



ORIGINAL ARTICLE | ARTÍCULO ORIGINAL

Weighted Environmental Impact of Microalgal Biomass Aimed at Carotenoids Production

Impacto ambiental ponderado da biomassa microalgal visando a produção de carotenóides

Dr.C. Pedro Antonio Rodríguez-Ramos^I, Dr.C. Ana Teresa Lombardi^{II}, M.Sc. Camila Candido^{II}

^I Universidad Tecnológica de La Habana “José Antonio Echeverría”, Facultad de Ingeniería Mecánica, Grupo de Combustibles Alternativos, Marianao, La Habana, Cuba.

^{II} Universidade Federal de São Carlos, Departamento de Botânica, Centro de Ciências Biológicas e da Saúde Laboratório de Biotecnologia de Algas, São Carlos, Brasil.

ABSTRACT. The application of a method for determining the weighted environmental impact of the life cycle of microalgae, with the purpose of carotenoids production, is described in this paper. The environmental impact is calculated, through a Weighted Matrix. The impact of 20 activities of the life cycle of microalgae, in 19 medium level impact categories and in 4 final level impact categories are shown (matrix base 20*19*4). This evaluation shows that microalgae are friendly with the environment. The achieved results, verify that microalgae are an excellent biomass that can be used for the production of compounds of high added value.

Keywords: Weighted Matrix, Life Cycle, Compounds, High Added Value.

RESUMO. Este estudo visa à aplicação de um método para determinação do impacto ambiental ponderado de estágios e atividades do ciclo de vida das microalgas, com a finalidade de produção de carotenóides. O impacto ambiental é calculado pela matriz de ponderação de impacto ambiental. Foi analisado o impacto das 20 atividades do ciclo de vida de microalgas em 19 categorias de impacto de nível médio e em 4 categorias de impacto de nível final (Matriz base 20*19*4). Esta avaliação mostrou que as microalgas são benéficas ao meio ambiente, e que sua biomassa pode ser utilizada para a produção de compostos com alto valor agregado.

Palavras-chave: matriz de ponderação, ciclo de vida, compostos, alto valor agregado.

INTRODUCTION

Microalgae have the potential to meet the growing energy demand expected in the coming decades. These organisms have many advantages over traditional terrestrial crops in biofuel production. Among these advantages, it is the ability to produce biomass per area and time unit, representing a large productivity beyond the obtained by the main land cultures, used as feedstock for production of other derivatives. Another feature in favor of microalgae is that they do not require fertile land and clean water, because they can be produced at marginal areas without competing with food production. However, there is no common consensus in the short term, on the economic viability of other products production from these organisms (De Azeredo, 2012).

Microalgae have been the subject of studies for multiple purposes, especially by the United States and Brazil, through

INTRODUÇÃO

É de conhecimento que as microalgas apresentam um potencial para suprir a crescente demanda de energia prevista para as próximas décadas. Estes organismos têm inúmeras vantagens sobre as culturas terrestres tradicionais na produção de biocombustíveis. Entre essas vantagens, a capacidade de produzir biomassa por unidade de área e tempo, o que representa uma produtividade muito além das obtidas pelas principais culturas terrestres, utilizadas como matéria prima na produção de outros derivados. Outra característica a favor das microalgas é o fato de que elas não necessitam de terras férteis e água potável. Portanto, podem ser produzidas em áreas marginais, sem competir com a produção de alimentos. Entretanto, não há um consenso comum, em curto prazo, sobre a viabilidade econômica da produção de outros produtos a partir desses organismos (de Azeredo, 2012)

research programs that began in the 70's, but which are gaining prominence only now. These unicellular organisms inhabit almost all existing environments. However, in most cases, the microalgae live in marine environments.

Currently, there are studies for an efficiently production from biomass, in particular the microalgae, destined to food, energy and biofuels. Many centers in Spain, USA, Cuba, Brazil, Japan, China; etc. develop research in order to produce various microalgae products with high added value.

The production of microalgae has benefits that can be summarized in three areas: economic, environmental and social.

Economic - their biomass is renewable, which will allow greater diversification. The raw material of interest and by-products generated from their processes can have other uses (insecticides, fertilizers, animal feed, etc.), according to economic viability. With this, we can develop agribusiness, reduce imports and generate new exportable products.

Environmental - the production and use of biomass can contribute to the regeneration of soils unsuitable for agriculture, increase biodiversity and reduce global warming through carbon sequestration. Currently the production of fuels from biomass, including biodiesel and bioethanol, are growing in the world, due to the need to find a viable solution to produce sustainably energy. The microalgae biomass meets this demand.

Social - it has a positive social impact as it creates jobs, improving the quality of life from this people.

Increased knowledge about the importance of protecting the environment from the potential impacts associated with manufacturing and / or consumed products, has increased the interest in developing methods to understand and manage better these impacts. One method developed for this purpose is the life cycle analysis (LCA). The life cycle includes taking all phases of the existence of a product or service, including extraction, production, distribution, use and disposal. This cycle can be understood by the term "from cradle to grave".

The evaluation of the life cycle is a technique for determining the aspects and potential environmental impacts associated with a product. It consists in compiling an inventory of relevant inputs and outputs of the systems, evaluating the potential environmental impacts associated with them, and to interpret results and objectives of the study (ISO Standard, 2006a, 2006b).

LCA is a methodological tool to analyze quantitatively the CV of products / activities within the context of its environmental impact. The application of this tool has undergone major changes during the nineties. It was quickly incorporated at the highest strategic levels Joint Research Center y European Commission (2010), including in decision-making and corporate policy levels. LCA is currently used to evaluate a wide range of products and activities, from design to finished product, also in energy systems, food production and transportation alternatives.

