou massa em unidades equivalentes de emergia por meio do coeficiente de transformidade (ODUM, 1996).

Esta metodologia contempla visões da economia ecológica e visa analisar o funcionamento do sistema econômico firmado em pressupostos físicos e biológicos (SINISGALI, 2006). Nos últimos anos, a metodologia emergética tem sido bastante utilizada para avaliar sistemas de produção agrícola, sistemas ecológicos naturais, sistemas econômicos e sistemas industriais por diversos pesquisadores de várias partes do mundo.

Alinhado com as ideias de Georgescu-Roegen, que propõe que dentro do processo econômico há uma cadeia hierárquica definida pelo aumento crescente de entropia resultando em resíduos e calor, além de produtos de maior qualidade de energia, Howard Odum identificou que neste processo existia uma memória energética ou energia incorporada (*embodied energy*), sendo esta, a energia necessária para produção de um bem de consumo ou serviço, passando a chamá-la de emergia (com M).

Segundo Odum (1996, p.7), “*Emergy is the available energy of one kind of previously user up directly and indirectly to make service or product*”, ou seja, a energia de transformação necessária para geração de um fluxo ou um armazenamento. Sua unidade de referência é a fonte primária de energia, o sol, tendo como unidade de medida estabelecida a emergia solar ou emJoule solar (seJ) (ZHANG et al., 2007).

Os conceitos de emergia e transformidade representam a adequação necessária da qualidade de energia que flui de um sistema, possibilitando a integração dos diversos componentes em uma base comum (ODUM, 1988).

A emergia de um dado fluxo ou produto é, por definição, uma medida do trabalho de auto-organização do planeta. A natureza fornece recursos por meio dos ciclos naturais e concentra a matéria através da interação e convergência de padrões. Alguns recursos exigem um trabalho ambiental maior do que outros e seu uso significa uma apropriação maior de

serviços ambientais. O teor de energia pode ser, portanto, uma medida de sustentabilidade e/ou de pressão sobre o meio ambiente pelo sistema (SCIUBBA & ULGIATI, 2005).

Para tanto, a determinação de uma medida única para valorar todos os recursos envolvidos, sejam eles oriundos da natureza ou da economia, permitiu integrar na análise valores ambientais e sociais, de bens, serviços e de informação (ODUM, 1996). A avaliação emergética mostra-se como uma ferramenta adequada para aliar na análise questões econômicas e ambientais voltadas à sustentabilidade (WANG et al., 2014).

Os usuários desta metodologia afirmam que ela é o meio mais adequado e compreensivo para valorar bens e serviços ecossistêmicos que estão se tornando, cada vez mais, raros devido à crescente e contínua degradação do ambiente natural mundial (VOORA & THRIFT, 2010).

Apesar da metodologia ainda receber muitas críticas de economistas, ecologistas e analistas energéticos, em função da complexidade conceitual que limitaria sua aplicação, ela é muito utilizada em pesquisas acadêmicas e de agências públicas como o *U.S. Environmental Protection Agency* (U.S. EPA) e *U.S. Forest Service* para políticas públicas e tomadas de decisão (BROWN & CAMPBELL, 2007; CAMPBELL & OHRT, 2009).

Voora & Thrift (2010) afirmam que o uso da abordagem emergética, juntamente com instrumentos econômicos de valoração de bens e serviços ecossistêmicos, permite uma completa avaliação dos reflexos das preferências humanas, assim como das tendências de evolução do ambiente natural, na busca de eficiências energéticas.

Esta metodologia segue um procedimento realizado em três etapas: i) construção do diagrama de fluxos de energia para reconhecimento dos elementos e interações do processo; ii) organização dos dados em uma tabela de avaliação emergética; e iii) cálculo e interpretação dos indicadores emergéticos quantitativos e suas aplicações na busca de sistemas mais eficientes e sustentáveis (ODUM, 1996; BROWN & ULGIATI, 2004).

A primeira etapa de construção e desenho do diagrama dos fluxos energéticos requer uma simbologia particular, proposta por Odum, a fim de identificar os componentes do sistema, entradas, saídas e interações. A partir desse diagrama é construída a tabela dos fluxos de energia que levará ao cálculo e interpretação dos indicadores emergéticos. Na Figura 4 são apresentados e descritos os principais símbolos utilizados na construção dos diagramas da tese.






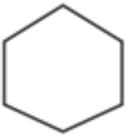

Símbolo	Nome	Descrição
	Fluxo	Utilizado para determinar um fluxo de energia, informações, organismos, materiais, etc.
	Fonte	Fonte de energia externa que supre força ou fluxo.
	Estoque	Representa um reserva energética dentro do sistema, um compartimento de energia, material, informação, etc.
	Sumidouro de energia	Representa a energia degradada durante um processo a qual sai do sistema como de energia de baixa intensidade. Conforme segunda lei da Termodinâmica, é a energia dispersada que não pode mais realizar trabalho (perde utilidade).
	Interação	Processo que combina diferentes tipos de energia e materiais para produzir uma ação ou um recurso diferente, isto é, uma transformação que utiliza dois ou mais fluxos de diferentes estoques necessários para um processo de produção, produzindo uma saída de um novo recurso.
	Consumidor	Unidade que consome e transforma matéria ou qualidade da energia produzida por outros elementos do sistema armazenando parte e, retroativamente, alimentando-os.
	Produtor	Unidade que coleta e transforma energia de baixa qualidade (baixa intensidade) em energia com qualidade superior, através de interações do sistema.

Figura 4: Principais símbolos utilizados na construção dos diagramas de fluxos de energia da presente tese.

Fonte: adaptado de ODUM (1996).

Na segunda etapa da avaliação ocorre a construção da tabela de fluxos emergéticos. Cada linha de fluxo energético representada no diagrama é identificada e quantificada em unidades comuns (massa, energia ou dinheiro) na tabela. Cada linha da tabela representa as entradas de recursos utilizados no processo podendo ter origem na natureza, segmentados em renováveis (R) e não renováveis (N), e de origem na economia (F), divididos em materiais (M) e serviços (S).

A primeira coluna é a referência numérica para a nota descritiva de cada item no memorial de cálculo. Nele são apresentadas fórmulas, fatores de conversão de unidades e referencial bibliográfico da transformidade utilizada em cada insumo. Na segunda coluna são descritas as quantidades de cada recurso e suas respectivas unidades.

Na metodologia emergética, para se reconhecer a qualidade e funcionalidade de cada tipo de energia, que depende do trabalho prévio de geração deste recurso, utiliza-se um fator de conversão de energia em emergia chamado transformidade solar (Tr). Ela indica a qualidade da energia solar incorporada a cada recurso ao longo das suas etapas de formação ou produção.

A transformidade é a emergia solar requerida para fazer uma unidade de um produto ou serviço (kg, Joule ou dólar) e pode ser utilizada como uma medida inversa da eficiência de um sistema, o que permite a comparação entre formas de energia. A transformidade como indicador emergético também é uma medida da posição do produto em termos de hierarquia global de energia. Os valores de transformidade e suas respectivas unidades são apresentados na quarta coluna da tabela.

Muitos valores de transformidade já foram calculados por vários pesquisadores no mundo e estão compilados e disponibilizados no *site* do *International Society for the Advancement of Emergy Research* (ISAER) e em artigos científicos. A identificação da fonte utilizada como base para a transformidade de cada insumo é sempre apresentada no memorial de cálculo de cada pesquisa.

Adicionalmente, na composição da tabela de fluxos emergéticos são inseridos os valores de renovabilidade de cada *input*. A renovabilidade permite a segmentação do fluxo emergético total em fluxo renovável e fluxo não renovável que, posteriormente, será utilizado para o cálculo dos indicadores emergéticos.

Da multiplicação da quantidade de cada entrada, com suas respectivas transformidade e renovabilidade, encontramos o valor do fluxo emergético renovável (R), fluxo emergético não renovável (N) (1- % renovabilidade) e o fluxo emergético total (Y).

Nas últimas linhas da tabela são apresentadas as saídas ou produtos com as quantidades produzidas, suas respectivas unidades (kg, ton, litro, etc.) e valor emergético (em Joules).

A Tabela 3 representada abaixo demonstra um modelo desta descrição proposta.

Tabela 3: Modelo de tabela para análise emergética

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
Nota	Descrição do Fluxo	Quantidade	Transformidade	Renovabilidade	Fluxo Renovável	Fluxo não renovável	Fluxo de emergia
		Valor Unidade	Valor Unidade	%	seJ	seJ	seJ
1	Recurso Renov da Natureza (R)						
2	Recurso N Renov da Natureza (N)						
3	Materiais da Economia (M)						
4	Serviços da Economia (S)						
5	Energia Total (Y)						
6	Produtos	Quantidade	Energia				

Fonte: a autora.

A derradeira etapa consiste no cálculo e interpretação dos indicadores energéticos a partir da tabela de fluxos de energia no intuito de avaliar a sustentabilidade dos sistemas propostos. Cada indicador possui propósitos específicos, mas que no conjunto permitem o desenvolvimento de uma imagem dinâmica dos fluxos anuais de recursos naturais e dos serviços ambientais providenciados pela natureza, assim como medir os impactos das atividades antrópicas nos ecossistemas (COMAR, 1998).

A composição dos indicadores energéticos pode ser melhor compreendida a partir da Figura 5 onde são identificados os fluxos de entrada e saída de um sistema hipotético com especificações dos tipos e origens dos fluxos.

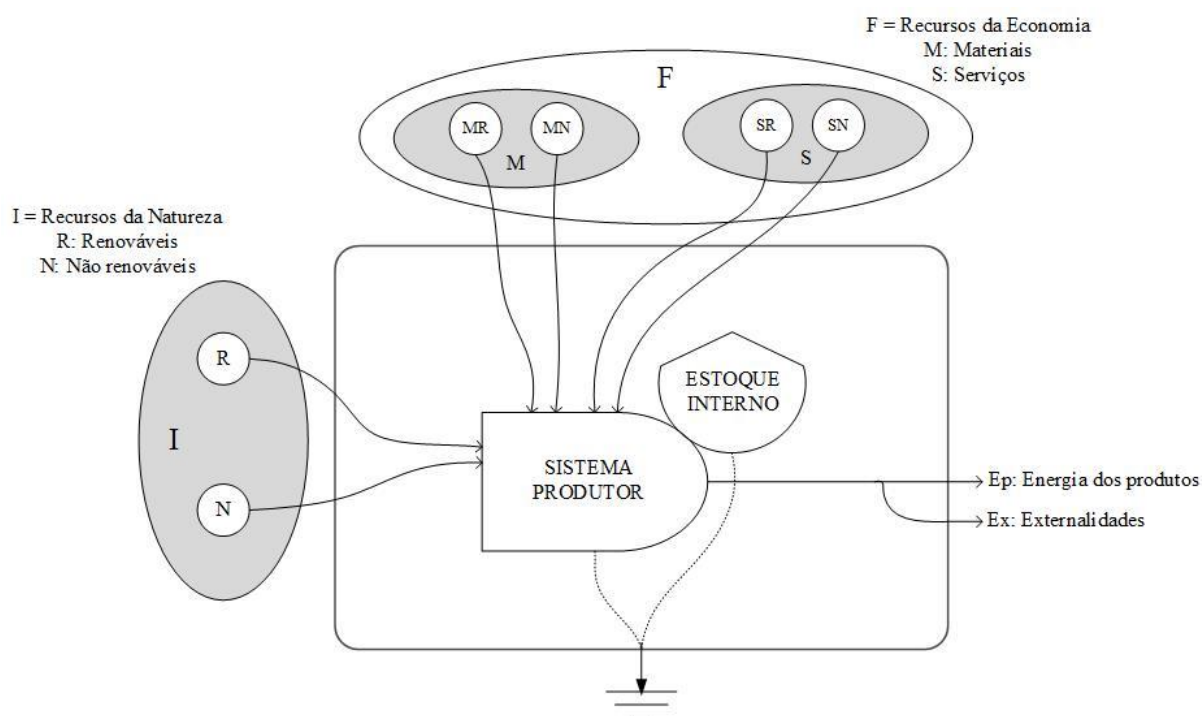


Figura 5: Diagrama sistêmico hipotético com descrição dos elementos constituintes.

Fonte: a autora.

A análise energética fornece diversos indicadores que podem ser utilizados para comparar sistemas homólogos ou para monitorar um sistema no tempo (CASTELLINI et al., 2006). Os indicadores energéticos utilizados nas diferentes etapas da presente pesquisa são apresentados a seguir:

1.3.1.1 Energia Total (Y)

O fluxo energético total ou energia total de um produto ou processo dá-se pelo somatório dos fluxos de energia da natureza (I) e da economia (F). Os fluxos da natureza são divididos em fluxos renováveis (R) e não renováveis (N), e os fluxos da economia são divididos

em materiais renováveis (MR), materiais não renováveis (MN), serviços renováveis (SR), serviços não renováveis (SN) e serviços adicionais (SA). Este indicador pode ser representado pela fórmula:

$$Y = I + F$$

Onde:

$$I = N + R$$

$$F = MR + MN + SR + SN + AS$$

A unidade de medida é o Joule de energia solar equivalente (seJ). Quanto maior o fluxo energético de um produto ou processo significa um maior número de etapas envolvidas e, conseqüentemente, mais energia incorporada ao processo.

1.3.1.2 Transformidade solar (*Tr*)

A transformidade solar de um recurso é obtida dividindo-se a energia total (*Y*) requerida por um sistema, pelo valor energético dos produtos (*Ep*) por ele gerados.

$$Tr = \frac{Y}{Ep}$$

A unidade de expressão é seJ J⁻¹. Ela é uma avaliação da eficiência do sistema e da qualidade de energia do produto permitindo a comparação entre diferentes formas de energia. A transformidade é maior quanto mais energia de transformação é requerida para gerar uma unidade de energia do produto.

1.3.1.3 Energia específica (*Yesp*)

Este indicador relaciona o total de energia pela massa total dos produtos. Utiliza-se como unidade o seJ kg⁻¹ ou seJ ton⁻¹.

$$Yesp = \frac{Y}{\text{massa total}}$$

1.3.1.4 *Renovabilidade (%R)*

É definida como a razão entre a energia dos recursos renováveis (R) e a energia total (Y). É uma forma de medir a sustentabilidade, ou autonomia, de um sistema. Ortega et al. (2002) propõem uma modificação no cálculo deste índice, incluindo as frações renováveis de materiais (MR) e serviços (SR) à fração renovável da natureza (R). Este índice é apresentado na forma de percentual.

Considerando no longo prazo, sistemas com maiores índices de renovabilidade tem maiores chances de sobreviver. A fórmula abaixo descreve esta proposição:

$$\%R = \frac{100X(R + MR + SR)}{Y}$$

1.3.1.5 *Taxa de eficiência emergética (EYR)*

A taxa de eficiência emergética, do inglês *energy yield ratio* (EYR), é uma medida da incorporação de energia da natureza e sugere a quantidade de energia da natureza que o processo retorna ao setor econômico. EYR próximo a 1 significa que o sistema consome tanta energia quanto a que disponibiliza para a economia. Quanto maior for o índice menor é a dependência da economia, ou seja, maior é sua capacidade de incorporar contribuições da natureza, conforme demonstrado na fórmula a seguir:

$$EYR = \frac{Y}{F}$$

1.3.1.6 *Taxa de investimento emergético (EIR) e Taxa de investimento emergético, considerando as externalidades (EIRex)*

Do inglês *energy investment ratio*, este índice avalia a proporção de recursos da economia (investimento monetário) frente aos recursos naturais que, atualmente, ainda não possuem seu valor remunerado. Este indicador é calculado pela razão entre as frações não renováveis da economia (materiais e serviços) e as fontes da natureza adicionada às frações renováveis de materiais e serviços. Quanto maior o fluxo, considerado atualmente “gratuito” ou derivado da natureza, menor a taxa de investimento emergético.

A fórmula abaixo permite uma melhor compreensão:

$$EIR = \frac{(MN + SN)}{(R + N + MR + SR)}$$

Visando propor uma análise mais aprofundada da consequência de custos ambientais adicionais que sistemas industriais, inevitavelmente, promovem ao poluir ou impactar nos recursos naturais, a presente tese sugere, fundamentada na proposição de Ortega et al. (2000) que insere na análise emergética os serviços adicionais (SA), a criação do Índice de Investimento Emergético Considerando as Externalidades (EIRex). Este índice, que é complementar ao anteriormente exposto, adiciona ao numerador de valores da economia os serviços adicionais.

Os serviços adicionais são as externalidades negativas provocadas pelo processo que precisam ser compensadas, ou mensuradas para ter seus reais custos incorporados à contabilidade ambiental. A perda de solo, as emissões de gases do efeito estufa, ou mesmo a quantidade de água da chuva que deixa de ser absorvida pelos lençóis freáticos, em função do processo industrial avaliado, devem ser mensuradas e os valores para mitigar os prejuízos identificados devem ser incorporados ao cálculo.

O cálculo realizado, para quantificar os valores compensatórios destas externalidades negativas, é apresentado no final deste capítulo por meio da área de absorção de impacto (AAI).

Com a inserção dos serviços ambientais, o EIRex será maior que EIR e a taxa de investimento emergético, conseqüentemente, mais alta, conforme demonstrado pela fórmula a seguir:

$$EIRex = \frac{(MN + SN + SA)}{(R + N + SR + MR)}$$

1.3.1.7 Taxa de carga ambiental (ELR)

O *environmental loading ratio* (ELR) ou taxa de carga ambiental dá-se pela razão entre recursos não renováveis (N+F) e os renováveis (R).

$$ELR = \frac{(N + MN + SN)}{(R + MR + SR)}$$

Este índice avalia a pressão causada no ecossistema pelo sistema produtivo em estudo. Altos valores de ELR indicam um maior impacto do sistema econômico no meio ambiente natural (CAVALLET, 2008). Brown & Ulgiati (2004) estabeleceram, com base em diversos estudos, que ELR menor que 2 indica baixos impactos ambientais, ELR entre 3 e 10 impactos moderados e ELR maior que 10 relaciona-se com altos impactos ambientais em função dos grandes fluxos de energia não renováveis concentrados em uma pequena área de um ecossistema local.

1.3.1.8 Taxa de intercâmbio de energia (EER)

A taxa de intercâmbio de energia ou *Emergy Exchange Ratio* é a razão entre a energia fornecida e a energia recebida na forma de produto quando da troca com os sistemas externos, por meio da aquisição no mercado. Como proposto por Odum (1996), as pessoas não pensam em unidades de energia, portanto é recomendado o uso de seu equivalente econômico denominado em dólar.

Para obtenção do em dólar de um país, Odum (1996) propôs a divisão da energia de todas as fontes energéticas utilizadas pelo sistema natureza-economia humana de um país, em determinado ano, pelo produto nacional bruto (PNB) expresso em dólares na taxa média anual. Para a presente pesquisa utilizou-se o em dólar proposto por Pereira et al. (2013) para o Brasil, no ano de 2015 - $4,52E+12$ seJ US\$⁻¹.

$$EER = \frac{Y}{\left[\text{Produção Unitária} \times \text{Preço} \times \left(\frac{Y}{\text{US\$}} \right) \right]}$$

Multiplicando a quantidade produzida pelo seu valor monetário e pelo em dólar encontramos a energia recebida pelo produto no mercado. Desta forma, o EER possibilita a avaliação se ao vender o produto é remunerada toda energia utilizada para a sua produção. Produtos da agricultura e minerais tendem a ter um valor de EER entre 5 e 10 quando são comprados a preço de mercado pois, geralmente, o valor monetário não remunera o trabalho realizado pela natureza, somente os serviços humanos.

O EER também permite a reflexão sobre o cálculo do preço justo de um produto. Seria o valor que remuneraria, na íntegra, tanto os insumos da natureza como da economia, envolvidos na composição de um produto. Considerando as cadeias produtivas do agronegócio, esta informação seria valiosa no intuito de determinar quais elos da cadeia estão se

responsabilizando pelos maiores custos e quem está recebendo as maiores remunerações. Desta forma, distribuições mais equitativas poderiam ser propostas e, desde os produtores até os consumidores finais, estas responsabilidades poderiam ser compartilhadas.

1.3.1.9 Cálculo da Área de Absorção de Impacto (AAI) para mitigação das Externalidades Negativas

As externalidades são efeitos positivos ou negativos gerados pelas atividades de produção ou consumo de um agente que podem impactar os demais agentes do ecossistema sem que estes tenham a opção de impedi-lo ou a obrigação de pagar por eles (CAVALETT, 2008). A externalidade é negativa quando ela gera um custo para o segundo agente, mesmo que não declaradamente, como acontece nas emissões de gases do efeito estufa em processos industriais ou na poluição dos lençóis freáticos, quando o tratamento de dejetos não é considerado. Da mesma forma, a externalidade pode ser positiva quando, involuntariamente, a atividade de um agente agrega benefícios aos demais, como a instalação de biodigestor em uma região suinícola reduzindo as emissões de GEE.

Já os serviços ambientais são serviços “gratuitos” fornecidos pela natureza ao homem e ao ecossistema que, naturalmente, buscam levar ao equilíbrio por meio do sequestro de GEE, filtragem da água da chuva, conservação da biodiversidade e controle do clima. Estes serviços, apesar de ainda não serem remunerados, devem ser valorados pelo homem, pois possibilitam a sustentabilidade da vida na Terra.

A maioria dos índices emergéticos propostos leva em consideração as fontes renováveis e não renováveis dos sistemas, mas desconsidera a necessidade de serviços adicionais para mitigar os danos decorrentes dos processos de produção. Ortega et al. (2000) propõem a incorporação destes custos adicionais a fim de mitigar os impactos provocados pelos processos produtivos, sejam eles agrícolas ou industriais. A adição destes custos ambientais dentro da análise emergética torna a contabilidade destes processos mais próxima da realidade e, somente assim, conhecendo o real valor dos produtos, uma justa remuneração possa ser estabelecida destinando parte do valor para a preservação dos recursos escassos.

Visando quantificar o fluxo emergético envolvido nos serviços adicionais da natureza, foi proposto o cálculo de incorporação das externalidades negativas por meio da determinação da área de floresta nativa (em hectares), característica da região do estudo, capaz de mitigar este impacto. Identificou-se como área de absorção do impacto (AAI) a área de mata nativa necessária para sequestrar os GEE referentes as emissões do próprio processo produtivo, da mesma forma que a área de floresta para mitigar as perdas de solo e a área necessária para

compensar a água de poço artesiano consumida no processo produtivo e que não é remunerada pela economia.

Os três cálculos da AAI utilizados na pesquisa são detalhados a seguir:

A) Cálculo compensatório de emissões de CO₂

Visando compensar as emissões de GEE do processo calcula-se a área de absorção de impacto através da fórmula:

$$AAI = \frac{IE}{CC}$$

Onde:

AAI= área de absorção do impacto – em hectares,

IE= impacto das emissões (emissões de GEE resultantes dos produtos e dos processos analisados) - medidas em ton CO₂ equivalente.

CC = capacidade de compensação – capacidade da biomassa de mata nativa de sequestrar o carbono emitido – ton ha.ano⁻¹.

A partir do cálculo da AAI, em hectares, multiplica-se o valor pela produtividade média anual de biomassa da mata nativa em ton ha.ano⁻¹ e, utilizando o fator de conversão de energia, encontra o valor em Joules ano⁻¹, conforme referencial bibliográfico. Considerando-se que 7 anos seja o tempo necessário para que uma floresta atinja seu estágio adulto e cumpra a plenitude de seus serviços ecossistêmicos, a produtividade de uma floresta (em ton ha.ano⁻¹) é dividida por 7 para o cálculo emergético anual.

A produção de biomassa anual é então multiplicada pela transformidade da floresta resultando no valor emergético da externalidade negativa que será incorporada à tabela de fluxos emergéticos do sistema.

B) Cálculo compensatório da perda de solo

Da mesma forma que se fez com as emissões de CO₂ do processo, faz-se o cálculo do valor emergético da externalidade negativa da perda de solo. O valor emergético da perda de solo equivale à energia da recuperação deste solo, ou seja, equivale à produção da floresta nativa característica da região. Sendo assim,

$$AAI = \frac{Y \text{ perda do solo}}{Y \text{ da recuperação do solo}}$$

Onde:

Y perda de solo= quantidade de solo perdido* valor energético do solo* Tr

Para o cálculo do valor energético do solo utiliza-se o teor de matéria orgânica no solo da região multiplicado pelo valor energético do quilograma de matéria orgânica de solo (5400kcal kg MO⁻¹).

O cálculo da energia para recuperação do solo, ou da floresta nativa dá-se pela fórmula abaixo:

$$Y \text{ recuperação solo} = AI \times \text{Prod Média Bio} \times Tr$$

Onde:

AI = área do impacto;

Prod Média Bio = Produção média de biomassa anual;

Tr = Transformidade.

Conforme a primeira fórmula apresentada, a AAI referente à perda de solo é encontrada da relação destas duas energias. Assim como foi feito no item anterior, a área de floresta encontrada é multiplicada pela sua produção de biomassa média anual e sua respectiva transformidade para identificação do fluxo emergético que será utilizado na tabela de fluxos totais do sistema.

C) Cálculo compensatório da perda de água de poço utilizada no processo

Para compensar o impacto causado pela água de poço artesiano utilizada no processo produtivo e que não pode ser remunerada pela economia utiliza-se a fórmula de AAI conforme fórmula abaixo:

$$AAI = \frac{Y \text{ da água consumida no processo}}{Y \text{ da água infiltrada}}$$

Para o cálculo do denominador aplicamos a fórmula abaixo:

$$Y \text{ água infiltrada} = \text{Precip. anual} \times \text{área} \times \text{dens. água} \times \text{ELG}$$

Onde:

Precip. Anual = Precipitação de chuva anual - depende do local da pesquisa ($l \text{ m}^2 \cdot \text{ano}^{-1}$),

Área = área do impacto ambiental (m^2),

Dens. Água = Densidade da água - 1 kg l^{-1} ,

ELG = Energia Livre de Gibbs – 5.000 J kg^{-1} .

Assim como nos itens anteriores, da relação energia da água consumida com energia da água infiltrada identifica-se a área de mata nativa capaz de compensar o dano (AAI). Para inserir na tabela de fluxos emergéticos como serviços adicionais, esta área deve ser convertida em biomassa produzida por ano e ter sua transformidade multiplicada para chegarmos ao valor do fluxo emergético referente a este serviço adicional.

1.3.2 Demais considerações da análise e processamento dos dados

Segundo investigações em publicações científicas internacionais, a análise emergética da criação e processamento de larvas de mosca BSF foi uma pesquisa inédita no mundo que permitiu comparar os índices emergéticos desta tecnologia inovadora com a fonte proteica tradicional para ração animal, o farelo de soja. A mensuração dos índices emergéticos servirá para avaliações evolutivas da tecnologia à medida que novos processos de automação ou redução de uso de recursos vão surgindo, ou para estudos comparativos de tecnologias futuras.

A avaliação emergética da avicultura com as duas opções de fontes proteicas permitiu a comparação com estudos previamente realizados no Brasil e no mundo, ou mesmo o estudo comparativo com outras fontes de proteína animal. Estudos evolutivos do setor também poderão ser propostos a partir da análise realizada.

Desta forma, políticas públicas, ou mesmo tomadas de decisão de empresas privadas, voltadas à sustentabilidade, podem ser formuladas, considerando, além da contabilidade tradicional, questões ambientais e sociais.

Visando delimitar o escopo de análise de cada etapa da pesquisa definiu-se que: i) na etapa de criação e processamento de larvas de BSF a análise refere-se a todo o processo; ii) na etapa da avicultura de corte a análise ficou restrita ao limite “dentro da porteira”,

desconsiderando as etapas de abate, processamento, distribuição e consumo da carne de frango; e, iii) os dados referentes ao farelo de soja são limitados à produção e processamento do farelo dentro do Brasil.

Na análise da avicultura foram considerados somente os impactos bioeconômicos relativos ao uso do componente proteico (farelo de insetos *versus* farelo de soja) na dieta animal. Os demais componentes da ração (milho, sorgo, complexos minerais e vitamínicos, etc.) foram considerados padrão, em quantidades idênticas, não interferindo na análise.

Em recentes pesquisas, apesar de ainda indicarem necessidade de novas investigações, Cullere et al. (2016) e De Marco et al. (2015) avaliaram a performance produtiva de frangos de corte alimentados com larvas de BSF e afirmaram que esta fonte proteica pode substituir, parcial ou totalmente, o farelo de soja na dieta de aves. Por fugir do escopo da presente pesquisa e por avaliar que profissionais de áreas específicas como entomologia e nutrição animal já estejam investigando o tema, debates de ordem nutricional (aminoácidos, valor nutricional ou composição da dieta) não fazem da parte da tese, apesar do reconhecimento da vital importância e complementariedade para a proposta de inserção dessa inovação tecnológica.

CAPÍTULO 4

Insects as feed: species selection and their potential use in Brazilian poultry production²

Summary

Growing income in developing countries has stimulated the global demand for animal protein. Brazilian poultry production plays a key role in supplying this market. The growing global demand for soybeans due to its different uses and byproducts, as well as its use in the diet of several livestock species, is forcing the industry to seek alternative protein sources. Environmental concerns related to huge volumes of poultry manure serve as a warning for the choice of more sustainable production systems. Thus, the current review suggests insect rearing for the processing of an insect flour as an alternative protein source to feed broilers in Brazil. The five desirable features in the selection of insect species proposed by the Food and Agriculture Organization (FAO) show that the high productivity of biomass, feed conversion efficiency and the organic waste conversion capacity from poultry farms into high value-added byproducts as feed and bio-fertilizer enable the use of larvae from Housefly and Black Soldier Fly species. This is possible due to the Brazilian production, climatic and environmental conditions. Despite their vulnerability to pathogens and predators, these species have the potential to supply part of the protein demands of the Brazilian poultry industry when raised in controlled environments. The prevalence of tropical climatic conditions and the possible use of organic waste from poultry farms as substrate can mitigate some environmental issues as well as generate income to smallholder farms prevailing in this activity.

Keywords: insects, unconventional, feed ingredient, Brazilian, poultry.

² Artigo aprovado no World's Poultry Science Journal.

Introduction

The increase in the world's population in recent decades (Godfray and Garnett, 2014) along with the projected expectancy of 9.6 to 12.3 billion people by the year 2100 (Gerland *et al.*, 2014), points to the growing need of food to meet the demand. Production methods that take into account environmental issues such as water use (Mekonnen and Hoekstra, 2010), greenhouse gas emissions (Parry *et al.*, 2009; Godber and Wall, 2014) and intense use of already productive lands (not requiring new areas) (Tilman *et al.*, 2001; Godfray and Garnett, 2014; Tabassum-Abbasi *et al.*, 2016) are essential. These are on the agenda of the major global institutions focused on food security and the fight against starvation.

Increased income in developing countries has strengthened the global demand for animal protein (meat and milk) (Delgado, 2003; Gandhi and Zhou, 2014), and raised awareness of the need to search for alternative protein sources for direct use in both human diets and for animal feeding.

