POLITECNICO DI TORINO
Repository ISTITUZIONALE

Combining Life Cycle Assessment and Multi-Criteria Decision Analysis to assess agricultural waste management alternatives

Original
Combining Life Cycle Assessment and Multi-Criteria Decision Analysis to assess agricultural waste management alternatives / Lombardi, P., Todella, E., D'Amico, T., Zanderigo, G.. - In: VALORI E VALUTAZIONI. - ISSN 2036-2404. - 37:(2025), pp. 87-114.

Availability:
This version is available at: 11583/3001810 since: 2025-07-14T07:54:04Z

Publisher:
DEI Tipografia del Genio Civile

Published
DOI:

Terms of use:

This article is made available under terms and conditions as specified in the corresponding bibliographic description in the repository

Publisher copyright

(Article begins on next page)

27 November 2026

[valori e valutazioni
teorie ed esperienze

Società Italiana di Estimo e Valutazione

Combining Life Cycle Assessment and Multi-Criteria Decision Analysis to assess agricultural waste management alternatives

Patrizia Lombardi[1], Elena Todella[1,*], Timothée D'Amico[2], Giovanni Zanderigo[3]

[1] Interuniversity Department of Regional and Urban Studies and Planning (DIST), Politecnico di Torino, Italy; patrizia.lombardi@polito.it; elena.todella@polito.it

[2] Section of Environmental Sciences and Engineering, EPFL Lausanne, Switzerland; timothee.damico@gmail.com

[3] Krill Design, Italy; giovanni.zanderigo@krilldesign.net

* corresponding author

Keywords

Life Cycle Assessment, Multi-Criteria Decision Analysis, Analytic Hierarchy Process, orange peel waste

Abstract

Food production is a major contributor to greenhouse gas emissions and environmental damage. Urgent actions are needed to reduce climate risks, and countries are currently committed to reducing emissions in the agricultural sector. Methodologies related to Life Cycle Thinking (LCT) are widely used, focusing mainly on environmental aspects. However, a recent interest oriented toward additional aspects related to agricultural sustainability emerged, both economic and social. Within this context, this paper proposes an application of a combined evaluation framework, based on the integration of Life Cycle Assessment (LCA) with Multi-Criteria Decision Analyses (MCDAs), and, in particular, the Analytic Hierarchy Process (AHP) to assess three alternative technologies for processing orange peel waste. The present paper represents a preliminary experimental application of the proposed framework, exploring the usefulness of supporting the decision-making process in the agriculture sector through a holistic perspective and the consideration of several evaluation criteria relating to multiple – and potentially conflicting – objectives, interests, and actors, as offered by MCDAs. The evaluation of alternative valorization options is fundamental for proposing effective policies and practices, with the aim to propose a multi-dimensional perspective on agricultural waste management, including environmental, economic, and social dimensions.

1. Introduction

Food production is a major contributor to greenhouse gas emissions and environmental damage, accounting for a quarter of the world's greenhouse gases (Ritchey, 2019; Reavis et al., 2022) and half of the arable land (Ritchey and Roser, 2024). Also, climate variability and the increasing frequency and intensity of weather extremes attributed to global warming present a growing challenge to the issue of food security. Such a dynamic, with the interconnected consequences of biodiversity loss, has both immediate and long-term effects on agrifood systems (FAO, 2022), as it inequitably impacts the social groups who are most vulnerable and places additional strain on

land and water resources, as well as fragile agrifood systems and ecosystems (FAO, 2015). Urgent actions are therefore needed to reduce climate risks, and countries around the world are committed to reducing the related–emissions, which will inevitably require action in the agricultural sector.

In this context, and in line with the European Green Deal (European Commission, 2019), which aims to combat environmental degradation and climate change, the National Research Centre for Agricultural Technologies (agritechcenter.it) – of which AGRITECH is the acronym – proposes an integrated, large-scale, multi-disciplinary research program in the context of the Next Generation EU project (European Commission, 2020), the EU's temporary recovery instrument, set up in response to the pandemic crisis, namely the National Recovery and Resilience Plan (2021).

AGRITECH aims to address the various challenges related to sustainable agriculture in Italy through a comprehensive multidisciplinary approach. Its establishment was driven by the objective of integrating cutting-edge scientific knowledge to enhance the competitiveness and sustainability of the Italian agri-food sector. It seeks to utilize enabling technologies to enhance productivity and sustainability while also promoting ecological and digital transition. AGRITECH involves 47 public and private partners, aiming "to adequately address in a truly multidisciplinary context the multifaceted problems associated with sustainable agriculture". In doing so, partners in AGRITECH conduct research on circular technologies in agriculture, to innovate the agri-food supply chains. This research relates to Spoke 8, on "New models of circular economy in agriculture through waste valorization and recycling", in which partners experiment in the realm of organic wastes transformation to obtain high-value products, promote sustainable agro-energy production via waste valorization, and produce biofertilizers. The analysis of the role of Multi-Criteria Decision Analyses (MCDAs) approaches in supporting agricultural waste management has already been the subject of a theoretical contribution (Lombardi and Todella, 2023). The literature review identified the Analytic Hierarchy Process (AHP) as the most used MCDA in the field to evaluate and prioritize alternative technologies in agriculture, integrated with Life Cycle Assessment (LCA) as the most frequent combination. Assuming the theoretical premises and results of the previous work, this paper proposes a methodological advancement based on the contribution of Life Cycle (LC) approaches – in particular LCA – to support them.

In particular, this paper proposes an application of a combined evaluation framework, based on the integration of LCA with the AHP to assess three alternative technologies for processing orange peel waste. The purpose of our research in AGRITECH is to propose a multi-dimensional perspective on agricultural waste management, including environmental, economic, and social dimensions. In doing so, our research is part of a three-step sustainability assessment framework, including the following methods: (i) Holistic Diagnosis; (ii) Life Cycle Assessment; and (iii) Multi-Criteria Decision Analysis.

This paper focuses on step (iii) – and its relationship with step (ii) – and represents a preliminary experimental application of the proposed framework.

First, it derives from the literature a multi-dimensional assessment perspective combining LCA and MCDA. Indeed, MCDAs are a particularly effective technique for addressing these challenges, especially when used in combination with LC tools (De Luca et al., 2017; Torkayesh et al., 2022; Romero-Perdomo, 2023). Accordingly, this paper highlights the features of integrating LCA and MCDA into a multi-methodology.

Second, it proposes a preliminary experiment of applying AHP, based on criteria derived from the literature – in a multi-dimensional perspective on agricultural waste management, including environmental, economic, and social dimensions – and refined through experts' involvement. The field of application entails the assessment of three alternative technologies for processing orange peel waste (OPW).

After this introduction, the paper is organized as follows. Section 2 presents the research design, with a first phase of literature review and a second phase of application. Then, section 3 presents the literature review on combining LCA and AHP in the field, and section 4 recounts the AHP application. Finally, section 5 discusses the findings and proposes the conclusions.

2. Research design

The research has been developed according to two phases: i) phase 1, related to the literature review on combining LCA and AHP, with the identification of relevant Key Performance Indicators (KPIs); ii) phase 2, concerning the refinement of such KPIs through experts' involvement, and the actual AHP application.

Phase 1 proposes an investigation of combining LCA and AHP in the context of agricultural waste. The findings of the literature review are then used to define the combination of methodologies, the most recurrent AHP structure, and the indicators (the above-mentioned KPIs) to be used in the application.

Phase 2 relates to refining the KPIs through experts' involvement, based on a survey, and applying the AHP to identify the best technology alternative. The case study entails the assessment of three technological alternatives for recycling OPW. The first alternative is investigated and proposed by one of the partners in the AGRITECH project, collaborating with a small company, namely Krill Design (KD), which recycles OPW to create daily items. The two additional technology alternatives were selected from the scientific literature to ensure a consistent comparison, specifically identified as anaerobic digestion and an animal feeding process.

A synthetic description of both LCA and AHP methods is provided in the next paragraphs.

2.1 Life Cycle Assessment

LCA is a standardized and comprehensive methodology for evaluating the environmental impacts of production systems throughout their life cycle (Salomone et al., 2017; Khanali et al., 2022), for a product or a process (Yang and Rosentrater, 2019; Koch et al., 2020; Tran et al., 2022). It provides an overall in-depth analysis and assessment of the entire system, from production to disposal (Li et al., 2023), in terms of different categories – e.g., global warming. LCA has been applied in several contexts and production sectors, among which agriculture (He et al., 2018; Nikkhah et al., 2019).

The procedure involves different steps of goal definition, inventory analysis, impact assessment, and interpretation (Tabatabaie et al., 2018; Nikkhah et al., 2019). LCA must define system boundaries, identify life cycle stages and unit processes, and quantify inputs and outputs such as energy, materials, emissions, and waste.

There are several methods for weighting the impact categories considered in LCA, nevertheless, MCDAs have not yet been fully investigated for weighting and prioritizing impact categories in the agriculture sector (Nikkhah et al., 2019). Since MCDAs are known as advanced and effective for such kind of comparison and analysis (Pourjavad et al., 2011), such investigation should be further deepened.

2.2. Analytic Hierarchy Process

AHP is a multi-criteria method to determine the best alternative scenario by considering different weightings based on a pairwise comparison (Saaty, 1980, 1986; Figueira et al., 2005). It is among the most common and widely used MCDAs (Amini and Asoodar, 2016; Nikkaha et al., 2019). It provides a hierarchy of the problems represented and decomposed into different levels, in terms of the main goal, criteria, and sub-criteria representing different aspects of the assessment, and a set of alternatives and options (Fregonara and Coscia, 2019).

The procedure involves different steps of recognizing the problem, creating the decision hierarchy, conducting a pairwise comparison, collecting the final rankings and priorities, and making a decision (Tran et al., 2022).

Once the hierarchy of the problem is defined, every element of the structure is pairwise compared to determine its relative importance. These comparisons are quantified using a numerical scale ranging from 1 to 9 (Saaty, 1980). The scale is based on subjective judgments, ideally from experts in the assessment field based on collected data. Accordingly, AHP provides a comprehensive way to synthesize the ratings into a final prioritization or ranking, facilitating more informed and consistent decision-making.

Literature review on LCA-AHP combinations

As mentioned, MCDAs are particularly effective techniques for decision-support challenges, especially when used in combination with LC tools (De Luca et al., 2017; Torkayesh et al., 2022). The first applications of this combined framework already emerged around three decades ago (Romero-Perdomo, 2023), usually carried out by integrating LCA into MCDA – where LCA provides indicators for the MCDA process – or the opposite – where interpretations and results from MCDA are included in the LCA perspective (De Luca et al., 2017).

A literature review (Phase 1) has been performed concerning LCA-AHP combinations in agricultural waste management, and the process developed is summarized in Figure 1.

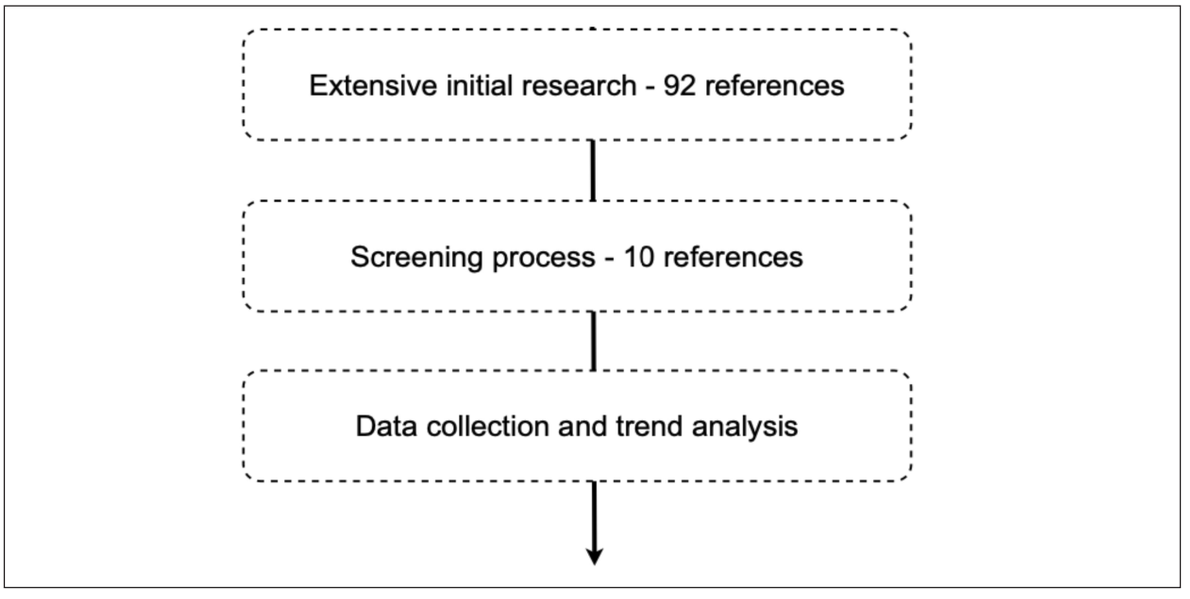

Figure 1. The literature review process.

The Scopus database has been adopted to support the literature search – complemented with the support of the BEAST catalog (Books, Ebooks, and Articles Search Tool), not open access, but available from the EPFL Lausanne, thanks to the third author of this paper. Even though BEAST is not open access, it somehow completes the Scopus results, which provided the vast majority of the documents gathered.

The search for documents related to combining LCA and AHP in agricultural waste management was conducted through an iterative methodology consisting of successive screenings.

First, the databases were interrogated by searching in the titles, abstracts, and keywords sections these keywords: ahp OR (analytic AND hierarchy AND process) AND lca OR (life AND cycle AND assessment) AND (agriculture OR agricultural OR waste). A first exclusion criterion was applied to documents that didn't explicitly propose an LCA-AHP combination. At the end of this research, 92 references were gathered: 64 from Scopus and 22 from BEAST.

Second, data were then sorted according to the research question, storing documents consisting of scientific articles or books related to waste management in the agriculture sector. Indeed, most of the articles derived from the extensive initial research were related to other types of waste, e.g., municipal waste. The sorting was conducted by reading the abstracts and browsing the documents. Resulting from this screening process, 10 articles were finally selected to constitute the basis of the literature review (Petrou and Pappis, 2014; Tan et al., 2017; Lijó et al., 2018; Wang et al., 2019; Teh et al., 2019; Bartzas and Komnitsas, 2020; Hafyan et al., 2020; Nasution et al., 2020; Tran et al., 2022; Li et al., 2023).

Third, the identified articles were analyzed according to three types of information: (i) the LCA-AHP multi-methodologies, focusing on the functional unit in the LCA, and the type of LCA-AHP interaction; (ii) the most commonly used KPIs; and (iii) the applications, exploring the type of stakeholder involvement in the AHP.

3.1. The LCA-AHP multi-methodologies

According to the LCAs conducted in the studies, the functional units were very diverse but mostly expressed in weight. Additionally, they express the quantity of waste processed (Nasution et al., 2020; Lijó et al., 2018), but mostly for the production of a product as energy (Li et al., 2023; Wang et al., 2019), or material (Petrou and Pappis, 2014; Teh et al., 2019; Tran et al., 2022).

The different types of LCA-AHP interaction can be classified according to De Luca et al., (2017), where LCA>AHP indicates an interaction where the AHP is used to improve an LCA result, while LCA<AHP represents studies where an LCA was employed to provide for a AHP application, strengthening the structure of the latter. In this literature review, a clear dominance for LCA<AHP interaction was highlighted, with 80% of use (Tran et al., 2022; Hafyan et al., 2020; Bartzas and Komnitsas, 2020; Teh et al., 2019; Lijó et al., 2018; Wang et al., 2019; Tan et al., 2017; Petrou and Pappis, 2014). Instead, LCA>AHP accounts for 20% of the studies (Nasution et al., 2020; Li et al., 2023).

3.2. The most used KPIs

The number of criteria employed in the AHP application varies between one and five, even if the most commonly adopted number is three. Five criteria have been distinctly identified: environment, economic, social, technology, and safety. Although their definitions vary from study to study, brief descriptions can be proposed:

- the “environment” criterion revolves around minimizing the ecological impact of activities. This includes considerations for emissions, resource usage, biodiversity preservation, and ensuring practices aligned with sustainability principles (Petrou and Pappis, 2014; Tan et al., 2017; Lijó et al., 2018; Wang et al., 2019; Teh et al., 2019; Bartzas and Komnitsas, 2020; Hafyan et al., 2020; Nasution et al., 2020; Tran et al., 2022; Li et al., 2023);
- the “economic” criterion aims to cover the financial viability and cost efficiency of the alternatives. This involves analyzing the total costs, unit costs, and input availability of waste recovery scenarios, thereby highlighting sustainable practices and their economic resilience (Petrou and Pappis, 2014; Lijó et al., 2018; Wang et al., 2019; Teh et al., 2019; Bartzas and Komnitsas, 2020; Hafyan et al., 2020; Tran et al., 2022);
- the “social” criterion relates to the human dimension of agricultural waste management, considering community health, safety, and job creation. It also evaluates factors such as community engagement, support, and the overall impact on the individuals involved (Petrou and Pappis, 2014; Lijó et al., 2018; Wang et al., 2019; Bartzas and Komnitsas, 2020);
- the “technical” criterion focuses on leveraging tools and methodologies to enhance waste management practices. Technology plays a pivotal role in optimizing efficiency, reducing waste, and mitigating environmental impact (Petrou and Pappis, 2014; Wang et al., 2019; Teh et al., 2019);
- the “safety” criterion considers paramount aspects in waste management endeavors, prioritizing the protection of workers, communities, and ecosystems from potential hazards. Rigorous risk assessment and mitigation strategies address exposure to harmful substances, ensuring a secure working environment (Hafyan et al., 2020).

The environment criterion appears in all studies, making it the most commonly used. The frequency of appearance places the economic one in the second order of occurrence (70% of the studies), followed by social (40%), technical (30%), and safety criteria (10%). These results underline the importance of environmental considerations in a waste and circular economy framework.

However, the economic aspect is also really frequent, showing a real concern for the economic viability of the alternatives studied.

Accordingly, 52 KPIs were identified and organized in the five fields described before. Table A1 in the Appendix gives an overview of them.

3.3. The applications

The multi-dimensional and multi-criteria assessment generally entails a lot of stakeholders from various perspectives. If it allows to collect diversified approaches and knowledge, it also represents a challenge to involve them in the assessment application. In an AHP process, the participation of experts is highly recommended, hence representing a step towards stakeholder participation. Accordingly, the results of the literature review show a high percentage of studies (80%) in which some actors were explicitly involved (Petrou and Pappis, 2014; Lijó et al., 2018; Wang et al., 2019; Teh et al., 2019; Bartzas and Komnitsas, 2020; Hafyan et al., 2020; Nasution et al., 2020; Li et al., 2023). When this was the case, there was always participation recorded during the criteria weighting phase, which is explained by the structure itself of the AHP, which requires expert participation or decision-makers. However, only a limited number of cases have reported involving stakeholders in another phase of the assessment (Petrou and Pappis, 2014; Lijó et al., 2018; Bartzas and Komnitsas, 2020). Precisely, these studies mentioned the participation of stakeholders to complete the data collection. This support was obtained mainly from surveys administered to farmers and/or local citizens, and then people within the field provided high-quality information.

4. Application

As mentioned, this section illustrates a preliminary experimental application of the combined evaluation framework of LCA and AHP, starting from the findings highlighted in the previous section. The results of the literature review underlined the trends in assessing agricultural waste management alternatives through an LCA-AHP structure. LCA was most used as an environmental data supplier for an AHP application, reinforcing the results of the latter. For this reason, the LCA<AHP is the interaction type that was conducted in the application. The results related to the criteria pointed out also the three criteria as the most common structure. This finding, coupled with the criteria's occurrence, led to opt for three criteria, namely the environmental, economic, and social. Also, the list of KPIs resulting from the literature review served as a starting point to choose some relevant to the AHP application to the case study.

4.1. Case study

The case study of this work encompasses an LCA-AHP application to assess three technology alternatives for processing orange peel waste in Italy. The study covers OPW processing, adding value to this waste as an initial material for a new supply chain. By giving a second life to this product, it generates some benefits, enhancing its contribution to a circular economy approach. As an assessment of the technologies is explored in this work, the growing phase of the oranges is not taken into account.

The company Krill Design (KD) was chosen as the reference company and the first alternative to the LCA-AHP structure, as a case study investigated by colleagues in the AGRITECH project – from which most of the information on the case was derived. The company processes dried OPW by milling and mixing it with an organic compound to obtain a 3D-printable material. Two further alternatives were selected from the scientific literature (Negro et al., 2017) to be compared with KD technology, namely anaerobic digestion (AD) and animal feeding (AF). On the one hand, the AD alternative converts the OPW into biogas for electricity generation. While this process supplies renewable energy, it may still contribute to greenhouse gas emissions due to fugitive methane losses and the release of biogenic CO_2, thereby partially deviating from a fully circular carbon loop. Also, this scenario is energetically self-sufficient and produces by-products such as limonene and digestate, the latter of

which can be used as on-land fertilizers, accounting for carbon capture and storage for the residual non-degraded carbon. On the other hand, the AF alternative transforms OPW into pellets to feed animals. The purpose of choosing these two scenarios was to have alternatives that represent common technologies, likely to be found in other studies during the data collection phase. Also, although the article is slightly old (2017), it perfectly aligns with the Italian context and also processes exclusively OPW.

The use of primary data for the Krill Design process and secondary data for the other two processes was dictated by data availability. Nevertheless, being the main aim of this application a verification of the methodological integration between LCA and AHP, it was possible to proceed and experiment with the research team, taking into account the asymmetry among primary and secondary data. Accordingly, these three alternatives were selected for this preliminary experimental application of the LCA-AHP framework.

4.1.1 Krill Design

KD is a small company that uses agricultural waste to produce objects for everyday use (https://krilldesign.net). Although they also work with lemon peels and coffee grounds, only the orange peel waste is considered in this study, analyzed through primary data. Their processing chain starts with the purchase of orange-dried flakes from Sicily. The peels are further dried and milled into a thin and homogeneous powder. A nature-based biodegradable polymer called PHB is added as the second input of the process to reach a blend of 30% OPW and 70% PHB. This compound comes from another company based in northern Italy, and its main advantage is that it contributes to providing a final product that is 100% biodegradable and compostable. The next step in the process is the pelletization of the mixed material into a patented product called Rekrill®. Finally, the pellets are used to feed 3D printers, which give the final shape to the orange peels. One of the representative final objects of this process is a lamp named Ohmie, entirely designed and produced by KD and sold on the market.

4.1.2 Anaerobic digestion

This alternative, considered through secondary data from the literature, considered anaerobic mono-digestion to produce heat and electricity, as well as fertilizers and limonene (Negro et al., 2017). The OPW was subjected to steam heating, using 22% of the total bio-methane generated, and then the slurry was directed to an expansion tank, where the limonene was extracted. In addition, the solid residue obtained from the extraction was directly transferred to the fermentative process. The process of anaerobic digestion in Negro et al. (2017) used thermophilic digestion at a temperature of 55°C. The electricity consumption was determined to be equivalent to the normal demand for homogeneous industrial biomass material. The majority of CO_2 impact was attributed to fugitive methane (CH_4) emissions, primarily resulting from leakages in the fermentation reactor and uncombusted CH_4 released from the stationary engine. Conversely, the CO_2 savings were linked to the production of biofuels that act as a substitute for natural gas-derived electricity, to the on-land application of the residual digestate that avoided the need for the production of mineral fertilizers and eventually to the chemical substitution of D-limonene in place of hexane. The biogas generated was presumed to be burned in an internal combustion engine. The heat produced was used internally to warm the fermenter. Also, the digestate derived from anaerobic digestion was proposed as a substitute for fertilizers.