In addition, research conducted by universities, institutes and consulting firms have further developed the procedures and methods to carry out the LCA. It was declared by the

As microalgas vêm sendo objeto de estudos para múltiplos fins, principalmente pelos Estados Unidos, Brasil e outros países, através de programas de pesquisa que se iniciaram na década dos anos 70, mas que só agora estão ganhando destaque. Esses organismos unicelulares habitam em quase todos os ambientes existentes. Entretanto, em sua maioria, as microalgas são de ambientes marinhos. Atualmente existem estudos para obter de forma eficiente a partir de biomassa, em especial da microalgal; alimento, energia e biocombustíveis. Muitos centros em Espanha, EUA, Cuba, Brasil, Japão e China, desenvolvem pesquisas visando produzir vários produtos de alto valor agregado a partir de microalgas.

A produção destes organismos tem benefícios que podem ser resumidos em três áreas: econômica, ambiental e social.

Econômica - sua biomassa é renovável, o que irá permitir uma maior diversificação. A matéria-prima de interesse e subprodutos gerados a partir de seus processos podem ter outros usos (inseticidas, fertilizantes, ração animal, etc.) de acordo com a viabilidade econômica. Com isso, pode se desenvolver o agronegócio, reduzir as importações e gerar novos produtos exportáveis.

Ambiental - a produção e utilização da biomassa pode contribuir para a regeneração dos solos impróprios para a agricultura, aumentar a biodiversidade e reduzir o efeito estufa, através do sequestro de carbono. Atualmente a produção de combustíveis a partir de biomassa, entre os quais o biodiesel e o bioetanol, estão crescendo no mundo, devido à necessidade de encontrar uma solução viável para produzir energia de forma sustentável. A biomassa de microalgas atende a essa demanda.

Social - provoca um impacto social positivo, já que cria empregos e melhora a qualidade de vida.

Maior conhecimento sobre a importância de proteger o meio ambiente e os impactos potenciais associados aos produtos manufaturados e / ou consumidos, tem aumentado o interesse no desenvolvimento de métodos para melhor compreender e diminuir esses impactos. Um dos métodos desenvolvidos para este fim é a Análise de Ciclo de Vida (ACV). O Ciclo de Vida (CV) inclui todas as fases da existência de um produto ou serviço incluindo a extração, produção, distribuição, utilização (uso) e eliminação. Esse ciclo pode ser entendido pela expressão "do berço ao túmulo".

A avaliação do CV é uma técnica para determinar os aspectos e impactos ambientais potenciais associados com um produto. Consiste em compilar um inventário das entradas e saídas dos sistemas relevantes, avaliando os potenciais impactos ambientais associados a estas, assim como de interpretação dos resultados e de impacto dos objetivos do estudo (ISO Standard, 2006a, 2006b). A ACV é uma ferramenta metodológica para analisar quantitativamente o CV de produtos/atividades dentro do contexto de seu impacto ambiental. A aplicação desta ferramenta sofreu grandes mudanças durante os anos 90. Ela foi rapidamente incorporada nos mais altos níveis estratégicos Joint Research Center y European Commission (2010), inclusive na tomada de decisões e níveis políticos corporativos. A ACV é usada atualmente para avaliar uma ampla gama de produtos e atividades, desde a concepção até o produto acabado, também em sistemas de energia, produção de alimentos e alternativas de transporte.

Além disso, pesquisas realizadas por universidades, institutos de pesquisa e empresas de consultoria têm desenvolvido ainda mais

Joint Research Center y European Commission, (2010), that the scope of an LCA depends on the objective to be achieved, so this methodology is still under development. This constant development clearly shows that there is no universal method applicable in all situations.

This study aims to evaluate the environmental impact of the production of microalgae biomass on a large scale, by evaluating its life cycle (LCA) in order to obtain compounds with high added value, for example, carotenoids.

METHODS

The current literature (Goedkoop *et al.*, 2009), considers the impact categories associated with medium and final levels. These 19 types of medium level impact are shown in Table 1.

os procedimentos e métodos para realizar a ACV. Foi declarado Joint Research Center y European Commission, (2010), que o escopo de uma ACV depende do objetivo a ser alcançado, por isso, esta metodologia ainda está em desenvolvimento. Constante, mostrando claramente que não existe um método universal aplicável em todas as situações. Com este estudo objetivou-se avaliar o impacto ambiental da produção de biomassa microalgal em escala ampliada, através da avaliação de seu ciclo de vida (ACV), visando à obtenção de compostos com alto valor agregado, por exemplo, os carotenóides.

MÉTODOS

A atual literatura Goedkoop *et al.* (2009), considera as categorias de impacto associadas a um nível médio e a um nível final. Essas 19 categorias de impacto ao nível médio, estão apresentadas na Tabela 1.

TABLE 1. Categories of Environmental Impacts Associated with Medium Level, Their Indicators and Measures (Goedkoop *et al.*, 2009)

TABELA 1. Categorias de impactos ambientais associados a um nível médio e seus indicadores e medidas (Goedkoop *et al.* 2009)

Categories of Environmental Impacts of Medium Level	Indicator	Measure
1. Ozone Depletion (OD)	Estratospheric Concentration	Decrease of DU ar^{-1}
2. Human Toxicity (HT)	Weighted Risk	--
3. Ionizing Radiation (IR)	Uranium Absorbed Dose	$\text{kg d U}^{235}\text{hm an}^{-1}$
4. Photochemical Oxidants Formation (FOF)	Ozone Photochemical Concentration	kg
5. Particulate Matter Formation (PMF)	Pm10 Ingestion	kg
6. Climate Changes (CC)	Infrared Waves Emission	$\text{Wano}^{-1}\text{m}^{-2}$
7. Terrestrial Ecotoxicity (TE)	Weighted Concentration Risk	$\text{m}^2 \text{g ar}^{-1}$
8. Terrestrial Acidification (TA)	Saturation Base	$\text{m}^2 \text{g ar}^{-1}$
9. Agricultural Area Occupation (AAO)	Occupation of Farmland	$\text{m}^2 \text{g ar}^{-1}$
10. Urban Area Occupation (UAO)	Occupation	$\text{m}^2 \text{g ar}^{-1}$
11. Natural Area Transformation (NAT)	Virgin Land Transformation	m^2
12. Marine Ecotoxicity (Me)	Weighted Concentration Risk	$\text{m}^2 \text{g ar}^{-1}$
13. Aquatic Eutrophication (AE)	Nitrogen Concentration	$\text{g ar kg}^{-1}\text{m}^{-3}$
14. Eutrophication of Freshwater (EUFW)	Phosphorus Concentration	$\text{g ar kg}^{-1}\text{m}^{-3}$
15. Freshwater Toxicity (FWEC)	Weighted Concentration Risk	$\text{m}^2 \text{g ar}^{-1}$
16. Depletion of Water (DW)	Amount of Water	m^3
17. Depletion of Mineral Resources (DMR)	Amount Decrease	kg^{-1}
18. Exhaustion of Fossil Resources (EFR)	Gross Calorific Value	MJ
19. Pandemics, Disasters, Corrosion, others (PDC)	Irreversible Destruction of the Architectural Heritage	g ar^{-1}