Brazil is the third largest producer and the largest exporter of broilers in the world. In 2013, the country accounted for 3.892 million tons of the global chicken meat market, mainly for the Chinese market and Arab countries. Even with this significant share of the world market, in the same year 68.4% of the Brazilian production was allocated to the domestic market (UBABEF, 2014), a fact that shows the growing need for input related to nutrition and management. The current dependence on soybean meal, the main protein source for feed, the competitive use of this vegetal product in other animal species' diet, as well as the alternative use of soybean in biofuel production, leads to the search for viable alternatives.

Edible insects are protein and energy sources that, for centuries, have been part of the diet of populations in over 113 countries worldwide (MacEvilly, 2000). Similarly, they provide nutrients to several animal species such as birds and fish (Vantomme *et al.*, 2012). Commercial insect rearing aiming to provide food to humans or animals is still an emerging practice.

However, it is developing because of the growing research conducted by public and private institutions around the world (van Huis, 2013).

Insect rearing appears as a viable alternative to protein production and supply, given the environmental factors such as greenhouse gas emissions, waste generation, direct and indirect demands (pollution) of water resources, and extensive use of areas both for animal breeding and food production (grains and pastures). These facts limit the increasingly intensive production of cattle, pigs and poultry (Sanches-Muros *et al.*, 2014).

The FAO, in partnership with countries such as The Netherlands (Wageningen University), China, Laos and the United Kingdom (through their various public and private research institutions) published a report "*Assessing the Potential of Insects as Food and Feed in assuring Food Security*", to identify alternatives to food production (Vantomme *et al.*, 2012). Among the different technical, scientific and institutional (regulations and policies) contributions, the report presents five desirable features for selecting the insect species for breeding on an industrial scale (Vantomme *et al.*, 2012). These features should also guide the planning of insect use in different agricultural activities, such as the case of poultry production in Brazil.

The motivation for the current research focuses on many relevant factors. The importance of poultry production for Brazilian and world agribusiness; the global pressures for sustainable meat production systems (Vaarst *et al.*, 2015) due to the scarcity of natural resources and extreme polluting potential of this activity. In addition, the sector's vulnerability in relying almost exclusively on soybean meal as a protein source; the possibility to reduce environmental impact in the main poultry producers' regions in Brazil through the use of poultry waste as substrate for larvae nutrition; and social issues related to rural work and income generation.

The decision on the insect species to be reared must take into account the choice for those that can promote a sustainable production system beyond the value of producing protein

for animal (broilers) feed. Thus, the possibility to use poultry production waste as substrate is a key driver in supporting the choice of insect species as well as adaptation to climatic conditions.

The coordination model of the production chain in the Brazilian poultry industry is a vertical integration (UBABEF, 2014). In this arrangement producers and the industry share environmental responsibilities, which due to the large volume of waste generated daily, are hampering the growth of the activity in the Southern region. The possibility of using organic waste as feed for insects can be an alternative to reducing environmental pollution and to attaining more sustainable meat production. Additionally, with the reduction in pollutant load and protein content, the bio-fertilizer as a byproduct of the process, can generate complementary outputs.

Therefore, the present review addresses technical (nutritional and productive), environmental (climate), health and institutional issues related to rearing and using Housefly (*Musca domestica*) and *Black Soldier Fly* - BSF (*Hermetia illucens*) larvae as alternatives for nutritional management in the Brazilian poultry industry. The review uses the five features suggested by FAO as reference to determine the insect species with the potential to be used in animal feed.

Insect industrial scale production to the broiler industry

According to Vantomme *et al.* (2012), the production of at least one ton of insects per day or 365 tons per year is considered industrial-scale one. The authors cite the following as challenges to the worldwide expansion of this production. The correct selection of the species or strains; the choice of economically viable substrates (organic wastes, when possible); disease control and the establishment of sanitary procedures; regular supply and the development of innovative production technologies; growing mechanization; animal welfare assurance (ethical

issues); the development of an industrial code of practices and standards; and finally, product quality assurance.

The first of these challenges, the correct selection of the species or strains, should take into consideration the following matters. Technical issues related to climate (temperature, humidity, ventilation and lighting), environment (biodiversity, substrates and water availability, greenhouse gas emissions) (Vantomme *et al.*, 2012; van Huis, 2013; Rumpold and Schlüter, 2013), and to the nutritional value, depending on the species they intend to breed (Khusro *et al.*, 2012).

Housefly and BSF larvae are species with potential for growth and development in decomposing organic materials (fruits and vegetables), and human and animal waste (Diener *et al.*, 2011; van Huis *et al.*, 2013). This particular feature, in addition to enabling insect production in waste generated by poultry production, brings positive environmental effects to the sector. It allows up to 58% reduction in waste volume (Sheppard *et al.*, 1994; Hwangbo *et al.*, 2009), reduction in nitrogen and phosphorus compounds - in the order of 50% and 70%, respectively (Myers *et al.*, 2008) as well as reduced waste odors from bacterial growth restrictions (van Huis *et al.*, 2013).

The specific BSF larvae rearing brings another advantage to the system since, by promoting a greater liquefaction of poultry manure, it inhibits housefly oviposition - an important disease vector – and interrupts larval development as well as reducing the proliferation of this insect from 94 to 100% in intensive production systems (Sheppard *et al.*, 1994). Health and productivity gains can be substantiated through the management of this biological waste (Noorman, 2001).

In addition to providing protein content to animal diets, insect rearing and processing generate other byproducts to be taken into consideration in the feasibility analysis of activities

such as the lipid composition in larvae bred on organic substrates, which allows the processing geared towards biodiesel production (Li *et al.*, 2011).

Larvae feed conversion efficiency ensures that the organic wastes are partially converted into biomass and that the byproduct generated in this process - the bio-fertilizer - can be used in agriculture (Oonincx and de Boer, 2012; van Huis *et al.*, 2013; van Zanten *et al.*, 2015). The larvae feed conversion (2.2 kg / kg live weight) was higher than that of other animal species: 2.5 kg, 5 kg and 10 kg for poultry, pig and beef cattle, respectively (Smil, 2002; Oonincx and de Boer, 2012; and van Huis, 2013).

The annual poultry waste production in Brazil, with the potential to be used as substrate for insect production, is estimated at 3.5 million tons, given the annual slaughter of 5.4 billion birds (IBGE, 2014) and the production of 1.3 kg of waste per bird in each production cycle (Bellaver and Palhares, 2003). Considering data from Sheppard *et al.* (1994), it would generate 1.47 million tons of compounds to be used as bio-fertilizer.

The Southern Region of Brazil, the main producer of poultry in the country, faces the saturation of phosphorus and nitrogen which degrades soil, and affects water quality and agricultural yield (Scherer *et al.*, 2010). As proposed by van Zanten *et al.* (2015), allocating huge amounts of poultry litter to feed larvae will result in reduced volumes of bio-fertilizer which can be transported and commercialized in poorly fertilized areas of Brazil generating rural income to smallholders which can diversify their revenue and contribute to social sustainability (Correa and Miele, 2011).

Chitin and its derivatives, such as chitosan, are among the byproducts that contribute to greater benefits from insect processing; however, it is not addressed in the current review. It has been the subject of countless studies related to increased immunity and disease resistance in different species (Lee *et al.*, 2008; Veldkamp *et al.*, 2012; Swiatkiewicz *et al.*, 2015) and has been explored by pharmaceutical, aesthetic and paper industries (Veldkamp *et al.*, 2012).

The diagram depicted in Figure 1 shows the rearing and processing stages of larvae cultivated in organic wastes and their respective byproducts.

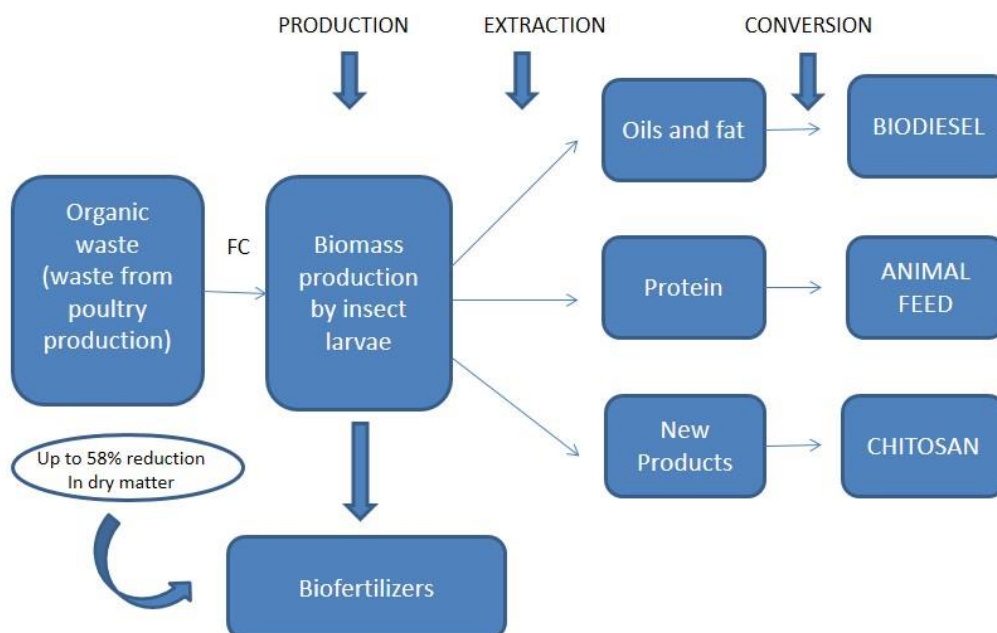


Figure 1: Diagram showing insect larvae rearing and processing in poultry production. (FC = feed conversion)

Source: The authors.

Proteins obtained from animals have been banned from farm animal feed due to outbreaks such as Bovine Spongiform Encephalopathy. Since then, food safety, hygiene, and health issues have been limiting the immediate acceptance of this nutritional alternative (Vantomme *et al.*, 2012; van Huis *et al.*, 2013). The wide taxonomic distance between men and insects, when compared to commercially bred species (poultry, swine, and cattle), suggests lower risks of zoonotic infections (van Huis *et al.*, 2013) however, it still requires further investigation.

Insect rearing and processing face challenges related to health, food safety, economic (automation to reduce costs) and institutional issues (laws and regulations) (van Huis *et al.*, 2013). The lack of specific guidelines to control the use of insects in animal diets impairs the commercial use of such technology. However, efforts from public and private institutions, in several countries, have helped the short-term inclusion (5 years) of this technological innovation (Veldkamp *et al.*, 2012).

Recent research analyzing larvae meal of the domestic fly through LCA, Van Zanten *et al.* (2015) called attention to the trade-off between decreasing land use and increasing global warming potential and energy use. However, Brazilian climatic conditions show some advantages in an insect production process. Solar energy can contribute to an industrial scale production reducing energy use especially in regions where temperatures are elevated.

The desirable features for determining insect species compared to Housefly and BSF larvae bred to poultry production in Brazil

Van Huis *et al.* (2013) report that the most promising insect species for animal feed production are BSF and Housefly larvae, mealworm (*Tenebrio*) and silkworm, although crickets and termites are also feasible on a smaller scale. Due to the positive external environmental factors aforementioned, the current study selected Black Soldier Fly and Housefly larvae as “bioreactors” due to their natural capacity to process organic manure from broilers. This section will compare their features with the five desirable characteristics (DC) identified for species selection in the FAO report.

DC#1: HIGH INTRINSIC RATE OF INCREASE (rm)

The intrinsic increase rate addresses the search for insect species that have a short development cycle, high immature specimen survival, and high oviposition rates. These features favor the fast development of insects by reducing losses in the early growth stages.

BLACK SOLDIER FLY

The BSF (*Hermetia illucens*) is a dipterous from the family Stratiomyidae (Fig. 2). It is native to tropical, subtropical and warm temperate climates in the Americas, and is currently found in regions between 45° N and 40° S (Diener *et al.*, 2011; Makkar *et al.*, 2014) with hot temperatures. The larvae of this fly feeds at a fast rate (25-500mg / larvae-day) from a large number of organic substrates, including poultry, pig, cattle and human wastes (Hardouin and Mahoux, 2003; van Huis *et al.*, 2013).

Oviposition takes place two days after fertilization and larval development may range from 2 to 4 weeks, or even longer, if there is no available food (Myers *et al.*, 2008; Diener *et al.*, 2011). Eggs and larvae are preferably kept at temperatures near 27°C, but they tolerate greater variations (Sheppard *et al.*, 2002)



Figure 2: Black Soldier Fly (*Hermetia illucens*) larval and adult phases.

Source: Feedipedia (2014).

BSF is extremely resistant to harsh environmental conditions such as drought, food shortage or oxygen deficiency (Diener *et al.*, 2011). The larvae of this species require hot environments to degrade the food substrate. Thus, their varying life cycle depends on this climatic factor (Veldkamp *et al.*, 2012).

This species, characterized by feeding in its larval stage only degrading large volumes of organic material due to its powerful jaw and digestive system (Erens *et al.*, 2012), has high resistance to adverse conditions and huge production capacity even in high densities.

HOUSEFLY

The life cycle stages of this species from the family Muscidae (Fig. 3) consist of egg, larvae (3 stages), pupa and adult. Such stages may last between 7 and 10 days in hot climate areas during summer and between 40 and 49 days in colder temperatures (El Boushy, 1991). Noorman (2001) describes that full development of the species takes place between the 14th and 18th day at 25°C and it results in its permanent reproduction in tropical and subtropical climate countries. However, larvae and pupae go into hibernation at lower temperatures and resume their development when the temperature rises.



Figure 3: Housefly (*Musca domestica*) larval and adult phases.

Source: Feedipedia (2014).

Considering Brazilian climatic conditions, decomposing organic waste shows potential for a shorter development cycle throughout the year favored by high temperatures.

M. domestica larvae show several features that make them suitable for mass production, such as precocity and prolificacy. Female larvae are capable of spawning 500-600 and up to 2,000 eggs in natural and controlled conditions, depending on the environmental temperature and humidity (Makkar *et al.*, 2014).

The humidity range required for larval development lies between 60% and 75% and it provides excellent conditions for industrial rearing when combined with ideal temperatures (above 20°C) (Miller *et al.*, 1974). Given the Brazilian climatic conditions, Weigert *et al.* (2002) demonstrated that higher temperatures (29°C and 32°C) negatively interfere in larval development and that heavier larvae are produced in temperatures ranging from 20°C to 26°C.

The variation in insect chemical composition (Table 1) draws attention to the careful selection of the collection phase (larvae or pupa), the drying and processing methods and to the substrate on which the larvae is bred (Pretorius, 2011).

Table 1 – Comparison between the larval and pupae composition of housefly bred on different substrates (based on DM).

	Ogunji <i>et al.</i> (2006)	Sogbesan <i>et al.</i> (2006)	Aniebo <i>et al.</i> (2008)
Substrate	Poultry manure	Poultry manure	Bovine blood meal
Collection stage	Larvae	Larvae	Larvae at the 3 rd day (pupa)
Crude protein (%)	37.5	50.4	47.1
Crude fiber (%)	-	1.6	7.5
Fat (%)	19.8	20.6	25.3
Ash (%)	23.1	11.7	6.6

Source: adapted from Pretorius (2011).

According to the presented data, the high intrinsic increase rate of *M. domestica* larvae is favored by Brazilian climatic conditions and the large volume of available poultry waste. Choosing the collection phase as well as the processing method requires studies related to local production conditions and to the animal category for which the feed is intended (nutritional composition).

DC#2: HIGH POTENTIAL OF BIOMASS INCREASE/DAY (WEIGHT GAIN/DAY);

Insects can be sustainably produced with a much smaller ecological footprint than that of most domesticated species (Oonincx *et al.*, 2010). Comparatively, cattle consume 8 grams of feed for each gram of weight gain, whereas insects may need less than 2 grams for each gram of weight gain (Vogel, 2010). These “bioreactors” are very efficient in biotransforming a wide variety of organic compounds into edible biomass (high feed conversion rate).

BLACK SOLDIER FLY

The BSF is not considered a pest because it is not attracted to human *habitats* or food in its adult stage. The adult insect does not need to feed since it survives from its own body fat stored during the larval stage during which time the larva is a voracious consumer of decomposing organic matter, including kitchen waste, spoiled food, and manure converting into biomass (Newton *et al.*, 2005).

The potential of the BSF is shown by the volume of waste that can be biodegraded, and its chemical composition depends on the type of substrate. Larvae show fat content between 15-25% (Sheppard *et al.* 1994; Zheng *et al.*, 2013) and 36-48% protein (Sheppard *et al.*, 1994; Diener *et al.*, 2011) when bred in poultry waste.

Diener *et al.* (2009), using larval density of 5 larvae/cm², managed to collect 2.5 kg/m² of prepupa (DM) per insect life cycle (145g/m²/day), using 100 mg of chicken manure daily per larvae as substrate. On the other hand, Sheppard *et al.* (1994) reported prepupa production of 46g per kg of poultry manure used as substrate.

BSF larvae have a high nutritional value of protein and fat; they may show protein levels between 36-48% in dry matter and 31-33% fat (Diener *et al.*, 2011). This diversity in energy and protein values (amino acid content) found by different researchers demonstrates the importance of properly defining the substrate and the larval development phase in which the insect is processed.

HOUSEFLY

M. domestica, as well as other dipterous larvae, has the ability to convert organic wastes into biomass. The increase in body weight depends on factors such as temperature and type of substrate (Weigert *et al.*, 2002).

Barnard *et al.* (1998) found reduction in the volume of poultry manure in the order of 64.4%, 80.3%, and 59.1% by inoculating, respectively; 300, 600, and 900 larvae in each 100 g of manure. Cickova *et al.* (2012) reported larvae biomass production from 3-4g/100g of poultry manure. Kenis *et al.* (2014) described unpublished experimental data by Nzamujo that reported the production of 3-4 kg of *M. domestica* larvae in four days, based on 10-15 kg of dry matter from animal waste.

The nutritional value of *M. domestica* biomass, both at the larval and pupal stages, is considered high and it ranges from 40 to 61.4% crude protein (El Boushy, 1991; Heuzé and Tran, 2013) and 9-25% lipid content in the dry matter (Aniebo *et al.*, 2008).

M. domestica shows higher lipid and lower protein content in advanced larval stages and at the pupal stage. By evaluating different processing methods, it is possible to state that sun-dried larvae have less protein and more lipids than those dried in ovens (Aniebo and Owen, 2010).

DC#3: HIGH CONVERSION RATE (Kg BIOMASS GAIN/ Kg FEEDSTOCK)

BLACK SOLDIER FLY

The food conversion efficiency of insect larvae is a major feature and it demonstrates the advantages of its potential use for animal feed production as has been shown in the presented research on the feature of high biomass production per kg of food.

The main issue to be taken into consideration in the feed conversion feature, compared to other species, is the type of substrate used by these larvae to generate biomass and protein for animal feed. Among the insect species, fly larvae, due to their coprophagous* feature, are

* Coprophagous: individual who feeds on excreta, animal and human wastes.

able to convert potentially high pollution residues, such as wastes, into high protein food or feed (van Huis, 2013; van Huis *et al.*, 2013).

The BSF larva has an average feed conversion efficiency of 29.6% (Diener *et al.*, 2009). Even when the larvae are bred on different substrates, such as chicken feed (25, 100 and 200mg/larvae/day), market wastes, population organic wastes and fecal mud, they showed high biomass conversion capacity as well as substrate volume reduction capacity (Diener *et al.*, 2011).

The production of bio-fertilizer resulting from the digestion of organic wastes by the larvae is another environmental advantage of choosing this species. Whenever this organic waste is used in agriculture, it achieves satisfactory results in the growth of plants (Newton *et al.*, 2005; van Huis *et al.*, 2013), thus adding value to this byproduct.

HOUSEFLY

Large populations of *M. domestica* may be obtained from relatively small amounts of substrates (Makkar *et al.*, 2014). El Boushy (1991) reported an experiment with an inoculation ratio of 3 grams of insect eggs incubated in 4 kilograms of fresh manure (mixed with water) at 35°C. Every 7 days 17,500kg of wet manure from a selected farm was inoculated with 52,500 eggs of *M. domestica* (3,000eggs/kg) resulting in larvae for broilers. Hardouin and Mahoux (2003) described the production of 1,500 larvae in 450 grams of manure. Poultry manure was the most cited substrate in the literature for *M. domestica* rearing.

DC#4: ABILITY TO LIVE IN HIGH-DENSITY ENVIRONMENTS (KG BIOMASS/M²);

BLACK SOLDIER FLY

BSF naturally occur in high densities and, compared with other species, they form groups (Zhang *et al.*, 2010). This feature allows them to convert large amounts of waste into biomass (van Huis *et al.*, 2013).

In a study on animal welfare related to insect rearing, Erens *et al.* (2012) stated that there is no animal freedom violation and discomfort due to the high population density. However, they suggest further studies using different densities to assess its possible impact on the animals' productivity and well-being (behavior).

Another advantage of high density in BSF rearing is its ability to limit the spread of *M. domestica*, which may be a vector of pathogenic agents in intensive production systems (Sheppard *et al.*, 1994). Unlike the natural spread of this insect, larvae rearing in controlled environments may be used as a manure management and disease prevention technique.

HOUSEFLY

The high density may also be explained by the behavior of *M. domestica* females that prefer depositing their eggs in clusters in substrate cracks rich in food for the larvae, thus protecting them from desiccation and predation. Noorman (2001) reports that the odor of eggs collected up to 30 minutes after oviposition was attractive to pregnant females and it stimulated new oviposition in the same place, thus suggesting the presence of a stimulating pheromone. This fact was not confirmed in eggs 2-6 hours after oviposition and it indicated that the pheromone disappears due to its high volatility.

Erens *et al.* (2012) reported that rearing high numbers of larvae develops more efficient food substrate digestion, due to the excretion of enzymes, and reduces the spread of diseases since the larvae excreta has antifungal and antibacterial properties.

DC#5: LOW VULNERABILITY TO DISEASES (RESISTANCE);

BLACK SOLDIER FLY

The BSF larvae rearing modifies manure microflora, thus potentially reducing the power of harmful bacteria such as *Escherichia coli* and *Salmonella spp.* (Erickson *et al.*, 2004). It suggests that these larvae have natural antimicrobial agents (van Huis *et al.*, 2013).

However, larvae rearing reports focused on vulnerability indicate rodents, frogs, birds and other insects, such as ants, as potential predators in production systems[†], as well as parasites to which larvae are susceptible. Rearing in controlled environments limits these predators' access to the system, thus reducing vulnerability.

Another favorable feature to the rearing of this species is the short life in adulthood (5-8 days), and the fact that it does not eat at this stage, which consequently keeps the larvae away from human *habitats* and food, thus reducing its exposure to insecticides, unlike the housefly (Tomberlin *et al.*, 2002).

HOUSEFLY

M. domestica is one of the species with greater capacity to develop resistance to insecticides due to genetic, biological and operational factors (Keiding, 1999), thus showing a potential advantage to the species survival even in controlled environments.

Although several authors have conducted surveys on parasitoids and predators to muscoid diptera of veterinary importance in Brazil (Mendes and Linhares, 1999; Werner *et al.*, 1999), the knowledge on the taxonomy and biology of these insects is still in the early stages.

In addition to the parasitoids, a great diversity of predators inhabits the environment composed of rearing-derived manure and feed on immature muscoid diptera (Borges, 2006). Among the main predators, we can highlight the coleoptera from the families Histeridae, Tenebrionidae, Staphylinidae, Dermaptera (earwigs) and the mites from the families Macrochelidae, Uropodidae and Parasitidae (Geden, 1990).

In manure accumulated in poultry farm sheds, there are several dipteran parasitoid species that are usually used as biological components in integrated pest management programs. The excess moisture found in poultry manure affects the colonization by parasitoids (Borges, 2006) and it allows the control and viability in a controlled rearing.

[†] Source: blacksoldierflyblog.com.

Conclusion

Black Soldier Fly and Housefly larvae were identified as the two potential species for protein production intended for poultry feed. Environmental (waste generation and treatment) and productive features of the Brazilian poultry industry was decisive in the insect species' choice with the potential to be produced on an industrial scale.

Features such as high productivity (biomass generation), feed conversion efficiency, organic waste use (from farms) and capacity to convert these potentially polluting wastes into high value-added byproducts (high-protein and lipid feed and bio-fertilizer) show the feasibility of using these species. Despite their vulnerability to pathogens and predators, these species have high potential to supply part of the protein demands of the Brazilian poultry industry, when grown in controlled environments.

The environmental and nutritional benefits of this technology for other species' diet requires specific research, however it expands the possibilities in other agribusiness production chains.

There are several fundamental issues related to potential and challenges to the rearing and processing of fly larvae for feed in the Brazilian poultry industry that require more discussion and planning throughout the poultry supply chain. Specifics of integrated production systems from the Brazilian poultry industry can facilitate the insertion of this new technology in the short term in Brazil, but not without research and world discussion among institutions, producers, the industry and consumers.

REFERENCES

ANIEBO, A.O., ERONDU, E.S., OWEN, O.J. (2008) Proximate composition of housefly larvae (*Musca domestica*) meal generated from mixture of cattle blood and wheat bran. *Livestock Research for Rural Development* **20 (12)**: 205.

ANIEBO A.O. and OWEN O.J. (2010) Effects of age and method of drying on the proximate composition of housefly larvae (*Musca domestica* Linnaeus) Meal (HFLM). *Pakistan Journal of Nutrition* **9**: 485-487.

BARNARD, D.R., HARMS, R.H., SLOAN, D.R. (1998) Biodegradation of poultry manure by house fly (Diptera: Muscidae). *Environmental Entomology* **27**: 600–605.

BELLAVER, C. and PALHARES, C.P. (2003) Uma visão sustentável sobre a utilização da cama de aviário. *Avicultura Industrial* **6**: 14-18.

BORGES, M.A.Z. (2006) Flutuação populacional de dípteros muscóides (Diptera: Muscomorpha), parasitoides e foréticos predadores Igarapé, MG. Ph D Thesis, Universidade Federal de Minas Gerais, Brazil, 103p.

CICKOVA, H., PASTOR, B., KOZÁNEK, M., MARTINEZ-SÁNCHEZ, A., ROJO, S., TAKÁČ, P. (2012) Biodegradation of pig manure by the housefly, *Musca domestica*: A viable ecological strategy for pig manure management. *PlosOne* **7**: 1-9.

CORREA, J.C. and MIELE, M. (2011) A cama de aves e os aspectos agrônômicos, ambientais e econômicos. In: Palhares, J.C.P., Kunz, A. (Ed.). Manejo ambiental na avicultura, 2011. Concórdia: Embrapa Suínos e Aves, 125-152. (Embrapa Suínos e Aves. Documentos, 149).

DELGADO, C.L. (2003) Rising consumption of meat and milk in developing countries has created a new food revolution. *The Journal of Nutrition* **133**: 3907-3910.

DIENER, S., ZURBRÜGG, C., TOCKNER K. (2009) Conversion of organic material by black soldier fly larvae: establishing optimal feeding rates. *Waste management & research* **27**: 603-610.

DIENER, S., ZURBRÜGG, C., GUTIÉRREZ, F.R., NGUYEN, D.H., MOREL, A., KOOTTATEP, T., TOCKNER, K. (2011) Black soldier fly larvae for organic waste treatment – Prospects and constraints. *Proceedings of the Waste Safe 2011 – 2nd International*

Conference on Solid Waste Management in the Developing Countries, Khulna, Bangladesh, 52p.

EL BOUSHY, A.R. (1991) House-fly pupae as poultry manure converters for animal feed: a review. *Bioresource Technology* **38**: 45-49.

ERENS, J., VAN ES, S., HAVERKORT, F., KAPSOMENOU, E., LUIJBEN, A. (2012) A bug's life – Large-scale insect rearing in relation to animal welfare. Wageningen, UR, 57p.

ERICKSON, M.C., ISLAM, M., SHEPPARD, C., LIAO, J., DOYLE, M.P. (2004) Reduction of *Escherichia coli* O157:H7 and *Salmonella enterica* serovar *Enteritidis* in chicken manure by larvae of the black soldier fly. *Journal of Food Protection* **67**: 685–690.

FEEDIPEDIA (2014) Animal Feed Resources Information System - INRA CIRAD AFZ and FAO. <http://www.feedipedia.org/content/housefly-maggots>.

GANDHI, V.P. and ZHOU, Z. (2014) Food demand and the food security challenge with rapid economic growth in the emerging economies of India and China. *Food Research International* **63**: 108-124.

GEDEN, C.J. (1990) Coleopteran and acarine predators of house-fly in poultry production systems. In: Rutz, D. A. and Patterson, R. S. (eds.). *Biocontrol of arthropods affecting livestock and poultry*. Westview, Boulder, CO. 317p.

GERLAND, P., RAFTERY, A.E., SEVCIKOVÁ, H., LI, N., GU, D. ET AL. (2014) World population stabilization unlike this century. *Science* **346**: 234-237.

GODBER, O. and WALL, R. (2014) Livestock and food security: vulnerability to population growth and climate change. *Global Change Biology* **20**: 3092-3102.

GODFRAY, H.C.J. and GARNETT, T. (2014) Food security and sustainable intensification. *Philosophical Transactions of the Royal Society B* **369**: 1-10.

HARDOUIN, J. and MAHOUX, G. (2003) Zootechnie d'insectes - Elevage et utilisation au bénéfice de l'homme et de certains animaux. -Bureau pour l'Echange et la Distribution de l'Information sur le Mini-élevage. BEDIM, Gembloux, Belgium.

HEUZÉ, V. and TRAN, G. (2013) Housefly maggot meal. Feedipedia.org. A programme by INRA, CIRAD, AFZ and FAO. <http://www.feedipedia.org/node/671>.

HWANGBO, J., HONG, E.C., JANG, A., KANG, H.K., OH, J.S., KIM, B.W., PARK, B.S. (2009) Utilization of housefly-maggots, a feed supplement in the production of broiler chickens. *Journal of Environmental Biology* **30**: 609–614.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2014. Sistema IBGE de recuperação automática. <http://www.sidra.ibge.gov.br/bda/tabela/listabl.asp?z=t&o=1&i=P&c=1094>.

KEIDING, J. (1999) Review of the global status and recent development of insecticide resistance in field populations of the housefly, *Musca domestica* (Diptera: Muscidae). *Bulletin of Entomological Research* **89**, 67p.

KENIS, M., KONÉ, N., CHRYSOSTOME, C.A.A.M., DEVIC, E., KOKO, G.K.D., CLOTTEY, V.A., NACAMBO, S., MENSAH G.A. (2014) Insect used for animal feed in West Africa. *Entomologia* **2(218)**: 107-114.

KHUSRO, M., ANDREW, N.R., NICHOLAS, A. (2012) Insects as poultry feed: a scoping study for poultry production systems in Australia. *World's Poultry Science Journal* **68**:435-446.

LEE, C.G., DA SILVA, C.A., LEE, J.-Y, HARTL, D., ELIAS, J.A. (2008) Chitin regulation of immune responses: an old molecule with new roles. *Current Opinion in Immunology* **20**: 1-6.

LI, Q., ZHENG, L., HOU, Y., YU, Z. (2011) Insect fat, a promising resource for biodiesel. *Petroleum & Environmental Biotechnology* **S2**:1-6.