4.1.3 Animal feeding

In this scenario, considered through secondary data from the literature, the OPW underwent dehydration to decrease the moisture level to below 10% before being pelletized (Negro et al., 2017). Since OPW is used for feeding, it is assumed that there is a substitution of traditional energy and protein feed, similarly and according to the energy and protein levels of the OPW. In Negro et al.

(2017), it is considered that OPW can substitute maize, as the marginal energy feed, and soymeal, as the marginal protein feed. Consequently, considering that the crops are grown worldwide and shipped overseas by sea (covering a distance of approximately 12,000 km), any negative impacts on the environment resulting from the production of traditional animal feeds and changes in land use related to maize and soybean are eliminated.

4.2. Application of the LCA-AHP framework

The application of the LCA-AHP framework involved the screening of the KPIs, the definition of the input from the LCA to the AHP application (in line with an LCA<AHP approach), and the application of the AHP in an experiment.

4.2.1 Screening the KPIs with a survey

The KPIs derived from the literature review were used as a starting point to select a final set, to be implemented in the LCA-AHP model. A preliminary step was to reconduct the KPIs from five to the three selected categories. As mentioned in the literature review section, a three-criteria structure was kept; hence, the KPIs were reorganized into environment, economic, and social.

The first step was then to complement the list to set up the most suitable environmental, economic, and social indicators. Starting from the study conducted by Lombardi and Todella (2023), the relevant KPIs – the 52 KPIs already identified in Table A1 in the Appendix – that emerged in the selected literature review on agricultural waste management were considered. Then, further relevant KPIs for orange peel waste management were selected (Negro et al., 2017; Eriksson e Spångberg, 2017; Wang et al., 2018; Koskiaho et al., 2020; Bolaji et al., 2021; Illankoon et al., 2023; Kanchanapiya e Tantisattayakul, 2023; Teigiserova et al., 2022; Ortiz-Sanchez et al. 2024). The list of the 17 added KPIs is available in Table A2 of the Appendix.

The second step consisted of a preliminary refinement of KPIs, based on the research team evaluation concerning: not being related enough to the framework of the case study; and being too broad or difficult to measure.

As the third step, the resulting list of 37 KPIs was submitted to 29 experts involved in the AGRITECH project through a survey, where they were asked to evaluate the set through the following statements:

- We should keep this KPI;
- We should keep this KPI but make changes to it;
- We should not keep this KPI;
- We should replace this KPI with another one.

Table 1. The selected multidimensional KPIs

	KPI	Description	Unit
Environment	Global warming potential (GWP)	The contribution to global warming by releasing greenhouse gases.	kgCO2 eq
	Water depletion (WD)	The extent of water usage or depletion in a given system.	m3
	Land use (LU)	Land-use activities, including land conversion and land use itself.	PDF · m2 · year or Kg Cdeficit
	Renewable material index (RMI)	The amount of renewable raw materials used in the process related to the total amount of inputs.	kg renewables / kg inputs

Segue **Table 1**. The selected multidimensional KPIs

	KPI	Description	Unit
Economic	Total cost	The capital and operational costs required to process 1kg of OPW (wet weight) according to their valorization scenario.	Euro
	Availability	Long-term feasibility of using the inputs required for the entire OPW treatment process.	Qualitative
	Payback period (PBP)	The time it takes for a project to make its accumulative profit equivalent to the initial investment.	Year
Social	Employment	The amount of labour required for the alternative, that is the employment created by it.	Nr. of jobs
	Risk of exposure to pollutants	The content of heavy metals, pharmaceuticals, microplastics and visible contaminants in the considered process, which measures the risks taken by workers. The focus is on the direct risk of exposure.	Qualitative
	Human toxicity (HT)	The potential adverse effects of toxic substances on the human environment, resulting from emissions and from the chemical ingredients in products released during their production, use, or end-of-life treatment, with public health impacts. Health risks of exposure in the working environment are not included.	Comparative Toxic Unit for Human Health

The participants also had a space to add some indicators, which they estimated were necessary. The 11 experts who answered the survey belonged to the academic field.

The KPIs were first filtered based on a threshold of 85% of suggestions to keep each of them. Furthermore, a few adjustments were made to have a coherent representation of the three fields selected and avoid redundancy. For example, "OPEX" and "CAPEX" were merged into the "Total cost" indicator, and the "Unit cost" indicator was removed, from the set due to its strong correlation with the latter. The set of 10 KPIs is presented in Table 1.

4.2.2 Defining the input from the LCA

Some information such as the supply chain, the process, and an LCA was shared by colleagues in AGRITECH working on the KD technology – among which the last author of this paper. Accordingly, in this application, the existing outputs of LCA were directly used as inputs for the AHP application. The Ohmie lamp was chosen as the reference product of KD. It should be specified that, in this application, the PHB was only taken into account for the GWP impact category due to a lack of data from the supplier of this material to KD. In alignment with the data collected about the KD technology and in the interests of uniformity, the functional unit (FU) was set to 1kg of OPW (wet weight) processed. As KD performed the LCA choosing 1 kg of Rekrill® pellets as a functional unit, this unit was converted to the common FU. According to Ortiz-Sanchez et al. (2024), a moisture content of 21% for the OPW has been adopted. Being Rekrill® made from 30% orange peels, 1kg processed of this fresh waste corresponds to 2,63kg of Rekrill® pellets. Information on LCA conducted on the AD and AF scenarios was derived from Negro et al. (2017). The functional unit for these alternatives was the management of 1 t of OPW (wet weight), and then all the data collected were scaled to be comparable with KD. In particular, the results of LCAs were used as inputs for the AHP application. In particular, the LCAs deliver information to four KPIs, three environmental (GWP, WD, and LU) and one social (HT).

4.2.3 The AHP structure

Derived from the literature review findings and the list of KPIs, it was possible to define an AHP structure combined with an LCA (Figure 2). It consists of a goal, which is to define the best technology

alternative, three criteria (environmental, economic, and social), and assesses three alternatives: the Krill Design technology, anaerobic digestion with the production of by-products, and an animal feeding scenario, which are further explained in the next section. Each criterion forms a cluster containing several sub-criteria, composed of the KPIs set derived from the survey.

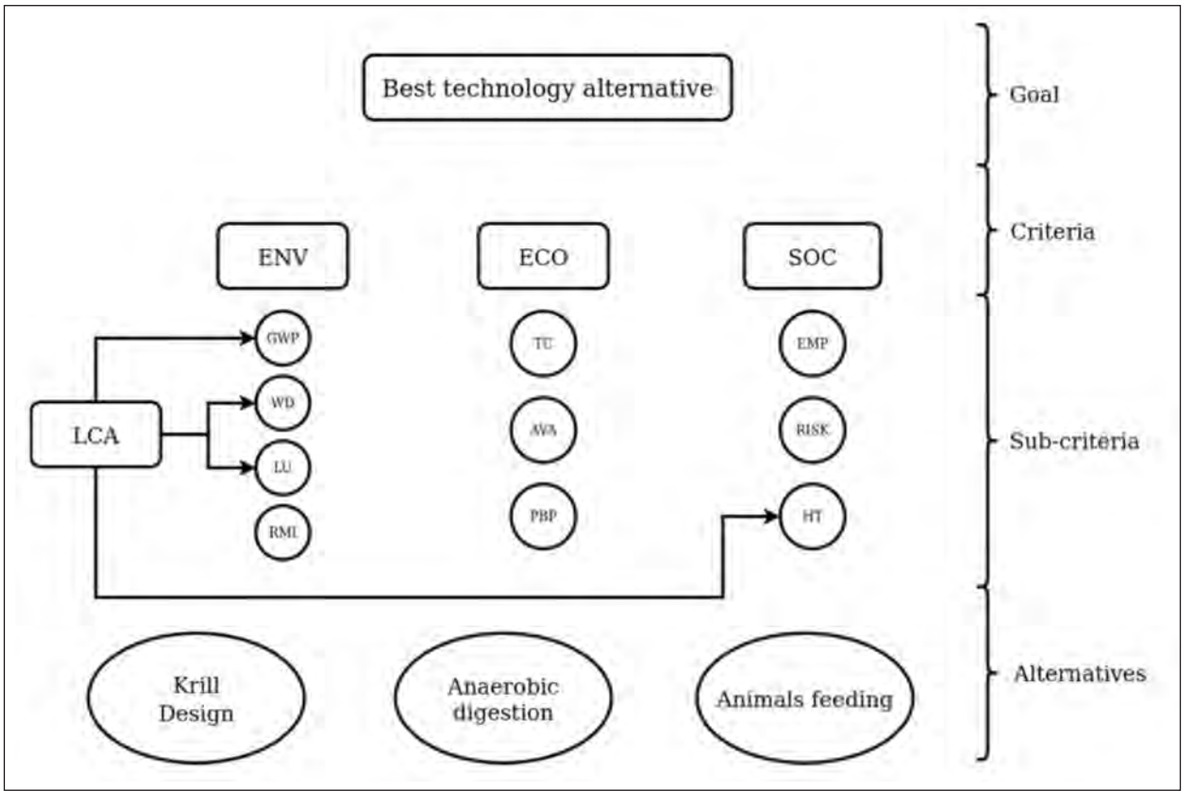

Figure 2. LCA-AHP structure (ENV: environmental; ECO: economic; SOC: social).

4.2.4 Data collection

The process of data collection faced some challenges since data on AD and AF scenarios and related data were gathered from secondary sources (mainly literature), whereas most of the KD parameters were primary ones (with semi-structured questionnaires and interviews). Whenever possible, the data were directly derived from the reference article providing the scenarios (Negro et al., 2017). Further scenarios as similar as possible were selected from the literature when the KPIs were not measured in the original study.

Some assumptions have been necessary to reach a basis with equivalent units, boundaries, and comparable orders of magnitude. Also, in some cases, the lack of relevant sources imposed a qualitative assessment from the experts during the AHP application process (e.g., for water depletion, land use for AD and AF, and total cost).

Hereafters are the results of the data collection, providing also details on the assumptions made for each KPI (Table 2):

- Global warming potential: the LCA conducted by KD does not consider any prevented emissions because it avoids the creation of a classic lamp, assumed to be made of plastic. In order to align with the assessment of the two other alternatives, an assumption was made to balance this aspect. 1kg of polypropylene was assumed to be avoided for each kg of Ohmie

lamp produced and sold. The assumption also relates to the fact that the body of the classical lamp is made of polypropylene. The footprint of polypropylene production is set to 2,75 kg CO2eq, hence making the process of 1 kg OPW (wet weight) avoid 2,03 kg CO2eq with respect to KD technology;

- Water depletion: a lack of data in the scientific literature was observed regarding the implicit and explicit consumption of water in the transformation of orange peels into feed for animals. No relevant value was found as regards the AF scenario, then the evaluation was considered to be qualitatively conducted by experts;
- Land use: the assessment of impacts on land use is shared with multiple approaches in the LCA framework, thus amplifying the unit heterogeneity between results in the literature. Land use impact was expressed in KgC deficit in the LCA assessing KD alternative, which has been, by default, the reference unit to quantify this impact category. Unfortunately, a lack of its use in studies did not enable a quantitative comparison among scenarios. Even in this case, the evaluation was considered to be qualitatively conducted by experts;
- Renewable material index: AD and AF scenarios are assumed to use exclusively OPW as input raw material. Nevertheless, the PHB used by Krill Design is also considered a renewable product as, according to the company, it can be produced by microbial fermentation using renewable resources;
- Total cost: the processing costs for AD and AF scenarios have been considered from the reference article (Negro et al., 2017), considering the sale of electricity and limonene, heat being dedicated to internal use, and digestate not being considered a revenue source due to the cost of spreading it on land being equal to that avoided. Nonetheless, slight modifications were made to be as close as possible to the current Italian market using a price correction index, adapting costs from 2016 to 2023 (Rivaluta ISTAT). Also, the KD scenario provides information about capital and operational expenditures, but the provided information was not comparable with the other scenarios. Accordingly, in this case, the evaluation was considered to be qualitatively conducted by experts;
- Availability: two aspects were considered to evaluate this indicator, namely supply of inputs and the impact of orange peel seasonality, as this kind of waste is the only one considered in this work and has a strong correlation with the period of the year studied. Both AF and KD scenarios can work with dried orange peel flakes, avoiding further seasonality considerations. A deeper reflection was required regarding AD, which has been qualitatively discussed in the AHP application. Also, concerning KD, the PHB is less available on the market than the alternatives it replaces, so its availability of PHB could represent a challenge if KD production is to increase (even if the company does not suffer any shortages at its current production rate);
- Payback period: the 0.5-year PBP was an estimation obtained for KD that takes into account all the carried-on projects in the last few years. Nevertheless, no PBP was considered for the two other alternatives since they are not economically viable, according to the secondary sources considered;
- Employment: the number of jobs created for KD is of three workers involved in the processing phase, whereas for AD, the value comes from secondary sources (Ortiz-Sanchez et al., 2024). Based on a larger processing chain in the study, only the corresponding steps to perform AD and obtain auxiliary products were isolated. The AF scenario has a processing chain similar to that of KD, pelletizing incoming material, so the same number of workers has been kept;
- Risk of exposure to pollutants: based on secondary sources (Johannesdottir et al., 2019), AD was considered to have a risk of exposure to pollutants of 0. According to assumptions derived from the same study, the other alternatives were assumed to present the same risk level in their processing chains;
- Human toxicity: as an impact category derived from an LCA, this indicator suffers from the

same limitations as the other ones, since PHB's impact was not considered. Nevertheless, quantitative data are provided here for all the scenarios.

Table 2. KPIs data

	KPI	Unit	Direction	Alternative 1 (KD)	Alternative 2 (AD)	Alternative 3 (AF)
Environment	Global warming potential (GWP)	$kgCO_2$ eq	Lowest	-2.03	-0.137	-0.302
	Water depletion (WD)	m^3	Lowest	Global warming potential (GWP)		
	Land use (LU)	PDF · m^2 · year or Kg Cdeficit	Lowest	Water depletion (WD)		
	Renewable material index (RMI)	kg renewables / kg inputs	Highest	100	100	100
Economic	Total cost (TC)	Euro	Lowest	To be qualitatively addressed by experts.		
	Availability (AVA)	Qualitative	Positive	Yes	Yes	Yes
	Payback period (PBP)	Year	Lowest	0.5	Not economically viable.	Not economically viable.
Social	Employment	Nr. of jobs	Highest	3	7	3
	Risk of exposure to pollutants	Qualitative	Negative	No	No	No
	Human toxicity (HT)	Comparative Toxic Unit	Lowest	$8.20 \cdot 10^{-08}$	$8.20 \cdot 10^{-11}$	$4.38 \cdot 10^{-07}$

4.2.5 The weighting process: workshop 1

To perform the weighting process of the considered criteria and sub-criteria, this paper proposes the application of the AHP process. The weighting process usually engages different groups of stakeholders, gathering expert judgments based on their knowledge and expertise. In this study, as an internal experiment, the involved experts were part of the project team. A first workshop was organized to conduct the criteria and sub-criteria pairwise comparison, attributing relative weights. Four experts took part in the workshop, through a software dedicated to the AHP application called Super Decisions (https://www.superdecisions.com), offering real-time results and graphics. The inconsistency is also calculated and can be found here in the description of each table.

The first phase of workshop 1 proceeded with experts performing relative comparisons within environmental, economic, and social criteria. They had to rate the level of importance of each pair of criteria using the Saaty scale based on absolute numbers from (Saaty, 1980). Table 3 summarizes the results of this assessment. The discussion led to considering social and environmental criteria

with the same importance as focusing on aspects of the circular economy and local social opportunities.

Table 3. Experts' judgment of the criteria level

Best technology alternative	**ENV**	**ECO**	**SOC**
ENV	1	4	1
ECO	1/4	1	1/4
SOC	1	4	1

Inconsistency: 0.00000

In the next sub-criteria weighting phase, each cluster was analyzed through its sub-criteria, again through pairwise comparison among experts taking part in workshop 1. As a result, tables 4, 5, and 6 illustrate how the weights were attributed.

Table 4. Experts' judgment of the environmental sub-criteria

Environmental	**GWP**	**WD**	**LU**	**RMI**
GWP	1	5	4	2
WD	1/5	1	2	1/5
LU	1/4	1/2	1	1/4
RMI	1/2	5	4	1

Inconsistency: 0.06271

The main discussion around the environmental criteria turned around the RMI, which was considered a really important KPI in a circular economy assessment. The importance of land use on GWP was also debated, as it mainly considers biodiversity, whereas GWP expresses global warming. The GWP was finally judged more important than LU because the growing phase of the oranges was not included in the boundaries of this work.

Table 5. Experts' judgment of the economic sub-criteria

Economic	**TC**	**AVA**	**PBP**
TC	1	1	1/2
AVA	1	1	1/3
PBP	2	3	1

Inconsistency: 0.01759

The focus in the economic field was placed on the availability indicator to decide if the seasonality of the orange waste would give it a consequent importance above the others. Finally, the PBP was chosen as the most important economic indicator.

Table 6. Experts' judgment of the social sub-criteria

Social	**EMPL**	**RISK**	**HT**
EMPL	1	1/2	1/4
RISK	2	1	1/2
HT	4	2	1

Inconsistency: 0.00000

An expert's deliberation concluded that human toxicity had greater importance and an impact on the long term in comparison with employment, even if it was also important.

A summary gathering the weight of each KPI within its cluster is shown in Table 7.

Table 7. The results of the criteria and sub-criteria weights

ENV		**ECO**		**SOC**	
44,4%		11,1%		44,4%	
KPI	**Weight [%]**	**KPI**	**Weight [%]**	**KPI**	**Weight [%]**
GWP	47.8	AVA	21.0	EMP	14.3
LU	8.1	PBP	55.0	HT	57.1
RMI	33.9	TC	24.0	RISK	28.6
WD	10.2				

4.2.6 Evaluation of alternatives: workshop 2

To perform the pairwise comparison of the alternatives according to the data collected and expert judgments, this paper proposes again the application of the AHP process. A second workshop was organized using Super Decision. Five experts took part in the workshop, among which three were present at the previous one. Weights attributed to criteria and sub-criteria were discussed again and slightly modified (results presented in this section take into account these modifications) as the group of experts was composed of a more diversified specialization panel.

Then, KD, AD, and AF scenarios were rated against each sub-criteria by the experts in pairwise comparison. This assessment was mainly based on the results of the data collection, but experts also used their knowledge and experience to make up for the lack of information on certain KPIs or their qualitative nature. Table 8 illustrates an example of the process that has been conducted for the ten sub-criteria.

Table 8. Alternative comparison concerning GWP

GWP	**KD**	**AD**	**AF**
KD	1	8	6
AD	1/8	1	1/3
AF	1/6	3	1

Inconsistency: 0.07069

Once criteria and sub-criteria were given a weight and the alternatives were compared concerning the sub-criteria, a final weight was computed for each technology. The final ranking of alternatives is presented in Figure 3.

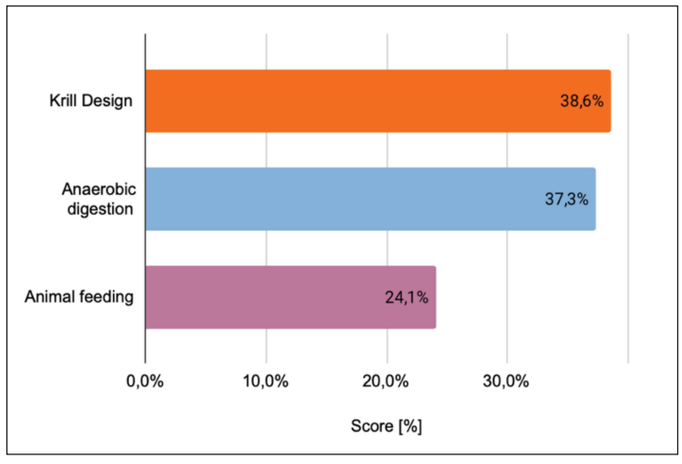

Figure 3. The final ranking of alternatives.

Considering the overall preference expressed by the experts involved, the best technology is KD among the alternatives. On the contrary, the less preferred alternative is AF. Nevertheless, KD and AD obtained close overall results, with AD remaining a proper option to consider.

4.2.7 Sensitivity Analysis

A sensitivity analysis has been performed to assess the robustness of the applied model, with a specific focus on the weights attributed to criteria and sub-criteria. The steps to carry out the analysis were as follows:

- using the weighting given in workshop 1, without modification, as an input to the criteria and sub-criteria;
- giving equal importance to all criteria;
- considering tipping points towards a change of alternative.

Figure 4 illustrates the results of the first two performed sensitivity analyses.

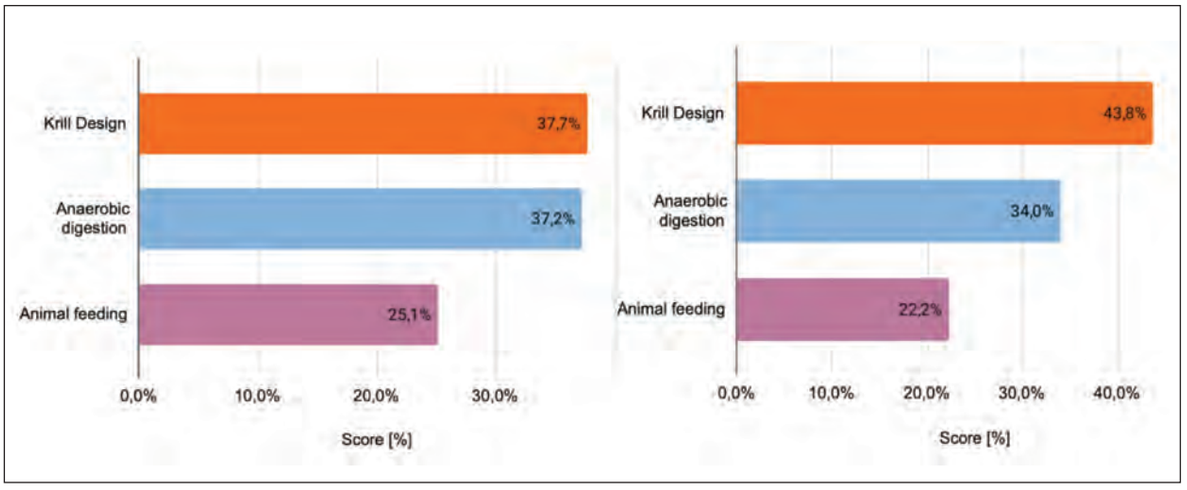

Figure 4. The results of the first sensitivity analysis (left) and of the second one (right).

Concerning the first one (Figure 4, left), the weighting given by experts during the first workshop was taken without the modifications made during the second one.

In this sense, environmental criteria were initially judged to be even more important than economic criteria. GWP was less dominant than LU and WD, WD and LU were estimated to be equally important, and RMI was not as important as WD. Nevertheless, it is possible to notice that the final results show the same ranking of alternatives. The KD and AD scenarios are even closer in this sensitivity analysis, which is the result of a slightly heavier weight for the LU indicator. In the end, changes are not significant.

Concerning the second sensitivity analysis (Figure 4, right), all criteria are equally weighted, then only sub-criteria weights and alternative assessments will contribute to the final ranking. Again, KD remains the preferred scenario (with an increase in the percentage), and the final results show the same ranking of alternatives. The major change derives from the increased weight of the economic criteria, which favors the KD alternative.

The third sensitivity analysis makes some more changes than the other two discussed before. This analysis explores tipping points, to observe a switch to another alternative considered to perform the best. This computation is made with the software Super Decisions and considers one weight change at a time, keeping others fixed. Two kinds of tipping points are analyzed: those related to a change of criteria weights, and those occurring if the weighting of HT and GWP are modified. These sub-criteria indeed account for 46% of the overall contribution of KPIs.