In turn, these 19 impact categories were pooled and transformed into 4 final level of impact categories (Table 2).

Por sua vez, essas 19 categorias de impacto foram agrupadas e transformaram-se em 4 categorias de impacto de nível final (Tabela 2).

TABLE 2. Categories of Impact to Medium and Final Levels (Goedkoop *et al.*, 2009)

TABELA 2. Categorias de impacto ao nível médio e final (Goedkoop *et al.* 2009)

Categories of Environmental Impacts of Medium Level	Categories of Impacts of Final Level
1. Ozone Depletion (OD)	Damage to Human Health (HH)
2. Human Toxicity (HT)	
3. Ionizing Radiation (IR)	
4. Photochemical Oxidants Formation (FOF)	
5. Particulate Matter Formation (PMF)	
6. Climate Changes (CC)	

Categories of Environmental Impacts of Medium Level	Categories of Impacts of Final Level
7. Terrestrial Ecotoxicity (TE)	
8. Terrestrial Acidification (TA)	
9. Agricultural Area Occupation (AAO)	
10. Urban Area Occupation (UAO)	Damage to Environmental Biodiversity (EB)
11. Natural Area Transformation (NAT)	
12. Marine Ecotoxicity (ME)	
13. Aquatic Eutrophication (AE)	
14. Eutrophication of Freshwater (EUF)	
15. Freshwater Toxicity (FEC)	
16. Depletion of Water (DW)	Damage to the Availability of Resources (AR)
17. Depletion of Mineral Resources (DMR)	
18. Exhaustion of Fossil Resources (EFR)	
19. Pandemics, Disasters, Corrosion, others (PDC)	Damage to the Artificial Environment (AE)

- Damage to human health (HH): the life-cycle assessments seek commonly to infer the damage of a production process to human health, using the concept of disability-adjusted life years (DALY). The values for DALY have been reported for a wide range of diseases (Goedkoop *et al.*, 2009)
- Damage to environmental biodiversity (EB): ecosystems are heterogeneous and complex to monitor. Various treaties, decrees and informal agreements (UNCED, PNUMA, the European Council) have included a list of attributes that are important to humanity such as biodiversity, esthetic and cultural values, ecological functions and services, ecological resources and functional information (genetic material) (Goedkoop *et al.*, 2009).
- Damage to the availability of resources (AR): it considers the risk to which humanity will be exposed due to the lack of resources for future generations. Resources depletion is the only problem that must be monitored permanently (Goedkoop *et al.* (2009).
- Damage to the artificial environment (AE): this impact category considers the damage to the quality of life, causing pandemics and disasters to human heritage (Goedkoop *et al.*, 2009).
- To apply the methodology of LCA, we should consider four phases (Goedkoop *et al.*, 2009):
 - Phase 1.- Determining the objectives and scope of the study
The scope and level of detail of an LCA depends on the subject matter and its utility use. The depth and breadth of LCA can differ considerably depending on the specific purpose for which it is intended.
 - Phase 2.- Inventory analysis
It is an inventory of the input and output of the studied system and involves the relationship among the data necessary to respond to the defined goal.
 - Phase 3.- Impact assessment
The objective of this phase is to provide additional information to help assessing the previous stage and understand better their environmental significance.
 - Phase 4.- Interpretation

- Danos à saúde humana (SH): as avaliações do ciclo de vida buscaram comumente inferir os danos de um processo produtivo para a saúde humana, utilizando o conceito: anos de vida ajustados por incapacidade (DALY- *disability-adjusted life years*). Os valores para os O DALY já foram relatados para uma ampla gama de doenças (Goedkoop *et al.* 2009).
- Danos à biodiversidade do ambiente (BA): os ecossistemas são heterogêneos e complexos para monitorar. Vários tratados, decretos e acordos informais (UNCED, PNUMA, Conselho Europeu) têm incluído uma lista de atributos considerados importantes para a humanidade, tais como: a biodiversidade, os valores estéticos e culturais, funções e serviços ecológicos, recursos ecológicos e informações funcionais (material genético) (Goedkoop *et al.* (2009).
- Danos na disponibilidade de recursos (DR): Considera o risco que a humanidade estará exposta por falta de recursos para as gerações futuras. O esgotamento de recursos é o único problema que deve ser monitorado permanentemente (Goedkoop *et al.* (2009).
- Danos ao ambiente artificial (AA): Esta categoria de impacto considera o dano à qualidade de vida, provocando pandemias e desastres ao patrimônio humano (Goedkoop *et al.* 2009).
- Para aplicar a metodologia da ACV, devem-se considerar quatro fases (Goedkoop *et al.* 2009):
 1. Determinar os objetivos e o âmbito do estudo: O âmbito e o nível de detalhe de uma ACV dependem do objeto de estudo e seu uso utilitário. A profundidade e a amplitude da ACV podem diferir consideravelmente, dependendo da finalidade específica a que se destina.
 2. Análise do Inventário: É um inventário dos dados de entrada e de saída do sistema estudado e envolve a relação entre os dados necessários para responder ao objetivo definido.
 3. Avaliação de Impacto: O objetivo desta fase é fornecer informação adicional para ajudar a avaliar o estágio anterior e melhor compreender o seu significado ambiental.