Mac EVILLY, C. (2000) Bugs in the system. *Nutrition Bulletin* **25**: 267-268.

MAKKAR, H.P.S. TRAN, G., HEUZÉ, V., ANKERS, P. (2014) State-of-art on use of insect as animal feed. *Animal Feed Science and Technology* **197**: 1-33.

MEKONNEN, M.M. and HOEKSTRA, A.Y. (2010) The green, blue and grey water footprint of farm animals and animal products. Volume 2: appendices. 104p.

MENDES, J. and LINHARES, A.X. (1999) Diapause, pupariation sites and parasitism of the horn fly, *Haematobia irritans*, in southeastern Brazil. *Medical and Veterinary Entomology* **13**: 185-190.

MILLER, B.F., TEOTIA, J.S., THATCHER, T.O. (1974) Digestion of poultry manure by *Musca domestica*. *British Poultry Science* **15**: 231–234.

MYERS, H.M., TOMBERLIN, J.K., LAMBERT, B.D., KATTES, D. (2008) Development of black soldier fly (Diptera: *Stratiomyidae*) larvae fed dairy manure. *Environmental Entomology* **37**: 11–15.

NEWTON, L., SHEPPARD, C., WATSON, D.W., BURTLE, G., DOVE, R. (2005) Using the Black Soldier Fly, *Hermetia illucens*, as a value-added tool for the management of swine manure. In: Report for Mike Williams, Director of the animal and poultry waste management center. North Carolina State University, 17p.

NOORMAN, N. (2001) Pheromones of the housefly: a chemical and behavioural study. Ph D Thesis, University of Groningen, The Netherlands, 127p.

OGUNJI, J.O., KLOAS W., WIRTH, M., SCHULZ, C., RENNERT B. (2006) Housefly maggot meal (Magmeal): an emerging substitute of fishmeal in tilapia diets. Tropentag 2006. Hohenheim. <http://www.tropentag.de/2006/abstracts/full/76.pdf>.

OONINCX, D.G.A.B., VAN ITTERBEECK, J., HEETKAMP, M.J.W., VAN DEN BRAND, H., VAN LOON, J.J.A., VAN HUIS, A. (2010) An exploration on greenhouse gas and ammonia production by insect species suitable for animal or human consumption. *PLoS One* **5**: 1-7.

OONINCX, D.G.A.B. and DE BOER, I.J.M. (2012) Environmental impact of the production of mealworms as protein source for humans – a Life Cycle Assessment. *PloS One* **7**: 1-5.

PARRY, M., EVANS, A., ROSENGRANT, M.W., WHEELER, T. (2009) Climate Change and Hunger: responding to the challenge. World Food Programme, Rome, 104p.

PRETORIUS, Q. (2011) The evaluation of larvae of *Musca domestica* (common housefly) as protein source for broiler production. Thesis (MScAgric (Animal Science)). University of Stellenbosch, South Africa, 95p.

RUMPOLD, B.A. and SCHLÜTER, O.K. (2013) Nutritional composition and safety aspects of edible insects. *Molecular Nutrition and Food Research* **57**: 802-823.

SANCHES-MUROS, M-J. BARROSO, F.G., MANZANO-AGUGLIARO, F. (2014) Insect meal as renewable source of food for animal feeding: a review. *Journal of Cleaner Production* **65**:16-27.

SCHERER, E.E., NESI, C.N., MASSOTTI, Z. (2010) Atributos químicos do solo influenciados por sucessivas aplicações de dejetos suínos em áreas agrícolas da Região Oeste Catarinense. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* **34**: 1375-1383.

SHEPPARD, D.C., NEWTON, G.L., THOMPSON, S.A., SAVAGE, S. (1994) A value added manure management system using the black soldier fly. *Bioresources Technology* **50**: 275–279.

SHEPPARD, D.C., TOMBERLIN, J.K., JOYCE, J.A., KISER, B.C., SUMNER, S.M. (2002) Rearing methods for the black soldier fly (Diptera: Stratiomyidae). *Journal of Medical Entomology* **39**: 695-698.

SMIL, V. (2002) Worldwide transformation of diets, burdens of meat production and opportunities for novel food proteins. *Enzyme and Microbial Technology*, **30**: 305–311.

SOGBESAN A.O., AJUNU N., MUSA B.O., ADEWOLE A.M. (2006) Harvesting techniques and evaluation of maggot meal as animal dietary protein source for Heteoclarias in outdoor concrete tanks. *World Journal of Agricultural Science* **4**: 394-402.

SWIATKIEWICZ, S., SWIATKIEWCZ, M., ARCZEWSKA-WLOSEKK, A., JOZEFIAK, D. (2015) Chitosan and its oligosaccharide derivatives (chito-oligosaccharides) as feed supplements in poultry and swine nutrition. *Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition* **99**: 1-12.

TABASSUM-ABBASI, ABBASI, T., ABBASI, S.A. (2016) Reducing the global environmental impact of livestock production: the minilivestock option, *Journal of Cleaner Production* **112**:1754-1766.

TILMAN, D., FARGIONE, J., WOLFF, B., D'ANTONIO, C., DOBSON A., HOWARTH, R., SCHINDLER, D., SCHLESINGER, W., SIMBERLOFF, D., SWACKHAMER, D. (2001) Forecasting agriculturally driven global environmental change. *Science* **292**: 281 –284.

TOMBERLIN, J.K., SHEPPARD, D.C., JOYCE, J.A. (2002) Susceptibility of black soldier fly (Diptera: Stratiomyidae) larvae and adults to four insecticides. *Journal of Economic Entomology* **95**: 598-602.

UBABEF – União Brasileira de Avicultura, 2014. Relatório Anual 2014. 105p.
<http://www.ubabef.com.br/files/publicacoes/8ca705e70f0cb110ae3aed67d29c8842.pdf>.

VAARST, M., STEENFELDT, S., HORSTED, K. (2015) Sustainable development perspectives of poultry production. *World's Poultry Science Journal* **71**: 609-620.

VAN HUIS A. (2013) Potential of insects as food and feed in assuring food security. *Annual Review of Entomology* **58**:563-583.

VAN HUIS, A., ITTERBEECK, J.V., KLUNDER, H., MERTENS, E., HALLORAN, A., MUIR, G., VANTOMME, P. (2013) Edible insects: future prospects for food and feed security. FAO Forestry Paper 171. Roma, Itália: FAO.

VANTOMME, P., MERTENS, E., VAN HUIS, A., KLUNDER, H.C. (2012) Assessing the Potential of Insects as Food and Feed in assuring Food Security- Summary report. FAO (Ed.). Rome, 38p.

VAN ZANTEN, H.H.E., MOLLENHORST, H., OONINCX, D.G.A.B., BIKKER, P., MEERBURG, B.G., DE BOER, I.J.M. (2015) From environmental nuisance to environmental opportunity: housefly larvae convert waste to livestock feed, *Journal of Cleaner Production* **102**:362-369.

VELDKAMP, T., VAN DUINKERKEN, G., VAN HUIS, A., IAKERMOND, C.M.M, OTTEVANGER, E., BOSCH, G., VAN BOEKEL, M.A.J.S. (2012) Insect as a sustainable feed ingredient in pig and poultry diets – a feasible study. Wageningen UR Livestock Research - Report 638.

VOGEL, G. (2010) For more protein, filet of cricket. *Science* **327**: 811-811.

WEIGERT, S.C., FIGUEIREDO, M.R.C., LOEBMANN, D., NUNES, J.A.R., SANTOS, A.L.G. (2002) Influência da temperatura e do tipo de substrato na produção de larvas de *Musca domestica* Linnaeus, 1758 (Diptera, *Muscidae*). *Revista Brasileira de Zootecnia* **5**: 1886-1889.

WERNER, W.W., GOMES, A., RODRIGUES, S.R., RODRIGUES, A.C.L., PENTEADO-DIAS, A.M. (1999) Predadores e parasitóides associados à entomofauna presente em fezes bovinas em áreas de pastagens em Campo Grande, MS. EMBRAPA - Comunicado técnico, n.58.

ZHANG J., HUANG L., HE J., TOMBERLIN J.K., LI J., LEI C., SUN M., LIU Z., YU Z. (2010) An artificial light source influences mating and oviposition of black soldier flies, *Hermetia illucens*. *Journal of Insect Science* **10** (202): 1-7.

ZHENG, L.Y., LI, Q., ZHANG, J.B., YU, Z.N. (2013) Double the biodiesel yield: rearing black soldier fly larvae, *Hermetia illucens*, on solid residual fraction of restaurant waste after grease extraction for biodiesel production. *Renewable Energy* **41**: 75-79.

CAPÍTULO 5

Emergy assessment of conventional poultry production system in Brazil ³

ABSTRACT

The growing world population and the increasing income of populous countries like India and China arises the world demand for animal protein. Brazil, as the first world's poultry meat exporter, plays an important role to supply this demand. Present research aims to evaluate the sustainability and renewability of Brazilian poultry production system through the emergy assessment. Was calculated indices of sustainability from a poultry farm representative of the average profile in the main producer region in Brazil, South, in 2015. Data showed that renewability was 13.95%, total emergy (Y) $1.07E+18$ seJ, transformity (Tr) 172,506 seJ/J, emergy yield ratio (EYR) 1.54, environmental load ratio (ELR) 5.91 and emergy sustainability index (ESI) 0.26. Large-scale pattern and efficient zootechnical indices as feed conversion allow better Tr and EYR in Brazilian conditions when compared to data from Italy and China, for instance. Brazilian ESI was close to Italian index, even considering particularities of each one. However, total emergy (Y), renewability and ELR not demonstrate sustainability in Brazilian system in a long term. Emergy exchange ratio (EER) found was 2.48 demonstrating that the system delivers 2.48 times more emergy than it receives with the sale of their products. The incorporation of social and natural costs, as additional services (to solve negative externalities) in the indices analysis allows reflections about the use, remuneration and responsibility of the use of resources along the whole food chain, since the producer, who uses the natural resources and have to preserve them, until the consumer who enjoys the product and should concern with waste processing and recycling.

Keywords: Environmental accounting; Emergy analysis; Broiler; Bioeconomics.

1. Introduction

The threefold challenge proposed by Godfray et al. (2010) to guarantee food security to feed 9 billion people propose (a) matching the rapidly changing demand for food from a larger and more affluent population; (b) ensuring that world's poorest people no longer suffer from hungry and; (c) implement previous solutions using environmentally and socially sustainable ways. The sustainable intensification proposed by those authors bring environmental and social concerns

³ Formatado e submetido em 08/02/2017 ao Journal of Cleaner Production.

related mainly to rural population who depends directly on finite resources of nature for their livelihoods.

In an article analyzing China and India data about growing food demand due to increasing in income, Ghandi and Zhou (2014) demonstrate that the economic growth rates of 7 to 12% in the last two decades changed the patterns of local food demand. The increasing global incomes has changing typical diet, usually based on grains, to a greater proportion of meat, dairy and eggs (Rask and Rask, 2011, Cassidy et al., 2013). According to Evans (2009) in an executive summary and recommendations, World Bank expects food demand to increase by 50% until 2030 and meat demand to increase by 85% considering population and income growth over the next two decades.

The income elasticity of demand in India is very low for all-cereal (0.091 – rural, negative in urban) and very high for meat (1.265 – rural; 0.626 – urban) demonstrating a floating demand for meat as income increase. The same way, in China, the income elasticity for animal products are generally positive and large reaching, respectively, 0.6183 and 0.7088 in 2010 for beef and poultry (Zhou et al., 2012). Both countries figure as most populous in the world and share the expectation to the highest gross domestic product (GDP) until 2050. Increasing meat consumption takes part of the experience to a transition from ‘poverty’ to ‘adequate food and clothing’ getting closer to ‘well to do lifestyles’ (Hubacek et al. 2007).

Brazil is the world’s main poultry meat exporter producing 13.14 million tonnes in 2015. Although 67% of the total production has been destined to domestic market, in 2014 it was exported 4,009 MT of poultry meat to foreign markets, mainly to Middle East and Asia. The South region responded, in 2015, per 76.66% of the Brazilian broiler exports generating employment to 130,000 families who produce in integration with exporters’ agro industries (ABPA, 2016).

The increasing world poultry meat consumption and the prognostic to world’s meat demand increase 68% for meat and 57% for dairy in 2030 (FAO, 2011) makes Brazil a potential candidate to achieve this aim. However, environmental concerns, especially with waste treatment and greenhouse gas (GHG) emissions, considering the whole life cycle of transformed inputs and waste, are limiting the expansion of poultry activity in some regions.

Brazilian poultry industry has a particular arrangement – vertical integration, where on one side the industries contribute with genetic (one day chicks), feed, veterinary and technical assistance and a production purchase agreement. On the other side, the producer assumes costs related to facilities (equipment and buildings), energy and gas, substrate for poultry litter, and labor. Usually, the labor force is provided by householder family members and sometimes poultry meat production is the only revenue of entire family unit. Considering national data, poultry sector generates 3.6 million employees being responsible for 1.5% of GDP (UBABEF, 2014). That

demonstrate the importance of this kind of activity to regions as the South of Brazil, the largest poultry producing region.

Among environmental concerns related to poultry production, the application of poultry litter as biofertilizer for many years in the same fields is damaging groundwater and disrupting the soil's minerals balance (Abdala et al. 2012; Shigaki et al. 2006). High levels of Phosphorus (P) and Nitrogen (N) for a long period and the lack of planning capacity to solve this issue is harming agricultural production (MacDonald et al. 2011; Bouwman et al. 2013). In developed countries, about 70% of harvested crops are destined to feed livestock but few of livestock waste is treated for to diminish the amounts of N and P that remain in groundwater or are volatilized to the atmosphere as ammonia and deposited regionally (Tilman et al. 2011).

Contributing to the debate, globally, 62% of crop production (on mass basis) are allocated to human food compared to 35% to animal feed. Considering regional numbers in North America and Europe, only 40% of their croplands meant to direct human food production whereas in Africa and Asia 80% of the areas are destined to food production (Foley et al., 2013).

Data shows changes in consumer patterns in developing countries that are replacing grain protein for meat protein (Rask and Rask, 2011). These new demands require methodologies capable to measure and evaluate all the resources involved in meat production process. Poultry industry, as others meat industries over the world, has to obtain sustainability in their agro-chains. This insertion of social responsibility, environmental concerns and economic growth in meat production analysis is the main challenge to feed the world in a sustainable way.

The waste generated from agricultural and industrial process has residual exergy (energy available) and is physically, biologically and chemically transformed before becoming an environmental and public health liability (Winfrey and Tilley, 2016). The remaining exergy in waste requires a work in the environment in order to dissipate it until all the available energy has become waste heat and the residual exergy in a minimum level.

Traditional economic analysis does not consider as inputs the natural contributions and social resources fundamental to the development of poultry production. If negative externalities are not considered, the analysis could deliver wrong results when seeking sustainability. In order to consider all these aspects we propose the use of emergy assessment which is based on the thermodynamics laws and applies to all kinds of energy, material, human services, money and information, converting all of them into the same unit – emergy (written with M) that is usually expressed in solar joule equivalent, (seJ) (Odum, 1996; Brown and Ulgiati, 2004).

The emergy methodology converts all the inputs of a process, including nature contributions (rain, sun, soil, biodiversity, wind, water wells), economic inputs (materials, fuels,

services, money, etc.), and negative and positives externalities (GHG emissions, environmental services, etc.) in terms of all the solar energy incorporated in the process. With the methodology the energy required by the environment to absorb the waste generated in previous process must be included as an input (Ulgiati et al., 2004) being a way of preserving resources in the long run.

Other specificity from Odum's methodology is the determination of the renewability of all kinds of resources (from nature to economy). Determining the percentage of renewability of each resource used allows the calculation of renewability that relates renewable solar energy of inputs and total solar energy used. This is a way to measure sustainability or autonomy of a system considering that in a long-term view, renewable systems have bigger surviving chance (Ortega et al. 2005).

Other energy indices as transformity (Tr), energy yield ratio (EYR), environmental loading ratio (ELR), energy exchange ratio (EER) will be discussed throughout the article and can enrich the debate giving reflections about the resources origin, technologies insertions and efficiency, besides discussing the possibilities to increase the desirable index like ESI.

Much more than just thinking food security to world population (Godfray and Garnet, 2014), that can reach 9.6 to 12 billion people in 2100 (Gerland et al. 2014), we need to think and evaluate environmental and social consequences of each kind of food. Emergy assessment can contribute to this and the present research aims to evaluate the ecological and economic behavior of prevalent system considering the conventional poultry production in the South Brazilian, generating data that can guide decisions on what kind of meat the world will be willing to eat.

2. Material and Methods

Scale production, technology level, market niche (like organic poultry meat) or even the management uses different resources or in a different way. Particularities of the production system are explained to better understand the steps of the methodology.

2.1 Poultry production system

Brazilian poultry industry, since 1960, has developed particularities that allow sharing costs and responsibilities between industry sector and the rural producers – vertical integration arrangement, which currently covers over 90% of poultry farming (UBABEF, 2011) and is coordinated by contracts. The farm's waste treatment is the responsibility of the producer. The poultry litter, after some transformation, belongs to poultry farmer and can generate additional

revenue. Both products, poultry meat and poultry litter has being incorporated in the calculus as energy products.

Although the costs of a production system are shared by both partners in the vertical integration, the calculation consider the system as a whole with all costs, independent of who pays for. In a different way, emergy assessment considers data inside the farm gate, all inputs that come to farm to poultry creation until they result in broilers and litter as products, disregarding transportation, slaughtering, processing or commercialization costs.

2.2 Poultry data

The economic and zootechnical data, presented in Tables 1 and 2, is from Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA-CNPSA). It was chosen for the emergy analysis a conventional poultry production system representative of Santa Catarina, the main Brazilian's exporter state (UBABEF, 2011). In this region, the arrangement in vertical integration model represents more than 70% of Brazilian poultry exports (UBABEF, 2014).

Farm data used is for a 1,200m² facilities with family labor force, highly mechanized. Even some farms produce grains to feed the animals, in this analysis, it was considered vertical integration in which the farms sell products to the industry and receive in return poultry feed.

Water data used for animal consumption and cleaning facility are from wells and until now in Brazilian environmental legislation it is not charged. This water is considered as a nonrenewable resource from nature. In recent years, there is a debate about water payment for livestock consumption in Brazil.

Table 1

Productive data from poultry farm with 1,200m² building in Chapecó, SC, Brazil

Building and productive performanc	Value
Initial accommodation (birds/lot)	12,500
Mortality (%)	1
Slaughter weight (kg)	2.4
Age at slaughtering (days)	43
Interval between lots (days)	16
Number of lots to change bedding	6
Lots per year	6
Feed conversion (kg feed/kg weight)	1.733
Feed intake (kg/bird)	4.62

Source: EMBRAPA – CNPSA

Table 2

Economic data from poultry farm in Chapecó, SC, Brazil in October 2015

Economic costs	US\$/year
Familiar Labor	2,709.00
Eventual labor	847.00
Energy and heat	2,359.00
Substrate for bed	1,238.00
Environmental license	52.00
Insurance	206.00
Maintenance	542.00
Cleaning, disinfection and drugs	774.00
Administrative costs	77.00
Technical assistance	1,489.00
Equipment investment	2,364.98
Facilities investment	1,238.39
October 2015 exchange rate (R\$/US\$)	3.876

Source: EMBRAPA – CNPSA

2.3 Energy Assessment

Based on open systems thermodynamics, energy assessment is a quantitative method for evaluating environmental assets and flows (Odum, 1996). By definition, energy is the embodied energy necessary to generate a flow (Odum, 1996). Energy assessment proposes to measure all contributions (money, mass, energy and information) in terms of work – energy (with M) and expressed in solar equivalent Joules (seJ) (Odum, 1996; Brown and Ulgiati, 2004). This methodology aims to obtain a thermodynamic measure of all the energy used to produce a resource (Cavalett et al. 2004).

In the energy methodology, the transformity is the solar energy required to make one unit of a product or a service (i.e. kg, Joule or dollar) and it can be used as a measure of the inverse value of the system efficiency, allowing comparison among other energy forms. Transformity for each input can be obtained in a direct consult to International Society for the Advancement of Energy Research (ISAER) database from which most of researches are based on. Specifically in this research transformity grain's data used were based in previous research in Brazil (Ortega, 2002; Cavalett, 2008). Further transformity data are from different researchers mentioned in the calculation memorial (Appendix A).

All biosphere natural flows are converted into solar energy flows using solar radiation as reference that by definition is 1.0 (Odum et al., 2000). To this calculations sun, rain and wind

incidence have local coordinates: 27°05'47" S- 52°37'06" W using NASA database (surface meteorology and solar energy – EOSWEB).

The transformities used in this study were obtained from data base obtained before 2000. The values were updated by multiplying the old value by 1.68, because in 2000 the budget of energy received by biosphere was recalculated and it changed to $15.83\text{E}+24 \text{ seJ year}^{-1}$, the previous value was $9.44\text{E}+24 \text{ seJ year}^{-1}$ (Odum et al. 2000, Hu et al. 2012).

For economic services (family labor, hired labor, insurance + environmental license, technical assistance, maintenance and administrative costs) it was used the average cost to the farm -in a vertical integrated arrangement model- converted in dollar (October of 2015).

In energy assessment methodology a three steps sequence must be observed: a) construction of a systems energy flow diagram defining the main components and the system boundaries; b) organization of the data in an emergy evaluation table and; c) calculation of emergy indices and discussion of the results for practical purposes (Odum, 1996).

The first step, description and drawing of an energy diagram (Figure 1), starts by defining the focus of attention (the system's boundaries), identifying external sources (forcing functions) and the main internal components and finally showing the interactions, relationships, etc. Odum uses symbols that enable the diagram to provide a pictorial description of main processes, driving forces, products, recycling patterns and interactions among components, which are all important aspects of an integrated assessment (Agostinho and Siche, 2014).

Second step is the emergy table (Table 4) where all resources are classified and listed according to their origin: a) contributions from nature (I), b) from economy (F). Resources from economy are divided into material (M), economic services (S) and additional services (AS). Description of each input and output is detailed in calculation memorial (appendix A).

Additional services is a measure of the process negative externalities through the calculation of the forest area (in hectares) needed to (a) sequester carbon dioxide generated in the production of industrial inputs, (b) compensate the soil lost and (c) to produce the rain water infiltration in quantity sufficient to needs of productive process. To improve the analysis, it is considered the renewability of all resources. All inputs are in part renewable (R) and in part nonrenewable (N). This assumption allows the calculation of renewability of each input and the calculation of the renewability of the system product (% R).

Emergy indicators used in third step aims to understand and evaluate the poultry production system. Odum (1996) proposes the formula and utility of each indicator in Table 3.

Table 3. Emery indicators used in environmental accounting.

Indicators	Expression	Signification
<i>Solar transformity (Tr)</i>	Y/E	<i>Ratio between the total emery and the energy of output.</i>
<i>Renewability (%R)</i>	$100x(R+M_R+S_R)/Y$	<i>Ratio between the renewable resources and the total emery.</i>
<i>Emery yield ratio (EYR)</i>	$Y/(M_N+S_N)$	<i>Ratio between total emery and economy non-renewable inputs</i>
<i>Emery investment ratio (EIR)</i>	$(F_N)/(R+F_R+N)$	<i>Ratio of emery of purchased inputs and emery of free inputs.</i>
<i>Environmental loading ratio (ELR)</i>	$(F_N+N)/(R+M_R+S_R)$	<i>Emery ratio of nonrenewable inputs and renewable inputs.</i>
<i>Emery exchange ratio (EER)</i>	$Y/[(\$)x(seJ/\$)]$	<i>Ratio between the emery delivered by the system and the emery of money received in sales.</i>
<i>Emery Sustainability index (ESI)</i>	$ESI=EYR/ELR$	<i>Ratio between yield ratio and environmental loading ratio.</i>

Font: Odum (1996); Brown & Ulgiati (1997), Ulgiati & Brown (1998), Brown & Ulgiati (2001).

3 Results

Following the sequence proposed by Odum (1996) to emery assessment, we present in Figure 1 the diagram where is represented all inputs renewable or not from nature and economy and outputs (products and byproducts) from a Brazilian conventional poultry farm system. Note that in outputs (OP) we consider the poultry litter and solid residues (carcass from mortality rate) to be added to substrate poultry litter, after decomposed in composter, generating bio fertilizer to be sold as byproduct.

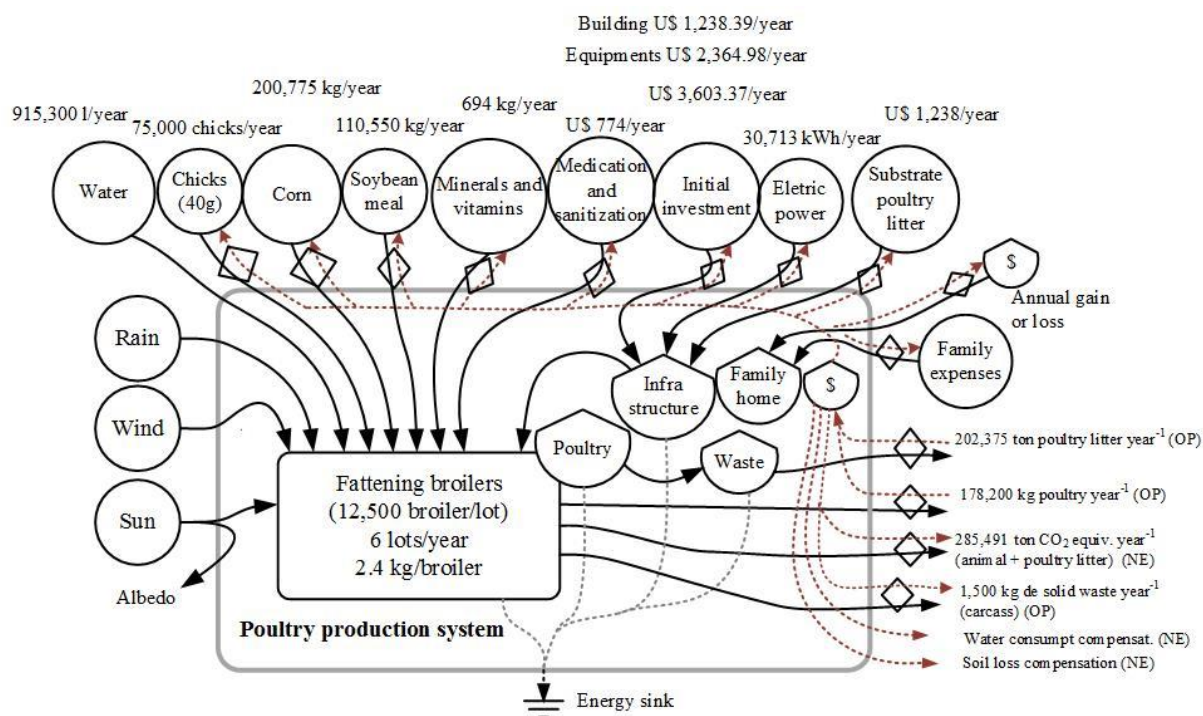


Figure 1: Diagram of energy, material and information flows of conventional poultry farm system with 1,200 m² shed building in Chapecó, SC, Brazil, in 2015.

Legend: OP = output; NE = negative externality.

Source: The authors.

The diagram allows uses energy language symbols (Odum, 1996) that allows the identification of the interactions between nature and economy. All resources processed including family labor are paid with the products sales represented with a red dotted arrow coming in an opposite side.

Red arrows relative to CO₂ emissions, from broilers or poultry litter, and carcasses remaining after poultry death, are directed outside of the diagram because their costs will be calculated as negative externalities (NE) in the emergy assessment, in the same way of soil loss to be compensated. Water consumption that come from well and not charged in Brazil today is considered a non-renewable source and are represented going outside the diagram as a negative externality to be compensated too.

Direct GHG emissions and other externalities, like infiltration of water with contaminants and nutrients in excess, are usually not considered in the emergy assessment of agricultural systems, the question is that without considering those externalities in the accounting the systems that do not treat animal manure present better emergy indicators (Buller et al., 2014).

The improvements proposed by Ortega et al. (2005) insert the externalities as the value of the additional services necessary to solve the negative impacts. The amount of CO₂ emissions is converted into native forest area (7 hectares) that can storage the emitted carbon. Emergy from nature contributions necessary to grow the forest are incorporated to the calculus (3.23E+16 seJ) becoming the emergy data more close to the reality. In the same way, the recovering of the soil lost is calculated having a value of 4.27E+10 seJ. Water infiltration that occurs naturally if the productive process was not installed can be mitigated in 1.27 hectares of native forest what represent an emergy calculus 5.87E+15 seJ.

The results of emergy assessment of the conventional poultry farm studied are presented in Table 4. In this table all inputs were converted into solar emergy using transformity values available derived from previous studies of other researchers, after carefully checking their applicability to the specific case under study. Values of goods and services supplied to the system were multiplied by suitable renewability factors, in order to split them into their renewable and nonrenewable components.

Table 4. Annual energy flows in conventional Brazilian poultry system

Note	Input	Value/year/poultry house (1200 m ²)		Conversion factor	International Unit	Transformity seJ/unit	Ren	Renew Flow seJ	Non renew Flow seJ	Emergy Flow seJ	%	
		Quantity	Unit									
		Renewable inputs from nature (R)										
1	Sun	1.42E+06	kWh	3.60E+06	J	1.68	sej/J	1.00	8.60E+12	0.00E+00	8.60E+12	0.00
2	Wind	14.51	J/s	3.15E+07	J	4.22E+03	sej/J	1.00	1.93E+12	0.00E+00	1.93E+12	0.00
3	Rain	1,600	l/m ² /year	6.00E+06	J	3.06E+04	sej/J	1.00	2.94E+14	0.00E+00	2.94E+14	0.03
Nature's Non renewable inputs (N)									0.00E+00	3.73E+17	3.73E+17	34.83
4	Water (drinking and cleaning)	9.15E+05	l/year	5.00E+06	J	8.15E+04	sej/J	0.00	0.00E+00	3.73E+17	3.73E+17	34.83
I=R+N									3.04E+14	3.73E+17	3.73E+17	34.86
Economy inputs (M)									1.33E+17	4.83E+17	6.16E+17	57.54
5	Chick	3,000	kg/year	2.26E+07	J	7.92E+05	sej/J	0.20	1.07E+16	4.30E+16	5.37E+16	5.02
6	Corn	200,775	Kg	1.59E+07	J	5.70E+04	sej/J	0.16	2.91E+16	1.53E+17	1.82E+17	17.01
7	Soybean meal	110,550	Kg	1.22E+07	J	2.45E+05	sej/J	0.26	8.61E+16	2.45E+17	3.31E+17	30.95
8	Mineral- vitamin premix	694	Kg	1.00E+03	Kg	1.48E+13	sej/g	0.00	0.00E+00	1.03E+16	1.03E+16	0.96
9	Energy heat	30,713.42	kWh	3.60E+06	J	2.67E+05	sej/J	0.05	1.48E+15	2.81E+16	2.95E+16	2.76
10	Bedding material (substrate)	1,238	US\$			4.52E+12	sej/US\$	1.00	5.60E+15	0.00E+00	5.60E+15	0.52
11	Medication and sanitization	774	US\$			4.52E+12	sej/US\$	0.00	0.00E+00	3.50E+15	3.50E+15	0.33
Fixed investment (M)									0.00E+00	1.63E+16	1.63E+16	1.52
12	Equipment	2,364.98	US\$			4.52E+12	seJ/US\$	0.00	0.00	1.07E+16	1.07E+16	1.00
13	Poultry house	1,238.39	US\$			4.52E+12	seJ/US\$	0.00	0.00	5.60E+15	5.60E+15	0.52
Economy services (S)									1.60E+16	1.08E+16	2.68E+16	2.50
14	Hired labor	846.98	US\$			4.52E+12	sej/US\$	0.70	2.68E+15	1.15E+15	3.83E+15	0.36
15	Family labor	2,708.98	US\$			4.52E+12	sej/US\$	0.70	8.57E+15	3.67E+15	1.22E+16	1.14
16	Insurance+environmental license	258.00	US\$			4.52E+12	sej/US\$	0.00	0.00E+00	1.17E+15	1.17E+15	0.11
17	Technical assistance	1,489.00	US\$			4.52E+12	sej/US\$	0.70	4.71E+15	2.02E+15	6.73E+15	0.63

The energy indicators calculated are presented in Table 5.