The analysis in Table 9 displays the weight required for the criteria to induce a preferred alternative shift. The percentage of variation underlines how far from the initial weight is the tipping point and if the weight needs to increase or decrease to reach a change.

Table 9. Tipping points when changing criteria weights

Final weights	Preferred alternative	Tipping points	[%] of variation	Shift
ENV: 0,444	KD	0.426	-4.15	KD -> AD
ECO: 0,111	KD	0.077	-30.52	KD -> AD
SOC: 0,444	KD	0.460	3.41	KD -> AD

The starting point is the same, with the KD scenario as the preferred alternative. An immediate observation points out that every change is made in favor of the AD scenario rather than AF. Indeed, in the final ranking, AD technology scored much closer to KD than AF, which explains this shift. It is also noticeable to realize how environmental and societal criteria are close to their respective tipping points. In the case of environmental criteria, a slight decrease in weight would encourage the AD scenario, whereas a slightly heavier weight of social criteria would bring about the same outcome. The economic tipping point is much further away in comparison with the two others. More importantly, it requires a lighter weight when it already has the lightest weight. Therefore, the likelihood of reaching this condition is significantly lower compared to other thresholds.

The analysis in Table 10 explores tipping points for the sub-criteria HT and GWP.

Table 10. Tipping points for GWP and HT weights

Final weights	Preferred alternative	Tipping points	[%] of variation	Shift
HT: 0,571	KD	0.634	10.99	KD -> AD
GWP: 0,478	KD	0.426	-10.78	KD -> AD

These require a variation of almost ± 11%, an increase for HT, or a diminution for GWP.

Such a difference is a significant change, and the tipping points are not as close to the results as the environmental and social criteria. However, if some of the KPIs have uncertain values, the experts might give different weight to the indicator.

The analyses highlighted that KD still obtained the preferred score in two additional cases. Nevertheless, the allocation of weight, specifically the weight assigned to the criteria, has a significant influence on the outcomes. Even small adjustments in the environmental (-4.2%) or social (+3.4%) criteria can shift the preference towards the AD alternative. Furthermore, two sub-criteria, GWP and HT, account for almost 46% of the total, with potential issues in case of uncertainties about the data. Due to these factors, the outcomes acquired in this AHP implementation should be approached with great caution and are prone to alteration when a more comprehensive AHP implementation is conducted. Accordingly, a discussion is proposed on data quality and reliability in the following section.

5. Discussion

Although a final ranking is an easy way to quickly identify which scenario should be considered first, facilitating the work of decision-makers, a whole process and quantity of choices have led to this ultimate result. This section aims to identify how this outcome has been reached and to understand which uncertainties – e.g., in data quality – could have been decisive. Indeed, being this a preliminary application and simulation, the outcomes acquired should be approached to improve the process when a more comprehensive AHP implementation is conducted with real stakeholders and experts outside the project team.

Accordingly, Figure 5 shows how alternatives have been ranked concerning the KPIs. In four cases, KD was weighted as the preferred alternative, while this situation occurred three times for the AD scenario and two times for the AF scenario. Similar weights were given to the three alternatives in two cases. It is here clearly illustrated that each scenario has some indicators where it performs best, so, on one hand, the choice of indicators is central, because it adds weight to a scenario, and the final result is a sum of trade-offs between indicators for which the alternatives are better than the others.

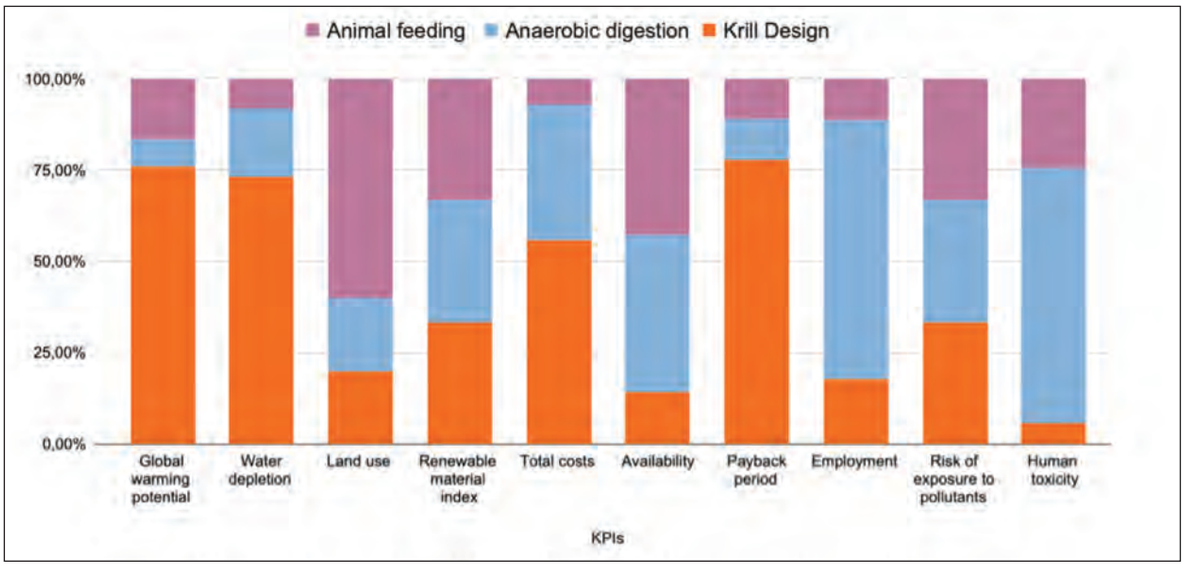

Figure 5. Weight allocation to alternatives with respect to sub-criteria.

Also, Figure 6 illustrates to which alternative sub-criteria give their weight, but in particular, it is ranked by order of global influence. For instance, the highest KPI, HT, was estimated by experts to be much more preferable in the AD scenario, hence giving a lot of weight to this technology. Conversely, KD performed seriously better under the GWP, which is the second louder sub-criteria. Even though AF has the best results regarding two indicators, their relative weights are so small that they have a really limited influence on the global result. These considerations thereby confirm why KD and AD scenarios have a close overall score, and why AF is significantly behind.

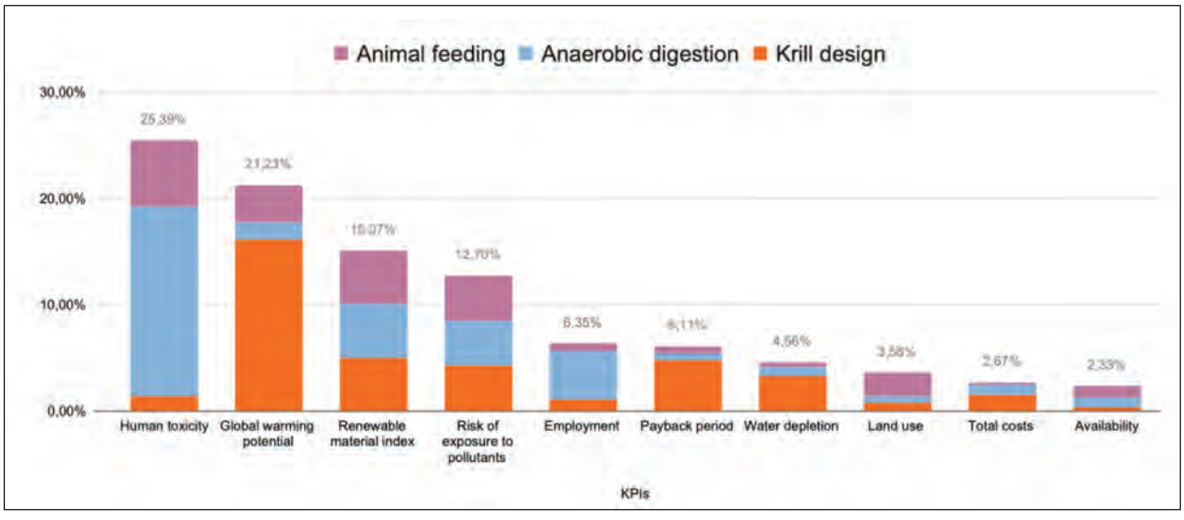

Figure 6. Relative weight allocation to alternatives with respect to sub-criteria.

Starting from these considerations, a chart can be derived to highlight the global effect of the criteria. The percentages illustrated in Figure 7 take into account attributed weights to criteria and sub-criteria weights. As a result, it appears that four indicators prevail as major contributors to the outcome (74%). They are HT (25,4%), GWP (21,2%), RMI (15,1%), and risk of exposure to pollutants (12,7%).

RMI has a strong influence because it directly represents the involvement of three alternatives in the circular economy, which constitutes a central aspect of the AGRITECH project.

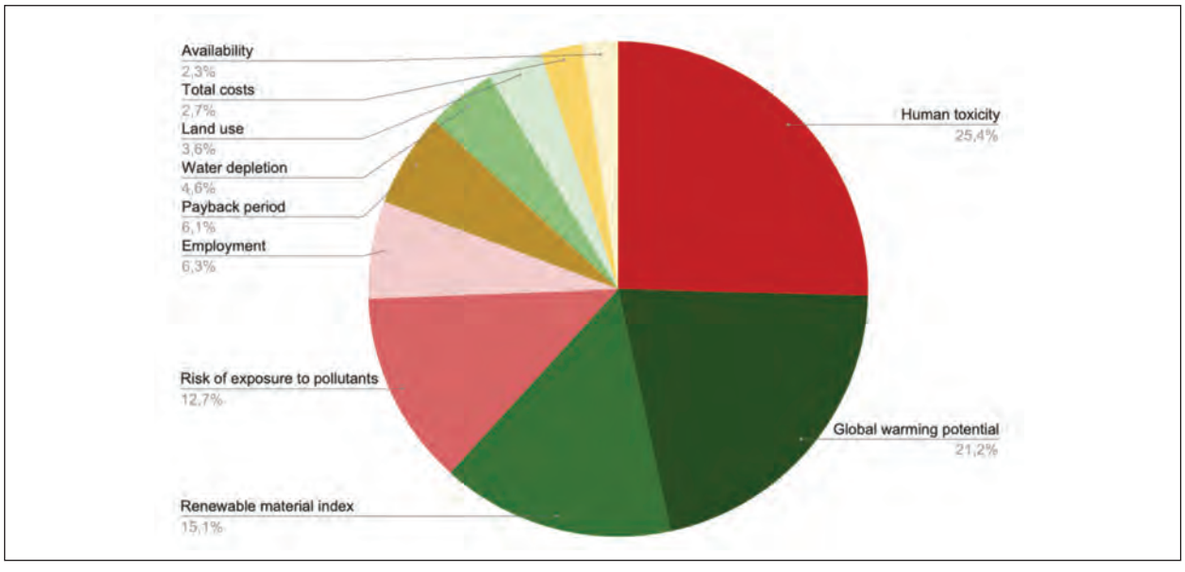

Figure 7. The overall contribution of KPIs.

None of these four main KPIs belong to the economic field, which does not contribute massively to the alternative assessment – e.g., the PBP sub-criteria only counts for 6% of the global weight, whereas it represents 55% of the economic cluster. The huge impact of the four above-mentioned indicators also implies considerations according to the uncertainties related to their measurement, which are likely to provoke different outcomes, acting like tipping points that cannot be ignored. The reliability of these KPIs is further discussed in the following data quality assessment section.

5.1.1 Data quality

The importance of the four most weighted sub-criteria leads to the need for further analysis of the data quality. The data gathered is the main tool the experts use to assign relative importance to the alternatives. As a result, if it is not adequate or representative, this lack of consistency will unavoidably affect the outcomes. It is therefore necessary to provide further discussion of the uncertainties faced during the data collection. A pedigree matrix is proposed, adapted from Ciroth et al. (2016), which proposes an approach to data uncertainty management, typically in LCA (Table 11).

Hence, reliability and representativeness are considered as the types of uncertainties affecting data, to discuss data quality according to their overall contribution. Starting from Ciroth et al. (2016), reliability is graded from 1 to 4, as follows:

- 1: verified data based on measurements or scientific literature;
- 2: verified data partly based on assumptions or non-verified data based on measurements or scientific literature;
- 3: non-verified data partly based on qualified estimates;
- 4: qualified estimates (e.g., by experts).

Also, representativeness is graded from 1 to 4, as follows:

- 1: representative data from the reference scenario or a scenario using exactly the same technology, metrics, inputs and outputs;

- 2: representative data from a scenario using the close technology, same metrics and close inputs and outputs;
- 3: representative data collected from a close technology, same metrics, vaguely similar inputs and outputs;
- 4: representative data not found, or in a vaguely close technology, or with different metrics, different inputs and outputs.

A mean was then calculated between reliability and representativeness, implicitly considering both types of uncertainty with the same importance.

Table 11. Pedigree matrix (adapted from Ciroth et al., 2016)

KPI	Reliability	Representativeness	Mean	Overall contribution
GWP	3	2	2.5	21%
LU	4	4	4	3.6%
RMI	1	1	1	15%
WD	4	4	4	4.6%
AVA	2	1	1.5	2.3%
PBP	3	1	2	6.1%
TC	3	1	2	2.7%
EMPL	2	3	2.5	6.3%
HT	3	3	3	25%
RISK	1	2	1.5	13%

Here it is possible to verify how the already mentioned four sub-criteria with above 10% of overall contribution have different situations in terms of pedigree matrix and uncertainty. On the one hand, RMI and RISK, presenting great influence on the outcomes, have an acceptable reliability and representativeness. On the other hand, GWP and HT obtained a mean of 2.5 and 3, respectively, for GWP and HT, which underlines a high level of uncertainty. Accordingly, out of the four mentioned indicators, the two with the greatest weight, accounting for almost 46% of the total, exhibited a significant amount of uncertainty. As a further example, LU and WD gathered really poor data quality because some data were not even found in the literature. However, they account respectively for 3.6% and 4.6%, which is not significant in comparison with other indicators.

Such additional analysis, conducted according to this preliminary application with the project team, allows us to verify the uncertainties to be reduced in the subsequent application, in particular highlighting the need for performing an LCA for the KD scenario including the PHB impacts, but also to reach representative data for all the indicators as much as possible based on measurements and primary data or scientific literature and secondary data.

Accordingly, these corrective actions are underway in the second and final application of the research. First of all, the researchers involved in step (ii) on LCA are proposing an updated study on the process, also considering the impacts of the PHB, which will be integrated in the AHP model. Furthermore, this pedigree matrix could be useful in precisely taking into account and focusing on the most critical indicators to be collected. Finally, to improve on this basis the comparability of

alternative scenarios, it will be proposed to deepen the collection of primary data, where possible, also for the anaerobic digestion and animal feeding processes.

6. Conclusions and further developments

This study investigates the potential of integrating Life Cycle Assessment with the Analytic Hierarchy Process for circular economy assessments in the agricultural waste framework. In particular, it proposes an application of the combined evaluation framework, for the assessment of three alternative technologies for processing orange peel waste (OPW). First, it derives from the literature a multi-dimensional assessment perspective combining LCA and MCDA. Second, it proposes a preliminary experiment of applying AHP, based on criteria derived from the literature and refined through experts' involvement. Through a case study evaluating technology alternatives for processing orange peel waste, KD technology emerges as the preferred alternative, closely followed by the AD scenario, with the AF alternative receiving the worst grade.

Based on the preliminary experimental application of this LCA-AHP framework, some lessons learned, and recommendations can be proposed.

First of all, in terms of stakeholder involvement, enhancing engagement with stakeholders to improve data collection is fundamental. On the one hand, it implies looking for the support of workers and citizens for social and qualitative indicators. On the other hand, it is also advised to address closer collaboration with industry partners, such as KD, to enhance data quality. Accordingly, incorporating diverse perspectives would ensure a more comprehensive assessment. In this sense, this preliminary study has implications for further real case studies' assessment, since it is noted that, particularly in Italy, methodologies and indicators to measure the actual circularity of companies' production processes or products are lacking (Circular Economy Network, 2024). In particular, indicators are often not adequately calibrated to the specific features of small enterprises – such as KD – and should be carefully reviewed through a context-based involvement of stakeholders, starting from preliminary studies such as this one.

Second, in terms of the selection of Key Performance Indicators, it is important to prioritize the KPIs that are frequently used and well-documented in the scientific literature. This ensures comparability between alternatives and facilitates a more robust assessment framework. Also, according to a circular economy perspective as the one adopted in this study, further refinements should be proposed, in terms of indicators accounting for a substantially lower resource and material consumption and less generation of waste (Potting et al., 2017), in line with SDG12, to "ensure sustainable consumption and production patterns" (United Nations General Assembly, 2015). In this sense, starting from innovative technologies such as KD, a broader reflection could be proposed in framing the research according to the 9Rs paradigm (Ellen MacArthur Foundation, 2013; Potting et al., 2017; Morseletto, 2020), with further KPIs related to smarter manufacturing and use of products, and extending the lifetime of products components, more than just recycling and recovering.

Finally, according to data quality improvement, it is necessary to refine data collection methods to address data quality concerns, first of all, by implementing LCAs tailored to the reference scenarios used in scientific literature, and by collecting as much as possible primary data - such as the already mentioned updated LCA which is ongoing by the research team in step (ii), also considering the impacts of the PHB, which will be integrated in the AHP model. Nevertheless, to deal with a potential asymmetry among primary and secondary data, an adaptation of the latter could be provided (e.g. modification of parameters such as the type of technology, process efficiency or operating conditions). Furthermore, a possibility is envisaged of benchmarking, to compare the results obtained from the real data with those obtained from the secondary data, to validate the consistency of the results. Also, if the asymmetry is still present, further uncertainty analyses could be provided in terms of statistical simulations. By ensuring data accuracy, the reliability of assessment outcomes will be more robust.

Moving forward, future assessments should consider these recommendations to ensure reliable results. By incorporating stakeholder perspectives, collaborating closely with industry partners, prioritizing relevant KPIs, and improving data quality, the results of an LCA-AHP application

methodology will be strong enough to derive more robust conclusions. Nevertheless, this study provides a preliminary experiment for broader evaluations and applications concerning circular technologies in agriculture.

Acknowledgements

This study was carried out within the "National Research Centre for Agricultural Technologies—AGRITECH" and received funding from the European Union Next-GenerationEU (PIANO NAZIONALE DI RIPRESA E RESILIENZA (PNRR)—MISSIONE 4 COMPONENTE 2, INVESTIMENTO 1.4—Avviso n. 3138 del 16/12/2021, Codice Programma CN00000022). This manuscript reflects only the authors' views and opinions, neither the European Union nor the European Commission can be considered responsible for them.

Authors' contribution

The work should be equally attributed to the authors.

Bibliography

Agritech (sito web): https://agritechcenter.it/

Amini S., Asoodar M.A. (2016). Selecting the most appropriate tractor using Analytic Hierarchy Process–an Iranian case study. *Information Processing in Agriculture*, 3(4), 223–234. https://doi.org/10.1016/j.inpa.2016.08.003

Assemblea Generale delle Nazioni Unite (2015) Transforming our world: The 2030 agenda for sustainable development. Available at: https://www.un.org/en/development/desa/population/migration/generalassembly/docs/globalcompact/A_RES_70_1_E.pdf

Bolaji I., Nejad B., Billham M., Mehta N., Smyth B., Cunningham E. (2021). Multi-criteria decision analysis of agri-food waste as a feedstock for biopolymer production. *Resources, Conservation and Recycling,* 172, 105671. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105671

Bartzas G., and Komnitsas K. (2020). An integrated multi-criteria analysis for assessing sustainability of agri- cultural production at regional level. *Information Processing in Agriculture*, 7, 223–232. https://doi.org/10.1016/j.inpa.2019.09.005

Circular Economy Network (2024). 6° Rapporto sull'Economia Circolare in Italia. Available at: https://circulareconomynetwork.it/wp-content/uploads/2024/05/CEN2024-Impagina-TOT-DEF.pdf

Ciroth A., Muller S., Weidema B., Lesage P. (2016). Empirically based uncertainty factors for the pedigree matrix in ecoinvent. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 21, 1338–1348. https://doi.org/10.1007/s11367-013-0670-5

Commissione Europea (2019). Communication from the Commission to the European Parliament, the European Council, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. The European Green Deal. Available at: https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:b828d165-1c22-11ea-8c1f-01aa75ed71a1.0002.02/DOC_1&format=%20PDF

Commissione Europea, NextGenerationEU (2020): https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/eu-budget/eu-borrower-investor-relations/nextgenerationeu_en

De Luca A.I., Iofrida N., Leskinen P., Stillitano T., Falcone G., Strano A., Gulisano G. (2017). Life cycle tools combined with multi-criteria and participatory methods for agricultural sustainability: Insights from a systematic and critical review. *Science of The Total Environment*, 595, 352–370. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.03.284

Ellen MacArthur Foundation (2013). Towards the circular economy Vol. 1: an economic and business rationale for an accelerated transition. Available at: https://content.ellenmacarthurfoundation.org/m/27265af68f11ef30/original/Towards-the-circular-economy-Vol-1.pdf?_gl=1*1sughrn*_gcl_au*OTg5MDA4ODYyLjE3NDQwNDMyMzM.*_ga*MTcyMzA5MzMuMTc0NDA0MzIwOQ..*_

ga_V32N675KJX*MTc0NDA0MzIwNi4xLjEuMTc0NDA0MzQ2MS41OS4wLjA.
Eriksson M., Spångberg J. (2017). Carbon footprint and energy use of food waste management options for fresh fruit and vegetables from supermarkets. *Waste Management*, 60, 786–799. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.01.008
FAO (2015). Climate change and food security: risks and responses. Available at: https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/a4fd8ac5-4582-4a66-91b0-55abf642a400/content
FAO (2022). Strategy on Climate Change 2022–2031. Available at: https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/f6270800-eec7-498f-9887-6d937c4f575a/content#:~:text=The%20new%20Strategy%20on%20Climate,youth%20and%20Indigenous%20Peoples%2C%20as
Figueira J., Greco S., Ehrgott M., Multiple Criteria Decision Analysis. State of the Art Survey, Springer, New York, 2005.
Fregonara E., Coscia C. (2019). Multi criteria analyses, life cycle approaches and delphi method: A methodological proposal to assess design scenarios. *Valori e Valutazioni*, 23, 107-117. https://siev.org/wp-content/uploads/2020/02/23_13-_-FREGONARA-COSCIA.pdf
Hafyan R.H., Bhullar L.K., Mahadzi, S., Bilad M.R., Nordi, N.A.H., Wirzal M.D.H., Putra Z.A., Rangaiah G.P., Abdullah B. (2020). Integrated Biorefinery of Empty Fruit Bunch from Palm Oil Industries to Produce Valuable Biochemicals. *Processes,* 8, 868. https://doi.org/10.3390/pr8070868
He X., Qiao Y., Liang L., Knudsen M.T., Martin F. (2018). Environmental life cycle assessment of long-term organic rice production in subtropical China. *Journal of Cleaner Production*, 176 (1), 880–888. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.045
Illankoon W.A.M.A.N., Milanese C., Karunarathna A.K., Liyanage K.D.H.E., Alahakoon A.M.Y.W., Rathnasiri P.G., Collivignarelli M.C., Sorlini S. (2023). Evaluating Sustainable Options for Valorization of Rice By-Products in Sri Lanka: An Approach for a Circular Business Model. *Agronomy,* 13, 22. https://doi.org/10.3390/agronomy13030803
Johannesdottir S., Kärrman E., Ljung E., Anderzén C., Edström M., Ahlgren S., Englund M. (2019). Reducing Emissions by Turning Nutrients and Carbon into Benefits, D.3.3, Stockholm Environment Institute. Available at: https://www.sei.org/wp-content/uploads/2022/03/report-from-the-multicriteria-analysis.pdf
Kanchanapiya P., Tantisattayakul T. (2023). Analysis of wastewater reuse options using a multicriteria decision tool for Phuket, Thailand. *Journal of Environmental Management*, 334, 117426. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.117426
Khanali M., Ghasemi-Mobtaker H., Varmazyar H., Mohammadkashi N., Cha, K., Nabavi-Pelesarae, A. (2022). Applying novel eco-exergoenvironmental toxicity index to select the best irrigation system of sunflower production. *Energy*, 250, 123822. https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.123822
Koch D., Paul M., Beisl S., Friedl A., Mihalyi B. (2020). Life cycle assessment of a lignin nanoparticle biorefinery: decision support for its process development. *Journal of Cleaner Production*, 245, 118760. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118760
Koskiaho J., Okruszko T., Piniewski M., Marcinkowski P., Tattari S., Johannesdottir S., Kärrman E., Kämäri, M. (2020). Carbon and nutrient recycling ecotechnologies in three Baltic Sea river basins – the effectiveness in nutrient load reduction. *Ecohydrology & Hydrobiology*, 20, 313–322. https://doi.org/10.1016/j.ecohyd.2020.06.001
Krill Design website: https://krilldesign.net
Li Y., Wang Y., Wang W., Fatehi P., Kozinski J., Kang K. (2023). Analytic hierarchy process-based life cycle assessment of the renewable energy production by orchard residual biomass-fueled direct-fired power generation system. *Journal of Cleaner Production*, 419, 138304. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138304
Lijó L., Frison N., Fatone F., González-García S., Feijoo G., Moreira M.T. (2018). Environmental and sustainability evaluation of livestock waste management practices in Cyprus. *Science of The Total Environment*, 634, 127–140.
Lombardi P., Todella E. (2023). Multi-Criteria Decision Analysis to Evaluate Sustainability and Circularity in Agricultural Waste Management. Sustainability 15, Number: 20 Publisher: Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 14878. https://doi.org/10.3390/su152014878
Morseletto P. (2020) Targets for a circular economy, *Resources, Conservation and Recycling*, 153, 104553.