The interpretation of the LC occurs in the final phase of the LCA process, where results are summarized and discussed as a basis for conclusions, recommendations and decisions in accordance with the purpose and scope.

RESULTS AND DISCUSSION

Qualitative Assessment of the Potential Environmental Impact of Microalgae Biomass

Table 3 shows the results of the qualitative assessment of the impact of microalgae LC. These data were obtained from the literature review (Shelef *et al.*, 1984; Sawayama *et al.*, 1995; Richmond, 2004; Rodríguez *et al.*, 2009, 2015; Widjaja *et al.*, 2009; Collet *et al.*, 2011; Benjamin, 2013) and the consultation with mechanical engineers, chemists and biologists, as well as by working skills of an expert's team (Delphi technique, Kendall w).

4. Interpretação: A interpretação do CV ocorre na fase final do processo de ACV, onde os resultados são resumidos e discutidos como base para conclusões, recomendações e tomada de decisões, em conformidade com o objetivo e alcance.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Avaliação qualitativa do potencial de impacto ambiental da biomassa de microalgas.

A Tabela 3 mostra os resultados da avaliação qualitativa do impacto do CV de microalgas. Esses dados foram obtidos a partir da revisão da literatura (Rodríguez *et al.*, 2015; Rodríguez *et al.*, 2009; Collet *et al.*, 2011; Richmond, 2004; Widjaja & Chien, 2009; Benjamin, 2013; Sawayama & Inoue, 1995; Shelef & Sukenik, 1984), e consulta com engenheiros mecânicos, químicos e biólogos, bem como pelas habilidades de trabalho em equipe com especialistas (técnica Delphi, Kendall w).

TABLE 3. Results of the Qualitative Assessment of the Potential Environmental Impact of Microalgae Biomass. (+) Positive Impact, (-) Negative Impact, (0) No Impact.

TABELA 3. Resultados da avaliação qualitativa do potencial de impacto ambiental da biomassa de microalgas. Impacto positivo (+), impacto negativo (-), nenhum impacto (0)

Impact (Damage) to the Factor	Resume	Impact (Damage) to the Factor	Resume
1. Climatic: Greenhouse Effect	+	16. Population	+
2. Air Quality. Mitigation of Atmospheric Emissions	+	17. Emigration	0
3. Geology	0	18. Agriculture	0
4. Geomorphology	0	19. Industry	+
5. Land Occupation	+	20. Services	+
6. Agricultural Viability. Competition with Other Food Crops	+	21. Education	+
7. Erosion. Soil Conservation	0	22. Human Health	+
8. Vegetation. Desertification	0	23. Jobs Qualities	+
9. Fauna	0	24. Scenic, Historical and Cultural Heritage	+
11. Surface Water. Liquid Affluent Pollutants	0	25. National Institutional Policy	+
12. Ground Water. Liquid Affluent Pollutants	0	26. Generation of Waste Contaminants	0
13. Aquatic Biology	0	27. Depletion of Non-Renewable Natural Resources	+
14. Transport and Logistics	-	28. Recyclability	+
15. Water Use	-	29. Biodegradable	+

From the above table it can be concluded:

- Positive impact: 53.57%
- No impact 39.29%
- -Negative impact 7.14%

Observing the results obtained, the microalgae are viable for economic activities and the negative impacts to the environment are very low.

Life Cycle Assessment of the Microalgae Production

In Figure 1 the life cycle of microalgae for the purpose of obtaining carotenoids, their stages (6) and activities (20) are shown.

A partir da tabela acima, pode-se concluir:

- Impacto positivo: 53,57%.
- Nenhum impacto 39,29%.
- Impacto negativo 7,14%.

Pelos resultados obtidos, as microalgas são viáveis para atividades econômicas, sendo os impactos negativos ao meio ambiente muito baixos.

Avaliação do Ciclo de Vida da produção de microalgas

Na Figura 1 é apresentado o CV das microalgas com o objetivo de obtenção de carotenóides, estágios (6) e atividades (20).