Table 5. Energy indicators of conventional poultry farm in Chapecó, SC, Brazil in 2015

Indicator	Formula	Value	Unit
Transformity	$Tr=Y/Ep$	172,506	seJ/J
Specific energy	$Y/\text{total dry mass}$	2.80E+12	seJ/kg
Renewability	$\% R= 100(R+MR+SR)/Y$	13.95	%
Energy Yield ratio	$EYR=Y/F$	1.54	
Energy investment ratio	$EIR=(MN+SN)/(R+MR+SR+N)$	0.98	
Energy investment ratio with externalities	$EIR_{ex}=(MN+SN+AS)/(R+MR+SR+N)$	1.05	
Environmental loading ratio	$ELR=(N+MN+SN)/(R+MR+SR)$	5.91	
Energy exchange ratio	$EER=Y/(\text{US\$*seJ}/\text{US\$})$	2.48	
Energy sustainable index	$ESI=EYR/ELR$	0.26	

The Energy Exchange ratio was calculated not only for the products but also for main inputs purchased in order to know if the price paid remunerates the energy involved to produce it. These data are presented in Table 6.

Table 6. Energy Exchange Ratio (EER) of economic inputs in a Brazilian poultry production system.

Input	Value (US\$)	Y Inputs (seJ)	EER
Chicks	48,374.6	5.37E+16	0.25
Corn	29,353	1.82E+17	1.37
Soybean meal	37,649	3.31E+17	1.95
Energy heat	2359,1	2.95E+16	2.77
Poultry litter substrate	1241.6	5.60E+15	1.00
Cleaning and sanitization	774	3.50E+15	1.00

4 Discussion

It was observed that one of the biggest energy flows in the conventional poultry farm is water used for animal consumption and for building sanitization that represents 34.83% of total energy flow. This water comes from wells and is not treated neither recycled. In Brazil, this water is not paid by the farmer (UNEP FI, 2009) masking the real value of poultry on environmental accounting. The South of Brazil still enjoys abundant water to raise livestock without paying for water, but energy analysis provides a warning to the necessity of inserting in preserved areas for water conservancy and treatment and recycling.

According to EMBRAPA (2016), in Brazilian poultry industry more than 60% of the economic costs comes from feed, mostly corn and soybean meal. Although huge part of these grains are produced inside country, the analysis says that 47.96% of total energy flow comes from them.

Incorporation of renewability factor aiming to provide the ratio of renewable and nonrenewable, for material and services, is especially valid considering the use of inputs purchased at the local or regional economy, such as, corn, soybean, manure and human services that are partially renewable (Cavalett et al., 2004). For instance, the renewable fraction of corn and soybean meal represents 10.76% of total energy and affects the environmental behavior of the system.

Another specificity observed is that family labor which represents $1.22E+16$ seJ, meaning 53.7, 34.0, 45.7% of renewable, nonrenewable and the total energy of services, respectively.

Considering energy indices presented in Table 5, transformity value fits in the same order of magnitude of other Brazilian conventional poultry farms (Buller et al. 2014). This indicator relates total energy spent to the system's products. The lower the better the use of materials and services form nature and the economy.

A Brazilian poultry transformity of $1.72E+05$ seJ J^{-1} means better ecosystem efficiency in comparison with an poultry farm in Italy ($5.79E+05$ seJ J^{-1}) even knowing that specificities exist between systems (Castelini et al., 2006). Another recent study in China analyzing cropping, poultry rearing and fish raising systems showed a higher transformity in poultry rearing ($2.31E+05$ seJ J^{-1}) than the present study, although total energy found was lower $6.61E+15$ seJ yr^{-1} (Cheng et al., 2017). The system proposed by these authors utilize chickens reared in the grass land, with no grains mentioned in the calculus. This system can be compared with the transformity data of another orchard-based field in China ($2.20E+06$ seJ J^{-1}) (Hu et al., 2012). As mentioned by the authors this high value due to long grow time, 180 days, compared with 43 in Brazil and 49 in Italy, respectively.

Transformity allows the comparison among different systems even they use different resources because they are converted to energy of the same type. Comparing to an integrated production system of grains, pig and fish in Brazil, the transformity reported by Cavalett et al. (2004)

was $9.48E+05$ seJ/J demonstrating that poultry production shows a better transformity than pig. Otherwise, in other poultry farm evaluated in Brazil, the transformity reaches $5.31E+05$ seJ/J (Barros, 2012). Comparison allows better choices involving ecosystem efficiency mainly if renewable numbers are used in the analysis.

It is possible to compare energy per mass. Specific energy (seJ/kg) are $2.8E+12$ and $4.35E+12$ for Brazil and Italy, respectively. Better feed conversion and a shorter period to slaughter in Brazilian industry represent less energy involved in the process.

A high renewability ratio means that, in the long run, the system is more able to survive to economic stress than those with high proportion of nonrenewable energy (Brown and Ulgiati, 2004). Like in all intensive livestock systems, with processes dependent on feed produced with inputs derived from oil, the renewability is very low, representing, in the present study, 13.95%. Considering that feed (corn and soybean meal) represents 48% of the total energy and 61% of the renewability, there are several options to improve the system: agroecological production of soy and corn; alternative source of protein, like insect meal (van Huis et al. 2013, Smetana et al. 2016), organic grains (Castellini et al. 2006) or even upgrade genetic enhancement to better zoo technical index.

Another way to improve renewability is to introduce renewable energy source like solar energy along poultry farm facilities. Today energy represent 2.76% of total energy flow and comes from hydroelectric source with 0.05 renewability. The insertion of solar energy technology can change all this flow to a renewable one aggregating 2.76% to the renewable fraction.

Other technology that is becoming more frequent in Brazilian poultry farms is the catchment of rainwater in cistern, which reduces the use of water from wells. Even water used by animals or to clean facilities is not treated and recycled, it can mitigate energy demand from wells and preserve groundwater, which in a long term beneficiate the ecosystem as a whole.

The energy yield ratio (EYR) is the proportion of the total energy used and the energy of the inputs purchased from economy. This indicator measures the ability of a system to use local resources through the incorporation of resources of outside economy. Its lower value is 1 in the case that system is totally dependent of economy inputs indicating that it only transform resources that are already available due to previous process (Cavalett et al., 2004).

Comparing the EYR values obtained with not organic poultry farms of Italy (Castellini et al. 2006) and China (Hu et al. 2012), for Brazil is 1.54 while in Italy is 1.19 and in China 1.11. Probably this difference comes from the use of water from wells that is not charged therefore making Brazil more competitive in the world market. However, if Brazilian livestock legislation begin to consider the use of well water, as already has been debated (UNEP PI, 2009, Tokgoz et al., 2014), the resource will switch from free from nature to economy input increasing up to 34.83% in the results. The EYR

in this situation will achieve the lowest value possible in emergy analysis, 1.00, demonstrating a complete dependence on external economy inputs.

Emergy investment ratio (EIR) found was 0.98 demonstrating that renewable sources from material and services prevail to non-renewables from economy.

Although when we consider in the calculus the insertion of additional services (SA), as a dividend the EIRex value is 1.05. This EIR improved index considers as additional services the contributions for native forest growth, necessary to mitigate carbon dioxide. Analyzing both index, EIR e EIRex, the lower the value of renewable sources higher will be EIR. The greater will be negative externalities (additional services) higher value will be found of EIRex.

The Environmental Loading Ratio (ELR) measures the impact of a production system (Brown and Ulgiati, 2002). ELR between 3 and 10 are indicative of moderate environmental impact what was found in Brazilian conventional poultry system (5.91) although is much bigger than integrated production system with pig-fish-grain in Brazil 3.13 (Cavalett et al. 2004) and similar to Italy poultry conventional system 5.21 (Castellini et al. 2006).

The Emergy Sustainability Index (ESI) is an aggregate measure of the benefit measured by emergy yield ratio (EYR) and cost measured by environmental loading ratio (ELR) because it is ratio between both indices (Ulgiati and Brown, 1998). To achieve sustainability, a system must have high value in EYR, meaning less dependency of resources purchased from economy, and low ELR, only achieved through high levels of renewable resources. It supports the idea that “sustainability is a function of yield and load on the environment” (Brown and Ulgiati, 1997).

In Brazilian conventional poultry system studied the ESI value was 0.26, facing 0.23 and 0.32 from industrial system from Italy and orchard-based field in China, respectively. The similarity of the production characteristics from Brazil and Italy allows a more accurate comparison of this index. The Brazilian poultry system efficiency obtained through feed conversion, days to slaughter and slaughter weight, represents better use of resources mainly feed; the more emergy expensive. However, the comparison of both systems allows reflections about the necessity to develop management practices that can improve efficiency.

In other Brazilian study, Barros (2012) evaluates a farm that creates broilers in integration with swine and dairy cows. In this analysis it was found a low ESI value (0.08) associated with a low renewability (7.79%) even disregarding the negative externalities. Considering externalities, ESI shows a small decrease (0.073) as well as the renewability (6.9%). The lack of details about production systems prevents further analysis, but warning for the possibility to always find more sustainable ways of poultry production.

All technologies that improve the renewability of inputs and consequently reduce ELR, as solar energy, rainwater capture, alternative protein sources like insect meal to feed, as mentioned above, are ways to increase the sustainability index in a poultry production system.

The Emery Exchange Ratio (EER) results from the ratio of total solar emery flow of the system product and the solar emery value of the currency received in its sales. It is the ratio of emery exchanged in a trade relative to the emery received from consumers or trade partners demonstrating the advantage of one partner over the other (Brown and Ulgiati, 2004). In this study, EER was 2.48 meaning that the system provides more emery to buyers than what is received. Remuneration from the buying system underestimates the environmental value.

Considering the GHG emissions in the poultry farm, from animal metabolism to waste treatment, a lot of resources spent to produce poultry meat are not remunerated although being fundamental to the process.

Emery Exchange shows who is getting the profit or who must pay for the environmental resources incorporated, but are part of the real value of the product. Also calculating the EER of each resource purchased by economy we can visualize who is getting profits and who is losing (Cavallet et al. 2004). Considering that $EER=1$ remunerates the emery of the resources, bigger values means higher benefits. EER of electric power (2.77), which in Brazil basically comes from hydroelectric, has the higher benefit to user. Already the EER from chicks (0.25) shows the low remuneration in relation with real costs of chick production.

5 Conclusion

Responsible alternatives for poultry production worried with social and environmental issues besides economic profit must be created to feed the population. Animal protein and especially poultry meat obliges the search for more sustainable production systems.

Emery assessment comes as an alternative to evaluate poultry production systems because it considers in the costs of resources that are not measured properly in the traditional economy, as natural resources, additional services (area for emission compensation) and family labor.

Results obtained allow the comparison with different poultry production systems or even different kind of animal protein. It was observed that Brazilian poultry farms efficiency indices, as Tr and EYR, are better than poultry production systems in Italy and China. The ESI value was close to Italian industrial poultry farm. Other indices like total emery, renewability and ELR are worst in Brazilian conventional farms. The emery methodology allows to recognize ways to improve the supply of renewable sources (e.g. water) that are important to achieve renewability and consequently less dependence of economy in the long term.

Different production systems, as organic production, must be evaluated. The Brazilian vertical integration between industry and farmers facilitates the insertion of household farms in the poultry activity. The zootechnical and administrative efficiency observed in Brazilian farms reflects in energy indices when compared with other countries.

It is inevitable that noble sources of protein become part of a growing population diet as better economic conditions are conquered. The responsibility of science is to find ways to measure environmental and social impacts of each production process, mainly through energy analysis, that should promote the insertion of hidden costs along the whole supply chain. Farmers, who use natural resources and industrial inputs, industry, who process the product, retail and wholesale, commerce, who intermediate the transactions, and consumers, who finally enjoy the products, must share these real costs.

Acknowledgements

This work was supported by Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), especially for doctoral scholarship.

REFERENCES

- Abdala, D.B., Ghosh, A.K., Silva, I.R., Novais, R.F., Venegas, V.H.A., 2012. Phosphorus saturation of a tropical soil and related P leaching caused by poultry litter addition. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 162, 15-23.
- ABPA – Brazilian Association of Animal Protein, 2016. Annual Report 2016. Brazil, 131p.
- Agostinho, F., Siche, R., 2014. Hidden costs of a typical embodied energy analysis: Brazilian sugarcane ethanol as a case study. *Biomass & Bioenergy*. 71, 69-83.
- Bouwman, L., Goldewijk, Van der Hoek, K.W., Beusen, A.H.W., Van Vuuren, D.P., Willems, J. Rufino, M.C., Stehfest, E., 2013. Exploring global changes in nitrogen and phosphorus cycles in agriculture induced by livestock production over the 1900-2050 period. *PNAS*. 110, 20882-20887.
- Brown, M.T., Ulgiati, S., 1997. Energy-based indices and ratios to evaluate sustainability: monitoring economies and technologies toward environmentally sound innovation. *Ecol. Eng.* 9, 51-69.
- Brown, M.T., Ulgiati, S., 2002. Energy evaluations and Environmental loading of electricity production systems. *Journal of Cleaner Production*. 10, 321-334.
- Brown, M.T., Ulgiati, S., 2004. Energy Analysis and Environmental Accounting. *Encyclopedia of Energy*. 2, 329-354.
- Buller, L.S., Bergier, I., Ortega, E., Moraes, A., Bayma-Silva, G., Zanetti, M.R., 2014. Soil improvement and mitigation of greenhouse gas emissions for integrated crop-livestock systems: Case study assessment in the Pantanal savanna highland, Brazil. *Agricultural Systems*. 137, 206-219.

- Cassidy, E.S., West, P.C., Gerber, J.S., Foley, J.A., 2013. Redefining agricultural yields: from tonnes to people nourished per hectare. *Environ. Res. Lett.* 8, 1-8.
- Castellini, C., Bastianoni, S., Granai, C., Dal Bosco, A., Brunetti, M., 2006. Sustainability of poultry production using the emergy approach: Comparison of conventional and organic rearing systems. *Agriculture Ecosystems & Environment*. 114, 343-350.
- Cavalett, O., Queiroz, J.F., Ortega, E., 2004. Emergy assessment of integrated production systems of grains, pig and fish in small farms in South Brazil. In: Ortega, E. & Ulgiati, S. (editors): *Proceedings of IV Biennial International Workshop "Advances in Energy Studies"*. Unicamp, Campinas, SP, Brazil, June 16-19, 239-256p.
- Cavalett, O., 2008. *Análise do ciclo de vida da soja*. (Doctoral thesis, UNICAMP, Campinas, Brazil). Retrieved from: <http://www.unicamp.br/fea/ortega/extensao/Tese-OtavioCavalett.pdf>.
- Cheng, H., Chen, C., Wu, S., Mirza, Z.A., Liu, Z. 2017. Emergy evaluation of cropping, poultry rearing, and fish raising system in the drawdown zone of Three Gorges Reservoir of China. *Journal of Cleaner Production* (2017), <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.053>
- FAO, 2011. *World Livestock 2011 – Livestock in Food Security*. Rome: Food and Agriculture Organization. <http://www.fao.org/docrep/014/i2373e/i2373e00.htm>. (Accessed 10.09.16).
- Gandhi, V.P., Zhou, Z., 2014. Food demand and the food security challenge with rapid economic growth in the emerging economies of India and China. *Food Research International*. 63, 108-124.
- Gerland, P., Raftery, A.E., Sevcikivá, H., Li, N., Gu, D. et al., 2014. World population stabilization unlike this century. *Science*. 346, 234-237.
- Godfray, H.C.J., Beddington, J.R., Crute, I.R., Haddad, L., Lawrence, D., Muir, J.F., Pretty, J., Robinson, S., Thomas, S.M., Toulmin, C., 2010. Food Security: The Challenge of Feeding 9 Billion People. *Science*. 327, 812-818.
- Godfray, H.C.J., Garnett, T., 2014. Food security and sustainable intensification. *Phil. Trans. R. Soc. Soc. B*. 369, 1-10.
- Hu, Q.H., Zhang, L.X., Wang, C.B., 2012. Emergy-based analysis of two chicken farming systems: a perception of organic production model in China. *Procedia Environmental Sciences*. 13, 445-454.
- Hubacek, K., Guan, D., Barua, A., 2007. Changing lifestyles and consumption patterns in developing countries: A scenario analysis for China and India. *Futures*. 39, 1084-1096.
- MacDonald, G.K., Bennett, E.M., Potter, P.A., Ramankutty, N., 2011. Agronomic phosphorus imbalances across the world's croplands. *PNAS*. 108, 3086-3091.
- Odum, H.T., 1996. *Environmental Accounting: Emergy and Environmental Decision Making*. John Wiley, New York.
- Odum, H.T., Brown, M.T., Brandt-Williams, S.L., 2000. Folio #1: Introduction and global budget. *Handbook of Emergy Evaluation: A compendium of data for emergy computation issued in a series of folios*. Center for Environmental Policy, Univ. of Florida, Gainesville.

Ortega, E., Cavalett, O., Bonfácio, R., Watanabe, M., 2005. Brazilian Soybean Production: Emery Analysis with an expanded scope. *Bulletin of Science, Technology & Society*. 25, 1-11.

Rask, K.J., Rask, N., 2011. Economic development and food production –consumption balance: A growing global challenge. *Food Policy*. 36, 186-196.

Shigaki, F., Sharpley, A., Prochnow, L.I., 2006. Animal-based agriculture, phosphorus management and water quality in Brazil: Options for the future. *Sci. Agric. (Piracicaba, Braz.)*. 63, 194-209.

Smetana, S., Palanisamy, M., Mathys, A., Heinz, V., 2016. Sustainability of insect use for feed and food: Life Cycle Assessment perspective. *Journal of Cleaner Production*. 137, 741-751.

Teixeira, M.B., 2012. Analysis of the environmental impact of agribusiness units. Case study: Pinhal river watershed, Santa Catarina. (Dissertation, UNICAMP, Campinas, SP, Brazil). Retrieved from: http://www.unicamp.br/fea/ortega/extensao/dissertacao_MarianaBarrosTeixeira.pdf

Tilman, D., Balzer, C., Hill, J., Befort, B.L., 2011. Global food demand and the sustainable intensification of agriculture. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 108, 20260-20264.

Tokgoz, S., Torres, D.A.P., Laborde, D., Huang, J., 2014. The role of U.S., China, Brazil's agricultural and trade policies on global food supply and demand. *FOODSECURE Working paper n° 19*, 60p. Netherlands.

UBABEF, 2011. The saga of the Brazilian poultry industry: How Brazil has become the world's largest exporter of chicken meat. (Ed. Costa, S.). São Paulo: UBABEF, 2011, 120p.

Ulgiati, S., Brown, M.T., 1998. Monitoring patterns of sustainability in natural and man-made ecosystems. *Ecol. Model.* 108, 23-36.

Ulgiati, S., Raugei, M., Bargigli, S. 2004. Dotting the I's and Crossing the T's of emery synthesis: material flows, information and memory aspects, and performance indicators. In: *ISAER Conference Proceedings*, Gainesville, FL, pp. 199-214.

UNEP Finance Initiative (UNEP FI), 2009. Water sustainability of agribusiness activities in Brazil. Chief Liquidity series – Issue 1: Agribusiness (geography – and sector- specific water materiability briefings for financial institutions). 72p. http://www.unepfi.org/fileadmin/documents/chief_liquidity1_01.pdf. (Accessed: 01/09/16).

van Huis, A., van Itterbeeck, J., Klunder, H., Mertens, E., Halloran, A., Muir, G., Vantomme, P., 2013. In: *FAO Forest (Ed.), Edible Insects: Future Prospects for food and Feed Security*. FAO, United Nations, Rome.

Winfrey, B.K., Tilley, D.R. 2016. An emery-based treatment sustainability index for evaluating waste treatment systems. *Journal of Cleaner Production*. 112, 4485-4496.

Zhou, Z.Y., Tian, W.M., Wang, J.M., Liu, H.B, Cao, L.J., 2012. Food consumption trends in China. Research report submitted to the Australian Department of Agriculture. Fisheries and Forestry in Canberra, May 2012.

CAPÍTULO 6

Insect as feed: an emergy assessment of insect meal as a sustainable protein source for the Brazilian poultry industry⁴

ABSTRACT

Projections point to a global increase in meat consumption as a result of rising income and changes in food patterns, especially in developing countries. Poultry meat is an option for supplying this demand and Brazil is currently the main global exporter of this protein. Of the resources involved in this industrial process, soybean meal, which is a protein source for the farmed animals, requires a large quantity of energy. In order to increase the sustainability of poultry industry it is necessary to find a more efficient alternative to this poultry feed. Through emergy assessment, this study proposes to evaluate the production and processing of black soldier fly larvae (BSFL) as an insect meal and to compare its use with soybean meal in a Brazilian poultry production system. The biological capacity of BSFL to convert the remaining energy from a previous process (grain residue) into a novel protein is demonstrated by emergy indices, whose best values favor this new technology. Transformity (emergy per energy of the product) decreased 144.35% while renewability (use of renewable resources) increased by 46.67%. The emergy yield ratio (EYR) reduced from 1.71 to 1.00 in insect meal production compared to soybean meal, the environmental loading ratio (ELR) improved from 1.99 to 1.03 and the emergy sustainable index (ESI) improved from 0.86 to 0.97. Gains were also observed in poultry production: the transformity of poultry meat decreased by 19.70% (144,114 seJ/J), renewability increased by 11.55%, EYR increased from 1.54 to 1.72 and ELR reduced from 5.91 to 5.15, when insect meal was used in comparison to soybean meal. These results, based on an experimental model, imply that BSFL meal can improve sustainability in the Brazilian poultry production process.

Keywords: broiler, bioeconomics, bioreactor, thermodynamic, energy and industrial ecology

⁴ Formateado para o Journal of Industrial Ecology.

<heading level 1> Introduction

The increasing global population and changes in food consumption patterns mean that it is important to find out other protein sources. Regardless of whether they are animal or vegetable in origin, they must be capable of supplying food demand in a viable and sustainable way (Ruviaro et al. 2012, Gandhi and Zhou 2014). Growing income, especially in developing countries, such as China, India and African countries, is responsible for an increase in meat consumption of 1.9% per year over the next decade. Poultry is one of the available meats that can help supply that demand (USDA 2016). Currently, Brazil is a main global poultry meat exporter, contributing 13.14 million tonnes to this industry in 2015 (ABPA 2015). Benning and Chemnitz (2014) estimate an increase of 13.25% in broiler meat consumption in Brazil in a period of 2010 to 2022. The three main producer and exporter states are located in the South Region and represent 76.6% of the total exports in the country (ABPA 2015). This region faces environmental problems related to pollution (organic residues) and natural resource availability, such as water (Drastig et al. 2016), which are concerning and limiting the expansion of the poultry industry.

The intensification of livestock production in recent decades forces the use of grains in animal diets. Of the world's crop production, 35% is allocated to animal feed that produces human food (meat, eggs and dairy products) indirectly and much less efficiently (Foley et al. 2011). Shepon et al. (2016) demonstrated that the production of poultry is more efficient than that of other meats (especially beef), and poultry can feed more people, while requiring less land, than beef. However, poultry production is not totally efficient its usage of nutrients that are available in grains such as corn and soybean.

Meat production systems require a relatively high quantity of land, energy and water, and they contribute to the pollution of soil and groundwater and emit large amounts of greenhouse gases (GHG) in many countries (Bhat et al. 2015). Palhares (2012) calculated the water use by Brazilian broiler farms between 2000 and 2010 and found that indirect water consumption for the production of grain represented 99% of the total water use. The direct water consumption by chickens, to drink

and to cool and refresh the barns, represented less than 0.32% of the total water demand in poultry production (Palhares 2012).

The sustainable intensification proposed by the Food and Agriculture Organization (FAO) (2013), Garnett and Godfray (2012) and Godfray and Garnett (2014) is based, among other actions, on the efficient use of finite natural resources to feed an increasing world population. The meat production process, including the poultry industry, is constantly developing technologies for better energy use, converting it into more products and byproducts with the minimum environmental impact (Chadd 2007). Finding technologies to extract all the energy from nutrient sources, such as grains, before discarding the remains as organic waste, is a huge challenge to mankind. Man, like all living organisms, uses available environmental resources (with low entropy) turning them into products with economic value (higher entropy) and residues. The entropic nature of the economic process, or even the maintenance of life, leads us to reflect on what low-entropy resources are available in the environment and how best to use them (Georgescu-Roegen 1971). Thus, we can ask: are we using the full energy potential of grains before discarding them? Are we appropriating the energy available in grains before generating organic waste? How can we extract the maximum energetic value of this resource to reduce our environmental impact? One approach to answering these questions is to investigate the use of insects as feed to improve the sustainability of the poultry sector.

The occurrence of waste is unavoidable in industrial production; it is an essential qualitative factor that can vary in quantitative extent according to the degree of thermodynamic (in)efficiency in which the processes operate (Baumgärtner and Arons 2003). This also applies to agribusiness, where organic waste is generated from different products and production process. However, nature provides biological agents, such as Black Soldier Fly Larvae (BSFL), that can act as bioreactors. They are capable of extracting energy from all kinds of organic waste (animal, vegetable and urban waste) to produce protein and lipids that can be processed in insect meal and used as animal feed (van Huis et al. 2013, De Marco et al. 2015, Smetana et al. 2016, Salomone et al. 2017).

In addition to its nutrient producing capacity, BSFL can promote environmental gains as demonstrated by Sheppard et al. (1994) and Nguyen et al. (2015) in experiments with 50.0%, 67.9% and 74.2% reductions in waste volume, depending on the kind of substrate. Myers et al. (2008) showed a reduction in nitrogen and phosphorus compounds of 50% and 70%, respectively. Reductions in waste odors from bacterial growth restrictions were also described by van Huis et al. (2013), as well as the ability to generate an organic compound that can be used as biofertilizer (Newton et al. 2005, van Huis et al. 2013).

The large quantity of nitrogen and phosphorus released into the air and soil, which generate GHG and pollute groundwater, is the main consequence of the inefficiency of feed usage by animals to produce human food (Tilman et al. 2011, Bouwman et al. 2013). As Georgescu-Roegen (1971) proposes, life and economy are entropic processes that are inevitable and irreversible over time. Even if zootechnical enhancements can improve feed conversion, converting feed to meat will always generate residues. The challenge is to slow down this entropic process by using all the available nutritive potential (energy) of feed before disposing of it in nature as residue.

As energy flows and conversions are the subject of thermodynamic analysis, thermodynamic metrics can be readily used to describe the environmental performance of any material or energy-based technology in industrial ecology (Liao et al. 2012). This study used emergy assessment as a tool to study thermodynamics and explore the potential of creating and processing BSFL in order to replace soybean meal as the protein component of the diet of broilers in Brazil.

Following Odum's methodology, all inputs, whether from nature or the economy, were converted into a common unit – solar energy (seJ) (Odum 1996). An experiment developed in Brazil, which creates BSFL from grain residues resulting from the creation of other insects destined for use in agricultural biological control, was used to calculate the emergy values of inputs and outputs of the process and the respective emergy indicators. The use of this new protein source was compared with traditional soybean meal in a poultry farm using the same methodology. The

composition indices and losses and gains associated with this technology are discussed, enriching the debate and developing new pathways to the sustainability of the poultry sector.

<heading level 1> Methods

In order to facilitate the understanding of the different steps of the research presented here, and as it is common to both, the first part, insect rearing, and the second part, poultry production, the methodology of emergy assessment will be explained. Subsequently the details of each step, including data collection, will be described.

<heading level 2> Emergy assessment

The emergy approach is flexible enough to be easily applied to the study of many different systems, whether they are natural or man-made (Jorgenson 2000). By definition, emergy is the embodied energy necessary to generate a flow (Odum 1996). Emergy assessment proposes to measure all contributions (money, mass, energy and information) in terms of work – emergy (with M) and expressed in solar equivalent Joules (seJ) (Odum 1996, Brown and Ulgiati 2004). This methodology aims to obtain a thermodynamic measure of all the energy used to produce a resource (Cavalett et al. 2004).

The particularly valuable contribution of Odum's methodology is the capacity to convert all inputs and outputs of a process to the same unit (seJ) through the conversion factor called transformity. Transformity is the solar emergy required to make one unit of a product or a service (i.e. kg, Joule or dollar) and it can be used as a measure of the inverse value of the system efficiency, allowing comparisons among other energy forms. Transformity for each input can be obtained from a direct search of the International Society for the Advancement of Emergy Research (ISAER) database, on which most research is based. When data are not available, transformity can be measured using different techniques, such as bromatology, which was used for insect meal in the present study.

The transformities used in this study originated from a database developed before 2000. The values were updated by multiplying the old value by 1.68, because in 2000 the budget of emergy received by the biosphere was recalculated: it changed from $9.44E+24$ seJ year⁻¹ to $15.83E+24$ seJ year⁻¹ (Odum et al. 2000, Hu et al. 2012).

Three steps must be followed according to the recommended methodology: a) construction of a systems energy flow diagram defining the main components and the system boundaries; b) organization of the data in an emergy evaluation table; c) calculation of emergy indices and discussion of the results for practical purposes (Odum 1996). The first step considers symbols proposed by Odum in order to differentiate the types of sources – sources from nature are situated on the left side of the diagram and sources from the economy (material and services) are positioned at the top. Outputs are on the right side of the diagram and at the bottom is the energy sink or the entropy lost in all phases of the process.