https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104553
Nasution M.A., Wulandari A., Ahamed T., Noguchi R. (2020). Alternative POME Treatment Technology in the Implementation of Roundtable on Sustainable Palm Oil, Indonesian Sustainable Palm Oil (ISPO), and Malaysian Sustainable Palm Oil (MSPO) Standards Using LCA and AHP Methods. *Sustainability*, 12, 4101. https://doi.org/10.3390/su12104101
Negro V., Ruggeri B., Fino D., Tonini D. (2017). Life cycle assessment of orange peel waste management. *Resources, Conservation and Recycling*, 127, 148–158. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.08.014
Nikkhah A., Firouzi S., El Haj Assad M., Ghnimi S. (2019). Application of analytic hierarchy process to develop a weighting scheme for life cycle assessment of agricultural production. *Science of the Total Environment*, 665, 538–545. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.170
Ortiz-Sanchez M., Solarte-Toro J.C., Inocencio-García P.J., Cardona Alzate C.A. (2024). Sustainability analysis of orange peel biorefineries. Enzyme and Microbial Technology 172, 110327. https://doi.org/10.1016/j.enzmictec.2023.110327
Petrou E.C., Pappis C.P. (2014). Sustainability of Systems Producing Ethanol, Power, and Lignosulfonates or Lignin from Corn Stover: A Comparative Assessment. ACS Sustainable Chemistry & Engineering 2, 2527–2535. https://doi.org/10.1021/sc500421t
Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza: https://www.governo.it/sites/governo.it/files/PNRR.pdf
Potting J., Hekkert M., Worrell E., Hanemaaijer A. (2016). Circular Economy: Measuring innovation in product chains. PBL Netherlands Environmental Assessment Agency, The Hague. Available at: https://www.pbl.nl/uploads/default/downloads/pbl-2016-circular-economy-measuring-innovation-in-product-chains-2544.pdf
Pourjavad E., Shirouyehzad H., Shahin A. (2011). Analyzing RCM Indicators in Continuous Production Lines: A Case Study. *Journal of International Business Research*, 4 (4), 115. https://doi.org/10.5539/ibr.v4n4p115
Ritchie H. (2019, November 6). Food production is responsible for one-quarter of the world's greenhouse gas emissions. Our World in Data. https://ourworldindata.org/food-ghg-emissions
Reavis M., Ahlen J., Rudek J., Naithani,K. (2022). Evaluating Greenhouse Gas Emissions and Climate Mitigation Goals of the Global Food and Beverage Sector. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 5, 789499. https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.789499
Ritchie H., Roser M. (2024, February 16). Half of the world's habitable land is used for agriculture. Our World in Data. https://ourworldindata.org/global-land-for-agriculture#:~:text=In%20the%20visualization%2C%20we%20see,land%20is%20used%20for%20agriculture
Rivaluta ISTAT: https://rivaluta.istat.it/Rivaluta/;jsessionid=0498656ED1EA42676C7065DEB8ED2CAD
Superdecisions: https://www.superdecisions.com
Romero-Perdomo F.; Gonzalez-Curbelo M.A. (2023). Integrating Multi-Criteria Techniques in Life-Cycle Tools for the Circular Bioeconomy Transition of Agri-Food Waste Biomass: A Systematic Review. *Sustainability*, 15, 5026. https://doi.org/10.3390/su15065026
Saaty T.L. (1980). The Analytic Hierarchy Process, New York, McGraw Hill.
Saaty T.L. (1986). Axiomatic Foundation of the Analytic Hierarchy Process. *Management* Science, *32*(7), 841–855. http://www.jstor.org/stable/2631765
Salomone R., Saija G., Mondello G., Giannetto A., Fasulo S., Savastano D. (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. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.06.154
Tabatabaie S.M.H., Tahami H., Murthy G.S. (2018). A regional life cycle assessment and economic analysis of camelina biodiesel production in the Pacific Northwestern US. *Journal of Cleaner Production*, 172, 2389–2400. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.172
Tan J., Tan R.R., Aviso K.B., Promentilla M.A.B., Sulaiman N.M.N. (2017). Study of microalgae cultivation systems based on integrated analytic hierarchy process–life cycle optimization. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 19, 2075–2088. https://doi.org/10.1007/s10098-017-1390-5
Teh K.C., Tan R.R., Aviso K.B., Promentilla M.A.B., Tan J. (2019). An integrated analytic hierarchy process and life cycle assessment model for nanocrystalline cellulose production. *Food and Bioproducts Processing*, 118, 13–31. https://doi.org/10.1016/j.fbp.2019.08.003

Teigiserova D.A., Hamelin L., Tiruta-Barna L., Ahmadi A., And Thomsen M. (2022). Circular bioeconomy: Life cycle assessment of scaled-up cascading production from orange peel waste under current and future electricity mixes. *Science of The Total Environment*, 812, 152574. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152574

Torkayesh A.E., Rajaeifar M.A., Rostom M., Malmir B., Yazdani M., Suh S., Heidrich O. (2022). Integrating life cycle assessment and multi criteria decision making for sustainable waste management: Key issues and recommendations for future studies. *Renewable and Sustainable Energy Review*, 168, 112819. https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112819

Tran M.H., Lee B., Lee H., Brigljević B., Lee E.Y., And Lim H. (2022). Sustainable biopolyol production via solvothermal liquefaction silvergrass saccharification residue: Experimental, economic, and environmental approach. *Science of The Total Environment*, 847, 157668. https://doi.org /10.1016/j.scitotenv.2022.157668

Wang B., Song J., Ren J., Li K., Duan H., And Wang X. (2019). Selecting sustainable energy conversion technologies for agricultural residues: A fuzzy AHP-VIKOR based prioritization from life cycle perspective. *Resources, Conservation and Recycling*, 142, 78–87. https://doi.org/10.1016/ j.resconrec.2018.11.011

Yang M., Rosentrater K.A. (2019). Life cycle assessment and techno-economic analysis of pressure sensitive bio-adhesive production. *Energies*, 12 (23), 4502. https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113302

Appendix

Table A1. The KPIs identified in the literature review

Environmental KPIs		
KPIs	**Unit**	**Reference**
Global warming potential	kgCO2 eq	(Bartzas and Komnitsas, 2020; Lijó et al., 2018; Li et al., 2023; Teh et al., 2019; Hafyan et al., 2020; Wang et al., 2018; Tran et al., 2022; Tan et al., 2017; Nasution et al., 2020)
Eutrophication potential	kg PO4 eq	(Bartzas and Komnitsas, 2020; Lijó et al., 2018; Li et al., 2023; Nasution et al., 2020)
Energy footprint	KWh	(Tan et al., 2017)
Cumulative energy demand (CED)	MJ/kg	(Bartzas and Komnitsas, 2020)
Acidification potential	kg SO2 eq	(Bartzas and Komnitsas, 2020; Lijó et al. 2018; Li et al., 2023)
Ozone Depletion Potential	kg CFC-11 eq	(Tran et al., 2022)
Photochemical ozone formation	μg/m³	(Li et al., 2023)
Solid waste	Qualitative	(Li et al., 2023)
NOx mitigation	μg/m³ o g/kg	(Wang et al., 2018)
SO2 mitigation	μg/m³ o g/kg	(Wang et al., 2018)
Damage to ecosystem diversity	Qualitative	(Petrou and Pappis, 2014)
Fine particulate matter formation	kgPM2.5-eq.	(Tran et al., 2022)
Human toxicity (HT)	Comparative Toxic Unit for Human Health	(Li et al., 2023; Teh et al., 2019; Petrou and Pappis, 2014; Nasution et al., 2020)
Water depletion	m3	(Li et al., 2023; Petrou and Pappis, 2014; Nasution et al., 2020)
Implementation of green chemistry	Non specificatoNot specified	(Petrou and Pappis, 2014)
COD discharge	mg oxygen / L water	(Wang et al., 2018)
Economic KPIs		
KPIs	**Unit**	**Reference**
Capital expenditure (CAPEX)	Euro	(Lijó et al. 2018; Hafyan et al., 2020; Tran et al. 2022)
Operational expenditure (OPEX)	Euro	(Lijó et al., 2018; Hafyan et al., 2020; Tran et al. 2022)
Revenue from recovered energy	Euro/kWh	(Lijó et al., 2018)
Revenue from bioproducts	Euro/quantity of bioproduct	(Lijó et al., 2018)
Gross margin	%	(Bartzas e Komnitsas, 2020)

Fallow **Table A1.** The KPIs identified in the literature review

Economic KPIs		
KPIs	**Unit**	**Reference**
Expected cash flow over 30 years	Euro	(Patrou and Pappis, 2014)
Market maturity / Marketability	Qualitative	(Petrou and Pappis, 2014)
Return on investment	%	(Wang et al., 2018)
Net present value	Euro	(Wang et al., 2018)
Payback period (PBP)	Anno	(Wang et al., 2018)
Unit cost	Euro	(Wang et al., 2018)
Internal rate of return (IRR)	%	(Petrou and Pappis, 2014)
Social KPIs		
KPIs	**Unit**	**Reference**
Visual impact	Qualitative	(Lijó et al., 2018)
Employment	Nr. of jobs	(Lijó et al., 2018; Wang et al., 2018; Petrou and Pappis, 2014)
Odor exposure	Qualitative	(Lijó et al., 2018)
Risk perception	Qualitative	(Lijó et al., 2018)
Acceptance	Qualitative	(Wang et al., 2018)
Age of worker	Qualitative	(Bartzas and Komnitsas, 2020)
Educational level	Qualitative	(Bartzas and Komnitsas, 2020)
Policy adaptability	Qualitative	(Wang et al., 2018)
Stakeholders support	Nr. of training / seminar followed by the farmers	(Bartzas and Komnitsas, 2020)
Participation in association	Years of involvement	(Bartzas and Komnitsas, 2020)
Technical KPIs		
KPIs	**Unit**	**Reference**
Technology maturity	Qualitative	(Teh et al., 2019; Wang et al., 2018; Petrou and Pappis, 2014)
Complexity	Qualitative	(Teh et al., 2019)
Productivity/yield	kg of final product / kg of input	(Bartzas and Komnitsas, 2020; Teh et al., 2019)
Energy efficiency	Not specified	(Wang et al., 2018)

Fallow **Table A1.** The KPIs identified in the literature review

Technical KPIs		
KPIs	**Unit**	**Reference**
Energy grade	%	(Wang et al., 2018)
Development potential	Qualitative	(Wang et al., 2018)
Safety KPIs		
KPIs	**Unit**	**Reference**
Fire explosion damage index	Qualitative	(Hafyan et al., 2020)
Toxicity damage index	Qualitative	(Hafyan et al., 2020)

Table A2. I KPI aggiuntivi selezionati

Environmental KPIs		
KPIs	**Unit**	**Reference**
Primary energy use (PEU)	MJ	(Eriksson and Spångberg, 2017)
Electricity consumption	MWh or kWh	(Kanchanapiya and Tantisattayakul, 2023)
Net Energy Recovery	Ratio	(Bolaji et al., 2021)
Air pollution	Not specified	(Illankoon et al., 2023)
Land use	PDF · m2 · year or Kg Cdeficit	(Teigiserova et al., 2022)
Technical flexibility	Qualitative	(Koskiaho et al., 2020)
Technical robustness	Qualitative	(Koskiaho et al., 2020)
Renewable material index (RMI)	kg renewables / kg inputs	(Ortiz-Sanchez et al., 2024)
Economic KPIs		
KPIs	**Unit**	**Reference**
Turnover ratio (TR)	Ratio	(Ortiz-Sanchez et al., 2024)
Total cost	Euro	(Bolaji et al., 2021)
Availability	Qualitative	(Bolaji et al., 2021)
Impacts on local economy	Qualitative	(Koskiaho et al., 2020)
Social KPIs		
KPIs	**Unit**	**Reference**
Acceptance	Qualitative	(Wang et al. 2018)
Usability		(Illankoon et al., 2023)
Flexibility	Qualitative	(Illankoon et al., 2023)
Risk of exposure to pollutants	Qualitative	(Koskiaho et al., 2020, based on Johannesdottir et al., 2019)
Minimum to living wage ratio	Ratio	(Ortiz-Sanchez et al., 2024)

valori
e valutazioni
teorie ed esperienze

Società Italiana di Estimo e Valutazione

Combinare la Valutazione del Ciclo di Vita e l'Analisi Decisionale Multicriteriale per valutare alternative di gestione di scarti agricoli

Patrizia Lombardi[1], Elena Todella[1,*], Timothée D'Amico[2], Giovanni Zanderigo[3]

[1] Dipartimento Interateneo di Scienze, Progetto e Politiche del Territorio (DIST), Politecnico di Torino, Italia; patrizia.lombardi@polito.it, elena.todella@polito.it
[2] Section of Environmental Sciences and Engineering, EPFL Lausanne, Svizzera; timothee.damico@gmail.com
[3] Krill Design, Italia; giovanni.zanderigo@krilldesign.net
* autore corrispondente

Parole chiave

Life Cycle Assessment, Multi-Criteria Decision Analysis, Analytic Hierarchy Process, scarti di buccia d'arancia

Abstract

La produzione alimentare è una delle principali responsabili delle emissioni di gas serra e dei danni ambientali. Sono necessarie azioni urgenti per ridurre i rischi climatici e i Paesi sono attualmente impegnati a ridurre le emissioni nel settore agricolo. Le metodologie legate al *Life Cycle Thinking* (LCT) sono ampiamente utilizzate, concentrandosi principalmente sugli aspetti ambientali. Tuttavia, di recente è emerso un interesse orientato verso ulteriori aspetti legati alla sostenibilità agricola, sia economici che sociali. In questo contesto, il presente lavoro propone l'applicazione di un quadro di valutazione combinato, basato sull'integrazione della Valutazione del Ciclo di Vita (LCA) con le Analisi Decisionali Multicriteriali (MCDA) e, in particolare, l'*Analytic Hierarchy Process* (AHP) per valutare tre tecnologie alternative per il trattamento di scarti di buccia d'arancia. Il presente lavoro rappresenta un'applicazione sperimentale preliminare del quadro proposto, esplorando l'utilità di supportare il processo decisionale nel settore agricolo attraverso una prospettiva olistica e la considerazione di diversi criteri di valutazione relativi a molteplici – e potenzialmente in conflitto – obiettivi, interessi e attori, come proposto dalle MCDA. La valutazione di opzioni alternative di valorizzazione è fondamentale per proporre politiche e pratiche efficaci, con l'obiettivo di proporre una prospettiva multidimensionale sulla gestione degli scarti agricoli, che includa le dimensioni ambientale, economica e sociale.

1. Introduzione

La produzione alimentare è uno dei principali fattori che contribuiscono alle emissioni di gas serra e ai danni ambientali, rappresentando un quarto dei gas serra del mondo (Ritchey, 2019; Reavis et al., 2022) e metà della terra coltivabile (Ritchey e Roser, 2024). Inoltre, la variabilità climatica e l'aumento della frequenza e dell'intensità dei fenomeni meteorologici estremi, imputabili al riscaldamento globale, rappresentano una sfida crescente al tema della sicurezza alimentare. Una tale dinamica, con le conseguenze interconnesse della perdita di biodiversità, ha effetti sia immediati che

a lungo termine sui sistemi agroalimentari (FAO, 2022), in quanto impatta in modo iniquo sui gruppi sociali più vulnerabili e mette a dura prova le risorse terrestri e idriche, nonché i fragili sistemi agroalimentari e gli ecosistemi (FAO, 2015). Sono quindi necessarie azioni urgenti per ridurre i rischi climatici e i Paesi di tutto il mondo si sono impegnati a ridurre le emissioni correlate, il che richiederà inevitabilmente un'azione nel settore agricolo.

In questo contesto, e in linea con il Green Deal europeo (Commissione Europea, 2019), che mira a combattere il degrado ambientale e il cambiamento climatico, il Centro Nazionale di Ricerca per le Tecnologie Agricole (agritechcenter.it) - di cui AGRITECH è l'acronimo - propone un programma di ricerca integrato, su larga scala e multidisciplinare nel contesto del progetto Next Generation EU (Commissione Europea, 2020), lo strumento di ripresa temporanea dell'UE, istituito in risposta alla crisi pandemica, ovvero il Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (2021).

AGRITECH mira ad affrontare le varie sfide legate all'agricoltura sostenibile in Italia attraverso un approccio multidisciplinare comprensivo. La sua istituzione è stata guidata dall'obiettivo di integrare conoscenze scientifiche all'avanguardia per migliorare la competitività e la sostenibilità del settore agroalimentare italiano. Cerca di utilizzare le tecnologie abilitanti per aumentare la produttività e la sostenibilità, promuovendo al contempo la transizione ecologica e digitale. AGRITECH coinvolge 47 partner pubblici e privati, con l'obiettivo di "affrontare adeguatamente, in un contesto realmente multidisciplinare, i molteplici problemi associati all'agricoltura sostenibile". Nel farlo, i partner di AGRITECH conducono ricerche sulle tecnologie circolari in agricoltura, per innovare le catene di approvvigionamento agroalimentari. Questa ricerca si riferisce allo Spoke 8, su "Nuovi modelli di economia circolare in agricoltura attraverso la valorizzazione e il riciclo degli scarti", in cui i partner sperimentano la trasformazione dei rifiuti organici per ottenere prodotti di alto valore, promuovere la produzione di agroenergia sostenibile attraverso la valorizzazione dei rifiuti e produrre biofertilizzanti. L'analisi del ruolo degli approcci di Analisi Decisionale Multicriteriale (MCDA) nel supportare la gestione dei rifiuti agricoli è già stata oggetto di un contributo teorico (Lombardi e Todella, 2023). La revisione della letteratura ha identificato L'*Analytic Hierarcy Process* (AHP) come l'MCDA più utilizzato nel settore per valutare e dare priorità alle tecnologie alternative in agricoltura, integrato con la Valutazione del Ciclo di Vita (LCA) come la combinazione più frequente. Partendo dalle premesse teoriche e dai risultati del lavoro precedente, questo articolo propone un avanzamento metodologico basato sul contributo degli approcci del Ciclo di Vita (LC) - in particolare della LCA - per supportarli.

In particolare, questo articolo propone l'applicazione di un quadro di valutazione combinato, basato sull'integrazione della LCA con l'AHP, per valutare tre tecnologie alternative per il trattamento dei rifiuti di buccia d'arancia. Lo scopo della nostra ricerca in AGRITECH è quello di proporre una prospettiva multidimensionale sulla gestione dei rifiuti agricoli, che includa le dimensioni ambientale, economica e sociale. In questo modo, la nostra ricerca fa parte di un quadro di valutazione della sostenibilità in tre fasi, che comprende i seguenti metodi: (i) Diagnosi Olistica; (ii) Valutazione del Ciclo di Vita; e (iii) Analisi Decisionale Multicriteriale.

Questo articolo si concentra sulla fase (iii) - e sulla sua relazione con la fase (ii) - e rappresenta un'applicazione sperimentale preliminare del quadro proposto.

In primo luogo, deriva dalla letteratura una prospettiva di valutazione multidimensionale che combina LCA e MCDA. Infatti, le MCDA sono una tecnica particolarmente efficace per affrontare queste sfide, soprattutto se utilizzate in combinazione con gli strumenti LC (De Luca et al., 2017; Torkayesh et al., 2022; Romero-Perdomo, 2023). Di conseguenza, questo articolo evidenzia le caratteristiche dell'integrazione di LCA e MCDA in una multimetodologia.

In secondo luogo, propone un esperimento preliminare di applicazione dell'AHP, basato su criteri derivati dalla letteratura - in una prospettiva multidimensionale sulla gestione dei rifiuti agricoli, comprese le dimensioni ambientale, economica e sociale - e perfezionato attraverso il coinvolgimento di esperti. Il campo di applicazione prevede la valutazione di tre tecnologie alternative per il trattamento di scarti di buccia d'arancia (OPW).

Dopo questa introduzione, il documento è organizzato come segue. La sezione 2 presenta il disegno della ricerca, con una prima fase di revisione della letteratura e una seconda fase di applicazione. Poi, la sezione 3 presenta la revisione della letteratura sulla combinazione di LCA e AHP nel settore, e la sezione 4 racconta l'applicazione dell'AHP. Infine, la sezione 5 discute i risultati e propone le conclusioni.

2. Disegno della ricerca

La ricerca è stata sviluppata in due fasi: i) la fase 1, relativa alla revisione della letteratura sulla combinazione di LCA e AHP, con l'identificazione degli indicatori chiave di prestazione (KPI) rilevanti; ii) la fase 2, relativa al perfezionamento di tali KPI attraverso il coinvolgimento di esperti e l'effettiva applicazione dell'AHP.

La Fase 1 propone un'indagine sulla combinazione di LCA e AHP nel contesto dei rifiuti agricoli. I risultati della revisione della letteratura vengono poi utilizzati per definire la combinazione di metodologie, la struttura AHP più ricorrente e gli indicatori (i KPI sopra citati) da utilizzare nell'applicazione.

La fase 2 riguarda il perfezionamento dei KPI attraverso il coinvolgimento di esperti, sulla base di un sondaggio, e l'applicazione dell'AHP per identificare la migliore alternativa tecnologica. Il caso di studio prevede la valutazione di tre alternative tecnologiche per il riciclo di scarti di buccia d'arancia. La prima alternativa è stata studiata e proposta da uno dei partner del progetto AGRITECH, in collaborazione con una piccola azienda, Krill Design (KD), che ricicla gli scarti di buccia d'arancia per creare articoli di uso quotidiano. Le due alternative tecnologiche aggiuntive sono state selezionate dalla letteratura scientifica per garantire un confronto coerente, in particolare sono state identificate come la digestione anaerobica e un processo di alimentazione animale.