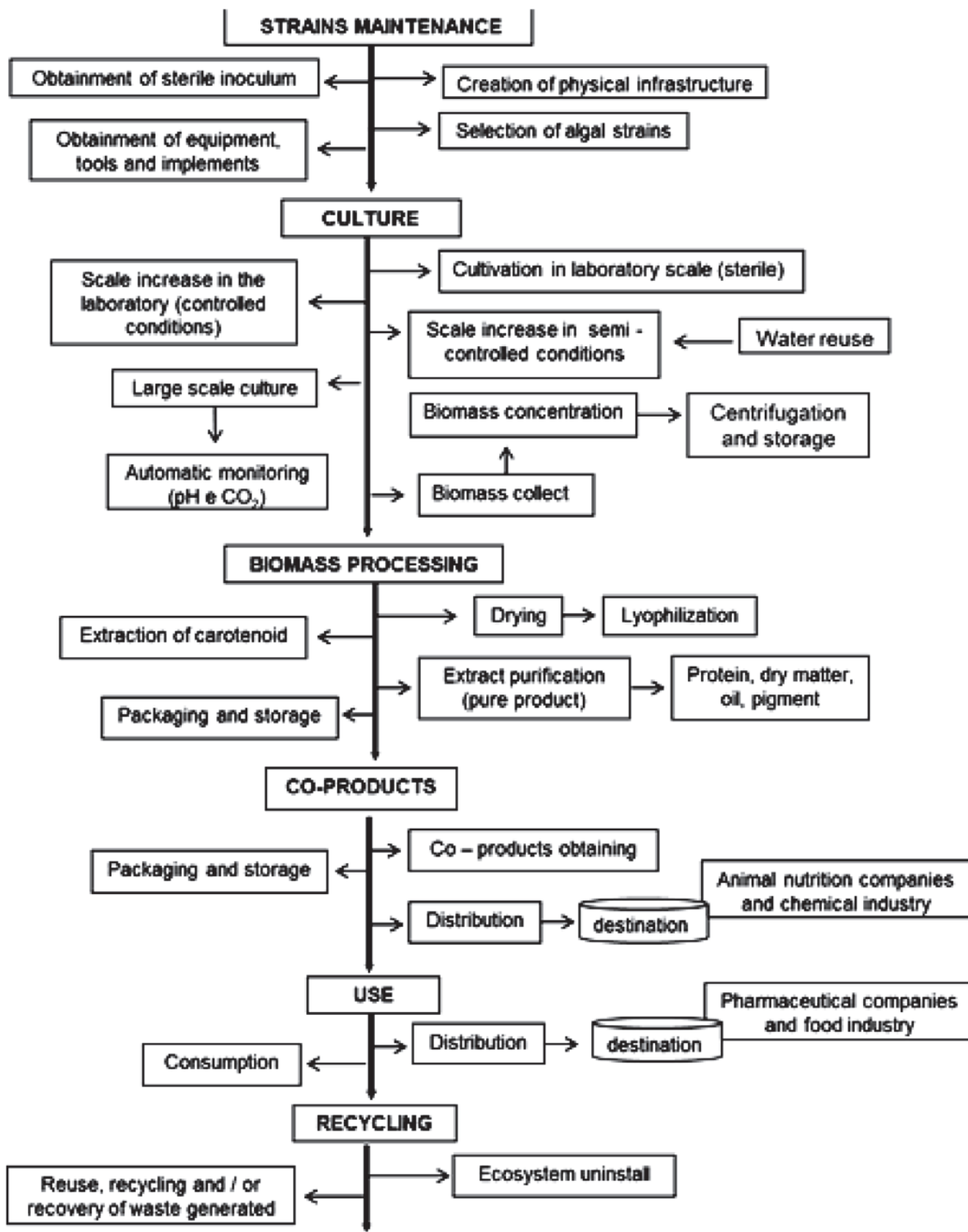


FIGURE 1. Stages and Activities of the Microalgae Life Cycle (Own Origination)

FIGURA 1. Estágios e atividades do ciclo de vida das microalgas. Fonte própria

Phase 1: Determining the purpose and scope of the LCA.
 Objective: To determine qualitatively the environmental impact of microalgae.
 Scope: production of carotenoids from the microalgae.
 Phase 2: Analysis of inventory.
 Two data inventories were made:
 - The inventory of impact categories at the medium and final levels, presented in Table 1.
 - The inventory of LC microalgae activities and the list of activities that are part of LC, that are presented in Table 4.

1- Fase da determinação da finalidade e âmbito da ACV
 Objetivo: determinar qualitativamente o impacto ambiental de microalgas.
 Âmbito: produção de carotenóides a partir de microalgas.
 2- Fases de análise do inventario
 Dois inventários dos dados foram feitos:
 - O inventário das categorias de impacto ao nível medio e final, apresentados na Tabela 1.
 - O inventário das atividades do CV das microalgas e a lista de atividades que fazem parte do CV, são apresentados na Tabela 4.

TABLE 4. Life Cycle of Microalgae Aimed at Carotenoids Production
TABELA 4. Ciclo de vida das microalgas visando à produção de carotenóides

Stages	Activity
1. Strains Maintenance	1. Creation of physical infrastructure. 2. Selection of algal strains. 3. Obtainment of sterile inoculum. 4. Obtainment of equipment, tools and implements. 5. Cultivation in laboratory scale (sterile). 6. Scale increase in the laboratory (controlled conditions).
2. Culture	7. Scale increase in semi - controlled conditions. 8. Large scale culture. 9. Biomass collection. 10. Drying.
3. Biomass processing	11. Extraction of carotenoid 12. Extract purification (pure product).
4. Co-products	13. Packaging and storage. 14. Co-products obtaining. 15. Packaging and storage. 16. Co-products distribution.
5. Use	17. Products distribution. 18. Consumption.
6. Recycling	19. Ecosystem uninstalling. 20. Reuse, recycling and/or recovery of waste generated

Phase 3: Impact assessment.
 The Environmental Impact Weighting Matrix (20 * 19 * 4 base) is used, which assesses the impact of the 20 activities of microalgae LC in 19 environmental categories and their consequences for the environment [5]. To conduct the evaluation, each activity is analyzed in each environmental category, evaluating the impact magnitude according to the recommendations in Table 5. The applied classification is an own proposal of the authors.

3 - Fase de Avaliação do impacto
 Para este efeito, é usada a matriz de ponderação de Impacto Ambiental (base 20*19*4), que avalia o impacto das 20 atividades do CV de microalgas nas 19 categorias ambientais e suas consequências para o ambiente (ICVD 2010). Para realizar a avaliação, cada atividade é analisada em cada categoria ambiental, avaliando a magnitude do impacto de acordo com as recomendações contidas na Tabela 5. A classificação aplicada é proposta própria dos autores.

TABLE 5. Scale for impact assessment (Own origination)
TABELA 5. Escala para a avaliação de impacto.

Significant	Moderate	Little	No impact
3	2	1	0

The evaluation of each pair of activities (environmental category) can be seen in Table 6. The identification of each activity can be found in Table 4. The value assigned to each activity pair of environmental category is the result of a work executed with the group technique (Delphi-Kendall) with the participation of experts (mechanics, engineers, chemists and biologists).

A avaliação de cada par de atividades (categoria ambiental) pode ser vista na Tabela 6. A identificação de cada uma das atividades pode ser encontrada na Tabela 4. O valor atribuído a cada par de atividades de categoria ambiental é o resultado da execução do trabalho com técnica grupal (Delphi-Kendall) com a participação de especialistas (mecânicos, engenheiros químicos e biólogos).

TABLE 6. Primary Data for the Environmental Impact Weighting Matrix
TABELA 6. Dados primários para a Matriz de Ponderação do Impacto Ambiental

Activity	Impact Categories to the Medium Level																				
	OD	HT	IR	F	PMF	CC	TE	TA	A	U	NA	ME	AE	E	U	F	E	DW	DMR	E	P
	1	2	3	O	5	6	7	8	AO	AO	T	12	13	F	C	16	17	FR	DC		
1	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0		
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0		
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0		
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0		
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0		
8	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	2	2	0	3	2	1	0	0		
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0		
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0		
11	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0		
12	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0		
13	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0		
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0		
16	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0		
17	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0		
18	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0		
20	1	1	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0		

Phase 4: Interpretation.