The second step is the emergy table where all resources are classified and listed according to their origin: nature (I) or economy (F). Resources from the economy are divided into material (M), economic services (S) and additional services (AS). The sum of all inputs demonstrates the energetic value produced in the industrial production process. Traditional accountability considers exclusively economic inputs, such as material and services, when evaluating an industrial system, disregarding the contributions of nature and the consequences generated by this process. Without including natural resources, human labor and additional services, the sustainability evaluation can be compromised. Additional services allow for externalities, either positive or negative, to be determined and incorporated into the calculation. In the present case, negative externalities such as GHG emissions and the use of non-renewable natural resources must be compensated for. To do this, the size of a forest area (in hectares) that is needed to sequester the carbon dioxide generated in the industrial process, to compensate for the soil lost and to compensate for the water used from wells that currently does not have monetary value, can be calculated. To improve the analysis, the renewability of all resources is considered. All inputs are in part renewable (R) and in part non-

renewable (N); this differentiation allows reflections on the permanence of the process through time and on the composition of different kinds of emergy indicators.

The last step is the calculation and analysis of emergy indicators. Emergy assessment has the ability to account for the thermodynamic behavior of a system, as well as to assess the renewability of its products and its equilibrium with the surrounding environment (Jorgensen 2000). A description of each indicator is detailed in Table 1.

Table 1. Description of emergy indicators.

Indicator	Expression	Description
Solar transformity (Tr)	Y/E	Ratio between total emergy and output energy
Renewability (%R)	$100x(R+M_R+S_R)/Y$	Ratio between renewable resources and total emergy
Emergy yield ratio (EYR)	$Y/(M_N+S_N)$	Ratio between total emergy and non-renewable inputs from the economy
Emergy investment ratio (EIR)	$(F_N)/(R+F_R+N)$	Ratio between emergy of purchased inputs and emergy of free inputs
Environmental loading ratio (ELR)	$(F_N+N)/(R+M_R+S_R)$	Emergy ratio of non-renewable inputs and renewable inputs
Emergy exchange ratio (EER)	$Y/[(\$)x(seJ/\$)]$	Ratio between the emergy delivered by the system and the emergy of money received in sales
Emergy sustainability index (ESI)	$ESI=EYR/ELR$	Ratio between yield ratio and environmental loading ratio

Source: Odum (1996), Brown & Ulgiati (1997), Ulgiati & Brown (1998), Brown & Ulgiati (2004)

This study implemented all three steps of this methodology for both parts of the study: i) industrial rearing and processing of BSFL for insect meal; ii) comparative use of protein sources (soybean meal and insect meal) in a Brazilian poultry farm. Emergy indicators were calculated for

each phase of the study in order to investigate the efficacy of this new feed technology and its impact on the sustainability of the Brazilian poultry industry.

<heading level 2> Insect rearing and processing

Rearing and processing insects to be used as an ingredient in animal feed is a new technology that, although is being fostered by the FAO, is facing many hurdles in terms of sanitary, cultural and legislative factors all over the world (van Huis et al. 2013). Due to these obstacles, in Brazil the available data on insect rearing and processing are only experimental, rather than from a commercial scale. Thus, information from a pilot experiment was used, which rears insects, specifically BSFL, using grain residues (corn and wheat) resulted from rearing other species of insects for the biological control of pests in agriculture. Even though it is considered to be an experiment, this pilot study produces 1 ton of BSFL per day and has facilities, equipment and labor that are considered by the FAO to be on an industrial mass scale (Vantomme et al. 2012). The specific methods of rearing and processing BSFL are not described here because they are beyond the scope of this study; only the inputs and outputs are discussed when calculating energy assessment. Data from the economy (building facilities and equipment) and labor (hired and technical assistance) are converted into energy flows using the emdollar, based on the exchange rate of October 2015. The conversion rate of the Brazilian emdollar used is from Pereira et al. (2013), updated for 2015.

The biosphere natural flows used in this study were converted into solar energy flows using solar radiation as a reference, which by definition is 1.0 (Odum et al. 2000). For this calculation, the sun, rain and wind incidence at the local coordinates 22°43'31"S and 47°38'57"W from the NASA database were used (surface meteorology and solar energy – EOSWEB).

The outputs remaining from the industrial process are insect meal and an organic compound that is being studied to investigate its capacity as a biofertilizer. Both products underwent bromatological analysis, described in Table 2. Emissions of GHG were estimated through

experimental data from Van Zanten et al. (2014) on house fly larvae, because an emissions study using BSFL could not be found.

Table 2. Bromatological analysis of BSFL meal, organic compound and grain residues (calculated as dry matter).

	BSFL meal	Organic Compound	Grain residue (substrate for BSFL)
Organic matter (%)	95.92	92.45	96.91
Crude protein (%)	35.89	25.44	26.85
Ethereal extract (%)	45.89	1.41	4.01
Gross energy (kcal/kg)	6,916	4,297	4,420

Source: authors

<heading level 2> Soybean meal as a protein source

The soybean meal (SBM) data used in the energetic analysis as a comparison with BSFL meal was obtained from Cavallet (2008). Although this author considered in his study the energetic value of all phases during the production of soybean in Brazil, the processing of oil and SBM and the naval transportation to Europe, in the present study the naval transportation step was disregarded, in order to consider only the use of SBM inside the country.

<heading level 2> The Brazilian poultry production system

The Brazilian poultry production system is based on a vertical integration model where more than 70% of producers share responsibilities and costs with the industry (UBABEF 2011). The processes analyzed in this study consider data only from inside the farm. The industry supplies all economic inputs (genetic material, feed and technical assistance) and the farmer provides facilities, labor (family members and hired staff), water and electricity. The outputs from this process are chickens and poultry litter, which are commercialized by farmers and generate revenue.

The economic and zootechnical data for emergy assessment were obtained from Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA – CNPSA) in October 2015, from a typical poultry farm in Chapecó, Santa Catarina, which is the main poultry producer and exporter state in Brazil (UBABEF 2011). The only difference between the poultry farm systems compared in this study was the protein source – soybean meal (SBM) or insect meal (IM). The farm data used are for a highly mechanized, 1,200 m² facility that uses a familiar labor force. Though some farms produce grain to feed the animals, the system was considered to be a vertical integration model in which the farms sell products to the industry and receive poultry feed in return.

The water used for animal consumption and cleaning is obtained from wells and is currently free of charge according to Brazilian environmental legislation. This water is considered to be a non-renewable resource from nature. In recent years, there has been a debate about whether Brazilian farmers should pay for water used in the production of livestock in Brazil.

Table 3. Zootechnical and economic data from a poultry farm with a 1,200 m² building in Chapecó, Santa Catarina, Brazil in October 2015.

Infrastructure and zootechnical performance	Value
Initial accommodation (birds/lot)	12,500
Mortality (%)	1
Slaughter liveweight (kg)	2.40
Age at slaughtering (days)	43
Interval between lots (days)	16
Number of lots to change bedding	6
Lots per year	6
Feed conversion (kg feed/kg live weight)	1.73
Feed intake (kg/bird)	4.62
<hr/>	
Economic costs	US\$/year
Familiar labor	2,709.00

Hired labor	847.00
Energy and heat	2,359.00
Bedding	1,238.00
Environmental license	52.00
Insurance	206.00
Maintenance	542.00
Cleaning, disinfection and drugs	774.00
Administrative costs	77.00
Technical assistance	1,489.00
Equipment investment	2,364.98
Facilities investment	1,238.39
October 2015 exchange rate (R\$/US\$)	3.876

Source: EMBRAPA – CNPSA

<heading level 1> Results and discussion

The diagram presented in Figure 1 constitutes the first step proposed by Odum (1996) in emergy methodology. Through a specific language of symbols it allows the visualization of all inputs from nature and economy and all outputs generated by the rearing and processing of BSFL meal.

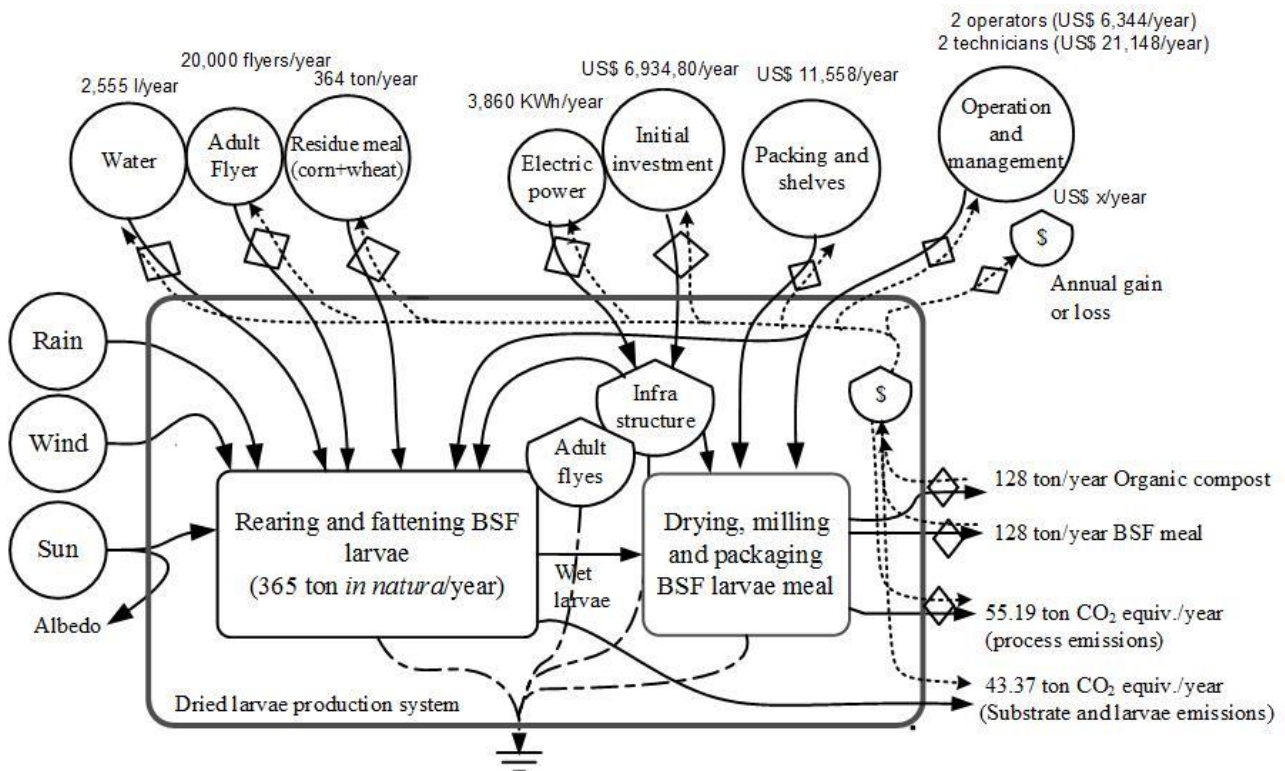


Figure 1. Energy, material and information diagram of rearing, fattening and processing Black Soldier Fly Larvae in a production system located in São Paulo state, Brazil. OP = output; NE = negative externality. Source: elaborated by authors based on the data sources described in the main text.

The inputs on the left side of the diagram come from nature. Those at the top are remunerated from the economy as demonstrated by finely dotted arrows on the opposite side, with the revenue generated by the sale of the products and byproducts (OP) situated on the right of the diagram. Emissions of CO₂ (from larvae, substrates and processes) and soil loss go out of the diagram (dotted arrows) because they are calculated as negative externalities (NE). Ortega et al. (2005) proposed an improvement to the methodology by inserting negative externalities into the calculation. The emissions of CO₂, as well as soil loss, must be compensated for by a native forest area (0.41 ha) that is able to sequester the carbon released. The insertion of the energetic value of this forest in the energy flow ($1.89E+15$ seJ) allows a more precise calculation of the sustainability of this production process.

The results of energy assessment of IM production and processing are presented in Table 4. Values of goods and services supplied to the system were multiplied by suitable renewability factors in order to split them into their renewable and non-renewable components, generating a total energy flow of $2.91\text{E}+17$ seJ/year.

Table 4. Annual energy flows of BSFL rearing and processing from grain residues in São Paulo state, Brazil.

Note	Description	Value		Conversion factor	Unit	Transformity (energy per unit)		Renewability centesimal	Renewable flow seJ/year	Non-renewable flow seJ/year	Total energy flow seJ/year	%
		Value	Unit			Value	Unit					
Renewable inputs from nature (R)									2.60E+14	0.00E+00	2.60E+14	0.09
1	Sun	1,784.762	kWh/year	3,600.0	J/year	1.00	sej/J	1	6.43E+12	0.00E+00	6.43E+12	0.00
2	Wind	21.92	J/s	31,536.0	J/year	4.22E+03	sej/J	1	2.92E+12	0.00E+00	2.92E+12	0.00
3	Rain	1,273	m ³ /m ² /year	6,100.0	J/year	3.06E+04	sej/J	1	2.37E+14	0.00E+00	2.37E+14	0.08
4	Adult flies	0.192	kg/year	20,720.7	J/year	3.36E+06	sej/J	1	1.34E+13	0.00E+00	1.34E+13	0.0046
Non-renewable inputs from nature (N)									0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00
I = R + N									2.60E+14	0.00E+00	2.60E+14	0.09
Economy inputs (M)									6.54E+15	2.47E+15	9.01E+15	3.09
5	Water (drinking, cleaning and sanitization)	2,555	l/year	5.00E+03	J/l	8.15E+04	sej/J	1	1.04E+12	0.00E+00	1.04E+12	0.00
6	Insect feed (corn and wheat residue)	365,000	kg/year	4,186	J/year	4.58E+04	sej/J	0.16	1.12E+13	5.88E+13	7.00E+13	0.02
7	Electric power	3,860	kWh/year	3.60E+06	J/year	2.67E+05	sej/J	0.35	1.30E+15	2.41E+15	3.71E+15	1.28
8	Materials (packing, shelves and containers)	11,558	US\$/year			4.52E+12	sej/US\$	0.1	5.22E+15	0.00E+00	5.22E+15	1.80
Fixed investment (M)									0.00E+00	3.13E+16	3.13E+16	10.77
9	Facilities and equipment	6,934.80	US\$/year			4.52E+12	seJ/US\$	0	0.00E+00	3.13E+16	3.13E+16	10.77
Economy services (S)									1.36E+17	1.13E+17	2.49E+17	85.40
10	Labor	2	people	6,344	US\$/year	4.52E+12	sej/US\$	0.7	4.01E+16	1.72E+16	5.74E+16	19.71
11	Technical assistance	2	people	21,148	US\$/year	4.52E+12	sej/US\$	0.5	9.56E+16	9.56E+16	1.91E+17	66.69

	Additional services (externalities) (AS)							1.89E+15	0.00E+00	1.89E+15	0.65	
12	Area for carbon sequestration (offsetting)	0.41	ha	4.31E+11	J/year	1.07E+04	seJ/J	1	8.89E+15	0.00E+00	1.89E+15	0.65
13	Soil loss (impact absorption)	0.0015	ha	4.31E+11	J/year	1.07E+04	sej/J	1	6.92E+12	0.00E+00	6.92E+12	0.00
	F = M + S + AS							1.44E+17	1.47E+17	2.91E+17	99.91	
Total emergy (Y) = I + F									1.44E+17	1.47E+17	2.91E+17	100.00
Outputs (OP)												
14	Insect meal	128	ton	3.71E+12	J/year							
15	Organic compound	128	ton	2.30E+12	J/year							
	Total			6.01E+12	J/year							

Source: authors.

The products and byproducts (organic compounds) that result from this process generate a production of $2.56E+5$ kg/year and an energy flow of $6.01E+12$ J/year, resulting in an emergy of $1.14E+12$ seJ/kg. The equivalent value for a Brazilian SBM production process, using data adapted from Cavallet (2008), was $2.43E+12$ seJ/kg. By relating the calorific value of each product (J) to its respective emergy flow, we can find the transformity, or a measure of the efficiency of a product (Odum 1996). The transformity of insect meal was calculated as 78,539 seJ/J, in comparison to 191,899 seJ/J for SBM, which represents an improvement of 144.35% for insect meal over SBM.

The data presented in Table 4 illustrates that economy inputs (material, services and additional services) represent 99.91% of total emergy flow, confirming that insect rearing and processing is an intensive industrial process. Fly larvae are a natural renewable input with an exceptional capacity to convert organic material on biomass as protein source, and they represent a small proportion ($1.34E+13$ seJ/year – 0.0046%) of the emergy flow in the total industrial process. Among the inputs related to economy, services (S), represented by labor and technical assistance, show the largest contribution to total emergy flow – $2.49E+17$ seJ/year or 85.40%. However, 54.62% of that is a renewable flow that can positively impact other indices, in contrast to SBM production.

The high costs found here of the services in this process are in line with the report “Assessing the potential of insects as food and feed in assuring food security” by insect researchers and stakeholders for the FAO (Vantomme et al. 2012). Rumpold and Schlüter (2013) pointed out the need for industrial scale production, which requires technological improvement of rearing facilities for an automated, cost-effective production process. Van Huis et al. (2013) propose that one of the major challenges to scaling up the production process is the lack of labor, which is limiting the competitiveness of the alternative animal protein products. However, these observations are based only on financial aspects of the

industrial process. When we add natural resources, negative externalities and human labor to the analysis, as proposed by emergetic assessment, it is shown that more expensive processes should have their sustainability and viability evaluated.

To facilitate the discussion of our results, they are summarized in Table 5. Comparative data from IM calculated in this research and SBM calculated in a previous study in Brazil (Cavallet 2008) are presented.

Table 5. Emergy indicators of insect meal (IM) and soybean meal (SBM) production and processing in Brazil.

Indicator	Formula	Unit	IM process	SBM process
Total emergy (Y)	$Y = I+F$	seJ	2.91E+17	6.87E+15
Specific emergy (seJ/kg)	Y/total mass	seJ/kg	1.14E+12	2.43E+12
Transformity of total process (seJ/J)	Y/E_p	seJ/J	48,442	120,599
Product* transformity (seJ/J)	Y/E_p	seJ/J	78,539	191,899
Renewability (%)	$\% R = 100.(R+MR+SR)/Y$	%	48.97	33.39
Emergy yield ratio (EYR)	$EYR = Y/F$		1.00	1.71
Environmental loading ratio (ELR)	$ELR = N/R$		1.03	1.99
Emergy sustainable index (ESI)	$ESI = EYR/ELR$		0.97	0.86

*Product = IM or SBM

Source: Cavallett (2008) for SBM and authors for IM

The capacity of a system to persist through time is conferred by its renewability and this can be a measure of sustainability. The higher this indicator, the lower the dependence on external resources and the higher the system's renewability (Buller et al. 2014). Comparing both protein sources, IM shows a relative increase of 46.67% in renewability in comparison to SBM. Although economy constitutes a significant fraction of emergy flows in IM production and processing, the renewability of the inputs involved in the process is 49.62%, the same figure for SBM is 33.39%.

Although other protein sources can be used in poultry production, such as canola, cotton and sunflower meal, or those from animal origin such as meat, fish or blood meal, soybean meal still prevails due to its high nutritional value, low variability in composition (Ca:P ratio) and the high sanitary safety required by the global importer market (Khan et al. 2016). Even though it is still at the stage of an experimental model, insect meal is already showing advantages and possibilities of improving the sustainability of the poultry sector.

The emergy yield ratio found in this research demonstrates almost total dependence on resources from the economy in IM production. The value for this indicator is 1.00, illustrating that the value of total emergy flow is equivalent to the emergy flow from the economy. In contrast, in the SBM system, a huge volume of natural resources is involved in the agricultural phase, so total emergy flow exceeds the emergy flow from the economy, resulting in a larger value for this indicator of 1.71. Another way to demonstrate sustainability is the analysis of the environmental loading ratio (ELR). For this index, the higher the renewable fraction of the emergy flow, the lower the index. IM presented a better value (1.03) than SBM (1.99), which impacts positively on the emergy sustainable index (ESI) values of 0.97 for IM and 0.86 for SBM.

Thus, analyzing isolated data from both protein sources verified some impacts on sustainability. However, in order to demonstrate improvements in a poultry supply chain that is highly dependent on protein, a comparative emergy assessment was conducted with data of a typical Brazilian poultry farm differing only the source of protein used (SBM or IM). Emergy indicators from this analysis are presented in Table 6.

Table 6. Comparative energy indicators of a conventional Brazilian poultry production system that used different protein sources in broilers diet.

Indicators	Unit	SBM use	IM use
Total energy (Y)	seJ	1.07E+18	8.94E+17
Transformity (Tr)	seJ/J	172,506	144,114
Renewability (R)	%	13.95	15.56
EYR		1.54	1.72
EIR		0.98	0.67
EIRex		1.05	0.75
ELR		5.91	5.16
EER		2.48	2.07
Specific energy	seJ/kg	2.80E+12	2.34E+12

Source: Cavalett (2008) for SBM and authors for IM

Better emergetic index values are observed for IM than for SBM. The highly intensive resource use, from both nature and economic inputs, in the production and processing of SBM resulted in a less sustainable index. Although only one resource (protein) was changed in the poultry production system, emergetic gains and improved sustainability can be seen. Lower total energy flow, a reduction of 19.70% in the transformity of poultry meat production with the use of IM, as well as a gain in renewability of around 11.55% in comparison to the current poultry industry (which uses SBM) show that using this new technology in a Brazilian poultry supply chain could result in improvements in sustainability.

However, the comparison of poultry to other competing meats requires more attention. Values of transformity presented by Castellini et al. (2006) comparing conventional ($6.11E+5$ seJ/J) with organic poultry production ($5.79E+5$ seJ/J) in Italy, and Hu et al. (2012) for a family-operated organic rearing system in China ($4.24E+6$ seJ/J), demonstrate that the Brazilian production process has better results when IM is used ($1.44E+5$ seJ/J). Even though

each study has particularities in the calculation used, as mentioned by the authors, better zootechnical indices such as feed conversion rate and number of lots per year in Brazilian systems improve the results.

The present study can also be compared with other types of meats. Specht et al. (2012) presented a transformity of $7.11\text{E}+6$ seJ/J for beef cattle production on the Pantanal in the South Mato Grosso region. Rótolo et al. (2007) found transformities for fattened steers and fattened culled cows to be $4.43\text{E}+5$ seJ/J and $1.73\text{E}+6$ seJ/J, respectively, in the Argentinean Pampa. Cavalett et al. (2004) calculated a separate transformity for each product in an integrated pork, grain and fish production system, and reported values of $2.08\text{E}+6$ seJ/J for pork and $3.04\text{E}+6$ seJ/J for fish. All of these transformities demonstrate the better efficiency of Brazilian poultry meat using IM, since transformity measures how much emergy is taken to generate one unit of product. It indicates the hierarchical position of an item in the thermodynamic scale of the biosphere and can be regarded as a measure of the emergy efficiency of production (Brown and Ulgiati 2004).

In terms of renewability, even when IM is used, poultry meat shows the worst index (15.56%) in comparison to grazing cattle in Argentina (65%; Rótolo et al. 2007), grazing cattle in the Pantanal, Brazil (89.11%; Spech et al. 2012), conventional pig farming in Sweden (26%; Andresen et al. 2000), pork production in an integrated system in Brazil (24%) or in the same study, when only pork production is considered (18%; Cavallet et al. 2004). The low renewability of inputs compromises the sustainability of the whole activity in the long term, as it will be less able to survive an economic stress (Brown and Ulgiati 2004). As poultry meat production is highly dependent on economic and natural resources, using insect meal as feed is a potential method for increasing renewability and sustainability in poultry production. This technology was able to increase 11.55% the relative renewability of poultry production when SBM was changed to IM in poultry diets. However, further analysis should be carried

out that considers different technologies in poultry production, related to water, electric power and grain sources.

Emergy yield ratio (EYR) is a measure of the ability of a process to make local resources available by investing external resources. The lowest possible value is one and indicates that the process delivers the same amount of emergy that was provided, merely transforming resources that were already available from previous processes (Cavalett et al. 2004). The change in the protein source of poultry diets increased this indicator from 1.54 to 1.72, which is superior to the index of pork production in an integrated system (1.44). However, when compared with grazing beef cattle in Brazil (10.01; Spech et al. 2012), the EYR is very low. Although the use of IM includes an ecological source (BSFL) in the industrial poultry process, the production and processing of IM is still dependent on a lot of economic resources, as demonstrated by the value of the EYR.

The emergy investment ratio (EIR) evaluates whether a process is a good user of the emergy that is invested, in comparison with alternatives (Brown and Ulgiati 2004). This index measures the intensity of economic development and the loading from the environment (Odum 1996). In the present research, a variation of this index was proposed: emergy investment ratio considering externalities (EIRex). This considers the insertion of additional services (AS) to the denominator of the formula, to be added to non-renewable sources from the economy ($M + S$) and nature (N). This way, sustainability can be calculated by incorporating compensations made by additional services, to mitigate damages to nature. Higher values for poultry production were found when AS was included (0.75 for IM and 1.05 for SBM) than when they were not included (0.67 for IM and 0.98 for SBM), meaning that the inclusion of AS makes the index more realistic. The lower the value, the higher the amount of renewable resources involved in the process, demonstrating that incorporating IM can improve the EIRex index by 40% when compared to SBM.

The energy exchange ratio (EER) represents the amount of energy that is delivered to buyers in relation to the price paid. It is a measure of relative trade advantage of one partner over the other, representing who “wins” and who “loses” in economic trade (Brown and Ulgiati 2004). Poultry production showed an EER of 2.07 for IM and 2.48 for SBM, demonstrating that the system provides, respectively, 2.07 and 2.48 times more energy to buyers than the value received by the sale of their products. These results show that the environmental cost of these products is underestimated by consumers or by market prices, and that this effect is worse in the production system that uses SBM. This finding highlights the issue of identifying, through the whole supply chain, who must pay this environmental price, from the supplier of raw material to the final consumer. One of the valuable contributions of energy methodology is the incorporation of environmental costs, showing how much and where in the process this remuneration is missing. A thorough assessment of EER for each input to poultry production shows that electric power (2.77), soybean meal (1.95) and corn (1.77) are delivering much more energy than the price received to remunerate the activity. Insect meal, although not studied in a commercial market, produced an EER of 0.91 (using an international currency), demonstrating that it is almost equivalent in energy and market value. With this tool, it is possible to identify who uses more energy and who is responsible for these costs.

Another index evaluated was the environmental loading ratio (ELR), which acts as an indicator of the pressure of a transformation process on the environment and measures the ecosystem stress due to production (Cavallet et al. 2004). Values between three and ten are indicative of moderate impact and values of more than ten represent higher environmental impact (Brown and Ulgiati 2004). Using IM rather than SBM reduces the ELR from 5.91 to 5.15, which is an environmental gain achieved by incorporating more renewable sources into the process.

<heading level 1> Conclusion

The use of the BSFL's bioreactor capacity to process all kinds of organic material, even those less novel such as manure and domestic waste, and convert them into a rich source of protein more than 35% of crude protein (CP) has already been evaluated. Environmental gains related to waste reduction in activities such as poultry and swine production are already confirmed. However, legislative issues related to sanitary problems are limiting the development of commercially rearing BSFL for meal, such that current available data are only experimental.

The most limiting environmental concern for the Brazilian poultry sector in the main production region (the South Region) is poultry manure. The possibility of using poultry manure as a substrate to rear BSFL could solve the issue of waste treatment in the poultry industry. It would generate a novel protein source that, in addition to providing environmental gains, could generate revenue, reduce production costs and increase competitiveness. The data needed to calculate energy assessments of producing and processing BSFL using organic waste are currently unavailable in Brazil. Therefore, examining gains in sustainability is the next step of this research, along with investigating the applicability of this scientific information to different Brazilian meat supply chains, such as pork or fish. Further work is required to investigate the outcomes of scaling up the IM production process, but IM appears to make use of an ecological source (BSFL) to convert lower entropy from grain residues or organic waste into high entropy protein, demonstrating higher sustainability than SBM. Current studies are proving the viability of IM, particularly that based on BSFL (*Hermetia illucens*), in broiler diets. Although legislative questions remain in the European Union (EU) and other countries, it is necessary to find more sustainable ways to produce meat to fuel the increasing global demand, and insect meal as feed appears to be a viable solution.

<heading level 1> Acknowledgements

This research was funded by CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico), especially for the doctoral scholarship. With thanks to João Pisa for the information shared regarding BSFL during thesis preparation.

<heading level 1> References

- ABPA – Brazilian Association of Animal Protein. 2015. Annual Report 2016. http://abpa-br.com.br/files/RelatorioAnual_UBABEF_2015_DIGITAL.pdf. Accessed: August, 2016.
- Andresen, N., J. Björklund, T. Rydberg. 2000. Ecological and conventional pig production: an analysis of resources flow and environmental dependency on farm scale level. In: Acta Universitatis Agriculturae Sueciae. Emergy Analysis to Assess Ecological Sustainability: Strengths and Weaknesses, Agraria 242, Swedish Agricultural University, Uppsala, Sweden.
- Banks, I.J., W.T. Gibson, and M.M. Cameron. 2014. Growth rates of black soldier fly larvae fed on fresh human faeces and their implication for improving sanitation. *Tropical Medicine & International Health* 19: 14-22.
- Baumgärtner, S. and J. de S. Arons. 2003. Necessity and inefficiency in the generation of waste – A thermodynamic analysis. *Journal of Industrial Ecology* 7(2):113-123.
- Benning, R. and C. Chemnitz. 2014. Meat Atlas - Facts and Figures about the Animals We Eat. Friends of the Earth Europe, Moller Druck, Brussels, Belgium. www.boell.de/en/2014/01/07/meat-atlas. Accessed: July 2016.
- Bhat, Z.F., S. Kumar, and H. Fayaz. 2015. *In vitro* meat production: Challenges and benefits over conventional meat production. *Journal of Integrative Agriculture* 14(2): 241-248.
- Bouwman, L., K.K. Goldewijk, K.W. van Der Hoek, A.H.W. Beusen, D.P. van Vuuren, J. Willems, M.C. Rufino, and E. Stehfest. 2013. Exploring global changes in nitrogen and

- phosphorus cycles in agriculture induced by livestock production over the 1900-2050 period. *PNAS* 110 (52):20882-20887.
- Brown, M.T., and S. Ulgiati, S. 1997. Emery-based indices and ratios to evaluate sustainability: monitoring economies and technologies toward environmentally sound innovation. *Ecological Engineering* 9: 51-69.
- Brown, M.T. and S. Ulgiati. 2004. Emery Analysis and Environmental Accounting, *Encyclopedia of Energy* 2: 329-354.
- Buller, L.S., I. Bergier, E. Ortega, A. Moraes, G. Bayma-Silva, and M.R. Zanetti. 2014. Soil improvement and mitigation of greenhouse gas emissions for integrated crop-livestock systems: Case study assessment in the Pantanal savana highland, Brazil. *Agricultural Systems*. 137: 206-219.
- Castellini, C., S. Bastianoni, C. Granai, A. Dal Bosco, and M. Brunetti. 2006. Sustainability of poultry production using the emery approach: Comparison of conventional and organic rearing systems. *Agriculture Ecosystems & Environment*. 114: 343-350.
- Cavalett, O., J.F. Queiroz, and E. Ortega. 2004. Emery assessment of integrated production systems of grains, pig and fish in small farms in South Brazil. In: Ortega, E. & Ulgiati, S. (editors): Proceedings of IV Biennial International Workshop “Advances in Energy Studies”. Unicamp, Campinas, SP, Brazil, June 16-19, 239-256p.
- Cavalett, O. 2008. Análise do ciclo de vida da soja. [Life cycle assessment of soybean]. Ph.D. thesis, UNICAMP, Campinas, Brazil.
- Chadd S. 2007. Future trends and developments in poultry nutrition. Poultry in the 21st century: Avian influenza and beyond. International Poultry Conference, Bangkok. www.fao.org/AG/againfo/home/events/bangkok2007/docs/part1/1_7.pdf. Accessed: December 2016.