Nei prossimi paragrafi viene fornita una descrizione sintetica di entrambi i metodi LCA e AHP.

2.1. Valutazione del Ciclo di Vita

La LCA è una metodologia standardizzata e completa per valutare gli impatti ambientali dei sistemi di produzione lungo il loro ciclo di vita (Salomone et al., 2017; Khanali et al., 2022), per un prodotto o un processo (Yang e Rosentrater, 2019; Koch et al., 2020; Tran et al., 2022). Fornisce un'analisi e una valutazione approfondita dell'intero sistema, dalla produzione allo smaltimento (Li et al., 2023), in termini di diverse categorie - ad esempio, il riscaldamento globale. La LCA è stata applicata in diversi contesti e settori produttivi, tra cui l'agricoltura (He et al., 2018; Nikkhah et al., 2019).

La procedura prevede diverse fasi di definizione degli obiettivi, analisi dell'inventario, valutazione dell'impatto e interpretazione (Tabatabaie et al., 2018; Nikkhah et al., 2019). La LCA deve definire i confini del sistema, identificare le fasi del ciclo di vita e i processi unitari, e quantificare gli input e gli output come energia, materiali, emissioni e rifiuti.

Esistono diversi metodi per ponderare le categorie di impatto considerate nella LCA, tuttavia le MCDA non sono ancora state studiate a fondo per ponderare e dare priorità alle categorie di impatto nel settore agricolo (Nikkhah et al., 2019). Poiché le MCDA sono note come avanzati ed efficaci per questo tipo di confronto e analisi (Pourjavad et al., 2011), tale indagine dovrebbe essere ulteriormente approfondita.

2.2. Analytic Hierarchy Process

L'AHP è un metodo multi-criteriale per determinare il miglior scenario alternativo considerando diverse pesature basati su un confronto a coppie (Saaty, 1980, 1986; Figueira et al., 2005). È una delle MCDA più comuni e diffuse (Amini e Asoodar, 2016; Nikkaha et al., 2019). Fornisce una gerarchia dei problemi rappresentati e scomposti in diversi livelli, in termini di obiettivo principale, criteri e sottocriteri che rappresentano diversi aspetti della valutazione, e un insieme di alternative e opzioni (Fregonara e Coscia, 2019).

La procedura prevede diverse fasi: riconoscere il problema, creare la gerarchia decisionale, condurre un confronto a coppie, raccogliere le classifiche e le priorità finali e prendere una decisione (Tran et al., 2022).

Una volta definita la gerarchia del problema, ogni elemento della struttura viene confrontato a coppie per determinare la sua importanza relativa. Questi confronti sono quantificati utilizzando una scala numerica che va da 1 a 9 (Saaty, 1980). La scala si basa su giudizi soggettivi, idealmente da parte di esperti nel campo della valutazione, sulla base dei dati raccolti. Di conseguenza, l'AHP fornisce

un modo completo per sintetizzare le valutazioni in una priorità o classifica finale, facilitando un processo decisionale più informato e coerente.

3. Revisione della letteratura sulle combinazioni LCA-AHP

Come accennato, le MCDA sono tecniche particolarmente efficaci per le sfide di supporto alle decisioni, soprattutto se utilizzate in combinazione con gli strumenti LC (De Luca et al., 2017; Torkayesh et al., 2022). Le prime applicazioni di questo quadro combinato sono emerse già circa tre decenni fa (Romero-Perdomo, 2023), di solito realizzate integrando la LCA nella MCDA - dove la LCA fornisce indicatori per il processo MCDA - o al contrario - dove le interpretazioni e i risultati della MCDA sono inclusi nella prospettiva della LCA (De Luca et al., 2017).

È stata eseguita una revisione della letteratura (Fase 1) riguardante le combinazioni LCA-AHP nella gestione dei rifiuti agricoli e il processo sviluppato è riassunto nella Figura 1.

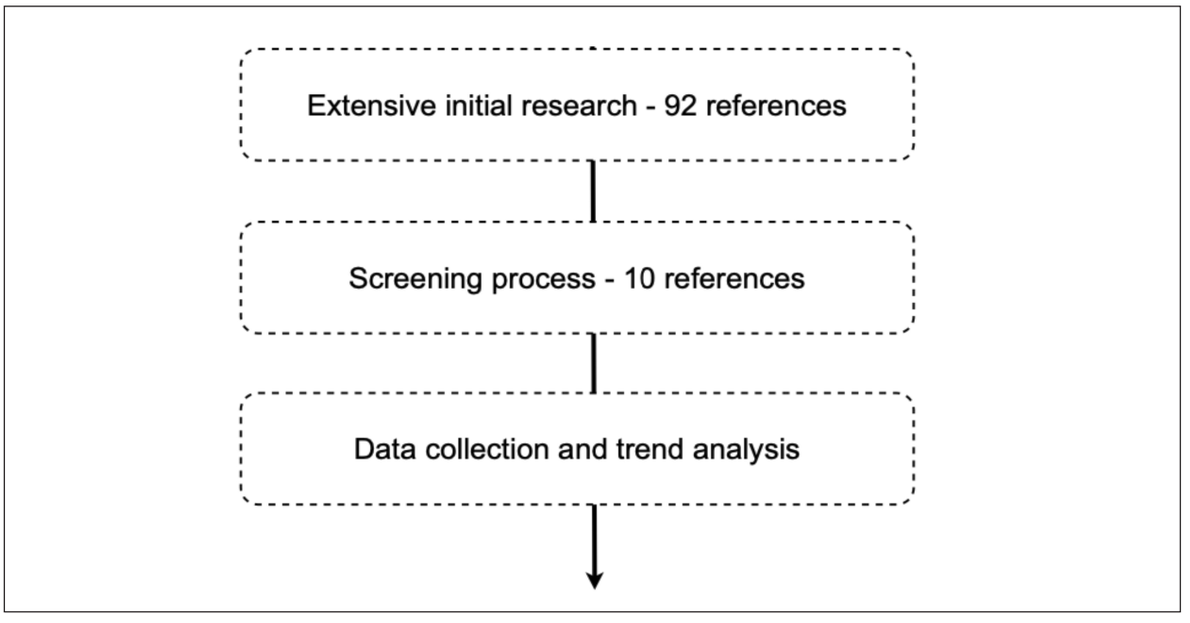

Figura 1. Il processo di revisione della letteratura.

Per supportare la ricerca della letteratura è stato adottato il database Scopus - integrato con il supporto del catalogo BEAST (Books, Ebooks, and Articles Search Tool), non open access, ma disponibile presso l'EPFL di Losanna, grazie al terzo autore di questo articolo. Anche se BEAST non è ad accesso libero, in qualche modo completa i risultati di Scopus, che ha fornito la grande maggioranza dei documenti raccolti.

La ricerca di documenti relativi alla combinazione di LCA e AHP nella gestione dei rifiuti agricoli è stata condotta attraverso una metodologia iterativa che consiste in screening successivi.

In primo luogo, i database sono stati interrogati cercando nelle sezioni di titoli, abstract e parole chiave queste parole chiave: ahp OR (analytic AND hierarchy AND process) AND lca OR (life AND cycle AND assessment) AND (agriculture OR agricultural OR waste). Un primo criterio di esclusione è stato applicato ai documenti che non proponevano esplicitamente una combinazione LCA-AHP. Alla fine di questa ricerca, sono stati raccolti 92 riferimenti: 64 da Scopus e 22 da BEAST.

In secondo luogo, i dati sono stati ordinati in base alla domanda di ricerca, archiviando i documenti costituiti da articoli scientifici o libri relativi alla gestione dei rifiuti nel settore agricolo. Infatti, la maggior parte degli articoli derivati dall'ampia ricerca iniziale erano relativi ad altri tipi di rifiuti, ad esempio i rifiuti urbani. La selezione è stata condotta leggendo gli abstract e leggendo i documenti. A seguito di questo processo di screening, sono stati infine selezionati 10 articoli che costituiscono la base della revisione della letteratura (Petrou e Pappis, 2014; Tan et al., 2017; Lijó et al., 2018; Wang et

al., 2019; Teh et al., 2019; Bartzas e Komnitsas, 2020; Hafyan et al., 2020; Nasution et al., 2020; Tran et al., 2022; Li et al., 2023).

In terzo luogo, gli articoli identificati sono stati analizzati in base a tre tipi di informazioni: (i) le multimetodologie LCA-AHP, concentrandosi sull'unità funzionale nella LCA e sul tipo di interazione LCA-AHP; (ii) i KPI più comunemente utilizzati; e (iii) le applicazioni, esplorando il tipo di coinvolgimento degli stakeholder nell'AHP.

3.1. Le multimetodologie LCA-AHP

Secondo le LCA condotte negli studi, le unità funzionali sono molto diverse, ma per lo più espresse in peso. Inoltre, esprimono la quantità di rifiuti trattati (Nasution et al., 2020; Lijó et al., 2018), ma soprattutto per la produzione di un prodotto come energia (Li et al., 2023; Wang et al., 2019), o materiale (Petrou e Pappis, 2014; Teh et al., 2019; Tran et al., 2022).

I diversi tipi di interazione LCA-AHP possono essere classificati secondo De Luca et al. (2017), dove LCA>AHP indica un'interazione in cui l'AHP viene utilizzato per migliorare un risultato LCA, mentre LCA<AHP rappresenta studi in cui un LCA è stato impiegato per fornire un'applicazione AHP, rafforzando la struttura di quest'ultima. In questa revisione della letteratura, è stata evidenziata una chiara dominanza dell'interazione LCA<AHP, con l'80% di utilizzo (Tran et al., 2022; Hafyan et al., 2020; Bartzas e Komnitsas, 2020; Teh et al., 2019; Lijó et al., 2018; Wang et al., 2019; Tan et al., 2017; Petrou e Pappis, 2014). Invece, LCA>AHP rappresenta il 20% degli studi (Nasution et al., 2020; Li et al., 2023).

3.2. I KPI più utilizzati

Il numero di criteri impiegati nell'applicazione dell'AHP varia da uno a cinque, anche se il numero più comunemente adottato è tre. Sono stati identificati distintamente cinque criteri: ambientale, economico, sociale, tecnologico e di sicurezza. Sebbene le loro definizioni varino da studio a studio, si possono proporre delle brevi descrizioni:

- il criterio «ambientale» ruota attorno alla minimizzazione dell'impatto ecologico delle attività. Ciò include considerazioni sulle emissioni, sull'utilizzo delle risorse, sulla conservazione della biodiversità e sulla garanzia di pratiche allineate ai principi di sostenibilità (Petrou e Pappis, 2014; Tan et al., 2017; Lijó et al., 2018; Wang et al., 2019; Teh et al., 2019; Bartzas e Komnitsas, 2020; Hafyan et al., 2020; Nasution et al., 2020; Tran et al., 2022; Li et al., 2023);
- il criterio «economico» mira a coprire la fattibilità finanziaria e l'efficienza dei costi delle alternative. Ciò comporta l'analisi dei costi totali, dei costi unitari e della disponibilità di input degli scenari di recupero dei rifiuti, evidenziando così le pratiche sostenibili e la loro resilienza economica (Petrou e Pappis, 2014; Lijó et al., 2018; Wang et al., 2019; Teh et al., 2019; Bartzas e Komnitsas, 2020; Hafyan et al., 2020; Tran et al., 2022);
- il criterio «sociale» si riferisce alla dimensione umana della gestione dei rifiuti agricoli, considerando la salute della comunità, la sicurezza e la creazione di posti di lavoro. Valuta anche fattori come l'impegno della comunità, il sostegno e l'impatto complessivo sulle persone coinvolte (Petrou e Pappis, 2014; Lijó et al., 2018; Wang et al., 2019; Bartzas e Komnitsas, 2020);
- il criterio «tecnico» si concentra sullo sfruttamento di strumenti e metodologie per migliorare le pratiche di gestione dei rifiuti. La tecnologia gioca un ruolo fondamentale nell'ottimizzazione dell'efficienza, nella riduzione dei rifiuti e nella mitigazione dell'impatto ambientale (Petrou e Pappis, 2014; Wang et al., 2019; Teh et al., 2019);
- il criterio «sicurezza» considera gli aspetti più importanti nelle attività di gestione dei rifiuti, dando priorità alla protezione dei lavoratori, delle comunità e degli ecosistemi dai potenziali pericoli. Una rigorosa valutazione dei rischi e strategie di mitigazione affrontano l'esposizione a sostanze nocive, garantendo un ambiente di lavoro sicuro (Hafyan et al., 2020).

Il criterio ambientale compare in tutti gli studi, il che lo rende il più utilizzato. La frequenza di apparizione pone quello economico al secondo posto (70% degli studi), seguito dai criteri sociali (40%), tecnici (30%) e di sicurezza (10%). Questi risultati sottolineano l'importanza delle considerazioni ambientali in un quadro di rifiuti e di economia circolare. Tuttavia, anche l'aspetto economico è molto frequente, mostrando una reale preoccupazione per la fattibilità economica delle alternative studiate.

Di conseguenza, sono stati identificati 52 KPI, organizzati nei cinque campi descritti in precedenza. La Tabella A1 nell'Appendice ne fornisce una panoramica.

3.3. Le applicazioni

La valutazione multidimensionale e multicriteriale in genere coinvolge molte parti interessate da diverse prospettive. Se permette di raccogliere approcci e conoscenze diversificati, rappresenta anche una sfida per coinvolgerli nell'applicazione della valutazione. In un processo AHP, la partecipazione di esperti è altamente raccomandata, quindi rappresenta un passo verso la partecipazione degli stakeholder. Di conseguenza, i risultati della revisione della letteratura mostrano un'alta percentuale di studi (80%) in cui alcuni attori sono stati esplicitamente coinvolti (Petrou e Pappis, 2014; Lijó et al., 2018; Wang et al., 2019; Teh et al., 2019; Bartzas e Komnitsas, 2020; Hafyan et al., 2020; Nasution et al., 2020; Li et al., 2023). In questi casi, si è sempre registrata una partecipazione durante la fase di ponderazione dei criteri, il che si spiega con la struttura stessa dell'AHP, che richiede la partecipazione di esperti o decisori. Tuttavia, solo un numero limitato di casi ha riportato il coinvolgimento delle parti interessate in un'altra fase della valutazione (Petrou e Pappis, 2014; Lijó et al., 2018; Bartzas e Komnitsas, 2020). Precisamente, questi studi hanno menzionato la partecipazione degli stakeholder per completare la raccolta dei dati. Questo supporto è stato ottenuto principalmente da sondaggi somministrati agli agricoltori e/o ai cittadini locali, e poi le persone dell'ambito hanno fornito informazioni di alta qualità.

4. Applicazione

Come accennato, questa sezione illustra un'applicazione sperimentale preliminare del quadro di valutazione combinato di LCA e AHP, partendo dai risultati evidenziati nella sezione precedente. I risultati della revisione della letteratura hanno sottolineato le tendenze nella valutazione delle alternative di gestione dei rifiuti agricoli attraverso una struttura LCA-AHP. L'LCA è stato principalmente utilizzato come fornitore di dati ambientali per un'applicazione AHP, rafforzando i risultati di quest'ultima. Per questo motivo, la LCA<AHP è il tipo di interazione che è stata condotta nell'applicazione. I risultati relativi ai criteri hanno evidenziato anche i tre criteri come struttura più comune. Questa constatazione, unita all'occorrenza dei criteri, ha portato a optare per tre criteri, ossia ambientale, economico e sociale. Inoltre, l'elenco di KPI risultante dalla revisione della letteratura è servito come punto di partenza per sceglierne alcuni rilevanti per l'applicazione dell'AHP al caso di studio.

4.1. Caso studio

Il caso di studio di questo lavoro comprende un'applicazione LCA-AHP per valutare tre alternative tecnologiche per il trattamento dei rifiuti di buccia d'arancia in Italia. Lo studio riguarda il trattamento degli scarti di buccia d'arancia, aggiungendo valore a questi rifiuti come materiale iniziale per una nuova catena di approvvigionamento. Dando una seconda vita a questo prodotto, si generano alcuni benefici, migliorando il suo contributo a un approccio di economia circolare. Poiché in questo lavoro viene esplorata una valutazione delle tecnologie, la fase di crescita delle arance non viene presa in considerazione.

L'azienda Krill Design (KD) è stata scelta come azienda di riferimento e come prima alternativa alla struttura LCA-AHP, come caso di studio analizzato dai colleghi del progetto AGRITECH - da cui è stata ricavata la maggior parte delle informazioni sul caso. L'azienda tratta lo scarto di buccia d'arancia essiccato macinandolo e mescolandolo con un composto organico per ottenere un mate-

riale stampabile in 3D. Dalla letteratura scientifica (Negro et al., 2017) sono state selezionate due ulteriori alternative da confrontare con la tecnologia KD, ossia la digestione anaerobica (AD) e l'alimentazione animale (AF). Da un lato, l'alternativa AD converte scarti di buccia d'arancia in biogas per la generazione di elettricità. Sebbene questo processo fornisca energia rinnovabile, può comunque contribuire alle emissioni di gas serra a causa delle perdite di metano fuggitivo e del rilascio di CO biogenica, deviando così parzialmente da un ciclo del carbonio completamente circolare. Inoltre, questo scenario è energeticamente autosufficiente e produce sottoprodotti come il limonene e il digestato, di cui quest'ultimo può essere utilizzato come fertilizzante sul terreno, contabilizzando la cattura e lo stoccaggio del carbonio per il carbonio residuo non degradato. D'altra parte, l'alternativa AF trasforma scarti di buccia d'arancia in pellet per l'alimentazione degli animali. Lo scopo della scelta di questi due scenari è stato quello di avere alternative che rappresentassero tecnologie comuni, probabilmente riscontrabili in altri studi durante la fase di raccolta dei dati. Inoltre, sebbene l'articolo sia un po' datato (2017), si allinea perfettamente al contesto italiano e tratta esclusivamente scarti di buccia d'arancia.

L'utilizzo di dati primari per il processo Krill Design e di dati secondari per gli altri due processi è stato dettato dalla disponibilità dei dati. Tuttavia, essendo l'obiettivo principale di questa applicazione una verifica dell'integrazione metodologica tra LCA e AHP, è stato possibile procedere e sperimentare con il team di ricerca, tenendo conto dell'asimmetria tra dati primari e secondari. Di conseguenza, sono state selezionate queste tre alternative per questa applicazione sperimentale preliminare del quadro LCA-AHP.

4.1.1 Krill Design

KD è una piccola azienda che utilizza i rifiuti agricoli per produrre oggetti di uso quotidiano (https://krilldesign.net). Sebbene lavori anche con bucce di limone e fondi di caffè, in questo studio vengono presi in considerazione solo gli scarti di buccia d'arancia, analizzati attraverso dati primari. La loro catena di lavorazione inizia con l'acquisto di fiocchi d'arancia essiccati dalla Sicilia. Le bucce vengono ulteriormente essiccate e macinate in una polvere sottile e omogenea. Un polimero biodegradabile di origine naturale, chiamato PHB, viene aggiunto come secondo input del processo, per raggiungere una miscela di 30% OPW e 70% PHB. Questo composto proviene da un'altra azienda del Nord Italia e il suo principale vantaggio è che contribuisce a fornire un prodotto finale che è biodegradabile e compostabile al 100%. La fase successiva del processo è la pellettizzazione del materiale misto in un prodotto brevettato chiamato Rekrill®. Infine, i pellet vengono utilizzati per alimentare le stampanti 3D, che danno la forma finale alle bucce d'arancia. Uno degli oggetti finali rappresentativi di questo processo è una lampada chiamata Ohmie, interamente progettata e prodotta da KD e venduta sul mercato.

4.1.2 Digestione anaerobica

Questa alternativa, considerata attraverso i dati secondari della letteratura, ha considerato la monodigestione anaerobica per produrre calore ed elettricità, oltre a fertilizzanti e limonene (Negro et al., 2017). Lo scarto di buccia d'arancia è stato sottoposto a riscaldamento a vapore, utilizzando il 22% del bio-metano totale generato, e poi il liquame è stato diretto a un serbatoio di espansione, dove è stato estratto il limonene. Inoltre, il residuo solido ottenuto dall'estrazione è stato trasferito direttamente al processo fermentativo. Il processo di digestione anaerobica di Negro et al. (2017) ha utilizzato la digestione termofila a una temperatura di 55°C. Il consumo di elettricità è stato determinato come equivalente alla normale richiesta di materiale omogeneo di biomassa industriale. La maggior parte dell'impatto di CO_2 è stata attribuita alle emissioni fuggitive di metano (CH_4), derivanti principalmente dalle perdite nel reattore di fermentazione e dal CH_4 non bruciato rilasciato dal motore stazionario. Al contrario, i risparmi di CO_2 erano legati alla produzione di biocarburanti che agiscono come sostituti dell'elettricità derivata dal gas naturale, all'applicazione sul terreno del digestato residuo che evita la necessità di produrre fertilizzanti minerali e infine alla sostituzione chimica del D-limonene al posto dell'esano. Si presumeva che il biogas generato venisse bruciato in un

motore a combustione interna. Il calore prodotto è stato utilizzato internamente per riscaldare il fermentatore. Inoltre, il digestato derivato dalla digestione anaerobica è stato proposto come sostituto dei fertilizzanti.

4.1.3 Alimentazione animale

In questo scenario, considerato attraverso i dati secondari della letteratura, lo scarto di buccia d'arancia è stato sottoposto a disidratazione per ridurre il livello di umidità al di sotto del 10% prima di essere pellettizzato (Negro et al., 2017). Dal momento che lo scarto di buccia d'arancia viene utilizzato per l'alimentazione, si presume che vi sia una sostituzione dei mangimi tradizionali a base di energia e proteine, allo stesso modo e in base ai livelli di energia e proteine dell'OPW. In Negro et al. (2017), si ritiene che lo scarto di buccia d'arancia possa sostituire il mais, come alimento energetico marginale, e la farina di soia, come alimento proteico marginale. Di conseguenza, considerando che le colture sono coltivate in tutto il mondo e spedite all'estero via mare (coprendo una distanza di circa 12.000 km), si elimina qualsiasi impatto negativo sull'ambiente derivante dalla produzione di mangimi tradizionali e dai cambiamenti nell'uso del suolo legati al mais e alla soia

4.2. Applicazione del quadro LCA-AHP

L'applicazione del quadro LCA-AHP ha comportato lo screening dei KPI, la definizione degli input dalla LCA all'applicazione AHP (in linea con un approccio LCA<AHP) e l'applicazione dell'AHP in un esperimento.

4.2.1 Screening dei KPI con un questionario

I KPI derivati dalla revisione della letteratura sono stati utilizzati come punto di partenza per selezionare un set finale, da implementare nel modello LCA-AHP. Un passo preliminare è stato quello di ricondurre i KPI da cinque alle tre categorie selezionate. Come menzionato nella sezione della revisione della letteratura, è stata mantenuta una struttura a tre criteri; quindi, i KPI sono stati riorganizzati in ambientali, economici e sociali.

Il primo step è stato quindi quello di integrare l'elenco per definire gli indicatori ambientali, economici e sociali più adatti. Partendo dallo studio condotto da Lombardi e Todella (2023), sono stati presi in considerazione i KPI rilevanti - i 52 KPI già identificati nella Tabella A1 dell'Appendice - emersi nella revisione della letteratura selezionata sulla gestione dei rifiuti agricoli. Inoltre, sono stati selezionati ulteriori KPI rilevanti per la gestione dei rifiuti di buccia d'arancia (Negro et al., 2017; Eriksson e Spångberg, 2017; Wang et al., 2018; Koskiaho et al., 2020; Bolaji et al., 2021; Illankoon et al., 2023; Kanchanapiya e Tantisattayakul, 2023; Teigiserova et al., 2022; Ortiz-Sanchez et al. 2024). L'elenco dei 17 KPI aggiunti è disponibile nella Tabella A2 dell'Appendice.