Knowing the environmental effects values for each activity, it is possible to calculate the average of the impact which has effect on the environment by:

- Absolute value of the activity (i): $i = \sum (\text{environmental impact } j) / 19$ (1)
 where $i=1...20; j=1...19$.
- Relative value of the activity i (%): $\% = \text{absolute activity impact } i / 3 \cdot 100$ (2)
- Specific weight of the activity i (%): $i\% = \text{relative value of the activity } / 20$ (3)
- Sum k (%) = \sum actual specific activities belonging to k (4)
 where $k=1...6$, corresponding to the number of stages of microalgae LC (Table 4).

Table 7. Shows the impact values for each of the activities listed in Table 4.

4 - Fase de interpretação:

Conhecidos os valores que têm os efeitos ambientais para cada atividade, é possível calcular o valor médio do impacto que tem efeito no meio ambiente por:

- Valor absoluto da atividade $i = \sum (\text{impacto ambiental } j) / 19$ (1)
 onde $i=1...20; j=1...19$
- Valor relativo da atividade i (%) = $\text{Impacto Absoluto da atividade } i / 3 \cdot 100$ (2)
- O peso específico da atividade i (%) = $\text{Valor relativo da atividade } / 20$ (3)
- Soma k (%) = \sum reais específicos de atividades pertencentes a k (4) onde $k = 1...6$ correspondente ao número de estágios do CV de microalgas (Tabela 4).

Na tabela 7 são apresentados os valores de impacto para cada uma das atividades enumeradas na Tabela 4.

TABLE 7. Activities Impact Values
TABELA 7. Valores de impacto das atividades

Stages	Activities	Absolute Value (i)	Relative Value (%)	Specific Weight (%)	Stages Average Values (%)	Sum of Specific Weights %
Strains Maintenance	1	0,263	8,77	0,44	0,1316	0,53
	2	0,000	0,00	0,00		
	3	0,053	1,75	0,09		
	4	0,000	0,00	0,00		
	5	0,105	3,51	0,18		
Culture	6	0,053	1,75	0,09	0,3158	1,58
	7	0,158	5,26	0,26		
	8	0,579	19,30	0,96		
	9	0,053	1,75	0,09		
	10	0,053	1,75	0,09		
Biomass Processing	11	0,105	3,51	0,18	0,1535	0,61
	12	0,105	3,51	0,18		
	13	0,105	3,51	0,18		
	14	0,000	0,00	0,00		
Co-product	15	0,053	1,75	0,09	0,1462	0,44
	16	0,211	7,02	0,35		
Use	17	0,211	7,02	0,35	0,3070	0,61
	18	0,158	5,26	0,26		
Recycling	19	0,053	1,75	0,09	0,3509	0,70
	20	0,368	12,28	0,61		

The total impact on the ecosystem is 4.47

Furthermore, it is possible to calculate from Table 5, the environmental impact by the medium level impact categories. The weighting of these effects is calculated as:

• Relative value of the environmental impact j (%) = $\sum (\text{activity}_j) / 20 / 3 \cdot 100$ (5)

where

$j = 1 \dots 19; i = 1 \dots 20$

Figure 2 presents the results from the environmental impact analysis in accordance with each of the indicators that characterize the categories of impact in medium level.

As can be seen, the greatest impact corresponds to the exhaustion of fossil resources with a value of 1.14%. As it can be seen, the greatest impact corresponds to the exhaustion of fossil resources with a value of 1.14%. Other categories with lower results than the latter are: human toxicity and depletion of water with 0.61% and 0.53%, respectively. There are 9 categories that have no impact, in which the value of the indicator is 0.

Figure 3 shows the magnitude of the environmental impact in the four final level categories.

The sum of these four variables is the total impact equivalent to 4.47%. There is not damage to the artificial environment. The data presented in Table 8 are a proposal of the authors.

A partir deste quadro observa-se que:

O impacto total sobre o ecossistema é de 4,47%.

1. As atividades do estágio Co-produto são as menos impactantes com 0,44%.
2. As atividades do estágio Cultura mostram um impacto de 1,58%, sendo o período de maior impacto.
3. As atividades dos estágios Processamento de Biomassa e Uso mostram um impacto de 0,61%.
4. As atividades do estágio Manutenção das Cepas mostram um impacto de 0,53%.
5. As atividades do estágio Reciclagem mostram um impacto de 0,70%.

Além disso, é possível calcular a partir da Tabela 5, o impacto ambiental por categorias de impacto a nível médio. A ponderação relativa destes efeitos é calculada como:

Valor relativo do impacto ambiental j (%) = $\sum (\text{atividades}_j) / 20 / 3 \cdot 100$ (5)

onde

$j = 1 \dots 19; i = 1 \dots 20$

Na Figura 2 são apresentados os resultados da análise do impacto ambiental, de acordo com cada um dos indicadores que caracterizam as categorias de impacto ao nível médio.

Como pode-se observar, o maior impacto corresponde ao esgotamento de recursos fósseis com um valor de 1,14%. Outras categorias com resultado menor do que esta última são: a toxicidade humana e o esgotamento de água com 0,61% e 0,53% respectivamente. Existem 9 categorias que não apresentam impacto, cujo valor do indicador é 0.

A Figura 3 mostra a magnitude do impacto ambiental nas quatro categorias de impacto a nível final, onde:

Dano à saúde humana: 1,23%.

Dano à diversidade do ambiente: 1,23%.

Dano para a disponibilidade de recursos: 2,02%.

Dano para o ambiente artificial: 0%.

A soma destas quatro variáveis é o impacto total equivalente a 4,47%.

O maior impacto de CV das microalgas é o que está associado com os danos à disponibilidade de recursos, seguido de danos à saúde humana e à biodiversidade do meio ambiente. Os danos para o ambiente artificial, no tem. Os dados apresentados na Tabela 8 são uma proposta dos autores.