- Cullere, M., G. Tasoniero, V. Giaccone, R. Miotti-Scapin, E. Claeys, S. de Smet, and A.D. Zotte. 2016. Black soldier fly as dietary protein source for broiler quails: apparent digestibility, excreta microbial load, feed choice, performance, carcass and meat traits. *Animal* 10 (12):1923-1930.
- De Marco, M., S. Martínez, F. Hernandez, J. Madrid, F. Gai, L. Rotolo, M. Belforti, D. Bergero, H. Katz, S. Dabbou, A. Kovitvadhi, I. Zoccarato, L. Gasco, and A. Schiavone. 2015. Nutritional value of two insect larval meals (*Tenebrio molitor* and *Hermetia illucens*) for broiler chickens: Apparent nutrient digestibility, apparent ileal amino acid digestibility and apparent metabolizable energy. *Animal Feed Science and Technology* 209: 211-218.
- Diener, S., C. Zurbügg, F.R. Gutiérrez, D.H. Nguyen, A. Morel, T. Koottatep, and K. Tockner. 2011. Black soldier larvae for organic waste treatment – prospects and constraints. Proceedings of the WasteSafe 2011–2nd International Conference on Solid Waste Management in the Developing Countries, 13-15 February 2011, Khulna, Bangladesh.
- Drastig, K., J.C.P. Palhares, K. Karbach, and A. Prochnow. 2016. Farm water productivity in broiler production: case studies in Brazil. *Journal of Cleaner Production* 135: 9-19.
- Foley, J.A., N. Ramankutty, K.A. Brauman, E.S. Cassidy, J.S. Gerber, M. Johnston, N.D. Mueller, C.O’Connell, D.K. Ray, P.C West, C. Balzer, E.M. Bennett, S.R. Carpenter, J. Hill, C. Monfreda, S. Polansky, J. Rockström, J. Sheehan, S. Siebert, D. Tilman, and D.P.M.Zaks. 2011. Solutions for a cultivated planet. *Nature* 478: 337-342.
- Food and Agriculture Organization (FAO), 2013. The Montpellier Panel 2013, Sustainable Intensification: a New Paradigm for Africa Agriculture, London. Available online: https://workspace.imperial.ac.uk/africanagriculturaldevelopment/Public/MP_0047_Report_V5_Low-res_singlepages.pdf. Accessed: July 2016.

- Gandhi V. P. and Z. Zhou. 2014. Food demand and the food security challenge with rapid economic growth in the emerging economies of India and China. *Food Research International* 63: 108–124.
- Garnett, T. and C. Godfray. 2012. Sustainable intensification in agriculture. Navigating a course through competing food system priorities, Food Climate Research Network and the Oxford Martin Programme on the Future of Food, University of Oxford, UK.
- Georgescu-Roegen, N. 1971. *The Entropy Law and Economic Process*. Harvard University Press, Cambridge
- Godfray, H.C.J. and T. Garnett. 2014. Food security and sustainable intensification. *Philosophical Transaction of the Royal Society B* 369: 20120273.
- Hu, Q.H., L.X. Zhang, and C.B. Wang. 2012. Emergy-based analysis of two chicken farming systems: a perception of organic production model in China. *Procedia Environmental Sciences* 13: 445-454.
- Hwangbo, J., E.C. Hong, A. Jang, J.S. Oh, B.W. Kim, and B.S. Park. 2009. Utilization of house fly-maggots, a feed supplement in the production of broiler chickens. *Journal of Environmental Biology* 30(4): 609-614.
- Jorgensen, S. E. 2000. *Thermodynamics and Ecological Modelling*. CRC Press, 384p.
- Khan, S., S. Naz, A. Sultan, I.A. Alhidary, M.M. Abdelrahman, R.U. Khan, N.A. Khan, M.A. Khan and S. Ahmad. 2016. Worm meal: a potential source of alternative protein in poultry feed. *World's Poultry Science Journal*, 72: 93-102.
- Liao, W., R. Heijungs, and G. Huppes. 2012. Thermodynamic analysis of human-environment systems: A review focused on industrial ecology. *Ecological Modelling* 228: 76-88.

- Myers, H.M., J.K. Tomberlin, B.D. Lambert, and D. Kattes. 2008. Development of black soldier fly (Diptera: Stratiomyidae) larvae fed dairy manure. *Environmental Entomology* 37: 11–15.
- Newton, L., C. Sheppard, D.W. Watson, G. Burtle, and R. Dove. 2005. Using the Black Soldier Fly, *Hermetia illucens*, as a value-added tool for the management of swine manure. In: Report for Mike Williams, Director of the Animal and Poultry Waste Management Center, North Carolina State University.
- Odum, H.T., 1996. Environmental Accounting: Emergy and Environmental Decision Making. John Wiley, New York.
- Odum, H.T., M.T. Brown, and S.L. Brandt-Williams. 2000. Folio #1: Introduction and global budget. Handbook of Emergy Evaluation: A compendium of data for emergy computation issued in a series of folios. Center for Environmental Policy, Univ. of Florida, Gainesville.
- Oonincx, D.G.A.B., A. van Huis, and J.J.A. van Loon. 2015. Nutrient utilization by black soldier flies fed with chicken, pig or cow manure. *Journal of Insect as Food and Feed* 1: 131-139.
- Ortega, E., O. Cavalett, R. Bonfácio, and M. Watanabe. 2005. Brazilian Soybean Production: Emergy Analysis with an expanded scope. *Bulletin of Science, Technology & Society* 25: 1-11.
- Palhares, J.C.P. 2012. Pegada Hídrica das aves abatidas no Brasil na década 2000- 2010. [Water footprint of poultry slaughtered in Brazil in the decade 2000-2010] Marcos Macari; Nilce Maria Soares. (Org.). Água na avicultura. 2ed. Campinas: Facta, 40e53. www.proamb.com.br/downloads/1qsd7a.pdf. Accessed: July 2016.
- Pereira, L., A. Zucaro, E. Ortega, and S. Ulgiati. 2013. Wealth, trade and the environment: Carrying capacity, economic performance and wellbeing in Brazil and Italy, *Journal of Environmental Accounting and Management* 1(2): 159-188.

- Rótolo, G.C., T. Rydberg, G. Lieblein, and C. Francis. 2007. Emergy evaluation of grazing cattle in Argentine Pampas. *Agriculture, ecosystems and environment* 119: 383-395.
- Rumpold, B.A. and O.K. Schlüter. 2013. Potential and challenges of insects as an innovative source for food and feed production. *Innovative food science and emerging technologies* 17: 1-11.
- Ruviaro, C.F., M. Gianezini, F.S. Brandao, C.A. Winck, and H. Dewes. 2012. Life cycle assessment in Brazilian agriculture facing worldwide trends. *Journal of Cleaner Production* 28: 9-24.
- Salomone, R., G. Saija, G. Mondello, A. Giannetto, S. Fasulo, and D. Savastano. 2017. Environmental impact of food waste bioconversion by insects: Application of Life Cycle Assessment to process using *Hermetia illucens*. *Journal of Cleaner Production* 140: 890-905.
- Shepon, A., G. Eshel, R. Milo. 2016. Energy and protein feed-to-food conversion efficiencies in the US and the potential food security gain from dietary changes. *Environmental Research Letters* 11 (105002): 1-8.
- Sheppard, D. C., G.L. Newton, and S.A. Thompson. 1994. A value added manure management system using the Black Soldier Fly. *Bioresource Technology* 50: 275-279.
- Smetana, S., M. Palanisamy, A. Mathys, and V. Heinz. 2016. Sustainability of insect use for feed and food: Life Cycle Assessment perspective. *Journal of Cleaner Production* 137: 741-751.
- Specht, L., S.A.F. Quadros, J.G. Erpen, and A.C.M. Rosa. 2012. Assessing sustainability of traditional extensive beef cattle rearing in the Pantanal of South Mato Grosso through eEmergy methodology. *Revista Brasileira de Agroecologia* 7 (3): 16-25.

- Tilman, D., J. Fargione, B. Wolff, C. D'Antonio, A. Dobson, R. Howarth, D. Schindler, W. H. Schlesinger, D. Simberloff, and D. Swackhamer. 2001. Forecasting agriculturally driven global environmental change. *Science* 292: 281-284.
- UBABEF. 2011. The saga of the Brazilian poultry industry: How Brazil has become the world's largest exporter of chicken meat. (Ed. Costa, S.). São Paulo: UBABEF, 2011, 120p.
- Ulgiati, S., and M.T. Brown. 1998. Monitoring patterns of sustainability in natural and man-made ecosystems. *Ecological Modelling* 108: 23-36.
- USDA. 2016. USDA Agricultural Projections to 2025.
www.usda.gov/oce/commodity/projections/. Accessed: July 2016.
- Van Huis A., J. Van Itterbeeck, H. Klunder, E. Merterns, A. Halloran, G. Muir, and P. Vantomme. 2013. Edible insects – Future prospects for food and feed security. FAO Forestry Paper, 171 p.
- Vantomme P., E. Mertens, A. van Huis, and H. Klunder. 2012. Summary report of the technical consultation meeting “Assessing the Potential of Insects as Food and Feed in assuring Food Security” In FAO (Ed.). Rome, 38p.
- Van Zanten, H.H.E., H. Mollenhorst, D.G.A.B. Oonincx, P. Bikker, B.G. Meerburg, and I.M.J.M de Boer. 2015. From environmental nuisance to environmental opportunity: housefly larvae convert waste to livestock feed. *Journal of Cleaner Production* 102:362-369.
- Zhou, F., J.K. Tomberlin, L. Zheng, Z. Yu, and J. Zhang. 2013. Developmental and waste reduction plasticity of three black soldier fly strains (Diptera: stratiomyidae) raised on different livestock manures. *Journal of Medical Entomology* 50: 1224-1230.

CAPÍTULO 7

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A exigência dos mercados consumidores cada vez mais preocupados com questões ambientais e sociais tem provocado, nos últimos anos, uma mudança nos sistemas de produção dos agronegócios direcionada à sustentabilidade. Sistemas que, até então, orientavam-se somente pela eficiência econômica estão tendo que se rearranjar inserindo no seu *mainstream* preocupações quanto ao uso e preservação de recursos naturais, cada vez mais escassos, geração de renda e qualidade de vida no campo, assim como a reciclagem e/ou correta destinação e tratamento dos resíduos da produção.

Concomitante a este fato, o aumento do volume populacional e da renda mundial, principalmente nos países em desenvolvimento, tem alertado para a crescente demanda por proteínas de origem animal, tanto de carnes como laticínios e derivados. Esta mudança no padrão de consumo traz consigo consequências diretas, especialmente para os principais países produtores e exportadores mundiais, referente a disponibilidade de recursos naturais para produção e impactos da geração de resíduos desses sistemas produtivos.

A ocorrência de tais fenômenos apresenta-se alinhada com as proposições e conhecimentos gerados por Georgescu-Roegen sobre bioeconomia, na segunda metade do século passado. A crescente e inevitável entropia dos processos econômicos e biológicos, no tocante a energia e matéria, proposta por este autor, alerta o mundo para a necessidade de busca por fontes menos entrópicas e menos geradoras de resíduos. Mesmos dentre os processos naturais é possível identificar meios mais ou menos eficientes no uso de energia, meios capazes de transformar recursos de baixa entropia em produtos de maior valor energético, porém mais entrópicos.

A busca por melhores índices zootécnicos, dentre as espécies produtoras de proteína animal, nem sempre leva a melhor escolha quanto a eficiência de uso de energia. Na produção de frangos de corte o uso cada vez mais intensivo de grãos, para melhorar o índice de conversão alimentar das aves, tem resultado em um grandioso volume de dejetos que, mesmo após excretado, concentra grande quantidade de energia.

Esta energia excedente, se considerada como um resíduo e depositada no ambiente, é fonte de poluição e provoca impactos ambientais que podem ser irreversíveis, no longo prazo, pelo acúmulo de fósforo, nitrogênio e outros minerais no solo ou mesmo corpos hídricos. Porém, ao considerar esta energia excedente dos dejetos como uma fonte energética ainda com

potencial para a criação de larvas de moscas como a BSF e posterior processamento, estar-se-á fazendo uso do potencial de bioconversão desta espécie reduzindo o volume de resíduos e aumentando o valor energético dos novos produtos gerados: farelo de insetos para ração animal, lipídeos para produção de biocombustíveis e biofertilizante.

Deste princípio de eficiência e transformação energética surge a proposta da FAO para alimentar o mundo com insetos, diretamente, como é característico em algumas culturas, mas principalmente indiretamente, por meio de ração animal. A riqueza nutricional de algumas espécies como a larva de BSF possibilita, como demonstrado em alguns estudos científicos, a substituição do farelo de soja na dieta de frangos de corte sem alteração na qualidade e rendimento de carcaça.

Os três artigos científicos apresentados na tese buscaram cronologicamente responder aos problemas de pesquisa propostos: A criação de larvas de BSF a partir de resíduos orgânicos (resíduos de grãos), e o subsequente processamento em farelo de insetos é uma alternativa mais sustentável que o farelo de soja como fonte proteica à ração animal? O uso de farelo de insetos como fonte proteica pode aumentar a sustentabilidade da produção de frangos de corte no Brasil?

O primeiro artigo, utilizando as 5 características propostas no estudo de VANTOMME et al. (2012) para a escolha de espécies de insetos para uma produção em escala industrial, identificou as larvas de BSF e de mosca doméstica como as espécies mais adequadas a este propósito nas condições brasileiras. A escolha pela larva da BSF para as demais etapas da pesquisa deu-se em função de seus hábitos (distantes do homem) e da não transmissibilidade de doenças reconhecida nesta espécie.

O segundo artigo teve por finalidade aplicar a metodologia da análise emergética avaliando uma típica propriedade de produção convencional de frangos de corte com tecnologia em Santa Catarina, Brasil. O estado é principal produtor e exportador de carne de frango do Brasil e, atualmente, enfrenta as maiores consequências ambientais em função do excesso de dejetos produzidos pela atividade, ou seja, apresenta-se como um excelente candidato a adoção desta tecnologia como ferramenta de gestão ambiental. Os indicadores de emergia demonstram que, em função da eficiência zootécnica, apesar do elevado valor do fluxo emergético total, a transformidade, emergia por unidade de energia do produto, mostrou-se superior a todas as demais análises feitas em avicultura no mundo. Esta etapa da pesquisa serviu para um reconhecimento do setor e posterior análise comparativa quando a fonte proteica farelo de insetos fosse testada.

O terceiro artigo contemplou a grande contribuição da pesquisa. Visando responder ao primeiro problema de pesquisa, primeiramente, foi realizada a análise emergética da criação insetos e processamento do farelo de larvas de BSF num projeto piloto existente no estado de São Paulo, Brasil. Apesar deste projeto não utilizar como substrato os dejetos da criação de frangos, foi utilizado um outro rejeito de um processo industrial prévio, o resíduo de farelo de grãos resultante da criação de insetos para o controle biológico de pragas da agricultura. O excedente energético deste produto, não totalmente aproveitado pelos primeiros insetos, é aproveitado pelas larvas gerando dois novos produtos com alto valor proteico e energético, o farelo de insetos e o composto orgânico com potencial de ser utilizado como biofertilizante.

As análises bromatológicas de ambos compostos realizadas na presente pesquisa confirmaram os valores de proteína e energia mencionados nas pesquisas internacionais com diferentes substratos, comprovando o potencial uso do farelo de insetos como componente nutricional na ração de frangos de corte. O valor de energia identificado na análise laboratorial de cada produto permitiu o cálculo da transformidade, sendo esta uma contribuição inédita para os bancos de dados internacionais de energia. As demais análises referentes a teores de quitina ou mesmo detecção de metais pesados não foram realizadas, já que a análise nutricional e usos alternativos (indústria farmacêutica) requerem estudos específicos e fogem ao escopo da pesquisa, apesar de considerá-las fundamentais para futuro uso comercial da tecnologia.

Os indicadores emergéticos do farelo de soja quando comparados ao farelo de inseto mostraram-se piores em todos os índices avaliados. A excepcional redução na transformidade do farelo de inseto (energia por energia de produto), 144,35% em relação ao farelo de soja demonstrou que a larva como bioconversor é extremamente eficiente na transformação da baixa entropia proveniente de resíduos orgânicos em produtos de maior qualidade apesar de mais alta entropia. A renovabilidade foi outro índice significativamente melhorado quando da comparação entre as duas fontes proteicas. Um ganho relativo de 46,67% em renovabilidade foi identificado, ou seja, o maior uso de fontes renováveis para produção do farelo de insetos em relação ao farelo de soja determinou uma maior sustentabilidade no longo prazo. Assim como em ambos indicadores todos os demais avaliados demonstraram resultado favorável ao farelo de insetos, conforme demonstrado no Capítulo 6, confirmando o primeiro pressuposto da pesquisa que a tecnologia de criação e processamento de larvas de BSF a partir de resíduos orgânicos é uma alternativa sustentável frente ao farelo de soja.

Buscando responder ao segundo problema de pesquisa e valendo-se do conhecimento adquirido nas etapas prévias, fez-se a análise emergética da produção anual de uma propriedade

de frangos de corte com duas opções de fontes proteicas, o farelo de soja e o farelo de insetos. Por meio dos índices emergéticos encontrados pode-se afirmar que a substituição do farelo de soja pelo farelo de insetos aumentou a sustentabilidade da produção de frangos reduzindo a transformidade do produto carne de frango em 19,70% e aumentando a renovabilidade em 11,55%. Estes são apenas alguns dos índices discutidos no terceiro artigo, mas que confirmam o segundo pressuposto da pesquisa que afirma que a inserção da inovação tecnológica de criação e processamento de insetos para ração animal pode aumentar a sustentabilidade do setor avícola.

Outros debates relacionados a composição de preço justo frente ao uso de recursos ambientais também são propostos no segundo e terceiro artigo com o indicador EER. Os custos ambientais e sociais, normalmente não considerados na contabilidade tradicional, são adicionados, por meio da análise emergética, permitindo que este método de contabilidade ambiental reflita um valor mais próximo do real, permitindo estabelecer, no futuro, um valor monetário capaz de custear a preservação ambiental ou investir na solução de questões sociais.

A presente tese desperta para um infindável número de pesquisas futuras do impacto desta tecnologia no agronegócio brasileiro e mundial. Diversas cadeias de produção como suínos, bovinos e peixes são potenciais consumidores desta fonte proteica que, à medida que for superando os entraves legislativos, sanitários e de redução de custos, possibilitará a liberação da nobre fonte proteica, que é a soja, diretamente para a alimentação humana. Da mesma forma, o pioneirismo de países europeus na pesquisa e adoção desta tecnologia, justificado pela atual dependência do farelo de soja de países como o Brasil, para produção de carne, poderá resultar em impactos diretos na cadeia produtiva da soja brasileira no médio ou longo prazo.

Outros focos de pesquisa complementares referem-se as etapas de processamento de insetos tanto para a produção de quitina, destinado à indústria farmacêutica, como para a produção de biocombustíveis, em função do alto teor lipídios de espécies como as larvas. Estas destinações alternativas de insetos são fronteiras de investigação desta tecnologia que podem utilizar a análise emergética ou outras metodologias complementares, como a análise do ciclo de vida (ACV), para mensuração de seu potencial.

Outra área de pesquisa com uso de insetos na alimentação animal, premente por resultados, relaciona-se ao comportamento do consumidor. Em função da expectativa de proximidade da autorização do uso de insetos para alimentação animal na Europa, especialmente para não ruminantes, pesquisadores como VERBEKE et al. (2015) e

LAUREATI et al. (2016) já vem investigando as intenções de consumo na Bélgica e Itália, respectivamente. O Brasil, em função de seu papel mundial como principal produtor e exportador de proteínas animal, requer uma investigação detalhada da intenção de consumo destes produtos e os consequentes impactos nas cadeias do agronegócio.

O mercado doméstico brasileiro de carne de frango, atualmente o maior dentre as proteínas animal, é outro potencial objeto de pesquisa no que diz respeito a intenção de consumo destes frangos alimentados com insetos. Investigações da intenção de uso desta tecnologia pelos avicultores, ou mesmo pelas agroindústrias, são fundamentais para a implantação e desenvolvimento desta inovação. No tocante ao consumidor brasileiro, questões culturais (praticamente inexistência do hábito de comer insetos), ou mesmo relacionadas a grande disponibilidade de grãos para a criação animal, diferentemente do que acontece hoje na Europa, podem desencadear resultados surpreendentes que não relacionados ao apelo de sustentabilidade atual dos mercados consumidores mundiais.

Dentre as limitações do estudo, a falta de pesquisas que utilizem dejetos de aves como substrato à criação de larvas de BSF no Brasil, ou mesmo o acesso restrito à dados internacionais de pesquisas com essa proposta, impossibilitou a avaliação desta tecnologia como uma ferramenta de gestão ambiental. O uso de resíduos de grãos como fonte nutricional para as larvas, na presente pesquisa, pode demonstrar o potencial desta espécie de inseto como bioconversor e seus ganhos, por meio dos índices de sustentabilidade. Porém, a possibilidade futura de inserção na análise do uso de rejeitos orgânicos da avicultura (dejetos), poderia revelar ganhos ambientais maiores que as contribuições nutricionais e ambientais já demonstradas.

Desta forma, resta como sugestão à futuras pesquisas, a avaliação dos impactos sociais, ambientais e econômicos da criação e processamento de larvas de BSF a partir de diferentes substratos orgânicos. Rejeitos de outras atividades com alto potencial poluidor, sejam eles de origem vegetal ou animal, como lixo urbano, dejetos de avicultura, suinocultura ou bovinocultura são potenciais focos de pesquisa.

A busca por meios de produção mais eficientes e menos demandantes de recursos naturais é e será o grande desafio da humanidade neste curso entrópico e irreversível que é a vida. O conceito de sustentabilidade, por mais polêmico e divergente em interesses e proposições, é a forma que nos permite refletir e nortear o conhecimento em direção a questões ambientais e sociais, além das econômicas.

Mais importante que os resultados encontrados na presente pesquisa, as reflexões pertinentes ao tema, assim como a identificação da necessidade de novas pesquisas

complementares relacionadas, como as mencionadas acima, nos permitem concluir que a resposta a um único problema científico nada mais é o que início da formulação de novos questionamentos que sempre moveram e moverão a roda do conhecimento que é a ciência.

REFERÊNCIAS

- ABDALA, D.B. et al. Phosphorus saturation of a tropical soil and related P leaching caused by poultry litter addition. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Amsterdam, v. 162, p.15-23, 2012.
- ABPA – Brazilian Association of Animal Protein. **Annual Report 2016**. Brazil, 2016. 131p.
- AGOSTINHO, F.; SICHE, R. Hidden costs of a typical embodied energy analysis: Brazilian sugarcane ethanol as a case study. **Biomass & Bioenergy**, Oxford, v. 71, p. 69-83, 2014.
- ALEXANDRATOS, N.; BRUINSMA, J. **World agriculture towards 2030/2050: the 2012 revision**. 2012. (ESA Work. Paper 3).
- ALLENBY, B.R.; GRAEDEL, T. **Industrial ecology**. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1993.
- AL-QAZAZ, M.F.A. et al. Effect of using larvae meal as a complete protein source on quality and productivity characteristics of laying hens. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v. 45, n. 9, p. 518-523, 2016.
- AMARAL, A.L. et al. **Boas práticas de produção de suínos**. Concórdia: Embrapa Suínos e Aves, 2006. (Circular Técnica 50).
- ANDRESEN, N.; BJÖRKLUND, J.; RYDBERG, T. Ecological and conventional pig production: an analysis of resources flow and environmental dependency on farm scale level. **Acta Universitatis Agriculturae Sueciae**, Uppsala, Sweden, 2000.
- ANDREWS, C.J. Building a micro foundation for industrial ecology. **Journal of Industrial Ecology**, Cambridge, v.4, p. 35–51, 2000.
- ANIEBO, A.O.; ERONDU, E.S.; OWEN, O.J. Proximate composition of housefly larvae (*Musca domestica*) meal generated from mixture of cattle blood and wheat bran. **Livestock Research for Rural Development**, Colômbia, v. 20, n. 12, article #205, p. 1-3, 2008.
- ANIEBO A.O.; OWEN O.J. Effects of age and method of drying on the proximate composition of housefly larvae (*Musca domestica* Linnaeus) Meal (HFLM). **Pakistan Journal of Nutrition**, Faisalabad, v. 9, p. 485-487, 2010.
- BANKS, I.J.; GIBSON; W.T.; CAMERON, M.M. Growth rates of black soldier fly larvae fed on fresh human faeces and their implication for improving sanitation. **Tropical Medicine & International Health**, Oxford, v. 19, p. 14-22, 2014.
- BARNARD, D.R.; HARMS, R.H.; SLOAN, D.R. Biodegradation of poultry manure by house fly (Diptera: Muscidae). **Environmental Entomology**, Oxford, v. 27, p. 600–605, 1998.

BAUMGÄRTNER, S.; ARONS, J. de S. Necessity and inefficiency in the generation of waste – A thermodynamic analysis. **Journal of Industrial Ecology**, Cambridge, v. 7, n. 2, p. 113-123, 2003.

BHAT, Z.F.; KUMAR, S.; FAYAZ, H. In vitro meat production: Challenges and benefits over conventional meat production. **Journal of Integrative Agriculture**, Beijing, v. 14, n.2, p. 241-248, 2015.

BHATTACHARYA, M. et al. The effect of renewable energy consumption on economic growth: Evidence from top 38 countries. **Applied Energy**, Barking, v. 162, p.733-741, 2016.

BEARD, R.; LOZADA, G. **Economics, Entropy and the Environment: The extraordinary economics of Nicholas Georgescu-Roegen**. Cheltenham Glos: Edward Elgar, 1999.

BELLAVER, C.; PALHARES, C.P. Uma visão sustentável sobre a utilização da cama de aviário. **Avicultura Industrial**, [S.I.], v. 6, p. 14-18, 2003.

BENNING, R.; CHEMNITZ, C. **Meat Atlas - Facts and Figures about the Animals We Eat**. Moller Druck, Brussels, Belgium: Friends of the Earth Europe, 2014.
Disponível em: <<http://www.boell.de/en/2014/01/07/meat-atlas>>. Acesso: 04 jul. 2016.

BODENHEIMER, F.S. **Insects as Human Food: A Chapter of the Ecology of Man**. The Hague: Junk, 1951. 352p.

BORGES, M.A.Z. **Flutuação populacional de dípteros muscóides (Diptera: Muscomorpha), parasitoides e foréticos predadores Igarapé, MG**. 2006. 103 f. Tese (Doutorado), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, 2006.

BOUWMAN, L, et al. Exploring global changes in nitrogen and phosphorus cycles in agriculture induced by livestock production over the 1900-2050 period. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, Washington, v. 110, p. 20882-20887, 2013.

BROWN, M.T.; ULGIATI, S. Emery-based indices and ratios to evaluate sustainability: monitoring economies and technologies toward environmentally sound innovation. **Ecological Engineering**, Amsterdam, v. 9, p. 51-69, 1997.

BROWN, M.T., ULGIATI, S. Emery evaluations and Environmental loading of electricity production systems. **Journal of Cleaner Production**, Oxford, v. 10, p. 321-334, 2002.

BROWN, M.T.; ULGIATI, S. Emery Analysis and Environmental Accounting, **Encyclopedia of Energy**, [S.I.], v. 2, p. 329-354, 2004.

BROWN, M.T.; CAMPBELL, E. **Evaluation of natural capital and environmental services of U.S. national forests using emery synthesis**. Gainesville, Florida: Center for Environmental Policy. University of Florida, 2007.

BUGE, M.M.; HANSEN, T.; KLITKOU, A. What is the bioeconomy? A Review of the literature. **Sustainability**, Basel, v. 8, n. 691, p.1-22, 2016.

BUKKENS, S.G.F. The nutritional value of edible insects. **Ecology of Food and Nutrition**, New York, v. 36, p. 287–319, 1997.

BULLER, L.S. et al. Soil improvement and mitigation of greenhouse gas emissions for integrated crop-livestock systems: Case study assessment in the Pantanal savana highland, Brazil. **Agricultural Systems**, Barking, v. 137, p. 206-219, 2014.

CAMPBELL, D.E.; OHRT, A. **Environmental accounting emergy**: Evaluation of Minnesota. Narragansett, Rhode Island: U.S. Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, 2009.

CASSIDY, E.S. et al. Redefining agricultural yields: from tonnes to people nourished per hectare. **Environmental Research Letters**, Bristol, v. 8, p. 1-8, 2013.

CASTELLINI, C. et al. Sustainability of poultry production using the emergy approach: Comparison of conventional and organic rearing systems. **Agriculture Ecosystems & Environment**, Amsterdam, v. 114, p. 343-350, 2006.

CAVALETT, O.; QUEIROZ, J.F.; ORTEGA, E. Emergy assessment of integrated production systems of grains, pig and fish in small farms in South Brazil. In: IV BIENNIAL INTERNATIONAL WORKSHOP “ADVANCES IN ENERGY STUDIES”, 4. 2004, Campinas. **Proceedings of...** Campinas, SP: Unicamp, 2004. p. 239-256.

CAVALETT, O. **Análise do ciclo de vida da soja**. [Life cycle assessment of soybean]. 2008. 221 f. Tese (Doutorado) - Faculdade de Engenharia de Alimentos da Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Brasil, 2008.

CECHIN, A.D. **Georgescu-Roegen e o desenvolvimento sustentável**: diálogo ou anátema? 2008. 208 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Ciência Ambiental, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

CHADD S. **Future trends and developments in poultry nutrition**: Poultry in the 21st century: avian influenza and beyond. 2007. (International Poultry Conference, Bangkok, 2007). Disponível em: <http://www.fao.org/AG/againfo/home/events/bangkok2007/docs/part1/1_7.pdf> Acesso: 12 set. 2016.

CHENG, H. et al. Emergy evaluation of cropping, poultry rearing, and fish raising system in the drawdown zone of Three Gorges Reservoir of China. **Journal of Cleaner Production [On-line]**, (2017). Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.053>>. Acesso: 30 jan. 2017.