Il secondo step consisteva in un affinamento preliminare dei KPI, basato sulla valutazione del team di ricerca riguardo a: non essere sufficientemente correlati al quadro dello studio di caso; essere troppo ampi o difficili da misurare.

Come terzo step, l'elenco risultante di 37 KPI è stato sottoposto a 29 esperti coinvolti nel progetto AGRITECH attraverso un sondaggio, in cui è stato chiesto loro di valutare l'insieme attraverso le seguenti affermazioni:

- Dovremmo mantenere questo KPI;
- Dovremmo mantenere questo KPI, ma modificarlo;
- Non dovremmo mantenere questo KPI;
- Dovremmo sostituire questo KPI con un altro.

I partecipanti avevano anche uno spazio per aggiungere alcuni indicatori, che ritenevano necessari. Gli 11 esperti che hanno risposto al sondaggio appartenevano al settore accademico.

I KPI sono stati prima filtrati in base a una soglia dell'85% dei suggerimenti per mantenere cias-

cuno di essi. Inoltre, sono state apportate alcune modifiche per avere una rappresentazione coerente dei tre campi selezionati ed evitare la ridondanza. Ad esempio, «OPEX» e «CAPEX» sono stati fusi nell'indicatore «Costo totale» e l'indicatore «Costo unitario» è stato rimosso dal set a causa della sua forte correlazione con quest'ultimo. Il set di 10 KPI è presentato nella Tabella 1.

Tabella 1. I KPI multidimensionali selezionati

	KPI	Descrizione	Unità
Ambiente	Potenziale di riscaldamento globale (GWP)	Il contributo al riscaldamento globale attraverso il rilascio di gas a effetto serra.	$kgCO_2$ eq
	Impoverimento idrico (WD)	L'entità dell'utilizzo o dell'esaurimento dell'acqua in un determinato sistema.	m3
	Uso del suolo (LU)	Attività di utilizzo del territorio, compresa la conversione del territorio e l'uso del suolo stesso.	PDF - m_2 - anno o Kg Cdeficit
	Indice di materiali rinnovabili (RMI)	La quantità di materie prime rinnovabili utilizzate nel processo rispetto alla quantità totale di input.	kg di energie rinnovabili / kg di input
Economico	Costo totale	I costi di capitale e operativi necessari per trattare 1 kg di OPW (peso umido) in base al loro scenario di valorizzazione.	Euro
	Disponibilità	Fattibilità a lungo termine dell'utilizzo dei fattori produttivi richiesti per l'intero processo di trattamento OPW.	Qualitativo
	Pauback period (PBP)	Il tempo necessario a un progetto per ottenere un profitto cumulativo equivalente all'investimento iniziale.	Anno
Sociale	Impiego	La quantità di manodopera richiesta per l'alternativa, ossia l'occupazione creata da essa.	Numero di posti di lavoro
	Rischio di esposizione agli inquinanti	Il contenuto di metalli pesanti, farmaci, microplastiche e contaminanti visibili nel processo considerato, che misura i rischi corsi dai lavoratori. Il focus è sul rischio diretto di esposizione.	Qualitativo
	Tossicità umana (HT)	I potenziali effetti negativi delle sostanze tossiche sull'ambiente umano, derivanti dalle emissioni e dagli ingredienti chimici dei prodotti rilasciati durante la produzione, l'uso o il trattamento a fine vita, con impatti sulla salute pubblica. I rischi per la salute derivanti dall'esposizione nell'ambiente di lavoro non sono inclusi.	Unità tossica comparativa per la salute umana

4.2.2 Definizione degli input dell'LCA

Alcune informazioni come la catena di approvvigionamento, il processo e una LCA sono state condivise dai colleghi di AGRITECH che lavorano sulla tecnologia KD, tra cui l'ultimo autore di questo articolo. Di conseguenza, in questa applicazione, i risultati esistenti della LCA sono stati utilizzati direttamente come input per l'applicazione AHP. La lampada Ohmie è stata scelta come prodotto di riferimento di KD. Va specificato che, in questa applicazione, il PHB è stato preso in considerazione solo per la categoria di impatto GWP, a causa della mancanza di dati da parte del fornitore di questo materiale a KD. In linea con i dati raccolti sulla tecnologia KD e nell'interesse dell'uniformità, l'unità funzionale (FU) è stata impostata su 1 kg di scarti di buccia d'arancia (peso umido) lavorato. Poiché KD ha eseguito l'LCA scegliendo 1 kg di pellet Rekrill® come unità funzionale, questa unità è stata convertita nella FU comune. Secondo Ortiz-Sanchez et al. (2024), è stato adottato un contenuto di umidità del 21% per lo scarto di buccia d'arancia. Essendo il Rekrill® composto al 30% da bucce d'arancia, 1 kg lavorato di questi rifiuti freschi corrisponde a 2,63 kg di pellet Rekrill®. Le informazioni sulla LCA condotta sugli scenari AD e AF sono state ricavate da Negro et al. (2017). L'unità funzionale per

queste alternative era la gestione di 1 t di scarto di buccia d'arancia (peso umido), e quindi tutti i dati raccolti sono stati scalati per essere comparabili con il KD. In particolare, i risultati delle LCA sono stati utilizzati come input per l'applicazione AHP. In particolare, le LCA forniscono informazioni a quattro KPI, tre ambientali (GWP, WD e LU) e uno sociale (HT).

4.2.3 La struttura AHP

Sulla base dei risultati della revisione della letteratura e dell'elenco dei KPI, è stato possibile definire una struttura AHP combinata con una LCA (Figura 2). Si compone di un obiettivo, che è quello di definire la migliore alternativa tecnologica, di tre criteri (ambientale, economico e sociale) e valuta tre alternative: la tecnologia Krill Design, la digestione anaerobica con la produzione di sottoprodotti e uno scenario di alimentazione animale, che sono ulteriormente spiegati nella prossima sezione. Ogni criterio forma un cluster contenente diversi sottocriteri, composti dall'insieme di KPI derivati dal sondaggio.

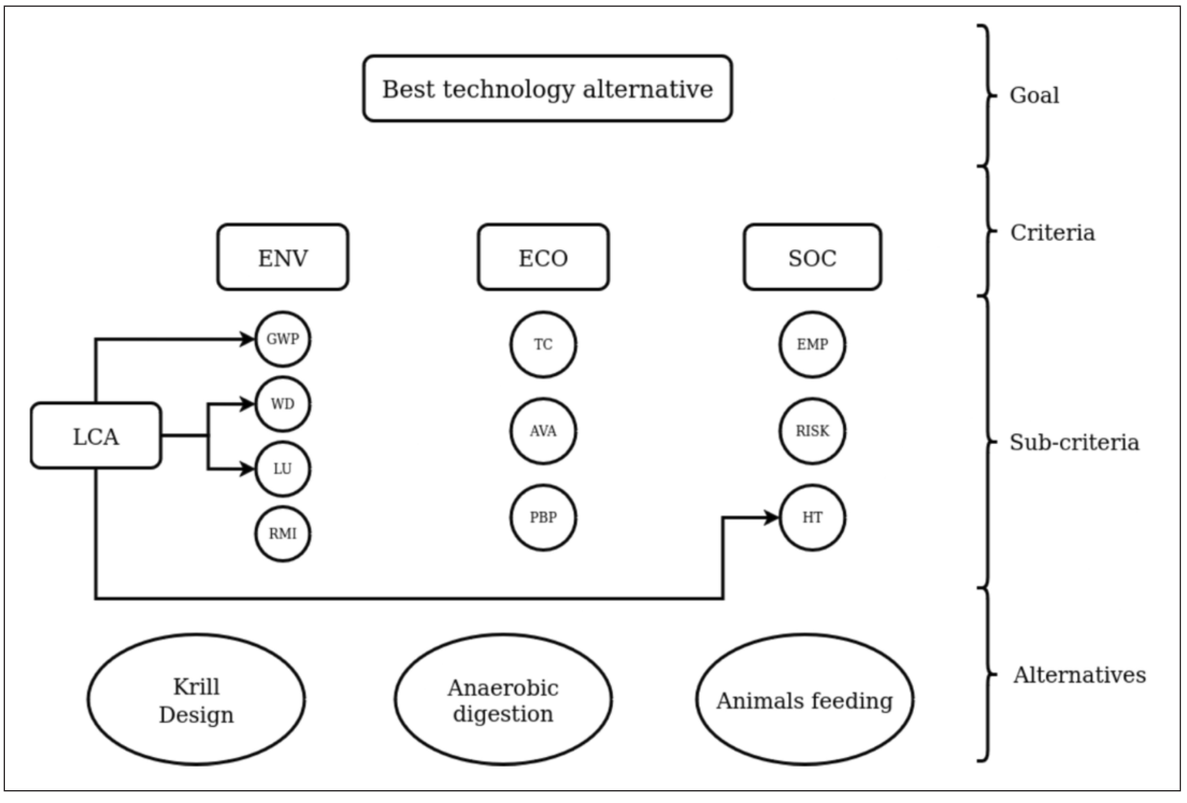

Figura 2. Struttura LCA-AHP (ENV: ambientale; ECO: economico; SOC: sociale).

4.2.4 Raccolta dei dati

Il processo di raccolta dei dati ha affrontato alcune criticità, poiché i dati sugli scenari di AD e AF e i dati correlati sono stati raccolti da fonti secondarie (principalmente letteratura), mentre la maggior parte dei parametri KD erano primari (con questionari semi-strutturati e interviste). Quando possibile, i dati sono stati ricavati direttamente dall'articolo di riferimento che fornisce gli scenari (Negro et al., 2017). Altri scenari il più possibile simili sono stati selezionati dalla letteratura quando i KPI non sono stati misurati nello studio originale.

Sono state necessarie alcune ipotesi per raggiungere una base con unità, confini e ordini di grandezza equivalenti. Inoltre, in alcuni casi, la mancanza di fonti rilevanti ha imposto una valu-

tazione qualitativa da parte degli esperti durante il processo di applicazione dell'AHP (ad esempio, per l'esaurimento dell'acqua, l'utilizzo del terreno per AD e AF e il costo totale).

Qui di seguito sono riportati i risultati della raccolta dati, fornendo anche dettagli sulle ipotesi fatte per ogni KPI (Tabella 2):

- Potenziale di riscaldamento globale: l'LCA condotto da KD non considera alcuna emissione evitata, perché evita la creazione di una lampada classica, che si presume sia realizzata in plastica. Per allinearsi alla valutazione delle altre due alternative, è stata fatta un'ipotesi per bilanciare questo aspetto. Si è ipotizzato di evitare 1 kg di polipropilene per ogni kg di lampada Ohmie prodotta e venduta. L'ipotesi si riferisce anche al fatto che il corpo della lampada classica è realizzato in polipropilene. L'impronta della produzione di polipropilene è fissata a 2,75 kg di CO2eq, per cui il processo di 1 kg di scarto di buccia di arancia (peso umido) evita 2,03 kg di CO2eq rispetto alla tecnologia KD;
- Impoverimento dell'acqua: è stata osservata una mancanza di dati nella letteratura scientifica riguardo al consumo implicito ed esplicito di acqua nella trasformazione delle bucce d'arancia in mangime per animali. Non è stato trovato alcun valore rilevante per quanto riguarda lo scenario AF, quindi la valutazione è stata considerata qualitativamente condotta dagli esperti;
- Uso del suolo: la valutazione degli impatti sull'uso del suolo è condivisa da più approcci nel quadro LCA, amplificando così l'eterogeneità delle unità tra i risultati in letteratura. L'impatto sull'uso del suolo è stato espresso in KgC di deficit nell'LCA che valuta l'alternativa KD, che è stata, per default, l'unità di riferimento per quantificare questa categoria di impatto. Purtroppo, la mancanza del suo utilizzo negli studi non ha permesso un confronto quantitativo tra gli scenari. Anche in questo caso, la valutazione è stata considerata qualitativamente condotta da esperti;
- Indice di materiali rinnovabili: Si presume che gli scenari AD e AF utilizzino esclusivamente scarto di buccia di arancia come materia prima di ingresso. Tuttavia, anche il PHB utilizzato da Krill Design è considerato un prodotto rinnovabile poiché, secondo l'azienda, può essere prodotto tramite fermentazione microbica utilizzando risorse rinnovabili;
- Costo totale: i costi di lavorazione per gli scenari AD e AF sono stati presi in considerazione dall'articolo di riferimento (Negro et al., 2017), considerando la vendita di elettricità e limonene, il calore dedicato all'uso interno e il digestato non considerato come fonte di reddito, in quanto il costo di spandimento sul terreno è uguale a quello evitato. Tuttavia, sono state apportate lievi modifiche per avvicinarsi il più possibile all'attuale mercato italiano, utilizzando un indice di correzione dei prezzi, adattando i costi dal 2016 al 2023 (Rivaluta ISTAT). Inoltre, lo scenario KD fornisce informazioni sulle spese di capitale e operative, ma le informazioni fornite da non erano comparabili con gli altri scenari. Di conseguenza, in questo caso, la valutazione è stata considerata qualitativamente condotta da esperti;
- Disponibilità: per valutare questo indicatore sono stati considerati due aspetti, ossia la fornitura di input e l'impatto della stagionalità delle bucce d'arancia, poiché questo tipo di rifiuti è l'unico considerato in questo lavoro e ha una forte correlazione con il periodo dell'anno studiato. Entrambi gli scenari AF e KD possono lavorare con fiocchi di buccia d'arancia essiccati, evitando ulteriori considerazioni sulla stagionalità. È stata necessaria una riflessione più approfondita per quanto riguarda l'AD, che è stata discussa in modo qualitativo nell'applicazione AHP. Inoltre, per quanto riguarda il KD, il PHB è meno disponibile sul mercato rispetto alle alternative che sostituisce, quindi la disponibilità di PHB potrebbe rappresentare una sfida se la produzione di KD dovesse aumentare (anche se l'azienda non soffre di carenze al suo attuale tasso di produzione);
- Payback period: il PBP di 0,5 anni è una stima ottenuta per KD che tiene conto di tutti i progetti portati avanti negli ultimi anni. Tuttavia, non è stato considerato alcun PBP per le altre due alternative, poiché non sono economicamente sostenibili, secondo le fonti secondarie considerate;

- Occupazione: il numero di posti di lavoro creati per la KD è di tre lavoratori coinvolti nella fase di lavorazione, mentre per l'AD, il valore proviene da fonti secondarie (Ortiz-Sanchez et al., 2024). Sulla base di una catena di lavorazione più ampia nello studio, sono state isolate solo le fasi corrispondenti per eseguire l'AD e ottenere i prodotti ausiliari. Lo scenario AF ha una catena di lavorazione simile a quella del KD, con la pellettizzazione del materiale in entrata, quindi è stato mantenuto lo stesso numero di lavoratori;
- Rischio di esposizione agli inquinanti: sulla base di fonti secondarie (Johannesdottir et al., 2019), si è considerato che l'AD abbia un rischio di esposizione agli inquinanti pari a 0. Secondo le ipotesi derivate dallo stesso studio, si è ipotizzato che le altre alternative presentino lo stesso livello di rischio nelle loro catene di lavorazione;
- Tossicità umana: come categoria d'impatto derivata da una LCA, questo indicatore soffre delle stesse limitazioni degli altri, poiché l'impatto del PHB non è stato considerato. Tuttavia, qui vengono forniti dati quantitativi per tutti gli scenari.

Tabella 2. Dati KPI

	KPI	Unità	Direzione	Alternativa 1 (KD)	Alternativa 2 (AD)	Alternativa 3 (AF)
Ambiente	Potenziale di riscaldamento globale (GWP)	$kgCO_2$ eq	Il più basso	-2.03	-0.137	-0.302
	Impoverimento idrico (WD)	m^3	Il più basso	Da valutare qualitativamente da parte degli esperti.		
	Uso del suolo (LU)	PDF - m^2 - anno o Kg Cdeficit	Il più basso	Da valutare qualitativamente da parte degli esperti.		
	Indice dei materiali rinnovabili (RMI)	kg di energie rinnovabili / kg di input	Il più alto	100	100	100
Economico	Costo totale (TC)	Euro	Il più basso	Da valutare qualitativamente da parte degli esperti.		
	Disponibilità (AVA)	Qualitativo	Positivo	Sì	Sì	Sì
	Payback period (PBP)	Anno	Il più basso	0.5	Non è economicamente sostenibile.	Non è economicamente sostenibile.
Sociale	Impiego	Numero di posti di lavoro	Il più alto	3	7	3
	Rischio di esposizione agli inquinanti	Qualitativo	Negativo	No	No	No
	Tossicità umana (HT)	Unità tossica comparativa per la salute umana	Il più basso	$8.20\text{-}10^{(-08}$	$8.20\text{-}10^{-11}$	$4.38\text{-}10^{-07}$

4.2.5 Il processo di ponderazione: workshop 1

Per eseguire il processo di ponderazione dei criteri e dei sottocriteri considerati, questo articolo propone l'applicazione del processo AHP. Il processo di ponderazione di solito coinvolge diversi gruppi di stakeholder, raccogliendo i giudizi degli esperti in base alle loro conoscenze e competenze. In questo

studio, come esperimento interno, gli esperti coinvolti facevano parte del team del progetto. È stato organizzato un primo workshop per condurre il confronto a coppie di criteri e sottocriteri, attribuendo i pesi relativi. Quattro esperti hanno partecipato al workshop, attraverso un software dedicato all'applicazione AHP chiamato Super Decisions (https://www.superdecisions.com), che offre risultati e grafici in tempo reale. Anche l'incoerenza è stata calcolata e può essere trovata qui nella descrizione di ogni tabella.

La prima fase del workshop 1 si è svolta con l'esecuzione da parte degli esperti di confronti relativi tra i criteri ambientali, economici e sociali. Dovevano valutare il livello di importanza di ogni coppia di criteri utilizzando la scala Saaty basata su numeri assoluti (Saaty, 1980). La Tabella 3 riassume i risultati di questa valutazione. La discussione ha portato a considerare i criteri sociali e ambientali con la stessa importanza, concentrandosi sugli aspetti dell'economia circolare e sulle opportunità sociali locali.

Tabella 3. Giudizio degli esperti sul livello dei criteri

La migliore alternativa tecnologica	**ENV**	**ECO**	**SOC**
ENV	1	4	1
ECO	1/4	1	1/4
SOC	1	4	1

Inconsistenza: 0,00000

Nella successiva fase di ponderazione dei sottocriteri, ogni cluster è stato analizzato attraverso i suoi sottocriteri, sempre attraverso un confronto a coppie tra gli esperti che hanno partecipato al workshop 1. Il risultato è che le tabelle 4, 5 e 6 illustrano come sono stati attribuiti i pesi. Di conseguenza, le tabelle 4, 5 e 6 illustrano come sono stati attribuiti i pesi.

Tabella 4. Giudizio degli esperti sui sottocriteri ambientali

Ambientale	**GWP**	**WD**	**LU**	**RMI**
GWP	1	5	4	2
WD	1/5	1	2	1/5
LU	1/4	1/2	1	1/4
RMI	1/2	5	4	1

Inconsistenza: 0,06271

La discussione principale sui criteri ambientali ha riguardato l'RMI, considerato un KPI davvero importante in una valutazione dell'economia circolare. È stata discussa anche l'importanza dell'uso del suolo sul GWP, in quanto considera principalmente la biodiversità, mentre il GWP esprime il riscaldamento globale. Il GWP è stato infine giudicato più importante dell'LU, perché la fase di coltivazione delle arance non è stata inclusa nei confini di questo lavoro.

Tabella 5. Giudizio degli esperti sui sottocriteri economici

Economico	**TC**	**AVA**	**PBP**
TC	1	1	1/2
AVA	1	1	1/3
PBP	2	3	1

Inconsistenza: 0,01759

L'attenzione in campo economico è stata posta sull'indicatore di disponibilità, per decidere se la stagionalità dei rifiuti arancioni gli avrebbe conferito una conseguente importanza rispetto agli altri. Infine, il PBP è stato scelto come indicatore economico più importante.

Tabella 6. Giudizio degli esperti sui sottocriteri sociali

Sociale	**EMPL**	**RISCHIO**	**HT**
EMPL	1	1/2	1/4
RISCHIO	2	1	1/2
HT	4	2	1

Inconsistenza: 0,00000

La deliberazione di un esperto ha concluso che la tossicità umana aveva un'importanza maggiore e un impatto a lungo termine rispetto all'occupazione, anche se anch'essa era importante.

Un riepilogo che raccoglie il peso di ciascun KPI all'interno del relativo cluster è riportato nella Tabella 7.

Tabella 7. I risultati dei pesi dei criteri e dei sottocriteri

ENV		**ECO**		**SOC**	
44,4%		11,1%		44,4%	
KPI	**Peso [%]**	**KPI**	**Peso [%]**	**KPI**	**Peso [%]**
GWP	47.8	AVA	21.0	EMP	14.3
LU	8.1	PBP	55.0	HT	57.1
RMI	33.9	TC	24.0	RISCHIO	28.6
WD	10.2				

4.2.6 Valutazione delle alternative: workshop 2

Per eseguire il confronto a coppie delle alternative in base ai dati raccolti e ai giudizi degli esperti, questo documento ripropone l'applicazione del processo AHP. È stato organizzato un secondo workshop utilizzando Super Decision. Al workshop hanno partecipato cinque esperti, tre dei quali erano presenti al workshop precedente. I pesi attribuiti ai criteri e ai sottocriteri sono stati discussi nuovamente e leggermente modificati (i risultati presentati in questa sezione tengono conto di queste modifiche), in quanto il gruppo di esperti era composto da un panel di specializzazione più diversificato.

Poi, gli scenari KD, AD e AF sono stati valutati dagli esperti rispetto a ciascun sottocriterio in un confronto a coppie. Questa valutazione si è basata principalmente sui risultati della raccolta dati, ma gli esperti hanno anche utilizzato le loro conoscenze ed esperienze per compensare la mancanza di informazioni su alcuni KPI o la loro natura qualitativa. La Tabella 8 illustra un esempio del processo condotto per i dieci sottocriteri.

Tabella 8. Confronto alternativo relativo al GWP

GWP	**KD**	**AD**	**AF**
KD	1	8	6
AD	1/8	1	1/3
AF	1/6	3	1

Inconsistenza: 0,07069

Una volta attribuito un peso ai criteri e ai sottocriteri e confrontate le alternative rispetto ai sottocriteri, è stato calcolato un peso finale per ogni tecnologia. La classifica finale delle alternative è presentata nella Figura 3.

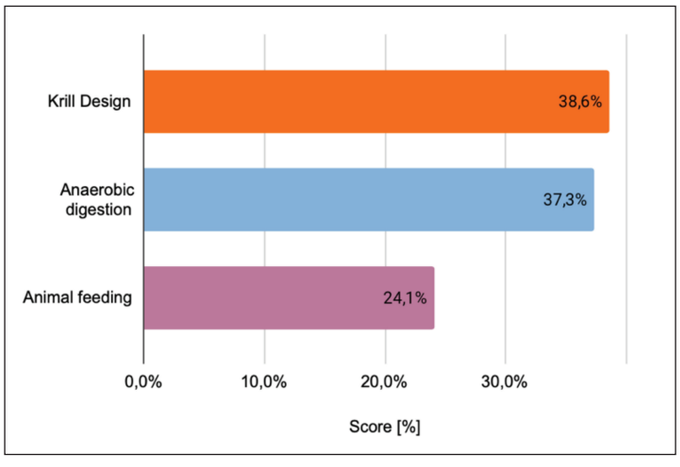

Figura 3. La classifica finale delle alternative.

