



## **DETERMINAÇÃO E REDUÇÃO DA PEGADA ECOLÓGICA EM UM INSTITUTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA USANDO ABORDAGEM MULTICRITÉRIO**

## **DETERMINATION AND REDUCTION OF THE ECOLOGICAL FOOTPRINT IN A TECHNOLOGICAL AND SCIENTIFIC INSTITUTE USING MULTI-CRITERIA ANALYSIS**

**Lucas Rodrigues Amaduro**

SAEG – Instituto Federal Fluminense / Campos dos Goytacazes, RJ, Brasil.

[lucazrodriguez93@gmail.com](mailto:lucazrodriguez93@gmail.com)

**Lucas Ramos Hissa**

SAEG – Instituto Federal Fluminense / Campos dos Goytacazes, RJ, Brasil.

[lucas.ra.hi@gmail.com](mailto:lucas.ra.hi@gmail.com)

**Whanderley Souza Freitas**

SAEG – Instituto Federal Fluminense / Campos dos Goytacazes, RJ, Brasil.

[whanderley.souza@gmail.com](mailto:whanderley.souza@gmail.com)

**Milton Erthal Junior**

SAEG – Instituto Federal Fluminense / Campos dos Goytacazes, RJ, Brasil.

[miltonerthal@hotmail.com](mailto:miltonerthal@hotmail.com)

**Henrique Rego Monteiro da Hora**

SAEG – Instituto Federal Fluminense / Campos dos Goytacazes, RJ, Brasil.

[dahora@gmail.com](mailto:dahora@gmail.com)

**Resumo** – Com o agravamento nesses últimos anos de problemas relacionados ao meio ambiente, efeito estufa e temperatura da terra, torna-se cada vez mais necessário tomar uma postura sustentável em relação ao meio ambiente. Para tanto faz-se necessário a adoção de indicadores. Neste contexto aparece o conceito de pegada ecológica, que visa mensurar a demanda de recursos naturais renováveis para neutralizar as emissões de carbono decorrentes do nosso estilo de vida. Este trabalho apresenta uma análise do cálculo da pegada ecológica aplicado a um Polo de inovação localizado em Campos dos Goytacazes. Para a determinação foram consideradas as emissões geradas pelo consumo de energia elétrica, gasolina e diesel do instituto, sua frota e geradores. Também foi calculada a pegada ecológica gerada pela área construída. Para os cálculos foram utilizados sempre fatores fornecidos por fontes oficiais, como o governo federal, bem como métodos consagrados anteriormente no Brasil e no mundo, visando assim a obtenção dos resultados mais confiáveis possíveis. Foram encontrados os valores da pegada ecológica tanto para cada dimensão individualmente quanto para o instituto como um todo, utilizando o valor da taxa de absorção média de carbono da cana de açúcar, levando em consideração que a região onde se encontra o pólo de inovação analisado é uma grande produtora da planta. Além do cálculo da pegada ecológica foi aplicado um método multicritério de tomada de decisão chamado Analytic Hierarchy Process (AHP), objetivando a priorização das dimensões da pegada ecológica para que então seja possível tomar medidas no sentido de mitigar os níveis de emissão de carbono nas dimensões que oferecem maior efetividade. A aplicação do método AHP mostrou que as medidas que oferecem resultados no sentido de diminuir as emissões de carbono relacionado ao consumo de energia elétrica devem ser priorizadas.