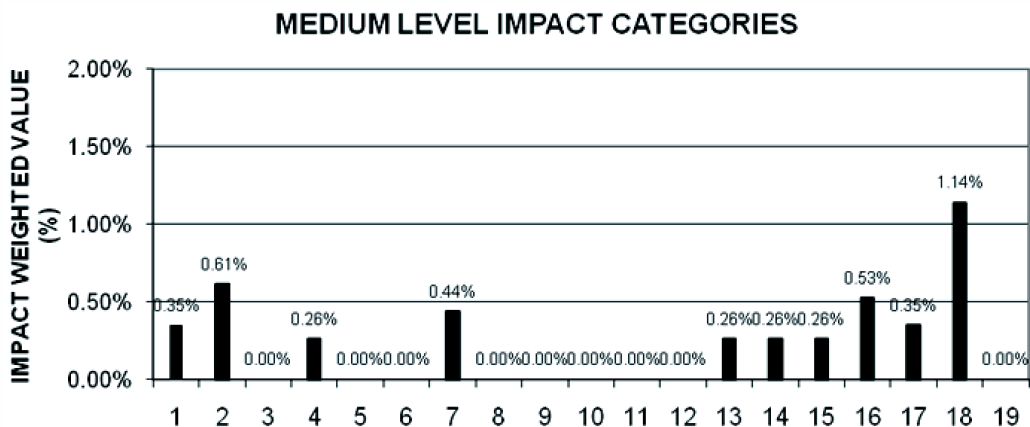


FIGURE 2. Weighting of the Environmental Impact by Medium Level Categories.
 FIGURA 2. Ponderação do impacto ambiental por categorias de impacto de nível médio.

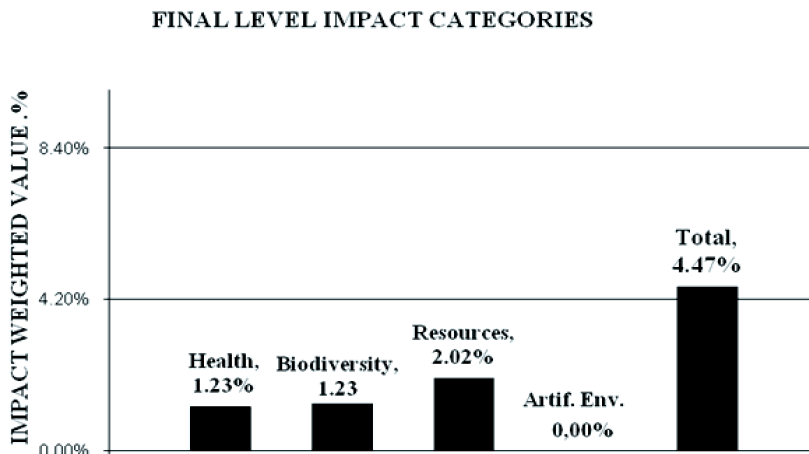


FIGURE 3. Weighting of the environmental impact by medium level categories.
 FIGURA 3. Ponderação de impacto ambiental por categorias de impacto ao nível final.

TABLE 8. Effect Evaluation in Accordance with the Impact (%)

TABELA 8. Avaliação do efeito de acordo com o impacto (%)

Weighted Value (%)	Impact
67 - 100	Significant
34 - 66	Mod rate
1 - 33	Little
0	No impact

Considering Table 8, that shows the weighted value in relation to the impact (%), it was found that microalgae biomass can be considered as a low impact activity. In previous work, Rodríguez *et al.* (2009, 2015), used the impact matrix for the analysis of the biomasses from sugarcane and *Jatropha curcas* (Pinion–meek) impact. Table 9 shows that comparison.

Considerando a Tabela 8, que mostra o valor ponderado (%) em relação ao impacto, concluiu-se que as microalgas podem ser descritas como pouco impactantes. Em trabalhos anteriores, Rodríguez *et al.* (2009) e Rodríguez *et al.* (2015) usaram a matriz de impacto para a análise do impacto das biomassas de cana-de-açúcar e *Jatropha curcas* (Pinhão–manso). A Tabela 9 mostra essa comparação.

TABLE 9. Comparison of the Weighted Environmental Impact of Biomass LC
TABELA 9. Comparação do impacto ambiental ponderado do CV de biomassas.

Biomass - Destination	Weighted Impact (%)
Sugarcane - ethanol.	15,71
<i>Jatropha curcas</i> - oil for biofuel.	7,26
Microalgae-carotenoid .	4,47

CONCLUSIONS

- By using the weighting matrix, it is possible to determine the weighted magnitude of the impact. With this information, it is possible to know the environmental impact of each activity of the LC and make decisions to reduce it.
- The weighted environmental impact of microalgae production is 4.47%, which is classified as small impact and shows that the biomass is environmentally sustainable. That points this biomass as a source of domestic production, and competitiveness with other final products.
- The production of carotenoids from microalgae is actually sustainable from an environmental point of view. However, a deeper analysis of the life cycle and throughout the supply chain is necessary. Due to the increasing number of issues related to global climate change, an assessment of the potential of microalgae to mitigate emissions of greenhouse gases, especially CO₂, would be important.

ACKNOWLEDGMENT



CONCLUSÕES

- Com a aplicação da matriz de ponderação é possível determinar a magnitude ponderada do impacto. A partir desta informação pode-se conhecer o impacto ambiental de cada atividade do CV e tomar decisões para reduzi-lo.
- O impacto ambiental ponderado da produção de microalgas é de 4,47%, o que o classifica como impacto pequeno e demonstra que a biomassa é ambientalmente sustentável. Isso aponta esta biomassa como fonte de produção nacional, tendo competitividade com outros produtos finais.
- A produção de carotenóides a partir de microalgas é de fato sustentável do ponto de vista ambiental. Porém, faz-se necessária uma análise mais profunda do ciclo de vida e de toda a cadeia de produção.
- Devido ao aumento crescente das questões relacionadas às mudanças climáticas globais, uma avaliação do potencial das microalgas para mitigar as emissões de gases de efeito estufa, em especial de CO₂, seria importante.