Considerando la preferenza complessiva espressa dagli esperti coinvolti, la tecnologia migliore è la KD tra le alternative. Al contrario, l'alternativa meno preferita è AF. Tuttavia, KD e AD hanno ottenuto risultati complessivamente vicini, con AD che rimane un'opzione adeguata da considerare.

4.2.7 Analisi di sensitività

È stata eseguita un'analisi di sensitività per valutare la robustezza del modello applicato, con un focus specifico sui pesi attribuiti ai criteri e ai sottocriteri. I passaggi per effettuare l'analisi sono stati i seguenti:

- utilizzando la ponderazione indicata nel workshop 1, senza modifiche, come input per i criteri e i sottocriteri;
- dando la stessa importanza a tutti i criteri;
- considerare i punti di svolta verso un cambiamento di alternativa.

La Figura 4 illustra i risultati delle prime due analisi di sensitività eseguite.

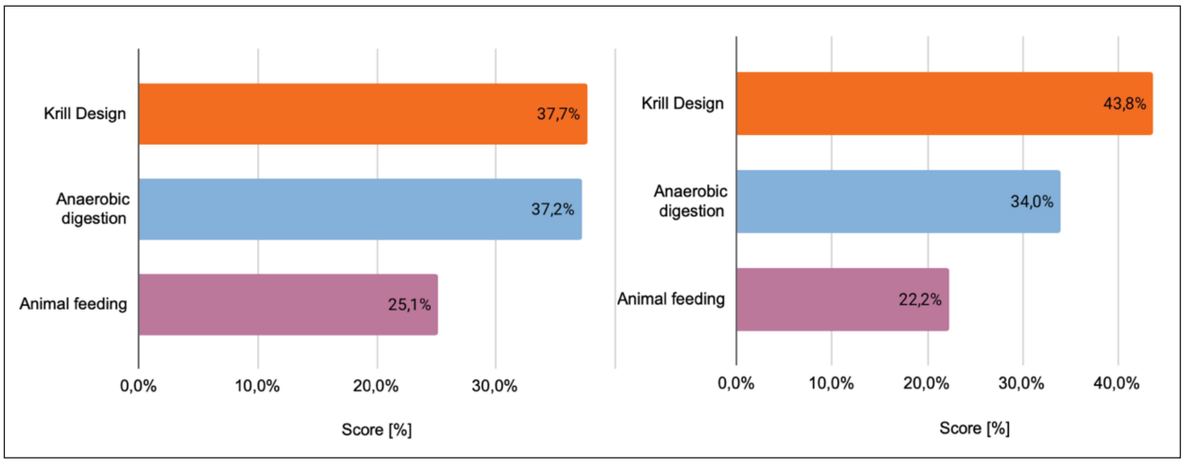

Figura 4. I risultati della prima analisi di sensibilità (a sinistra) e della seconda (a destra).

Per quanto riguarda il primo (Figura 4, a sinistra), la ponderazione data dagli esperti durante il primo workshop è stata presa senza le modifiche apportate durante il secondo.

In questo senso, i criteri ambientali sono stati inizialmente giudicati ancora più importanti dei criteri economici. Il GWP era meno dominante rispetto a LU e WD, WD e LU erano considerati ugualmente importanti e l'RMI non era importante come WD. Tuttavia, è possibile notare che i risultati finali mostrano la stessa classifica delle alternative. Gli scenari KD e AD sono ancora più vicini in questa analisi di sensibilità, che è il risultato di un peso leggermente maggiore per l'indicatore LU. Alla fine, i cambiamenti non sono significativi.

Per quanto riguarda la seconda analisi di sensitività (Figura 4, a destra), tutti i criteri sono ponderati allo stesso modo, quindi solo i pesi dei sottocriteri e le valutazioni delle alternative contribuiranno alla classifica finale. Anche in questo caso, il KD rimane lo scenario preferito (con un aumento della percentuale), e i risultati finali mostrano la stessa classifica delle alternative. Il cambiamento principale deriva dall'aumento del peso dei criteri economici, che favorisce l'alternativa KD.

La terza analisi di sensitività apporta alcune modifiche in più rispetto alle altre due discusse in precedenza. Questa analisi esplora i punti di ribaltamento, per osservare il passaggio a un'altra alternativa considerata migliore. Questo calcolo viene effettuato con il software Super Decisions e considera un cambiamento di peso alla volta, mantenendo fissi gli altri. Vengono analizzati due tipi di punti critici: quelli legati alla modifica dei pesi dei criteri e quelli che si verificano se la ponderazione di HT e GWP viene modificata. Questi sottocriteri rappresentano effettivamente il 46% del contributo complessivo dei KPI.

L'analisi della Tabella 9 mostra il peso richiesto dai criteri per indurre un cambiamento dell'alternativa preferita. La percentuale di variazione sottolinea quanto lontano dal peso iniziale sia il punto di svolta e se il peso debba aumentare o diminuire per raggiungere un cambiamento.

Il punto di partenza è lo stesso, con lo scenario KD come alternativa preferita. Un'osservazione

Tabella 9. Punti di svolta quando si modificano i pesi dei criteri

Pesi finali	Alternativa preferita	Punti di svolta	[%] di variazione	Turno
ENV: 0,444	KD	0.426	-4.15	KD -> AD
ECO: 0,111	KD	0.077	-30.52	KD -> AD
SOC: 0,444	KD	0.460	3.41	KD -> AD

immediata evidenzia che ogni cambiamento viene effettuato a favore dello scenario AD piuttosto che AF. Infatti, nella classifica finale, la tecnologia AD ha ottenuto un punteggio molto più vicino a KD che ad AF, il che spiega questo spostamento. Si nota anche come i criteri ambientali e sociali siano vicini ai rispettivi punti di svolta. Nel caso dei criteri ambientali, una leggera diminuzione del peso incoraggerebbe lo scenario AD, mentre un peso leggermente maggiore dei criteri sociali porterebbe allo stesso risultato. Il punto di svolta economico è molto più lontano rispetto agli altri due. Inoltre, richiede un peso più leggero quando ha già il peso più leggero. Pertanto, la probabilità di raggiungere questa condizione è significativamente più bassa rispetto alle altre soglie.

L'analisi della Tabella 10 esplora i punti di svolta per i sottocriteri HT e GWP.

Tabella 10. Punti di svolta per i pesi GWP e HT

Pesi finali	Alternativa preferita	Punti di svolta	[%] di variazione	Turno
HT: 0,571	KD	0.634	10.99	KD -> AD
GWP: 0,478	KD	0.426	-10.78	KD -> AD

Questi richiedono una variazione di quasi ± 11%, un aumento per l'HT, o una diminuzione per il GWP. Una tale differenza è un cambiamento significativo e i punti critici non sono così vicini ai risultati come i criteri ambientali e sociali. Tuttavia, se alcuni KPI hanno valori incerti, gli esperti potrebbero attribuire un peso diverso all'indicatore.

Le analisi hanno evidenziato che la KD ha comunque ottenuto il punteggio preferito in altri due casi. Tuttavia, l'assegnazione del peso, in particolare il peso assegnato ai criteri, ha un'influenza significativa sui risultati. Anche piccoli aggiustamenti nei criteri ambientali (-4,2%) o sociali (+3,4%) possono spostare la preferenza verso l'alternativa AD. Inoltre, due sottocriteri, GWP e HT, rappresentano quasi il 46% del totale, con potenziali problemi in caso di incertezze sui dati. A causa di questi fattori, i risultati acquisiti in questa implementazione AHP devono essere affrontati con grande cautela e sono suscettibili di alterazione quando viene condotta un'implementazione AHP più completa. Di conseguenza, nella sezione seguente viene proposta una discussione sulla qualità e l'affidabilità dei dati.

5. Discussione

Sebbene una classifica finale sia un modo semplice per identificare rapidamente quale scenario debba essere considerato per primo, facilitando il lavoro dei decisori, un intero processo e una quantità di scelte hanno portato a questo risultato finale. Questa sezione mira a identificare come è stato raggiunto questo risultato e a capire quali incertezze - ad esempio, nella qualità dei dati - potrebbero essere state decisive. In effetti, trattandosi di un'applicazione e di una simulazione preliminare, i risultati acquisiti dovrebbero essere affrontati per migliorare il processo quando verrà condotta un'implementazione AHP più completa, con soggetti interessati ed esperti reali al di fuori del team di progetto.

Di conseguenza, la Figura 5 mostra come sono state classificate le alternative rispetto ai KPI. In quattro casi, la KD è stata ponderata come alternativa preferita, mentre questa situazione si è verificata tre volte per lo scenario AD e due volte per lo scenario AF. In due casi sono stati attribuiti pesi simili alle tre alternative. È qui chiaramente illustrato che ogni scenario ha alcuni indicatori in cui performa meglio, quindi, da un lato, la scelta degli indicatori è centrale, perché aggiunge peso a uno scenario, e il risultato finale è una somma di compromessi tra indicatori per i quali le alternative sono migliori delle altre.

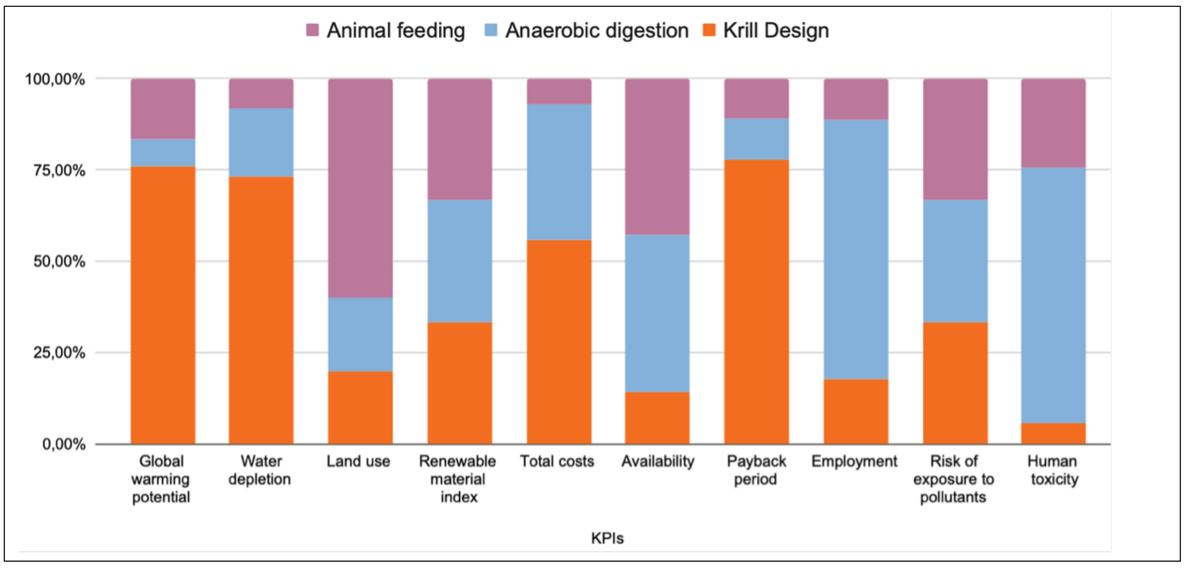

Figura 5. Assegnazione del peso alle alternative rispetto ai sottocriteri.

Inoltre, la Figura 6 illustra a quali sottocriteri alternativi attribuire il loro peso, ma in particolare è classificata in base all'ordine di influenza globale. Ad esempio, il KPI più alto, HT, è stato ritenuto dagli esperti molto più preferibile nello scenario AD, dando quindi molto peso a questa tecnologia. Al contrario, KD ha ottenuto risultati nettamente migliori nell'ambito del GWP, che è il secondo sottocriterio più forte. Anche se l'AF ha i risultati migliori per quanto riguarda due indicatori, i loro pesi relativi sono così piccoli che hanno un'influenza davvero limitata sul risultato globale. Queste considerazioni confermano quindi il motivo per cui gli scenari KD e AD hanno un punteggio complessivo vicino e perché AF è significativamente indietro.

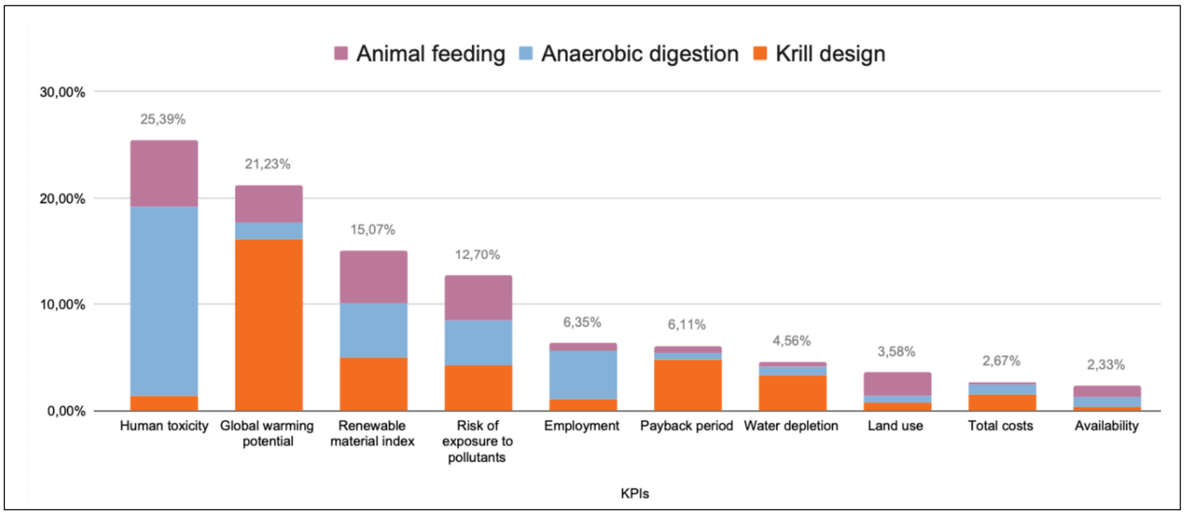

Figura 6. Assegnazione del peso relativo alle alternative rispetto ai sottocriteri.

Partendo da queste considerazioni, si può ricavare un grafico per evidenziare l'effetto globale dei criteri. Le percentuali illustrate nella Figura 7 tengono conto dei pesi attribuiti ai criteri e dei pesi dei sottocriteri. Di conseguenza, risulta che quattro indicatori prevalgono come maggiori contributori al risultato (74%). Si tratta di HT (25,4%), GWP (21,2%), RMI (15,1%) e rischio di esposizione agli inqui-

nanti (12,7%). L'RMI ha una forte influenza perché rappresenta direttamente il coinvolgimento di tre alternative nell'economia circolare, che costituisce un aspetto centrale del progetto AGRITECH.

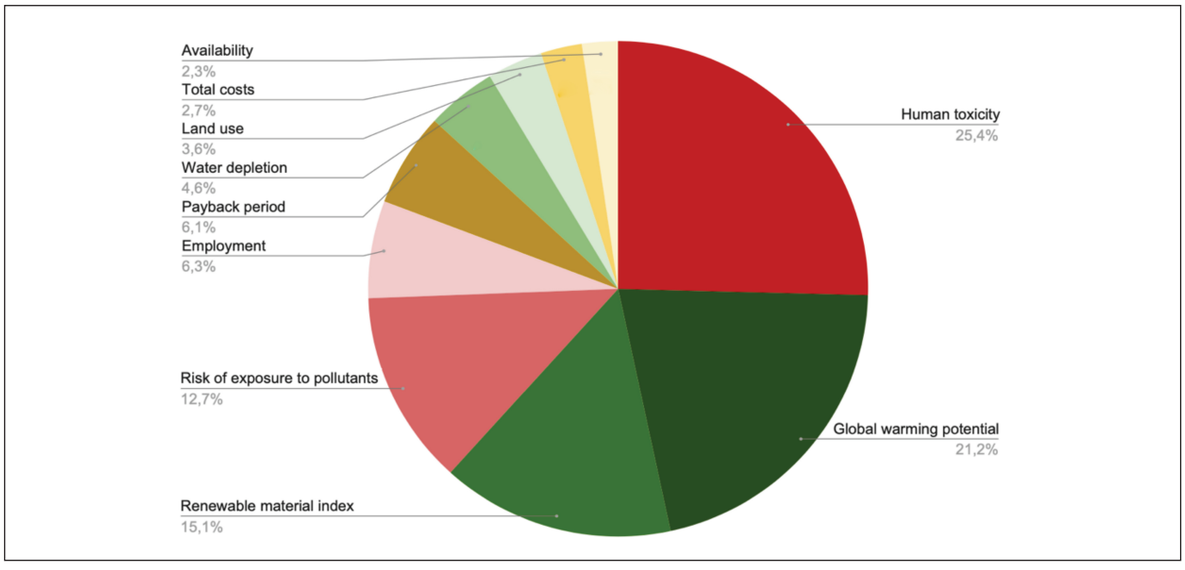

Figura 7. Il contributo complessivo dei KPI.

Nessuno di questi quattro KPI principali appartiene al settore economico, che non contribuisce in modo massiccio alla valutazione alternativa - ad esempio, il sottocriterio PBP conta solo per il 6% del peso globale, mentre rappresenta il 55% del cluster economico. L'enorme impatto dei quattro indicatori sopra citati implica anche considerazioni in base alle incertezze legate alla loro misurazione, che potrebbero provocare risultati diversi, agendo come punti di svolta che non possono essere ignorati. L'affidabilità di questi KPI è ulteriormente discussa nella seguente sezione di valutazione della qualità dei dati.

5.1.1 Qualità dei dati

L'importanza dei quattro sottocriteri più votati porta alla necessità di un'ulteriore analisi della qualità dei dati. I dati raccolti sono lo strumento principale che gli esperti utilizzano per assegnare l'importanza relativa alle alternative. Di conseguenza, se non sono adeguati o rappresentativi, questa mancanza di coerenza influenzerà inevitabilmente i risultati. È quindi necessario fornire un'ulteriore discussione sulle incertezze affrontate durante la raccolta dei dati. Viene proposta una matrice di pedigree, adattata da Ciroth et al. (2016), che propone un approccio alla gestione dell'incertezza dei dati, tipicamente nella LCA (Tabella 11).

Quindi, l'affidabilità e la rappresentatività sono considerate come tipi di incertezze che riguardano i dati, per discutere la qualità dei dati in base al loro contributo complessivo. Partendo da Ciroth et al. (2016), l'affidabilità è classificata da 1 a 4, come segue:

- 1: dati verificati basati su misurazioni o letteratura scientifica;
- 2: dati verificati basati in parte su ipotesi o dati non verificati basati su misurazioni o letteratura scientifica;
- 3: dati non verificati e in parte basati su stime qualificate;
- 4: stime qualificate (ad esempio, da parte di esperti).

Inoltre, la rappresentatività viene classificata da 1 a 4, come segue:

- 1: dati rappresentativi dello scenario di riferimento o uno scenario che utilizza esattamente

la stessa tecnologia, metriche, input e output;

- 2: dati rappresentativi di uno scenario che utilizza la tecnologia close, le stesse metriche e gli input e output close;
- 3: dati rappresentativi raccolti da una tecnologia vicina, stesse metriche, input e output vagamente simili;
- 4: dati rappresentativi non trovati, o in una tecnologia vagamente vicina, o con metriche diverse, input e output diversi.

È stata quindi calcolata una media tra affidabilità e rappresentatività, considerando implicitamente entrambi i tipi di incertezza con la stessa importanza.

Tabella 11. Matrice del pedigree (adattata da Ciroth et al., 2016)

KPI	Affidabilità	Rappresentatività	Media	Contributo complessivo
GWP	3	2	2.5	21%
LU	4	4	4	3.6%
RMI	1	1	1	15%
WD	4	4	4	4.6%
AVA	2	1	1.5	2.3%
PBP	3	1	2	6.1%
TC	3	1	2	2.7%
EMPL	2	3	2.5	6.3%
HT	3	3	3	25%
RISCHIO	1	2	1.5	13%

Qui è possibile verificare come i quattro sottocriteri già citati con oltre il 10% del contributo complessivo presentino situazioni diverse in termini di matrice di pedigree e di incertezza. Da un lato, RMI e RISK, che presentano una grande influenza sui risultati, hanno un'affidabilità e una rappresentatività accettabili. D'altra parte, GWP e HT hanno ottenuto una media di 2,5 e 3, rispettivamente, per GWP e HT, che sottolinea un alto livello di incertezza. Di conseguenza, dei quattro indicatori citati, i due con il peso maggiore, che rappresentano quasi il 46% del totale, hanno mostrato una quantità significativa di incertezza. Come ulteriore esempio, LU e WD hanno raccolto una qualità dei dati davvero scarsa, perché alcuni dati non sono stati trovati in letteratura. Tuttavia, rappresentano rispettivamente il 3,6% e il 4,6%, che non è significativo rispetto agli altri indicatori.

Questa analisi aggiuntiva, condotta in base a questa applicazione preliminare con il team del progetto, ci permette di verificare le incertezze da ridurre nell'applicazione successiva, in particolare evidenziando la necessità di eseguire un LCA per lo scenario KD che includa gli impatti di PHB, ma anche di ottenere dati rappresentativi per tutti gli indicatori, per quanto possibile, basati su misurazioni e dati primari o letteratura scientifica e dati secondari.

Di conseguenza, queste azioni correttive sono in corso nella seconda e ultima applicazione della ricerca. Innanzitutto, i ricercatori coinvolti nella fase (ii) sull'LCA stanno proponendo uno studio aggiornato sul processo, considerando anche gli impatti del PHB, che sarà integrato nel modello AHP. Inoltre, questa matrice di pedigree potrebbe essere utile per prendere in considerazione e concentrarsi con precisione indicatori più critici da raccogliere. Infine, per migliorare su questa base la compara-

bilità degli scenari alternativi, si proporrà di approfondire la raccolta di dati primari, ove possibile, anche per i processi di digestione anaerobica e di alimentazione animale.

6. Conclusioni e ulteriori sviluppi

Questo studio analizza il potenziale dell'integrazione della Valutazione del Ciclo di Vita con l'Analytic Hierarchi Process per le valutazioni dell'economia circolare nell'ambito dei rifiuti agricoli. In particolare, propone un'applicazione del quadro di valutazione combinato, per la valutazione di tre tecnologie alternative per il trattamento di scarti di buccia d'arancia. In primo luogo, ricava dalla letteratura una prospettiva di valutazione multidimensionale che combina LCA e MCDA. In secondo luogo, propone un esperimento preliminare di applicazione dell'AHP, basato su criteri derivati dalla letteratura e perfezionati attraverso il coinvolgimento di esperti. Attraverso un caso di studio che valuta le alternative tecnologiche per il trattamento dei rifiuti di buccia d'arancia, la tecnologia KD emerge come l'alternativa preferita, seguita da vicino dallo scenario AD, mentre l'alternativa AF riceve il voto peggiore.

Sulla base dell'applicazione sperimentale preliminare di questo quadro LCA-AHP, si possono proporre alcune lezioni apprese e raccomandazioni.

Innanzitutto, in termini di coinvolgimento degli stakeholder, è fondamentale migliorare l'impegno con le parti interessate per migliorare la raccolta dei dati. Da un lato, ciò implica la ricerca del sostegno dei lavoratori e dei cittadini per gli indicatori sociali e qualitativi. Dall'altro lato, si consiglia anche di affrontare una collaborazione più stretta con i partner del settore, come KD, per migliorare la qualità dei dati. Di conseguenza, incorporare prospettive diverse garantirebbe una valutazione più completa. In questo senso, questo studio preliminare ha implicazioni per ulteriori valutazioni di casi reali, poiché si nota che, soprattutto in Italia, mancano metodologie e indicatori per misurare l'effettiva circolarità dei processi produttivi o dei prodotti delle aziende (Circular Economy Network, 2024). In particolare, gli indicatori spesso non sono adeguatamente calibrati sulle caratteristiche specifiche delle piccole imprese - come la KD - e dovrebbero essere attentamente rivisti attraverso un coinvolgimento delle parti interessate basato sul contesto, a partire da studi preliminari come questo.