**Palavras-chave:** Indicadores de Sustentabilidade; Processo de análise Hierárquica - AHP; ICT – instituição de Ciência e Tecnologia;

**Abstract** – With the increase in recent years of problems related to the environment, greenhouse effect and temperature of the earth, increasingly necessary it is to make a sustainable attitude to the environment. Therefore, it is necessary to adopt indicators. In this context arises the concept of ecological footprint, which aims to measure the demand of renewable natural resources to neutralize the carbon emissions from our lifestyle. This paper presents an analysis of the calculation of the ecological footprint applied to an innovation pole located in Campos dos Goytacazes. For the determination were considered the emissions generated by electricity, gasoline and diesel consumption by the institute, its fleet and generators. It was also calculated the ecological footprint generated by the built area. For the calculations were always been used factors provided by official sources, such as the federal government as well as previously established methods in Brazil and around the world, so in order to obtain the most reliable results as

possible. The ecological footprint values were found both for each dimension individually and for the institute as a whole, using the value of the sugar cane carbon absorption average rate, taking into account that the analyzed innovation pole is located in a region that is a major producer of this plant. In addition to calculating the ecological footprint we applied a multi-criteria method of decision-making called Analytic Hierarchy Process (AHP), in order to prioritize the dimensions of the footprint so that then you can take steps to mitigate carbon emission levels in the dimensions offering greater effectiveness. The application of AHP method showed that the measures that provide results in order to reduce carbon emissions related to electricity consumption should be prioritized.

**Keywords:** Sustainability Indicators; AHP - Analytic Hierarchy Process; Technological and Scientific Institute;

## 1. Introdução

A temperatura do planeta Terra vem aumentando drasticamente nos últimos anos. Com a emissão de gases do efeito estufa a média de temperatura de superfície da terra aumentou ao longo do século 20 cerca de 0,6 °C, sendo a década de 1990 a mais quente e 1998 o ano mais quente. Novas análises de dados para o hemisfério norte indicam que o aumento da temperatura no século 20 foi o maior de qualquer século dos últimos 1.000 anos (HOUGHTON, 2001). Já no século 21 para se conseguir atingir a meta de menos de 2° C de aumento da temperatura em relação ao período pré-industrial, será necessária uma mudança radical nos nossos costumes. Um atraso nos esforços de mitigação ou disponibilidade limitada de tecnologias que emitem menos carbono, aumenta ainda mais esses desafios (EDENHOFER, 2014).

A necessidade de assumir uma postura sustentável, bem como a compreensão de como implementá-la, torna necessária a identificação de indicadores práticos, bem como a compreensão de como eles podem ser medidos ao longo do tempo, a fim de constatar o progresso atingido (SCHWARZ et al., 2002).

No entanto surge o seguinte questionamento: como mensurar a sustentabilidade? A primeira proposta vem de Wackernagel et al. (1999), onde propõem um modelo definitivo de pegada ecológica. Tal conceito oferece uma maneira metodologicamente simples, porém abrangente para uma tarefa de

contabilizar a demanda de recursos naturais. Ele rastreia as demandas nacionais de energia e outros recursos e os traduzem em áreas biologicamente produtivas necessárias para suprir esta demanda.

Além do dimensionamento dos impactos causado pela atividade humana, faz-se necessário a análise de quais seriam as dimensões prioritárias à adoção de medidas que os tornem o menor possível.

Neste contexto, a utilização de métodos multicritérios para tomada de decisão aparecem como uma ferramenta útil no que tange a priorização das medidas a serem tomadas. Tais métodos fornecem uma abordagem quantitativa sistemática visando tomar melhores decisões (CORNER; KIRKWOOD, 1991).

Neste trabalho serão identificadas e priorizadas, através do método de análise multicritério AHP, as diversas dimensões da pegada ecológica de um polo de pesquisa localizado em Campos dos Goytacazes, com o intuito de nortear a implantação de medidas mitigadoras futuramente.