- CICKOVA, H. et al. Biodegradation of pig manure by the housefly, *Musca domestica*: A viable ecological strategy for pig manure management. **Plos One**, San Francisco, v. 7, p. 1-9, 2012.
- CLARK, W.C. Sustainable development and sustainability science. **In:** LEVIN, S.A.; CLARK, W.C. (Ed.). **Toward a Science of Sustainability**: Report from Toward a Science of Sustainability Conference. Princeton: Princeton University Press, 2010.
- COMAR, M.V. **Avaliação emergética de projetos agrícolas e agro-industriais no Alto Rio Pardo**: a busca do Desenvolvimento Sustentável. 1998. 197 f. Tese (Doutorado) - Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, Brasil, 1998.
- CORREA, J.C.; MIELE, M. A cama de aves e os aspectos agronômicos, ambientais e econômicos. **In:** PALHARES, J.C.P., KUNZ, A. (Ed.). **Manejo ambiental na avicultura**. Concórdia: Embrapa Suínos e Aves, 2011. 125-152p. (Embrapa Suínos e Aves. Documentos, 149).
- CULLERE, M. et al. Black soldier fly as a dietary protein source for broiler quails: apparent digestibility, excreta microbial load, feed choice performance, carcass and meat traits. **Animal**, Cambridge, v. 10, n.12, p. 1923-1930, 2016.
- DALY, H. On Nicholas Georgescu-Roegen's contribution to economics: an obituary essay. **Ecological Economics**, Amsterdam, v.13, p. 149-154, 1995.
- DEFOLIART, G.R. Insect fatty acids: similar to those of poultry and fish in their degree of unsaturation but higher in the polyunsaturates. **Food Insect Newsletter**, [S.I.], v. 4, p. 1-4, 1991.
- DEFOLIART, G.R. Edible insects as minilivestock. **Biodiversity and Conservation**, London, v. 4, p. 306-321, 1995.
- DEFOLIART, G.R. An overview of the role of edible insects in preserving biodiversity. **Ecology of Food and Nutrition**, United Kingdom, v. 36, p. 109-132, 1997.
- DELGADO, C.L. Rising consumption of meat and milk in developing countries has created a new food revolution. **The Journal of Nutrition**, Rockville, v. 133, p. 3907-3910, 2003.
- DE MARCO, M. et al. Nutritional value of two insect larval meals (*Tenebrio molitor* and *Hermetia illucens*) for broiler chickens: Apparent nutrient digestibility, apparent ileal amino acid digestibility and apparent metabolizable energy. **Animal Feed Science and Technology**, Amsterdam, v. 209, p. 211-218, 2015.
- DIENER, S.; ZURBRÜGG, C.; TOCKNER K. Conversion of organic material by black soldier fly larvae: establishing optimal feeding rates. **Waste management & research**, London, v. 27, p. 603-610, 2009.

DIENER, S. et al. Black soldier fly larvae for organic waste treatment – prospects and constraints. In: WASTESAFE 2011 AND 2ND INT. CONF. ON SOLID WASTE MANAGEMENT IN THE DEVELOPING COUNTRIES, 2011, Khulna, Bangladesh. **Proceedings of ...** Khulna, Bangladesh, 2011. p. 1-8.

DRASTIG, K. et al. Farm water productivity in broiler production: case studies in Brazil. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 135, p. 9-19, 2016.

EC – European Parliament and of the Council. Directive n° 32, May 7th of 2002. **Official Journal of the European Union**, L140, p.1-22, 2002.

EC - European Parliament and of the Council. Regulation n° 767, July 13rd of 2009. **Official Journal of the European Union**, L229, p. 1-28, 2009.

EC – European Parliament and of the Council. Regulation n° 1069 October, 21st of 2009. **Official Journal of the European Union**, L300, p. 1-33, 2009.

EC - European Parliament and of the Council. Regulation n° 68, January, 16th of 2013. **Official Journal of the European Union**, L29, p. 1-64, 2013.

EL BOUSHY, A.R. House-fly pupae as poultry manure converters for animal feed: a review. **Bioresource Technology**., Barking, Essex, v. 38, p. 45–49, 1991.

ELKINGTON, J. **Cannibals with forks: the triple bottom line of 21st century business**. Minneapolis: Consortium Book Sales & Distribution, 1998.

ERENS, J. et al. **A bug's life – Large-scale insect rearing in relation to animal welfare**. Wageningen, UR, 2012. 57p.

ERICKSON, M.C. et al. Reduction of Escherichia coli O157:H7 and Salmonella enterica serovar Enteritidis in chicken manure by larvae of the black soldier fly. **Journal of Food Protection**, Des Moines, v. 67, p. 685–690, 2004.

ERKMAN, S. Industrial ecology: an historical view. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 5, p. 1-10, 1997.

FEEDIPEDIA. **Animal Feed Resources Information System** - INRA CIRAD AFZ and FAO. 2014. Disponível em: <<http://www.feedipedia.org/content/housefly-maggots>>. Acesso: 04 abr. 2015.

FERNANDEZ-MENA, H.; NESME, T.; PELLERIN, S. Agro-industrial ecology: A review of nutrient flow modelling and assessment tools in agro-food systems at the local scale. **Science of the Total Environment**, Amsterdam, v. 543, p. 467-479, 2016.

FINKE, M.D. Complete nutrient composition of commercially raised invertebrates used as food for insectivores. **Zoo Biology**, New York, v. 21, p. 269–85, 2002.

FOLEY, J.A. et al. Solutions for a cultivated planet. **Nature**, London, v, 478, p. 337-342, 2011.

FAO - FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION. **World Livestock 2011 – Livestock in Food Security**. Rome, 2011. Disponível em:

<<http://www.fao.org/docrep/014/i2373e/i2373e00.htm>>. Acesso: 10 set. 2016.

FAO - FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION. **The Montpellier Panel 2013, Sustainable Intensification: a New Paradigm for Africa Agriculture**. London, 2013.

Disponível em:

<https://workspace.imperial.ac.uk/africanagriculturaldevelopment/Public/MP_0047_Report_V5_Low-res_singlepages.pdf>. Acesso: 2 jul. 2016.

GANDHI, V.P.; ZHOU, Z. Food demand and the food security challenge with rapid economic growth in the emerging economies of India and China. **Food Research International**, Ottawa, v. 63, p. 108-124, 2014.

GARNETT, T.; GODFRAY, C. **Sustainable intensification in agriculture: Navigating a course through competing food system priorities**. Oxford: Food Climate Research Network and the Oxford Martin Programme on the Future of Food, University of Oxford, UK, 2012.

GEDEN, C.J. Coleopteran and acarine predators of house-fly in poultry production systems. In: RUTZ, D. A.; PATTERSON, R. S. (Ed.). **Biocontrol of arthropods affecting livestock and poultry**. Boulder, CO: Westview, 1990. 317p.

GEORGESCU-ROEGEN, N. The Institutional Aspects of Peasant Economies: A Historical and Analytical Review. In: **Energy and Economic Myths**, New York: Permagon Press, 1965. p. 3-36.

GEORGESCU-ROEGEN, N. **The Entropy Law and the Economic Process**, Cambridge, MA: Harvard University Press, 1971.

GEORGESCU-ROEGEN, N. Energy Analysis and Economic Valuation, **Southern Economic Journal**, [S.I.], v. 45, p. 1023-1058, 1979.

GEORGESCU-ROEGEN, N. O decrescimento: entropia, ecologia e economia. São Paulo: Editora Senac. 2012. 258p.

GERLAND, P. et al. World population stabilization unlike this century. **Science**, Washington, v. 346, p. 234-237, 2014.

GODBER, O.; WALL, R. Livestock and food security: vulnerability to population growth and climate change. **Global Change Biology**, Oxford, v. 20, p. 3092-3102, 2014.

GODFRAY, H.C.J. et al. Food Security: The Challenge of Feeding 9 Billion People. **Science**, Washington, v. 327, p. 812-818, 2010.

GODFRAY, H.C.J.; GARNETT, T. Food security and sustainable intensification. **Philosophical Transactions of the Royal Society B**, [S.I.], v. 369, p. 1-10, 2014.

- GOWDY, J; MESNER, S. The evolution of Georgescu-Roegen's bioeconomics. **Review of social economy**, Chicago, v. 56, p. 136-156, 1998.
- GREEN, T.R.; POPA, R. Enhanced ammonia content in compost leachate processed by black soldier fly larvae. **Applied Biochemistry and Biotechnology**, Clifton, v. 166, n. 6, p. 1381-1378, 2012.
- GRINEVALD, J.; RENS, I. Prefácio à segunda edição. In: GEORGESCU-ROEGEN, N. (Org.). O decrescimento: entropia, ecologia e economia. São Paulo: Editora Senac, 2012. p. 17-45.
- GULLAN, P.J.; CRANSTON, P.S. **The insects: an outline of entomology**. Oxford: Blackwell, 2005. 505p.
- HACKSTEIN, J.H.P.; STUMM, C.K. Methane production in terrestrial arthropods. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America** Washington, v. 91, p. 5441–5445, 1994.
- HARDOUIN, J.; MAHOUX, G. **Zootecnied'insectes - Elevage et utilisation au bénéfice de l'homme et de certainsanimaux**. - Bureau pour l'Echange et la Distribution de l'Informationsur le Mini-élevage. Gembloux, Belgium: BEDIM, 2003.
- HIGGINS, J.B. Emergy analysis of the Oak Openings region. **Ecological Engineering**, Amsterdam, v. 21, p. 75–109, 2003.
- HEUZÉ, V.; TRAN, G. **Housefly maggot meal: Feedipedia.org.: a programme by INRA, CIRAD, AFZ and FAO**, 2013. Disponível em: <<http://www.feedipedia.org/node/671>>. Acesso: 01 mai 2015.
- HOEKSTRA, A.Y. et al. **Manual de avaliação da pegada hídrica: estabelecendo o padrão global**. [S.I]: Water Footprint Network, 2011. 216p.
- HOEKSTRA, A.Y.; WIEDMANN, T.O. Humanity's unsustainable environmental footprint. **Science**, Washington, v. 344, p. 1114-1117, 2014.
- HORLINGS, L.G.; MARSDEN, T.K. Exploring the 'new rural paradigm' in Europe: Eco-economic strategies as a counterforce to the global competitiveness agenda. **European Urban of Regional Studies**, Harlow, Essex, v. 21, p. 4–20, 2014.
- HU, Q.H.; ZHANG, L.X.; WANG, C.B. Emergy-based analysis of two chicken farming systems: a perception of organic production model in China. **Procedia Environmental Sciences**, Amsterdam, v. 13, p. 445-454, 2012.
- HUBACEK, K.; GUAN, D.; BARUA, A. Changing lifestyles and consumption patterns in developing countries: A scenario analysis for China and India. **Futures**, Guilford, v. 39, p. 1084-1096, 2007.

HWANGBO, J. et al. Utilization of housefly-maggots, a feed supplement in the production of broiler chickens. **Journal of Environmental Biology**, Luknow, v. 30, p. 609–614, 2009.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Sistema IBGE de recuperação automática. 2014**. Disponível em:

<<http://www.sidra.ibge.gov.br/bda/tabela/listabl.asp?z=t&o=1&i=P&c=1094>> Acesso: 22 jun 2015.

JORGENSEN, S. E. **Thermodynamics and Ecological Modelling**. CRC Press, 2000. 384p.

JÓZEFIK D. et al. Insects-a natural nutrient source for poultry- a review. **Annals of Animal Science**, Warsaw, v. 16, p. 297-313, 2016.

KEEGAN, D. et al. Cascading use: A systematic approach to biomass beyond the energy sector. **Biofuels, Bioproducts and Biorefining**, [S.I.], v. 7, p. 193–206, 2013.

KEIDING, J. Review of the global status and recent development of insecticide resistance in field populations of the housefly, *Musca domestica* (Diptera: Muscidae). **Bulletin of Entomological Research**, London, v. 89, 67p., 1999.

KENIS, M. et al. Insect used for animal feed in West Africa. **Entomologia**, Pavia, v. 2, n. 218, p. 107-114, 2014.

KHAN, S. et al. Worm meal: a potential source of alternative protein in poultry feed. **World's Poultry Science Journal**, Ithaca, v. 72, p. 93-102, 2016.

KHUSRO, M.; ANDREW, N.R.; NICHOLAS, A. Insects as poultry feed: a scoping study for poultry production systems in Australia. **World's poultry Science Journal**, Ithaca, v. 68, p. 435-446, 2012.

LAUREATI, M. et al. New sustainable protein sources: consumers' willingness to adopt insects as feed and food. **Italian Journal of Food Science**, Pinerolo, v. 28, p. 652-668, 2016.

LEE, C.G. et al. Chitin regulation of immune responses: an old molecule with new roles. **Current Opinion in Immunology**, London, v. 20, p. 1-6, 2008.

LEESON, S.; SUMMERS, J.D. **Commercial poultry nutrition**. 3 Ed. Nottingham: Nottingham University Press, 2009. 416p.

LEVIDOW, L.; BIRCH, K.; PAPAIOANNOU, T. Divergent paradigms of European agro-food innovation: The knowledge-based bio-economy (KBBE) as an R & D agenda. **Science Technology & Human Values**, Cambridge, v. 38, p. 94-125, 2013.

LI, Q. et al. Insect fat, a promising resource for biodiesel. **Petroleum & Environmental Biotechnology**, Los Angeles, v. S2, p. 1-6, 2011.

LIAO, W.; HEIJUNGS, R.; HUPPES, G. Thermodynamic analysis of human-environment systems: A review focused on industrial ecology. **Ecological Modelling**, Amsterdam, v. 228, p. 76-88, 2012.

LUCHANESKY, M.S.; MONKS, J. Supply and demand elasticities in the U.S. ethanol fuel Market. **Energy Economics**, [S.I.], v. 31, p. 403-410, 2009.

MACARI, M.; SOARES, N.M. (Org.). **Água na avicultura**. 2ed. Campinas: Facta, 2012. Disponível em: <<http://www.proamb.com.br/downloads/1qsd7a.pdf>>. Acesso: 2 jul.2016.

MacDONALD, G.K. et al. Agronomic phosphorus imbalances across the world's croplands. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, Washington, v. 108, p. 3086-3091, 2011.

Mac EVILLY, C. Bugs in the system. **Nutrition Bulletin**, London, v. 25, p. 267-268, 2000.

MAKKAR, H.P.S. et al. State-of-the-art on use of insect as animal feed. **Animal Feed Science and Technology**, Amsterdam, v. 197, p. 1-33, 2014.

MAYUMI, K. Nicholas Georgescu-Roegen: His bioeconomics approach to development and change. **Development and Change**, Mouton, v. 40, p. 1235-1254, 2009.

MEISSNER H. H.; SCHOLTZ, M.M.; ENGELBRECHT, F.A. Sustainability of the South African Livestock Sector towards 2050. Part 2: Challenges, changes and required implementations. **South African Journal of Animal Science**, Pretoria, v. 43, p. 298-319, 2013.

MEKONNEN, M.M.; HOEKSTRA, A.Y. **The green, blue and grey water footprint of farm animals and animal products**. Volume 2: appendices. 104p, 2010.

MEKONNEN, M.M.; HOEKSTRA, A.Y. A global assessment of the water footprint of farm animal products. **Ecosystems**, New York, v. 15, p. 401-415, 2012.

MENDES, J.; LINHARES, A.X. Diapause, pupariation sites and parasitism of the horn fly, *Haematobia irritans*, in southeastern Brazil. **Medical and Veterinary Entomology**, Oxford, v. 13, p. 185-190, 1999.

MILLER, B.F., TEOTIA, J.S., THATCHER, T.O. Digestion of poultry manure by *Musca domestica*. **British Poultry Science**, Edinburg, v. 15, p. 231-234, 1974.

MOTTET, A. et al. Livestock: On our plates or eating at our table? A new analysis of the feed/food debate. **Global Food Security [On-line]**, (2017). Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.gfs.2017.01.001>>. Acesso: 2 jan. 2017.

MYERS, H.M. et al. Development of black soldier fly (Diptera: Stratiomyidae) larvae fed dairy manure. **Environmental Entomology**, Oxford, v. 37, p. 11-15, 2008.

- NAKAGAKI, B.J.; DEFOLIART, G.R. Protein quality of the house cricket *Acheta domesticus* when fed to rooster chicks. **Poultry Science**, Oxford, v. 66, p. 1367–1371, 1987.
- NEWTON, L. et al. Using the Black Soldier Fly, *Hermetia illucens*, as a value-added tool for the management of swine manure. In: Report for Mike Williams, Director of the animal and poultry waste management center. North Carolina State University, 2005. 17p.
- NGUYEN, T.T.X.; TOMBERLIN, J.K.; VANLAERHOVEN, S. Ability of Black Soldier fly (Diptera: Stratiomyidae) larvae to recycle food waste. **Environmental Entomology**, Oxford, v. 44, n. 2, p. 406-410, 2015.
- NOORMAN, N. **Pheromones of the housefly**: a chemical and behavioural study. 2001. 127 f. Tese (Doutorado), University of Groningen, The Netherlands, 2001.
- OCIO, E.; VIÑARAS, R.; REY, J.M. Housefly larvae meal grown on municipal organic waste as a source of protein in poultry diets. **Animal Feed Science and Technology**, Amsterdam, v.4, p. 227–31, 1979.
- ODUM, H.T. Self-organization, transformity and information. **Science**, Washington, v. 242, p. 1132-1139, 1988.
- ODUM, H.T. **Environmental accounting**: emergy and environmental decision making. New York: Wiley, 1996. 390p.
- ODUM, H.T.; BROWN, M.T.; BRANDT-WILLIAMS, S.L. **Folio #1**: Introduction and global budget. Handbook of Emergy Evaluation: A compendium of data for emergy computation issued in a series of folios. Center for Environmental Policy, Univ. of Florida, Gainesville, 2000.
- OECD/FAO. **OECD-FAO Agricultural Projections to 2023**. Interagency Agricultural Projections Committee, 2014. Disponível em: <<http://www.usda.gov/oce/commodity/projections/>>. Acesso: 12 de outubro de 2014.
- OECD/FAO. **OECD-FAO Agricultural Outlook 2016-2025**. OECD Publishing, Paris, 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1787/agr_outlook-2016-en>. Acesso: 20 out. 2016.
- OGUNJI, J.O. et al. **Housefly maggot meal (Magmeal)**: an emerging substitute of fishmeal in tilapia diets. Tropentag 2006. Hohenheim. Disponível em: <<http://www.tropentag.de/2006/abstracts/full/76.pdf>>. Acesso: 6 jun. 2015.
- OONINCX, D.G.A.B et al. A. An exploration on greenhouse gas and ammonia production by insect species suitable for animal or human consumption. **PloS One**, San Francisco v. 5, p. 1-7, 2010.
- OONINCX, D.G.A.B.; DE BOER, I.J.M. Environmental impact of the production of mealworms as protein source for humans – a Life Cycle Assessment. **PloS One**, San Francisco, v. 7, p. 1-5, 2012.

OONINCX, D.G.A.B.; VAN HUIS, A.; VAN LOON, J.J.A. Nutrient utilization by black soldier flies fed with chicken, pig or cow manure. **Journal of Insect as Food and Feed**, Wageningen, v. 1, p. 131-139, 2015.

ORTEGA, E.; ANAMI, M.; DINIZ, G. Certification of food products using emergy analysis. **Proceedings of III International Workshop Advances in Emergy Studies**. Porto Venere, Itália, p. 227-237, 2002.

ORTEGA, E. Brazilian Soybean Production: Emergy Analysis with an expanded scope. **Bulletin of Science, Technology & Society**, New York, v. 25, p. 1-11, 2005.

PALHARES, J.C.P. Pegada Hídrica das aves abatidas no Brasil na década 2000-2010. [Water footprint of poultry slaughtered in Brazil in the decade 2000-2010]. In: 3º Seminário de Gestão Ambiental na Agropecuária, 25 a 27 de abril de 2012. Bento Gonçalves, RS, Brasil, 2012.

PARRY, M. et al. **Climate Change and Hunger: responding to the challenge**. World Food Programme, Rome, 2009. 104p.

PEREIRA, L. et al. Wealth, trade and the environment: Carrying capacity, economic performance and wellbeing in Brazil and Italy. **Journal of Environmental Accounting and Management**, [S.l.], v. 1, n. 2, p. 159-188, 2013.

PRETORIUS, Q. **The evaluation of larvae of *Musca domestica* (common housefly) as protein source for broiler production**. 2011. 95 f. Dissertação (Mestrado) - Science in Agriculture (Animal Sciences). Stellenbosch University, Stellenbosch, South Africa, 2011.

PROTEINSECT. **PROteINSECT – enabling the exploitation of insect as sustainable source of protein for animal feed and human nutrition**, 2014. Disponível em: <<http://www.proteinsect.eu/>>. Acesso: 19 set.2014.

PROTEINSECT. **Insect protein- Feed for the future. White Paper**, 2016. Disponível em: <http://www.proteinsect.eu/fileadmin/user_upload/press/proteinsect-whitepaper-2016.pdf> Acesso: 20 de outubro de 2016.

RAMALHO, H.F.; SUAREZ, P.A.Z. A Química dos Óleos e Gorduras e seus Processos de Extração e Refino. **Revista Virtual de Química**, Niterói, v.5, p. 2-15, 2013.

RAMOS-ELORDUY, J. Insects: A sustainable source of food? **Ecology of food and nutrition**, New York, v.36, p. 247–276, 1997.

RAMOS-ELORDUY, J. Insects: a hopeful food source. In: PAOLETTI, M. G. (Ed.) **Ecological implications of minilivestock (Potential of insects, rodents and snails)**. [S.l.]: Science Publishers INC. 2005. p. 263-291

- RAMOS-ELORDUY, J. et al. Use of *Tenebrio molitor* (Coleoptera: Tenebrionidae) to recycle organic wastes and as feed for broiler chickens. **Journal of Economic Entomology**, Oxford, v. 95, p. 214–220, 2002.
- RAO, P.U. Chemical composition and nutritional evaluation of spent silkworm pupae. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, Washington, v. 42, p. 2201–2203, 1994.
- RASK, K.J.; RASK, N. Economic development and food production –consumption balance: A growing global challenge. **Food Policy**, Guildford, v. 36, p. 186–196, 2011.
- ROMERO, J.C.; LINARES, P. Exergy as a global energy sustainability indicator. A review of the state of the art. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [S.I.], v. 33, p. 427–442, 2014.
- ROSTAGNO, H.S. et al. **Tabelas brasileiras para aves e suínos: composição de alimentos e exigências nutricionais**. Viçosa: UFV – Imprensa Universitária, 2005. 187p.
- RÓTOLO, G.C. et al. Emery evaluation of grazing cattle in Argentine Pampas. **Agriculture, ecosystems and environment**, Amsterdam, v. 119, p. 383–395, 2007.
- RUMPOLD, B.A.; SCHLÜTER, O.K. Nutritional composition and safety aspects of edible insects. **Molecular Nutrition and Food Research**, Weinheim, v. 57, p. 802–823, 2013.
- RUVIARO, C.F. et al. Life cycle assessment in Brazilian agriculture facing worldwide trends. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 28, p. 9–24, 2012.
- SALOMONE, R. et al. Environmental impact of food waste bioconversion by insects: Application of Life Cycle Assessment to process using *Hermetia illucens*. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 140, p. 890–905, 2017.
- SANCHES-MUROS, M-J.; BARROSO, F.G.; MANZANO-AGUGLIARO, F. Insect meal as renewable source of food for animal feeding: a review. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 65, p. 16–27, 2014.
- SCHABEL, H. G. Forest insects as food: A global review. In: DURST, P.B.; JOHNSON, D. V.; LESLIE, R.N.; SHONO, K. (Eds.). **Forest insects as food: Humans bite back** (pp. 37–64). Bangkok, Thailand: FAO, 2010.
- SCHERER, E.E.; NESI, C.N.; MASSOTTI, Z. Atributos químicos do solo influenciados por sucessivas aplicações de dejetos suínos em áreas agrícolas da Região Oeste Catarinense. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 34, p. 1375–1383, 2010.
- SCIUBBA, E.; ULGIATI, S. Emery and exergy analyses: complementary methods or irreducible ideological options? **Energy**, [S.I.], v. 30, p. 1953–1988, 2005.
- SEURING, S. Industrial ecology, life cycles, supply chains: differences and interrelations. **Business Strategy and the Environment**, Aberdeen, v. 13, p. 306–319, 2004.

SHEPON, A.; ESHEL, G.; MILO, R. Energy and protein feed-to-food conversion efficiencies in the US and the potential food security gain from dietary changes. **Environmental Research Letters**, Bristol, v. 11, n. 105002, p. 1-8, 2016.

SHEPPARD, D.C. et al. A value added manure management system using the black soldier fly. **Bioresource Technology**, Barking, Essex, v. 50, p. 275–279, 1994.

SHEPPARD, D.C. et al. Rearing methods for the black soldier fly (Diptera: Stratiomyidae). **Journal of Medical Entomology**, Oxford, v. 39, p. 695-698, 2002.

SHIGAKI, F.; SHARPLEY, A.; PROCHNOW, L.I. Animal-based agriculture, phosphorus management and water quality in Brazil: Options for the future. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 63, p. 194-209, 2006.

SINISGALI, P.A.A. A eMergia como indicador de valor para a análise econômica-ecológica. **Megadiversidade**, [S.I.], v. 2, p. 18-23, 2006.

SIRIAMORNUN, S.; THAMMAPAT, P. Insects as a Delicacy and a Nutritious Food in Thailand. In: ROBERTSON, G.L.; LUPIEN, J.R. (Eds). **Using Food Science and Technology to Improve Nutrition and Promote National Development** – capítulo 16. IUFoST, Roma, 2008. 11p.

SMETANA, S. et al. Sustainability of insect use for feed and food: Life Cycle Assessment perspective. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 137, p. 741-751, 2016.

SMIL, V. Worldwide transformation of diets, burdens of meat production and opportunities for novel food proteins. **Enzyme and Microbial Technology**, Guildford, v. 30, p. 305–311, 2002.

SOGBESAN A.O. et al. Harvesting techniques and evaluation of maggot meal as animal dietary protein source for Heteoclarias in outdoor concrete tanks. **World Journal of Agricultural Science**, [S.I.], v. 4, p. 394-402, 2006.

SPECHT, L. et al. Assessing sustainability of traditional extensive beef cattle rearing in the Pantanal of South Mato Grosso through eMergy methodology. **Revista Brasileira de Agroecologia**, Porto Alegre, v. 7, n. 3, p. 16-25, 2012.

STEFFEN, W.; CRUTZEN, P.J.; MCNEILL, J.R. The Anthropocene: are humans now overwhelming the great forces of nature? **Ambio**, Oslo, v. 36, n. 8, p. 614–621, 2007.

SWIATKIEWICZ, S. et al. Chitosan and its oligosaccharide derivatives (chito-oligosaccharides) as feed supplements in poultry and swine nutrition. **Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition**, Berlin, v. 99, p. 1-12, 2015.

TABASSUM-ABBASI; ABBASI, T.; ABBASI, SA. Reducing the global environmental impact of livestock production: the minilivestock option. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 112, p. 1754-1766.

TEIXEIRA, M.B. **Analysis of the environmental impact of agribusiness units. Case study: Pinhal river watershed, Santa Catarina.** 2012. 127 f. Dissertação (Mestrado), Faculdade de Engenharia de Alimentos da Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, Brasil, 2012.

TILMAN, D. et al. Forecasting agriculturally driven global environmental change. **Science**, Washington, v. 292, p. 281–284, 2001.

TILMAN, D. et al. Global food demand and the sustainable intensification of agriculture. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, Washington, v. 108, p. 20260-20264, 2011.

TOKGOZ, S. et al. **The role of U.S., China, Brazil's agricultural and trade policies on global food supply and demand.** FOODSECURE, Working paper n° 19, 60p. Netherlands, 2014. 60p

TOMBERLIN, J.K.; SHEPPARD, D.C.; JOYCE, J.A. Susceptibility of black soldier fly (Diptera: Stratiomyidae) larvae and adults to four insecticides. **Journal of Economic Entomology**, Oxford, v. 95, p. 598-602, 2002.

TOMBERLIN, J.K.; ADLER, P.H.; MYERS, H.M. Development of the black soldier fly (Diptera: Stratiomyidae) in relation to temperature. **Environmental Entomology**, Oxford, v. 38, p. 930-934, 2009.

UBABEF – União Brasileira de Avicultura. **The saga of the Brazilian poultry industry: How Brazil has become the world's largest exporter of chicken meat.** (Ed. Costa, S.). São Paulo: UBABEF, 2011, 120p.

UBABEF – União Brasileira de Avicultura. **Relatório Anual 2014.** 105p, 2014. Disponível em:
<<http://www.ubabef.com.br/files/publicacoes/8ca705e70f0cb110ae3aed67d29c8842.pdf>>. Acesso: 01 mai. 2016.

ULGIATI, S.; BROWN, M.T. Monitoring patterns of sustainability in natural and man-made ecosystems. **Ecological Modelling**, Amsterdam, v. 108, p. 23-36, 1998.

ULGIATI, S.; RAUGEI, M.; BARGIGLI, S. Dotting the I's and Crossing the T's of emergy synthesis: material flows, information and memory aspects, and performance indicators. **In: ISAER Conference Proceedings**, Gainesville, FL, p. 199-214, 2004.

UNEP Finance Initiative (UNEP FI). **Water sustainability of agribusiness activities in Brazil.** Chief Liquidity series – Issue 1: Agribusiness (geography – and sector- specific water materiability briefings for financial institutions). 72p, 2009. Disponível em:
<http://www.unepfi.org/fileadmin/documents/chief_liquidity1_01.pdf>. Acesso: 02 set 2016.

USDA - United States Department of Agriculture. **USDA Agricultural Projections to 2025,** 2016. Disponível em: <https://www.ers.usda.gov/webdocs/publications/oce20161/56721_oce-2016-1-fm.pdf> Acesso: 20 nov. 2016.

- VAARST, M.; STEENFELDT, S.; HORSTED, K. Sustainable development perspectives of poultry production. **World's Poultry Science Journal**, Ithaca, v. 71, p. 609-620, 2015.
- VAN HUIS, A. Insects as food in sub-Saharan Africa. **Insect Science and its Application**, Wallingford, v. 23, p. 163–185, 2013.
- VAN HUIS, A. Potential of insects as food and feed in assuring food security. **Annual Review and Entomology**, Palo Alto, v. 58, p. 563-583, 2013.
- VAN HUIS, A. Edible insects contributing to food security? **Agriculture & Food Security**, [S.I.], v. 4, n. 20, p. 1-9, 2015.
- VAN HUIS, A. et al. **Edible insects: future prospects for food and feed security**. FAO Forestry Paper 171. Roma, Itália: FAO, 2013. 190p.
- VANTOMME, P. et al. **Assessing the Potential of Insects as Food and Feed in assuring Food Security**- Summary report. FAO (Ed.). Rome, 2012. 38p.
- VAN ZANTEN, H.H.E. et al. From environmental nuisance to environmental opportunity: housefly larvae convert waste to livestock feed. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 102, p. 362-369, 2015.
- VELDKAMP, T. et al. **Insect as a sustainable feed ingredient in pig and poultry diets – a feasible study**. Wageningen UR Livestock Research - Report 638, 2012. 48p.
- VERBEKE W. et al. Insect in animal feed: Acceptance and its determinants among farmers, agriculture sectors stakeholders and citizens. **Animal feed science and technology**, Amsterdam, v. 204, p. 72-87, 2015.
- VOGEL, G. For more protein, filet of cricket. *Science*, Washington, v. 327, p. 811-811, 2010.
- VOORA, V.; THRIFT, C. **Using emergy to value ecosystem good and services**. International Institute for Sustainable Development, 2010. Disponível em: <<http://www.iisd.org>>. Acesso: 10 jan 2015.
- WANG, D. et al. Nutritional value of the Chinese grasshopper *Acrida cinerea* (Thunberg) for broilers. **Animal Feed Science and Technology**, Amsterdam, v. 135, p. 66-74, 2007.
- WANG, X.; SHEB, J.; ZHANG, W. Emergy evaluation of agricultural sustainability of Northwest China before and after the grain-for-green policy. **Energy Policy**, Guildford, v. 67, p. 508-516, 2014.
- WEIGERT, S.C. et al. Influência da temperatura e do tipo de substrato na produção de larvas de *Musca domestica* Linnaeus, 1758 (Diptera, Muscidae). **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v. 5, p. 1886-1889, 2002.