AGRADECIMENTOS

Este artigo forma parte dos resultados do projeto internacional: Cultivo das microalgas *Chlorella sorokiniana* e *Chlorella vulgaris* visando à produção de carotenóides e proteínas para atender às indústrias farmacêutica, alimentícia, cosmética e de química fina, que apoiou a FAPESP através do Processo nº 2015/07315-2, o que propiciou a colaboração conjunta entre a Universidade Tecnológica de Havana, Fac. Ing. Mecânica, Cuba e a Universidade Federal de São Carlos, Departamento de Botânica, Centro de Ciências Biológicas e da Saúde, Laboratório de Biotecnologia de Algas, São Carlos, Brasil. Agradecemos pelo valioso apoio à pesquisa.

REFERENCES / REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BENJAMIN, K.S.: *Nutrient and Carbon-Dioxide Requirements for Large-Scale Microalgae Biofuel Production*, UTAH State University, M.Sc. Thesis, Logan, Utah, USA, 67 p., 2013.

COLLET, P.; HÉLIAS, A.; LARDON, L.; RAS, M.; GOY, R.-A.; STEYER, J.-P.: “Life-cycle assessment of microalgae culture coupled to biogas production”, *Bioresource Technology*, ser. Special Issue: Biofuels - II: Algal Biofuels and Microbial Fuel Cells, 102(1): 207-214, 1 de enero de 2011, ISSN: 0960-8524, DOI: 10.1016/j.biortech.2010.06.154.

- DE AZEREDO, V.B.S.: *Produção de biodiesel a partir do cultivo de microalgas: Estimativa preliminar de custos e perspectivas para o Brasil*, [en línea], Universidade Federal do Rio de Janeiro, Tese de Mestrado, Rio de Janeiro, Brasil, 171 p., 2012, Disponible en: http://www.ppe.ufrrj.br/ppe/production/tesis/vinicius_barbosa.pdf, [Consulta: 1 de septiembre de 2016].
- GOEDKOOP, M.; HEIJUNGS, R.; HUIJBREGTS, M.; SCHRYVER, A.; STRUIJS, J.; ZELM, R.: *A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level*, [en línea], no. 1, Inst. Ruimte en Milieu - Ministerie van Volkshuisvesting - Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer, Characterisation, 126 p., ReCiPe 2008, 6 de enero de 2009, Disponible en: http://www.leidenuniv.nl/cml/ssp/publications/recipe_characterisation.pdf, [Consulta: 1 de septiembre de 2016].
- ISO STANDARD: *ISO Environmental management — Life cycle assessment: principles and framework*. ISO Standard 14040, no. 14040, Geneva, 2006a.
- ISO STANDARD: *ISO Environmental management—Life cycle assessment — Requirements and guidelines*, no. 14044, Geneva, 2006b.
- JOINT RESEARCH CENTER; EUROPEAN COMMISSION: *International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook - General guide for Life Cycle Assessment - Detailed guidance*, Ed. Joint Research Center - European Commission, Luxembourg, 414 p., 2010, ISBN: 978-92-79-19092-6.
- RICHMOND, A.: *Handbook of Microalgal Culture*, [en línea], Ed. Blackwell Publishing Ltd, Oxford, UK, 588 p., 2004, ISBN: 978-0-470-99528-0, Disponible en: <http://doi.wiley.com/10.1002/9780470995280>, [Consulta: 1 de septiembre de 2016].
- RODRÍGUEZ, P.; OMETTO, A.R.; LOMBARDI, G.; PÉREZ, O.; ZUMALACÁRREGUI, L.: “Matriz numérica para el cálculo del impacto ambiental de un modelo sostenible de producción de etanol”, *Ingeniería Química*, 36(1): 10-17, 2009, ISSN: 0797-4930, 0797-4930.
- RODRÍGUEZ, P.; OMETTO, A.R.; LOMBARDI, G.; PÉREZ, O.; ZUMALACÁRREGUI, L.: “Impacto medio ambiental del aceite de Jatropha curcas utilizado como biocombustible”, *Ingeniería Química*, 44(1): 14-21, 2015, ISSN: 0797-4930, 0797-4930.
- SAWAYAMA, S.; INOUE, S.; DOTE, Y.; YOKOYAMA, S.-Y.: “CO₂ fixation and oil production through microalga”, *Energy Conversion and Management*, ser. Proceedings of the Second International Conference on Carbon Dioxide Removal, 36(6): 729-731, 1 de junio de 1995, ISSN: 0196-8904, DOI: 10.1016/0196-8904(95)00108-P.
- SHELEF, G.; SUKENIK, A.; GREEN, M.: *Microalgae harvesting and processing: a literature review*, [en línea], no. SERI/STR-231-2396, 6204677, Inst. Technion Research and Development Foundation Ltd., Haifa, Israel, 1 de agosto de 1984, Disponible en: <http://www.osti.gov/servlets/purl/6204677-jDec19/>, [Consulta: 1 de septiembre de 2016].
- WIDJAJA, A.; CHIEN, C.-C.; JU, Y.-H.: “Study of increasing lipid production from fresh water microalgae *Chlorella vulgaris*”, *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 40(1): 13-20, 1 de enero de 2009, ISSN: 1876-1070, DOI: 10.1016/j.jtice.2008.07.007.

Received: 30/01/2017.

Approved: 11/09/2017.

Pedro Antonio Rodríguez-Ramos, Prof. Titular, Universidad Tecnológica de La Habana “José Antonio Echeverría”, Facultad de Ingeniería Mecánica, Grupo de Combustibles Alternativos, Marianao, La Habana, Cuba. E-mail: parr@ceim.cujae.edu.cu

Ana Teresa Lombardi, E-mail: lombardi@ufscar.br

Camila Candido, E-mail: cacandido90@gmail.com

Note: the mention of commercial equipment marks, instruments or specific materials obeys identification purposes, there is not any promotional commitment related to them, neither for the authors nor for the editor.