## **2. Revisão Bibliográfica**

### **2.1. Análise Bibliométrica**

Com o intuito de realizar um levantamento bibliométrico, foi comandada uma pesquisa bibliográfica na base de conhecimento Scopus ([www.scopus.com](http://www.scopus.com)), das palavras-chave:

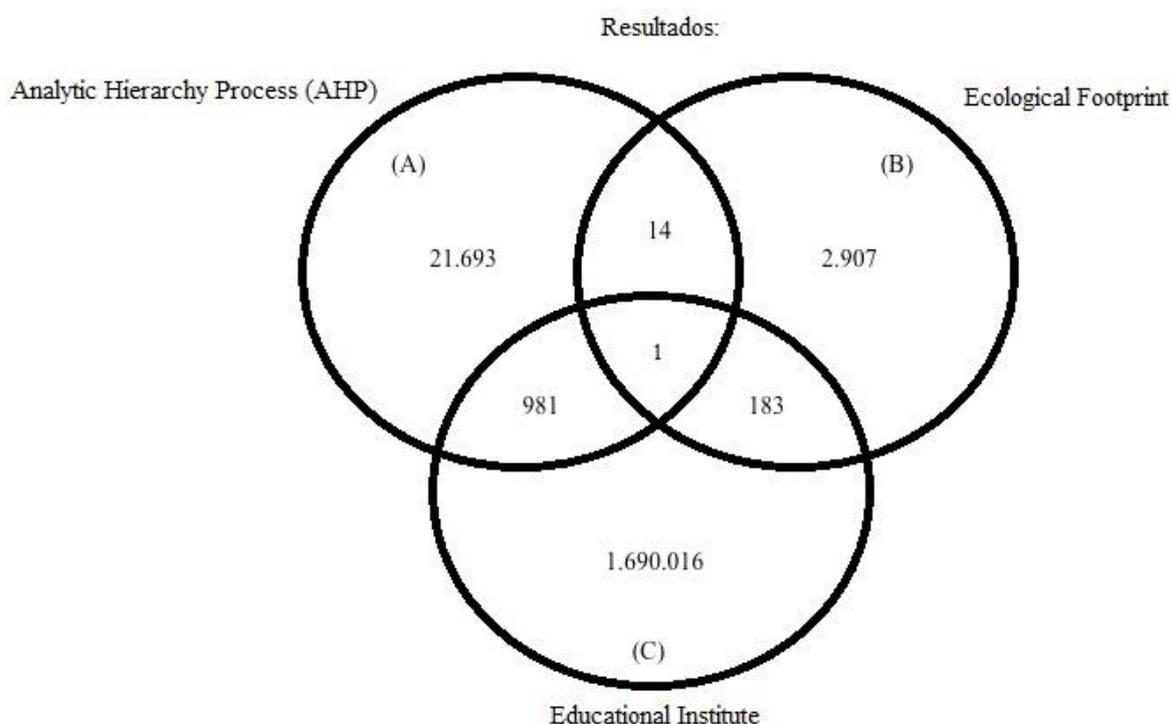
- "AHP" e respectivos tesouros (A);
- "ecological footprint" (B);
- "ICT" - Institutos de Ciência e Tecnologia, seus tesouros "University", "Educational Institute" e "academy" (C).

O número de ocorrências em cada pesquisa pode ser visualizado na Tabela 1.

Tabela 1 - Pesquisa na base scopus

| <b>Termos</b>       | <b>Pesquisa</b>  | <b>Ocorrências</b> |
|---------------------|--|--------------------|
| <b>A</b>            | TITLE-ABS-KEY(AHP) OR TITLE-ABS-KEY>Analytic Hierarchy Process)  | 22.689             |
| <b>B</b>            | TITLE-ABS-KEY(ecological footprint)  | 3.105              |
| <b>C</b>            | (TITLE-ABS-KEY(Technological and scientific institute) OR TITLE-ABS-KEY(educational institute) OR TITLE-ABS-KEY(university) OR TITLE-ABS-KEY(academy))   | 1.691.181          |
| <b>A B</b><br>∩     | (TITLE-ABS-KEY(AHP) OR TITLE-ABS-KEY>Analytic Hierarchy Process)) AND TITLE-ABS-KEY(ecological footprint)  | 15                 |
| <b>B C</b><br>∩     | (TITLE-ABS-KEY(ecological footprint) AND (TITLE-ABS-KEY(Technological and scientific institute) OR TITLE-ABS-KEY(educational institute) OR TITLE-ABS-KEY(university) OR TITLE-ABS-KEY(academy)))   | 184                |
| <b>A C</b><br>∩     | ((TITLE-ABS-KEY(Technological and scientific institute) OR TITLE-ABS-KEY(educational institute) OR TITLE-ABS-KEY(university) OR TITLE-ABS-KEY(academy)) AND (TITLE-ABS-KEY(ahp) OR TITLE-ABS-KEY>Analytic Hierarchy Process)))   | 982                |
| <b>A B C</b><br>∩ ∩ | (TITLE-ABS-KEY(ecological footprint) AND (TITLE-ABS-KEY(Technological and scientific institute) OR TITLE-ABS-KEY(educational institute) OR TITLE-ABS-KEY(university) OR TITLE-ABS-KEY(academy)) AND (TITLE-ABS-KEY(AHP) OR TITLE-ABS-KEY>Analytic Hierarchy Process))) | 1                  |