WEIS, T. The meat of the global food crisis. **Journal of Peasant Studies**, London, v. 40, p. 65-85, 2013.

WERNER, W.W. et al. **Predadores e parasitóides associados à entomofauna presente em fezes bovinas em áreas de pastagens em Campo Grande, MS**. EMBRAPA - Comunicado técnico, n.58, 1999.

WINFREY, B.K., TILLEY, D.R. An emergy-based treatment sustainability index for evaluating waste treatment systems. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 112, p. 4485-4496, 2016.

ZHANG, L.X.; YANG, Z.F.; CHEN, G.Q. Emergy analysis of cropping–grazing system in Inner Mongolia Autonomous Region, China. **Energy Policy**, Guildford, v. 35, p. 3843–3855, 2007.

ZHANG J. et al. An artificial light source influences mating and oviposition of black soldier flies, *Hermetia illucens*. **Insect Science**, Tucson, v. 10, n. 202, p. 1-7, 2010.

ZHENG, L.Y. et al. Double the biodiesel yield: rearing black soldier fly larvae, *Hermetia illucens*, on solid residual fraction of restaurant waste after grease extraction for biodiesel production. **Renewable Energy**, Oxford, v. 41, p. 75-79, 2013.

ZHOU, Z.Y. et al. **Food consumption trends in China**. Research report submitted to the Australian Department of Agriculture, Fisheries and Forestry in Canberra, May 2012, 2012.

ZHOU, F. et al. Developmental and waste reduction plasticity of three black soldier fly strains (Diptera: stratiomyidae) raised on different livestock manures. **Journal of Medical Entomology**, Honolulu, v. 50, p. 1224-1230, 2013.

APÊNDICE A - Material Suplementar submetido ao Journal of Cleaner
Production – Capítulo 5.

Appendix A

Table 7. Calculations (Coordinates: 27° 05'47'' S, 52° 37'06''W)

1. Solar energy:

Average insolation¹ = 1,694 kWh/m²/yr

Incidence area = 1,200 m²

Albedo = 0.3

Energy = (area)*(insolation)*(1-albedo) = 1,422.624 kWh/yr

Conversion factor = 3.60E+06 J/kWh

Energy calculated = 5.12E+12 J

Transformity = 1 seJ/J

Transformity updated = 1.68

Transformity source = Odum (1996)

2. Wind energy:

Speed = 3.6 m/s

Air density = 1.2 kg/m³

Geostrophic speed (60%) = 2.16 m/s

Drag coefficient = 1.00E-03

Area = 1,200 m²

Conversion factor = 3.15E+07 s/yr

Energy = (area)*(air density)*(drag coeff)*(geost speed)³ = 14.51 J/s

Energy calculated = 4.58E+08 J

Transformity = 2.51+03 seJ/J

Transformity updated = 4.22E+03 seJ/J

Transformity source = Odum (1996)

3. Rain (chemical potential):

Annual precipitation = 1,600 l/m²/yr

Area = 1,200 m²

Water density = 1 kg/l

Gibbs free energy (GFE) = 5.00E+03 J/kg

Energy = (precipitation)*(area)*(water density)*(GFE) = 9.60E+09 J/yr

Transformity = 1.82E+04 seJ/J

Transformity updated = 3.06E+04 seJ/J

Transformity source = Odum (1996)

¹ EOSWEB/NASA - https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/grid.cgi?&num=128063&lat=-27.05&hgt=100&submit=Submit&veg=17&sitelev=&email=&p=grid_id&p=swvdowncook&step=2&lon=-52.37

4. Well water (drinking and cleaning):

Water used = 915,300 l/yr

Water density = $1.00\text{E}+03$ kg/l

Gibbs free energy (GFE) = $5.00\text{E}+03$ J/kg

Energy = water density*GFE*water used = $4.58\text{E}+12$ J/yr

Transformity = $4.85\text{E}+04$ seJ/J

Transformity updated = $8.15\text{E}+04$ seJ/J

Transformity source = Boyd et al. (2000)

5. Chicks:

Number of birds = 75,000 birds/yr

Chick weight = 0.04 kg/bird

Calorific value of poultry meat = 5,400kcal/kg

Energy = (n° birds)*(chick weight)*(calorif. value) = $1.62\text{E}+07$ kcal/yr

Conversion factor = 4,186 J/kcal

Energy calculated = $6.78\text{E}+10$ J/yr

Transformity = $7.92\text{E}+05$ seJ/J

Transformity updated = $1.33\text{E}+06$ seJ/J

Transformity source = De Boer and Smith, 2001

6. Corn:

Quantity used = 200,775 kg/yr

Calorific value = 3,800 kcal/kg

Conversion factor = 4,186 J/kcal

Energy = Quantity*calorific value* conversion factor = $3.19\text{E}+12$ J/yr

Transformity = $5.70\text{E}+04$ seJ/J

Transformity source = Cavallet (2008)

7. Soybean:

Quantity used = 110,550 kg/yr

Calorific value = 2,921 kcal/kg

Conversion factor = 4,186 J/kcal

Energy = Quantity*calorific value*conversion factor = $1.35\text{E}+12$ J/yr

Transformity = $2.45\text{E}+05$ seJ/J

Transformity source = Cavallet (2008)

8. Mineral and Vitamin Premix

Quantity used = 694 kg/yr

Conversion factor = $1.00\text{E}+03$ g/kg

Transformity = $1.48\text{E}+13$ seJ/g

Transformity source = Castellini et al. (2006)

9. Energy heat:

Cost = 9,144 R\$/yr
 Tariff rate = 0.29772 R\$/kWh
 Consumption = 30,713 kWh/yr
 Conversion factor = 3.60E+06 J/kWh
 Energy = consumption*conversion factor = 1.11E+11 J/yr
 Transformity = 1.59E+05 seJ/J
 Transformity updated = 2.67E+05 seJ/J
 Transformity source = Odum (1996)

10. Bedding material (substrate to poultry litter)

Commercial value = 4,800 R\$/yr
 Exchange rate (October, 2015) = 3.876 R\$/US\$
 Total value = 1,238 US\$/yr
 Transformity = 4.52E+12 seJ/US\$
 Transformity source = Pereira et al. (2013)

11. Medicine and sanitizers:

Commercial value = 3,000 R\$/yr
 Exchange rate (October, 2015) = 3.876 R\$/US\$
 Total value = 773.99 US\$/yr
 Transformity = 4.52E+12 seJ/US\$
 Transformity source = Pereira et al. (2013)

12. Equipments:

Investment value = 110,000 R\$
 Life cycle = 12 years
 Value/yr = 9,166.67 R\$/yr
 Exchange rate (October, 2015) = 3.876 R\$/US\$
 Total value = 2,365 US\$/yr
 Transformity = 4.52E+12 seJ/US\$
 Transformity source = Pereira et al. (2013)

13. Shed:

Investment value = 120,000 R\$
 Life cycle = 25 years
 Value/yr = 4,800 R\$/yr
 Exchange rate (October, 2015) = 3.876 R\$/US\$
 Total value = 1,238 US\$/yr
 Transformity = 4.52E+12 seJ/US\$
 Transformity source = Pereira et al. (2013)

14. Hired labor:

Value/yr = 3,282.9 R\$/yr

Exchange rate (October, 2015) = 3.876 R\$/US\$
 Total value = 847 US\$/yr
 Transformity = $4.52E+12$ seJ/US\$
 Transformity source = Pereira et al. (2013)

15. Familiar labor:

Value/yr = 105,000 R\$/yr
 Exchange rate (October, 2015) = 3.876 R\$/US\$
 Total value = 2,708.98 US\$/yr
 Transformity = $4.52E+12$ seJ/US\$
 Transformity source = Pereira et al. (2013)

16. Ensurance and environmental license

Value/yr = 1,000 R\$/yr
 Exchange rate (October, 2015) = 3.876 R\$/US\$
 Total value = 258 US\$/yr
 Transformity = $4.52E+12$ seJ/US\$
 Transformity source = Pereira et al. (2013)

17. Technical assistance:

Total value/yr = 1489 US\$/yr
 Transformity = $4.52E+12$ seJ/US\$
 Transformity source = Pereira et al. (2013)

18. Maintenance and administrative costs:

Value/yr = 2,400 R\$/yr
 Exchange rate (October, 2015) = 3.876 R\$/US\$
 Total value = 619.2 US\$/yr
 Transformity = $4.52E+12$ seJ/US\$
 Transformity source = Pereira et al. (2013)

19. Area for carbon sequestration (offsetting):

Emission of CO₂ (poultry+poultry litter) = 91.5 g/bird/day
 Number of lots (considering sanitary time) = 6 lots/yr
 Number of birds = 75,000 birds/yr
 Mortality = 1%
 Total slaughter = 74,250/yr
 Annual CO₂ emissions = 1,763 ton CO₂ equivalent.
 Carbon sequestration in SC forest = 241 ton/ha/yr
 Area for sequestration = 7 ha
 Biomass production (native forest) = 22.43 ton/ha/yr
 Total biomass production = 164 ton/yr
 Conversion factor 1 = $1.00E+03$ kg/ton

Conversion factor 2 = 4,600 kcal/kg

Conversion factor 3 = 4,186 J/kcal

Energy = Total biomass production*CF1*CF2*CF3 = 3.16E+12 seJ/yr

Transformity = 1.07E+04 sej/J

Transformity source = Bardi and Brown (2001)

20. Soil loss compensation: Soil loss emergy = emergy to recover soil (native forest)

20.1 Emergy of Soil loss:

Area = 0.12 ha

Average soil loss in region = 9 kg/ha/yr

Time of impact = 20 years

Soil loss = 0.054 kg/yr

Organic matter content = 0.04 kg OM/kg soil

Conversion factor 1 = 5,400 kcal/kg OM

Conversion factor 2 = 4,186 J/kcal

Transformity = 6,2E+04 seJ/J

Transformity updated = 1.05E+05 seJ/J

Transformity source = Ortega et al. (2005)

Emergy of soil lost = soil loss* OM content*CF1*CF2*Transfor updated = 5.13E+09 seJ

20.2 Emergy to recover soil (native forest)

Area = 0.12 ha

Vegetal production (native forest) = 22.43 ton/ha/yr

Conversion factor 1 = 1,000 kg/ton

Conversion factor 2 = 4,600 kcal/kg

Conversion factor 3 = 4,186 J/kcal

Transformity = 1.07E+04 sej/J

Transformity source = Bardi and Brown (2001)

Emergy to recover soil = vegetal production*area*CF1*CF2*CF3*Transfor = 5.55E+14 seJ

20.3 Area to absorb soil impact = emergy of soil lost/emergy to recover soil = 0.000009 ha.

Biomass production (native forest) = 22.43 ton/ha/yr

Total biomass production = 0.00020 ton/yr

Conversion factor 1 = 1.00E+03 kg/ton

Conversion factor 2 = 4,600 kcal/kg

Conversion factor 3 = 4,186 J/kcal

Energy = Total biomass production*CF1*CF2*CF3 = 3.99E +06 seJ/yr

Transformity = 1.07E+04 sej/J

Transformity source = Bardi and Brown (2001)

Emergy to compensate soil lost = energy*Transf = 4.27E+10 seJ

21. Area to compensate water well use: Emergy of water consumption=emergy of infiltrated water

21.1 Emergy of water consumption:

Water consumption = 915,300 l/yr

Water density = 1 kg/l

Gibbs Free Energy (GFE) = 5.00E+03 J/kg

Conversion factor = 5.00E+03 J/l

Transformity = 4.85E+04 seJ/J

Transformity updated = 8.15E+04 seJ/J

Transformity source = Boyd (2000)

Emergy of water consumption = Water consumption*CF*Transf updated = 3.73E+14 seJ

21.2 Emergy of infiltrated water

Precipitation = 1,600 l/m²/yr

Area = 1200 m²

Water density = 1 kg/l

GFE = 5.00E+3 J/kg

Conversion factor = 6.00E+06 J/yr

Transformity = 1.82E+04 seJ/J

Transformity updated = 3.06E+14 seJ/J

Transformity source = Odum (1996)

Emergy of infiltrated water = Precipitation*CF*Transf. updated = 2.94E+14 seJ

21.3 Area to absorb impact = emergy of water consumption/emergy of infiltrated water = 1.27 ha

Biomass production (native forest) = 22.43 ton/ha/yr

Total biomass production = 28.48 ton/yr

Conversion factor 1 = 1.00E+03 kg/ton

Conversion factor 2 = 4,600 kcal/kg

Conversion factor 3 = 4,186 J/kcal

Energy = Total biomass production*CF1*CF2*CF3 = 5.48E+11 seJ/yr

Transformity = 1.07E+04 sej/J

Transformity source = Bardi and Brown (2001)

Emergy to compensate soil lost = energy*Transf = 5.86E+15 seJ

Output (OP)

22. Chicken:

Annual production = 75,000 broiler/yr

Mortality = 1%

Unit slaughter weight = 2.4 kg/broiler

Total slaughter weight = 178,000 kg

Conversion factor 1 = 4,500 kcal/kg

Conversion factor 2 = 4,186 J/kcal
 Energy = total weight * CF1 * CF2 = 3.36E+12 J
 Transformity calculated = 1.73E+05 seJ/J
 Price = 2.05 R\$/kg

23. Poultry litter:

Organic waste = 2.615 kg/broiler
 Lots number = 6 lots/yr
 Bedding material (substrate) = 0.5 kg/broiler (considering only the first lot = 12500 birds)
 Animal production = 75,000 broilers
 Poultry litter production (organic waste+bedding material) = 202,375 kg/yr
 Calorific value = 1.39E+07 J
 Energy = Poultry litter production * Calorific value = 2,81E+12 J
 Transformity = 1.96E+06 seJ/J
 Transformity calculated = 1.73E+05 seJ/J
 Price = 0.026R\$/kg

24. Solid waste (carcass to poultry litter):

Mortality = 1%
 Annual production = 75,000 broilers
 Total carcass = 750 birds
 Average weight = 2 kg
 Total carcass weight = 1,500 kg
 Calorific value = 5,400 kcal/kg
 Conversion factor 1 = 4,186 J/kcal
 Energy = total carcass weight * calorific value * CF1 = 3.39E+10 J

REFERENCES

- Odum, H.T., 1996. Environmental Accounting: Emergy and Environmental Decision Making. John Wiley, New York.
- Boyd, C., Ortega, E., Queiroz, J., Ferraz, M., 2000. Emergy analysis of channel catfish farming in Alabama, USA. Proceedings of the first biennial emergy conference.
- De Boer, I. and Smit, H., 2001. Embodied energy and emergy analyses in a Dutch agricultural region. Proceedings of the 2nd International Workshop advances in Energy studies.
- Cavalett, O., 2008. Análise do ciclo de vida da soja. (Doctoral thesis, UNICAMP, Campinas, Brazil). Retrieved from: <http://www.unicamp.br/fea/ortega/extensao/Tese-OtavioCavalett.pdf>.
- Castellini, C., Bastianoni, S., Granai, C., Dal Bosco, A., Brunetti, M., 2006. Sustainability of poultry production using the emergy approach: Comparison of conventional and organic rearing systems. Agriculture Ecosystems & Environment. 114, 343-350.

Pereira, L., Zucaro, A., Ortega, E. and Ulgiati, S., 2013. Wealth, trade and the environment: Carrying capacity, economic performance and wellbeing in Brazil and Italy, *Journal of Environmental Accounting and Management* 1(2): 159-188.

Bardi, E. and Brown, M., 2001. Folio #3 - Emergy of ecosystems. *Handbook of Emergy evaluation - A compendium of Data for emergy computation issued in a series of folios.*

Ortega, E., Cavalett, O., Bonfácio, R., Watanabe, M., 2005. Brazilian Soybean Production: Emergy Analysis with an expanded scope. *Bulletin of Science, Technology & Society*. 25, 1-11.

APÊNDICE B - Material suplementar a ser submetido ao Journal of Industrial Ecology

Appendix A

Table 7. Calculations (Coordinates: 22°43'31''S, 47°38'57''W)

3. Solar energy¹:

Average insolation = 1,829 kWh/m²/yr

Incidence area = 1,220 m²

Albedo = 0.2

Energy = (area)*(insolation)*(1-albedo) = 1,784.762 kWh/yr

Conversion factor = 3.60E+06 J/kWh

Energy calculated = 6.43E+12 J

Transformity = 1 seJ/J

Transformity updated = 1.68

Transformity source = Odum (1996)

4. Wind energy:

Speed² = 4.0 m/s

Air density = 1.3 kg/m³

Geostrophic speed (60%) = 2.4 m/s

Drag coefficient = 1.00E-03

Area = 1,220 m²

Conversion factor = 3.15E+07 s/yr

Energy = (area)*(air density)*(drag coeff)*(geost speed)³ = 21.92 J/s

Energy calculated = 6.91E+08 J

Transformity = 2.51+03 seJ/J

Transformity updated = 4.22E+03 seJ/J

Transformity source = Odum (1996)

3. Rain (chemical potential):

Annual precipitation³ = 1,273 l/m²/yr

Area = 1,220 m²

Water density = 1 kg/l

Gibbs free energy (GFE) = 5.00E+03 J/kg

Energy = (precipitation)*(area)*(water density)*(GFE) = 7.77E+09 J/yr

¹ EOSWEB/NASA - https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/homer.cgi?email=skip40larc.nasa.gov&step=1&lat=-22.4331&lon=-47.3857&submit=Submit&ms=1&ds=1&ys=1998&me=12&de=31&ye=1998&daily=swv_dwn

² ATLAS EOLICO DO ESTADO DE SP - <http://www.energia.sp.gov.br/a2sitebox/arquivos/documentos/398.pdf>

³http://www.udop.com.br/download/estatistica/economia_chuvas/1991a2016_historico_piracicaba.pdf

Transformity = $1.82E+04$ seJ/J
 Transformity updated = $3.06E+04$ seJ/J
 Transformity source = Odum (1996)

4. Adult flies:

Fly weight (male and female average)⁴ = 0.048 g/fly
 Flies quantity to 1 ton larvae/day production = 20,000 flies/yr
 Flies lifespan (time to renovate) = 5 yr
 Flies to renovation = 4,000 flies/yr
 Renovation flies weight = 0.192 kg DM
 Protein content (44% CP) = 0.44 kg CP/kg
 Calorific value (44% CP) = 4,500 kcal/kg CP
 Fat content (33%) = 0.33 kg fat/kg
 Calorific value fat (33%) = 9,000 kcal/kg fat
 Conversion factor 1 = 4,186 J/kcal
 Energy of fly = (protein cont*calorific value*CF1)+(fat content*calorific value*CF1) =
 $2.07E+07$ J/kg fly
 Transformity = $2.00E+06$ seJ/J
 Transformity updated = $3.36E+06$ seJ/J
 Transformity source = Odum (1996)

5. Water (all industrial process):

Water density = $1.00E+00$ kg/l
 Gibbs Free Energy (GFE) = $5.00E+03$ J/kg
 Water use = 2,555 kg/yr
 Energy = water density *GFE*water use = $1.28E+07$ J
 Transformity = $4.85E04$ seJ/J
 Transformity updated = $8.15E+04$ seJ/J
 Transformity source= Boyd (2000)

6. Insect feed (Corn and Wheat residue)

Quantity used = 365,000 kg/yr
 Calorific value = $4.42E+03$ kcal/kg
 Conversion factor = 4,186 J/kcal
 Transformity = $4.58E+04$ seJ/J
 Transformity source = Cavallet (2008) – estimated 80% of the data.
 Source data= Calorific value from present research.

7. Electric power

Consumption = 3,860 kWh/yr
 Conversion factor = $3.6E+06$ J/kWh

⁴ Diener, S., Zurbrugg, C., Tockner, K. 2009. Conversion of organic material by black soldier fly larvae: establishing optimal feeding rates. *Waste Management & Research*, 27(6):603-610.

Energy = consumption * CF = 1.39E+10 J/yr
 Transformity = 1.59E+05 seJ/J
 Transformity updated = 2.67E+05 seJ/J
 Transformity source = Odum (1996)

8. Materials (packing, shelves and containers)
 Investment value = 11,558.09 US\$/yr
 Em dolar Brazil = 4.52E+12 seJ/US\$
 Transformity source = Pereira et al. (2013)

9. Facilities and equipments
 Investment value = 104,022 US\$
 Lifespan = 15 yrs
 Annual investment = 6,934.8 US\$/yr
 Em dolar Brazil = 4.52E+12 seJ/US\$
 Transformity source = Pereira et al. (2013)

10. Labor
 Employees = 2 people
 Cost = 6,344.41 US\$/yr
 Em dolar Brazil = 4.52E+12seJ/US\$
 Transformity source = Pereira et al. (2013)

11. Technical assistance
 Employees = 2 people
 Cost = 21,148 US\$/yr
 Em dolar Brazil = 4.52E+12seJ/US\$
 Transformity source = Pereira et al. (2013)

12. Area for carbon sequestration (offsetting):
 Annual emissions (44% larvae and 56% process) = 770 kg CO₂/ton of dry larvae
 Insect meal production = 128 ton/yr
 Total emission = 98.56 ton CO₂ equiv/yr
 Carbon sequestration in SP native forest = 241 ton/ha/yr
 Area for sequestration = 0.41 ha
 Biomass production (native forest)⁵ = 22.43 ton/ha/yr
 Total biomass production = 9.19 ton/yr
 Conversion factor 1 = 1.00E+03 kg/ton
 Conversion factor 2 = 4,600 kcal/kg
 Conversion factor 3 = 4,186 J/kcal
 Energy = Total biomass production*CF1*CF2*CF3 = 1.77E+11 seJ/yr

⁵ Silveira P. 2010. Estimativa da biomassa e carbono acima do solo em um fragmento de floresta ombrófila densa utilizando o método da derivação do volume comercial. *Floresta*, 40(4): 789-800.

Transformity = $1.07E+04$ sej/J

Transformity source = Bardi and Brown (2001)

Emergy = Energy * Transformity = $1.89E+15$ seJ/yr

13. Soil loss compensation: Soil loss emergy = emergy to recover soil (native forest)

13.1 Emergy of Soil loss:

Area = 0.122 ha

Average soil loss in region = 1,500 kg/ha/yr

Time of impact = 20 years

Soil loss = 9 kg/ha/yr

Organic matter content = 0.04 kg OM/kg soil

Conversion factor 1 = 5,400 kcal/kg OM

Conversion factor 2 = 4,186 J/kcal

Transformity = $6.2E+04$ seJ/J

Transformity updated = $1.05E+05$ seJ/J

Emergy of soil lost = soil loss * OM content * CF1 * CF2 * Transformity updated = $8.54E+11$ seJ/yr

13.2 Emergy to recover soil (native forest)

Area = 0.122 ha

Vegetal production (native forest) = 22.43 ton/ha/yr

Conversion factor 1 = 1,000 kg/ton

Conversion factor 2 = 4,600 kcal/kg

Conversion factor 3 = 4,186 J/kcal

Transformity = $1.07E+04$ sej/J

Transformity source = Bardi and Brown (2001)

Emergy to recover soil = vegetal production * area * CF1 * CF2 * CF3 * Transformity = $5.63E+14$ seJ/yr

13.3 Area to absorb soil impact = emergy of soil lost/emergy to recover soil = 0.0015 ha.

Biomass production (native forest) = 22.43 ton/ha/yr

Total biomass production = 0.03365 ton/yr

Conversion factor 1 = $1.00E+03$ kg/ton

Conversion factor 2 = 4,600 kcal/kg

Conversion factor 3 = 4,186 J/kcal

Energy = Total biomass production * CF1 * CF2 * CF3 = $6.48E+08$ seJ/yr

Transformity = $1.07E+04$ sej/J

Transformity source = Bardi and Brown (2001)

Emergy to compensate soil lost = energy * Transformity = $6.93E+12$ seJ/yr

Products (OP)

14. Insect meal:

Quantity produced = 128 ton/yr

Crude energy = 6,916 kcal/kg

Conversion factor 1 = 4,186 J/kcal

Conversion factor 2 = 1.00E+03 kg/ton

Energy = Quantity*crude energy*CF1*CF2 = 3.71E+12 J/yr

15. Organic compound:

Quantity produced = 128 ton/yr

Crude energy = 4,297 kcal/kg

Conversion factor 1 = 4,186 J/kcal

Conversion factor 2 = 1.00E+03 kg/ton

Energy = quantity*crude energy*CF1*CF2 = 2.30E+12 J/yr

REFERENCES

Odum, H.T., 1996. Environmental Accounting: Energy and Environmental Decision Making. John Wiley, New York.



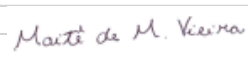

Boyd, C., Ortega, E. Queiroz, J., Ferraz, M., 2000. Emergy analysis of channel catfish farming in Alabama, USA. Proceedings of the first biennial emergy conference.

Cavalett, O., 2008. Análise do ciclo de vida da soja. (Doctoral thesis, UNICAMP, Campinas, Brazil). Retrieved from: <http://www.unicamp.br/fea/ortega/extensao/Tese-OtavioCavalett.pdf>.



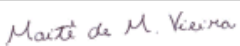

Pereira, L., Zucaro, A., Ortega, E. and Ulgiati, S., 2013. Wealth, trade and the environment: Carrying capacity, economic performance and wellbeing in Brazil and Italy, Journal of Environmental Accounting and Management 1(2): 159-188.

Bardi, E. and Brown, M., 2001. Folio #3 - Emergy of ecosystems. Handbook of Emergy evaluation - A compendium of Data for emergy computation issued in a series of folios.



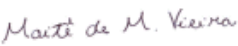

ANEXO A

 DEPARTAMENTO DE ZOOTECNIA LABORATÓRIO DE NUTRIÇÃO ANIMAL UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL PROFESSOR DULPHE PINHEIRO MACHADO			 DEPARTAMENTO DE ZOOTECNIA UFRGS	
LAUDO DE ANÁLISES				
Análise N.º:	19653P			
Cliente:	Profª Veronica Schmidt			
Data de entrada:	02/09/2016			
Data de saída:				
Material:	Substrato das Larvas			
	Materia Seca (%)		Seco ao Ar (%)	
Materia Seca	100,00		86,33	
Umidade			13,67	
Materia Orgânica	96,91		83,66	
Proteína Bruta	26,85		23,18	
Fibra Bruta	4,69		4,05	
Extrato Etéreo	4,01		3,46	
Cinzas	3,09		2,67	
Extrato Não Nitrogenado	61,36		52,97	
Cálcio				
Fósforo				
Atividade Ureática				
Solubilidade Protéica				
DGM (µm)				
FDN				
FDA				
Lignina				
pH				
Energia Bruta (kcal/kg)	4420,00		3815,79	
NDT	84,52		72,97	
<p>O cliente é responsável pela identificação e amostragem do material. O resultado das análises é referente apenas à amostra enviada.</p>				
				
Profª. Maitê de Moraes Vieira Responsável Técnico				
				
LABORATÓRIO DE NUTRIÇÃO ANIMAL Av. Bento Gonçalves, 7712, Agronomia - Porto Alegre - RS e-mail: lna@ufrgs.br CEP: 91540-000 - Fone/Fax: (51) 3308 6057 www.ufrgs.br/agronomia/lna (51) 3308 6048				

ANEXO B

 DEPARTAMENTO DE ZOOTECNIA LABORATÓRIO DE NUTRIÇÃO ANIMAL UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL PROFESSOR DULPHE PINHEIRO MACHADO				
LAUDO DE ANÁLISES				
Análise N.º:	19652P			
Cliente:	Profª Veronica Schmidt			
Data de entrada:	02/09/2016			
Data de saída:				
Material:	Lavas de Blacksoldier			
	Materia Seca (%)		Seco ao Ar (%)	
Materia Seca	100,00		97,00	
Umidade			3,00	
Materia Orgânica	95,92		93,04	
Proteína Bruta	35,89		34,81	
Fibra Bruta	18,49		17,94	
Extrato Etéreo	45,89		44,51	
Cinzas	4,08		3,96	
Extrato Não Nitrogenado	-4,35		-4,22	
Cálcio				
Fósforo				
Atividade Ureática				
Solubilidade Protéica				
DGM (µm)				
FDN				
FDA				
Lignina				
pH				
Energia Bruta (kcal/kg)	6916,00		6708,52	
NDT	110,05		106,75	
<p>O cliente é responsável pela identificação e amostragem do material. O resultado das análises é referente apenas à amostra enviada.</p>				
 Profª. Maitê de Moraes Vieira Responsável Técnico				
				
LABORATÓRIO DE NUTRIÇÃO ANIMAL Av. Bento Gonçalves, 7712, Agronomia - Porto Alegre - RS e-mail: lna@ufrgs.br CEP: 91540-000 - Fone/Fax: (51) 3308 6057 www.ufrgs.br/agronomia/lna (51) 3308 6048				

ANEXO C

 DEPARTAMENTO DE ZOOTECNIA LABORATÓRIO DE NUTRIÇÃO ANIMAL UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL PROFESSOR DULPHE PINHEIRO MACHADO			 DEPARTAMENTO DE ZOOTECNIA UFRGS	
LAUDO DE ANÁLISES				
Análise N.º:	19654P			
Cliente:	Profª Veronica Schmidt			
Data de entrada:	02/09/2016			
Data de saída:				
Material:	Composto Orgânico			
	Materia Seca (%)	Seco ao Ar (%)		
Materia Seca	100,00	58,14		
Umidade		41,86		
Materia Orgânica	92,45	53,75		
Proteína Bruta	25,44	14,79		
Fibra Bruta	12,82	7,45		
Extrato Etéreo	1,41	0,82		
Cinzas	7,55	4,39		
Extrato Não Nitrogenado	52,78	30,69		
Cálcio				
Fósforo				
Atividade Ureática				
Solubilidade Protéica				
DGM (µm)				
FDN				
FDA				
Lignina				
pH				
Energia Bruta (kcal/kg)	4297,00	2498,28		
NDT	70,55	41,02		
<p>O cliente é responsável pela identificação e amostragem do material. O resultado das análises é referente apenas à amostra enviada.</p>				
				
Profª. Maitê de Moraes Vieira Responsável Técnico				
				
LABORATÓRIO DE NUTRIÇÃO ANIMAL Av. Bento Gonçalves, 7712, Agronomia - Porto Alegre - RS e-mail: lna@ufrgs.br CEP: 91540-000 - Fone/Fax: (51) 3308 6057 www.ufrgs.br/agronomia/lna (51) 3308 6048				