In secondo luogo, in termini di selezione degli Indicatori Chiave di Prestazione, è importante dare priorità ai KPI che sono frequentemente utilizzati e ben documentati nella letteratura scientifica. Questo garantisce la comparabilità tra le alternative e facilita un quadro di valutazione più solido. Inoltre, secondo una prospettiva di economia circolare come quella adottata in questo studio, si dovrebbero proporre ulteriori perfezionamenti, in termini di indicatori che tengano conto di un consumo di risorse e materiali sostanzialmente inferiore e di una minore generazione di rifiuti (Potting et al., 2017), in linea con l'SDG12, per «garantire modelli di consumo e produzione sostenibili» (Assemblea Generale delle Nazioni Unite, 2015). In questo senso, partendo da tecnologie innovative come il KD, si potrebbe proporre una riflessione più ampia nell'inquadrare la ricerca secondo il paradigma delle 9R (Ellen MacArthur Foundation, 2013; Potting et al., 2017; Morseletto, 2020), con ulteriori KPI relativi alla produzione e all'utilizzo più intelligente dei prodotti, e all'estensione della durata di vita dei componenti dei prodotti, più che al semplice riciclo e recupero.

Infine, in base al miglioramento della qualità dei dati, è necessario perfezionare i metodi di raccolta dei dati per affrontare le preoccupazioni sulla qualità dei dati, innanzitutto implementando LCA su misura per gli scenari di riferimento utilizzati nella letteratura scientifica, e raccogliendo il più possibile dati primari - come la già citata LCA aggiornata che è in corso da parte del team di ricerca nella fase (ii), considerando anche gli impatti del PHB, che saranno integrati nel modello AHP. Tuttavia, per gestire una potenziale asimmetria tra dati primari e secondari, si potrebbe prevedere un adattamento di questi ultimi (ad esempio, la modifica di parametri come il tipo di tecnologia, l'efficienza del processo o le condizioni operative). Inoltre, è prevista la possibilità di un benchmarking, per confrontare i risultati ottenuti dai dati reali con quelli ottenuti dai dati secondari, per convalidare la coerenza dei risultati. Inoltre, se l'asimmetria è ancora presente, si potrebbero fornire ulteriori analisi di incertezza in termini di simulazioni statistiche. Garantendo l'accuratezza dei dati, l'affidabilità dei risultati della valutazione sarà più solida.

In futuro, le valutazioni successive dovrebbero prendere in considerazione queste raccomandazioni per garantire risultati affidabili. Incorporando le prospettive degli stakeholder, collaborando strettamente con i partner del settore , dando priorità ai KPI rilevanti e migliorando la qualità dei dati, i risultati di una metodologia di applicazione LCA-AHP saranno abbastanza solidi da trarre conclusioni più robuste. Tuttavia, questo studio fornisce un esperimento preliminare per valutazioni e applicazioni più ampie sulle tecnologie circolari in agricoltura.

Ringraziamenti

Questo studio è stato realizzato nell'ambito del «Centro Nazionale di Ricerca per le Tecnologie Agricole— AGRITECH» e ha ricevuto un finanziamento dall'Unione Europea Next-GenerationEU (PIANO NAZIONALE DI RIPRESA E RESILIENZA (PNRR)-MISSIONE 4 COMPONENTE 2, INVESTIMENTO 1.4-Avviso n. 3138 del 16/12/2021, Codice Programma CN00000022). Questo manoscritto riflette solo i punti di vista e le opinioni degli autori, né l'Unione Europea né la Commissione Europea possono essere ritenute responsabili.

Contributo degli autori

Il lavoro deve essere ugualmente attribuito agli autori.

Bibliografia

Agritech (sito web): https://agritechcenter.it/

Amini S., Asoodar M.A. (2016). Selecting the most appropriate tractor using Analytic Hierarchy Process–an Iranian case study. *Information Processing in Agriculture*, 3(4), 223–234. https://doi.org/10.1016/j.inpa.2016.08.003

Assemblea Generale delle Nazioni Unite (2015) Transforming our world: The 2030 agenda for sustainable development. Available at: https://www.un.org/en/development/desa/population/migration/generalassembly/docs/globalcompact/A_RES_70_1_E.pdf

Bolaji I., Nejad B., Billham M., Mehta N., Smyth B., Cunningham E. (2021). Multi-criteria decision analysis of agri-food waste as a feedstock for biopolymer production. *Resources, Conservation and Recycling,* 172, 105671. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105671

Bartzas G., and Komnitsas K. (2020). An integrated multi-criteria analysis for assessing sustainability of agri- cultural production at regional level. *Information Processing in Agriculture*, 7, 223–232. https://doi.org/10.1016/j.inpa.2019.09.005

Circular Economy Network (2024). 6° Rapporto sull'Economia Circolare in Italia. Available at: https://circulareconomynetwork.it/wp-content/uploads/2024/05/CEN2024-Impagina-TOT-DEF.pdf

Ciroth A., Muller S., Weidema B., Lesage P. (2016). Empirically based uncertainty factors for the pedigree matrix in ecoinvent. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 21, 1338–1348. https://doi.org/10.1007/s11367-013-0670-5

Commissione Europea (2019). Communication from the Commission to the European Parliament, the European Council, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. The European Green Deal. Available at: https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:b828d165-1c22-11ea-8c1f-01aa75ed71a1.0002.02/DOC_1&format=%20PDF

Commissione Europea, NextGenerationEU (2020): https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/eu-budget/eu-borrower-investor-relations/nextgenerationeu_en

De Luca A.I., Iofrida N., Leskinen P., Stillitano T., Falcone G., Strano A., Gulisano G. (2017). Life cycle tools combined with multi-criteria and participatory methods for agricultural sustainability: Insights from a systematic and critical review. *Science of The Total Environment*, 595, 352–370. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.03.284

Ellen MacArthur Foundation (2013). Towards the circular economy Vol. 1: an economic and business

rationale for an accelerated transition. Available at: https://content.ellenmacarthurfoundation.org/m/27265af68f11ef30/original/Towards-the-circular-economy-Vol-1.pdf?_gl=1*1sughrn*_gcl_au*OTg5MDA4ODYyLjE3NDQwNDMyMzM.*_ga*MTcyMzA5MzMuMTc0NDA0MzIwOQ..*_ga_V32N675KJX*MTc0NDA0MzIwNi4xLjEuMTc0NDA0MzQ2MS41OS4wLjA.

Eriksson M., Spångberg J. (2017). Carbon footprint and energy use of food waste management options for fresh fruit and vegetables from supermarkets. *Waste Management*, 60, 786–799. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.01.008

FAO (2015). Climate change and food security: risks and responses. Available at: https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/a4fd8ac5-4582-4a66-91b0-55abf642a400/content

FAO (2022). Strategy on Climate Change 2022–2031. Available at: https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/f6270800-eec7-498f-9887-6d937c4f575a/content#:~:text=The%20new%20Strategy%20on%20Climate,youth%20and%20Indigenous%20Peoples%2C%20as

Figueira J., Greco S., Ehrgott M., Multiple Criteria Decision Analysis. State of the Art Survey, Springer, New York, 2005.

Fregonara E., Coscia C. (2019). Multi criteria analyses, life cycle approaches and delphi method: A methodological proposal to assess design scenarios. *Valori e Valutazioni*, 23, 107-117. https://siev.org/wp-content/uploads/2020/02/23_13-_-FREGONARA-COSCIA.pdf

Hafyan R.H., Bhullar L.K., Mahadzi, S., Bilad M.R., Nordi, N.A.H., Wirzal M.D.H., Putra Z.A., Rangaiah G.P., Abdullah B. (2020). Integrated Biorefinery of Empty Fruit Bunch from Palm Oil Industries to Produce Valuable Biochemicals. *Processes,* 8, 868. https://doi.org/10.3390/pr8070868

He X., Qiao Y., Liang L., Knudsen M.T., Martin F. (2018). Environmental life cycle assessment of long-term organic rice production in subtropical China. *Journal of Cleaner Production*, 176 (1), 880–888. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.045

Illankoon W.A.M.A.N., Milanese C., Karunarathna A.K., Liyanage K.D.H.E., Alahakoon A.M.Y.W., Rathnasiri P.G., Collivignarelli M.C., Sorlini S. (2023). Evaluating Sustainable Options for Valorization of Rice By-Products in Sri Lanka: An Approach for a Circular Business Model. *Agronomy,* 13, 22. https://doi.org/10.3390/agronomy13030803

Johannesdottir S., Kärrman E., Ljung E., Anderzén C., Edström M., Ahlgren S., Englund M. (2019). Reducing Emissions by Turning Nutrients and Carbon into Benefits, D.3.3, Stockholm Environment Institute. Available at: https://www.sei.org/wp-content/uploads/2022/03/report-from-the-multicriteria-analysis.pdf

Kanchanapiya P., Tantisattayakul T. (2023). Analysis of wastewater reuse options using a multicriteria decision tool for Phuket, Thailand. *Journal of Environmental Management*, 334, 117426. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.117426

Khanali M., Ghasemi-Mobtaker H., Varmazyar H., Mohammadkashi N., Cha, K., Nabavi-Pelesarae, A. (2022). Applying novel eco-exergoenvironmental toxicity index to select the best irrigation system of sunflower production. *Energy*, 250, 123822. https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.123822

Koch D., Paul M., Beisl S., Friedl A., Mihalyi B. (2020). Life cycle assessment of a lignin nanoparticle biorefinery: decision support for its process development. *Journal of Cleaner Production*, 245, 118760. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118760

Koskiaho J., Okruszko T., Piniewski M., Marcinkowski P., Tattari S., Johannesdottir S., Kärrman E., Kämäri, M. (2020). Carbon and nutrient recycling ecotechnologies in three Baltic Sea river basins – the effectiveness in nutrient load reduction. *Ecohydrology & Hydrobiology*, 20, 313–322. https://doi.org/10.1016/j.ecohyd.2020.06.001

Krill Design website: https://krilldesign.net

Li Y., Wang Y., Wang W., Fatehi P., Kozinski J., Kang K. (2023). Analytic hierarchy process-based life cycle assessment of the renewable energy production by orchard residual biomass-fueled direct-fired power generation system. *Journal of Cleaner Production*, 419, 138304. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138304

Lijó L., Frison N., Fatone F., González-García S., Feijoo G., Moreira M.T. (2018). Environmental and sustainability evaluation of livestock waste management practices in Cyprus. *Science of The Total Environment*, 634, 127–140.

Lombardi P., Todella E. (2023). Multi-Criteria Decision Analysis to Evaluate Sustainability and

Circularity in Agricultural Waste Management. Sustainability 15, Number: 20 Publisher: Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 14878. https://doi.org/10.3390/su152014878
Morseletto P. (2020) Targets for a circular economy, *Resources, Conservation and Recycling*, 153, 104553. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104553
Nasution M.A., Wulandari A., Ahamed T., Noguchi R. (2020). Alternative POME Treatment Technology in the Implementation of Roundtable on Sustainable Palm Oil, Indonesian Sustainable Palm Oil (ISPO), and Malaysian Sustainable Palm Oil (MSPO) Standards Using LCA and AHP Methods. *Sustainability*, 12, 4101. https://doi.org/10.3390/su12104101
Negro V., Ruggeri B., Fino D., Tonini D. (2017). Life cycle assessment of orange peel waste management. *Resources, Conservation and Recycling*, 127, 148–158. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.08.014
Nikkhah A., Firouzi S., El Haj Assad M., Ghnimi S. (2019). Application of analytic hierarchy process to develop a weighting scheme for life cycle assessment of agricultural production. *Science of the Total Environment*, 665, 538–545. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.170
Ortiz-Sanchez M., Solarte-Toro J.C., Inocencio-García P.J., Cardona Alzate C.A. (2024). Sustainability analysis of orange peel biorefineries. Enzyme and Microbial Technology 172, 110327. https://doi.org/10.1016/j.enzmictec.2023.110327
Petrou E.C., Pappis C.P. (2014). Sustainability of Systems Producing Ethanol, Power, and Lignosulfonates or Lignin from Corn Stover: A Comparative Assessment. ACS Sustainable Chemistry & Engineering 2, 2527–2535. https://doi.org/10.1021/sc500421t
Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza: https://www.governo.it/sites/governo.it/files/PNRR.pdf
Potting J., Hekkert M., Worrell E., Hanemaaijer A. (2016). Circular Economy: Measuring innovation in product chains. PBL Netherlands Environmental Assessment Agency, The Hague. Available at: https://www.pbl.nl/uploads/default/downloads/pbl-2016-circular-economy-measuring-innovation-in-product-chains-2544.pdf
Pourjavad E., Shirouyehzad H., Shahin A. (2011). Analyzing RCM Indicators in Continuous Production Lines: A Case Study. *Journal of International Business Research*, 4 (4), 115. https://doi.org/10.5539/ibr.v4n4p115
Ritchie H. (2019, November 6). Food production is responsible for one-quarter of the world's greenhouse gas emissions. Our World in Data. https://ourworldindata.org/food-ghg-emissions
Reavis M., Ahlen J., Rudek J., Naithani,K. (2022). Evaluating Greenhouse Gas Emissions and Climate Mitigation Goals of the Global Food and Beverage Sector. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 5, 789499. https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.789499
Ritchie H., Roser M. (2024, February 16). Half of the world's habitable land is used for agriculture. Our World in Data. https://ourworldindata.org/global-land-for-agriculture#:~:text=In%20the%20visualization%2C%20we%20see,land%20is%20used%20for%20agriculture
Rivaluta ISTAT: https://rivaluta.istat.it/Rivaluta/;jsessionid=0498656ED1EA42676C7065DEB8ED2CAD
Superdecisions: https://www.superdecisions.com
Romero-Perdomo F.; Gonzales-Curbelo M.A. (2023). Integrating Multi-Criteria Techniques in Life-Cycle Tools for the Circular Bioeconomy Transition of Agri-Food Waste Biomass: A Systematic Review. *Sustainability*, 15, 5026. https://doi.org/10.3390/su15065026
Saaty T.L. (1980). The Analytic Hierarchy Process, New York, McGraw Hill.
Saaty T.L. (1986). Axiomatic Foundation of the Analytic Hierarchy Process. *Management* Science, *32*(7), 841–855. http://www.jstor.org/stable/2631765
Salomone R., Saija G., Mondello G., Giannetto A., Fasulo S., Savastano D. (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. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.06.154
Tabatabaie S.M.H., Tahami H., Murthy G.S. (2018). A regional life cycle assessment and economic analysis of camelina biodiesel production in the Pacific Northwestern US. *Journal of Cleaner Production*, 172, 2389–2400. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.172
Tan J., Tan R.R., Aviso K.B., Promentilla M.A.B., Sulaiman N.M.N. (2017). Study of microalgae cultivation systems based on integrated analytic hierarchy process–life cycle optimization. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 19, 2075–2088. https://doi.org/10.1007/s10098-017-1390-5

Teh K.C., Tan R.R., Aviso K.B., Promentilla M.A.B., Tan J. (2019). An integrated analytic hierarchy process and life cycle assessment model for nanocrystalline cellulose production. *Food and Bioproducts Processing*, 118, 13–31. https://doi.org/10.1016/j.fbp.2019.08.003

Teigiserova D.A., Hamelin L., Tiruta-Barna L., Ahmadi A., And Thomsen M. (2022). Circular bioeconomy: Life cycle assessment of scaled-up cascading production from orange peel waste under current and future electricity mixes. *Science of The Total Environment*, 812, 152574. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152574

Torkayesh A.E., Rajaeifar M.A., Rostom M., Malmir B., Yazdani M., Suh S., Heidrich O. (2022). Integrating life cycle assessment and multi criteria decision making for sustainable waste management: Key issues and recommendations for future studies. *Renewable and Sustainable Energy Review*, 168, 112819. https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112819

Tran M.H., Lee B., Lee H., Brigljević B., Lee E.Y., And Lim H. (2022). Sustainable biopolyol production via solvothermal liquefaction silvergrass saccharification residue: Experimental, economic, and environmental approach. *Science of The Total Environment*, 847, 157668. https://doi.org /10.1016/j.scitotenv.2022.157668

Wang B., Song J., Ren J., Li K., Duan H., And Wang X. (2019). Selecting sustainable energy conversion technologies for agricultural residues: A fuzzy AHP-VIKOR based prioritization from life cycle perspective. *Resources, Conservation and Recycling*, 142, 78–87. https://doi.org/10.1016/ j.resconrec.2018.11.011

Yang M., Rosentrater K.A. (2019). Life cycle assessment and techno-economic analysis of pressure sensitive bio-adhesive production. *Energies*, 12 (23), 4502. https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113302

Appendice

Tabella A1. I KPI identificati nella revisione della letteratura

KPI ambientali		
KPI	**Unità**	**Riferimento**
Potenziale di riscaldamento globale	kgCO2 eq	(Bartzas e Komnitsas, 2020; Lijó et al., 2018; Li et al., 2023; Teh et al., 2019; Hafyan et al., 2020; Wang et al., 2018; Tran et al., 2022; Tan et al., 2017; Nasution et al., 2020)
Potenziale di eutrofizzazione	kg PO4 eq	(Bartzas e Komnitsas, 2020; Lijó et al., 2018; Li et al., 2023; Nasution et al., 2020)
Impronta energetica	KWh	(Tan et al., 2017)
Domanda di energia cumulativa (CED)	MJ/kg	(Bartzas e Komnitsas, 2020)
Potenziale di acidificazione	kg SO2 eq	(Bartzas e Komnitsas, 2020; Lijó et al. 2018; Li et al., 2023)
Potenziale di riduzione dell'ozono	kg CFC-11 eq	(Tran et al., 2022)
Formazione di ozono fotochimico	μg/m³	(Li et al., 2023)
Rifiuti solidi	Qualitativo	(Li et al., 2023)
Mitigazione degli NOx	μg/m³ o g/kg	(Wang et al., 2018)
Mitigazione dell'SO2	μg/m³ o g/kg	(Wang et al., 2018)
Danno alla diversità dell'ecosistema	Qualitativo	(Petrou e Pappis, 2014)
Formazione di particolato fine	kgPM2.5-eq.	(Tran et al., 2022)
Tossicità per l'uomo (HT)	Unità tossica comparativa per la salute umana	(Li et al., 2023; Teh et al., 2019; Petrou e Pappis, 2014; Nasution et al., 2020)
Impoverimento dell'acqua	m3	(Li et al., 2023; Petrou e Pappis, 2014; Nasution et al., 2020)
Implementazione della chimica verde	Non specificato	(Petrou e Pappis, 2014)
Scarico del COD	mg di ossigeno / L di acqua	(Wang et al., 2018)
KPI economici		
KPI	**Unità**	**Riferimento**
Spese in conto capitale (CAPEX)	Euro	(Lijó et al. 2018; Hafyan et al., 2020; Tran et al. 2022)
Spese operative (OPEX)	Euro	(Lijó et al., 2018; Hafyan et al., 2020; Tran et al. 2022)
Ricavo dall'energia recuperata	Euro/kWh	(Lijó et al., 2018)
Ricavi da bioprodotti	Euro/quantità di bioprodotto	(Lijó et al., 2018)
Margine lordo	%	(Bartzas e Komnitsas, 2020)

Segue **Tabella A1.** I KPI identificati nella revisione della letteratura

KPI economici		
KPI	**Unità**	**Riferimento**
Flusso di cassa previsto per 30 anni	Euro	(Patrou e Pappis, 2014)
Maturità del mercato / commerciabilità	Qualitativo	(Petrou e Pappis, 2014)
Ritorno sull'investimento	%	(Wang et al., 2018)
Valore attuale netto	Euro	(Wang et al., 2018)
Periodo di ritorno (PBP)	Anno	(Wang et al., 2018)
Costo unitario	Euro	(Wang et al., 2018)
Tasso di rendimento interno (IRR)	%	(Petrou e Pappis, 2014)
KPI sociali		
KPI	**Unità**	**Riferimento**
Impatto visivo	Qualitativo	(Lijó et al., 2018)
Impiego	Numero di posti di lavoro	(Lijó et al., 2018; Wang et al., 2018; Petrou e Pappis, 2014)
Esposizione agli odori	Qualitativo	(Lijó et al., 2018)
Percezione del rischio	Qualitativo	(Lijó et al., 2018)
Accettazione	Qualitativo	(Wang et al., 2018)
Età del lavoratore	Età media	(Bartzas e Komnitsas, 2020)
Livello di istruzione	Qualitativo	(Bartzas e Komnitsas, 2020)
Adattabilità delle politiche	Qualitativo	(Wang et al., 2018)
Supporto alle parti interessate	N. di corsi di formazione/seminari seguiti dagli agricoltori	(Bartzas e Komnitsas, 2020)
Partecipazione ad associazioni	Anni di coinvolgimento	(Bartzas e Komnitsas, 2020)
KPI tecnici		
KPI	**Unità**	**Riferimento**
Maturità della tecnologia	Qualitativo	(Teh et al., 2019; Wang et al., 2018; Petrou e Pappis, 2014)
Complessità	Qualitativo	(Teh et al., 2019)
Produttività/ rendimento	kg di prodotto finale / kg di input	(Bartzas e Komnitsas, 2020; Teh et al., 2019)
Efficienza energetica	Non specificato	(Wang et al., 2018)

Segue **Tabella A1.** I KPI identificati nella revisione della letteratura

KPI tecnici		
KPI	**Unità**	**Riferimento**
Grado di energia	%	(Wang et al., 2018)
Potenziale di sviluppo	Qualitativo	(Wang et al., 2018)
KPI di sicurezza		
KPI	**Unità**	**Riferimento**
Indice di danno da esplosione e incendio	Qualitativo	(Hafyan et al., 2020)
Indice di danno da tossicità	Qualitativo	(Hafyan et al., 2020)

Tabella A2. I KPI aggiuntivi selezionati

KPI ambientali		
KPI	**Unità**	**Riferimento**
Uso di energia primaria (PEU)	MJ	(Eriksson e Spångberg, 2017)
Consumo di elettricità	MWh o kWh	(Kanchanapiya e Tantisattayakul, 2023)
Recupero netto di energia	Rapporto	(Bolaji et al., 2021)
Inquinamento atmosferico	Non specificato	(Illankoon et al., 2023)
Uso del suolo	PDF - m2 - anno o Kg Cdeficit	(Teigiserova et al., 2022)
Flessibilità tecnica	Qualitativo	(Koskiaho et al., 2020)
Robustezza tecnica	Qualitativo	(Koskiaho et al., 2020)
Indice dei materiali rinnovabili (RMI)	kg di energie rinnovabili / kg di input	(Ortiz-Sanchez et al., 2024)
KPI economici		
KPI	**Unità**	**Riferimento**
Rapporto di turnover (TR)	Rapporto	(Ortiz-Sanchez et al., 2024)
Costo totale	Euro	(Bolaji et al., 2021)
Disponibilità	Qualitativo	(Bolaji et al., 2021)
Impatto sull'economia locale	Qualitativo	(Koskiaho et al., 2020)
KPI sociali		
KPI	**Unità**	**Riferimento**
Accettazione	Qualitativo	(Wang et al. 2018)
Usabilità		(Illankoon et al., 2023)
Flessibilità	Qualitativo	(Illankoon et al., 2023)
Rischio di esposizione agli inquinanti	Qualitativo	(Koskiaho et al., 2020, basato su Johannesdottir et al., 2019)
Rapporto tra salario minimo e salario di sussistenza	Rapporto	(Ortiz-Sanchez et al., 2024)