A busca realizada na base Scopus minerou 1.714.616 documentos científicos (Figura 1).



**Figura 1. Diagrama de Venn apresenta os resultados da bibliometria.**

A pesquisa envolvendo todos os termos e seus respectivos tesouros, retornou apenas um resultado compatível, no qual Yao e Jin (2013) definem um método de avaliação de um campus ecológico, trabalhando com sistema de índices e utilizando AHP para ponderar estes índices. Foi utilizada a Pegada Ecológica como indicador de sustentabilidade e algumas medidas foram propostas (Ex: marketing verde, sensibilização de professores e alunos, promoção da educação ambiental, manutenção das áreas verdes, água de superfície, nível de ruído, entre outros) para definir e avaliar um campus ecológico.

## 2.2. Desenvolvimento Sustentável

Surgida na Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, a definição de desenvolvimento sustentável é "o desenvolvimento capaz de suprir as necessidades da geração atual, sem comprometer a capacidade de atender as necessidades das futuras gerações. É o desenvolvimento que não esgota os recursos para o futuro" (Nosso Futuro Comum, 1988).

Para ser alcançado, o desenvolvimento sustentável depende de planejamento

e do reconhecimento de que os recursos naturais são finitos. O desenvolvimento sustentável sugere o desenvolvimento em qualidade em vez de quantidade, com a redução do uso de matérias-primas e produtos e o aumento da reutilização e da reciclagem.

Segundo Leff (2009), a crise ambiental questionou algumas de nossas crenças mais arraigadas: não só a supremacia humana sobre todas as outras criaturas no planeta e o direito de dominar e explorar a natureza em prol do "homem", mas o próprio sentido da existência humana, fundamentada no crescimento econômico e progresso tecnológico. Este progresso foi forjado na racionalidade econômica, moldado pelas ferramentas da ciência clássica, e criar uma estrutura, um modelo, que estabeleceu as condições para a uma noção de que o progresso não foi baseado na co-evolução das culturas com os seus ambientes, mas em um desenvolvimento econômico com base num modo de produção que levou em seu código genético um imperativo de crescimento - de crescimento ilimitado!

### **2.3. Engenharia da Sustentabilidade**

É a prestação de serviços de engenharia de uma forma sustentável. Pressupõe que os serviços de engenharia sejam fornecidos para todas as pessoas de uma forma que, no presente e no futuro, sejam suficientes para prover as necessidades básicas das pessoas e comunidades, a preços acessíveis e sem prejudicar o meio ambiente (ROSEN et al., 2008).

Conforme exposto nas Diretrizes Curriculares Nacionais para os Cursos de Graduação em Engenharia 1, dentre as competências gerais que o egresso deve possuir está a do item XII- Avaliar o impacto das atividades da engenharia no contexto social e ambiental. Que ressalta a responsabilidade do engenheiro perante o contexto social e ambiental.

A Engenharia da sustentabilidade, apresenta-se a partir de uma perspectiva sistêmica, holística, de integração e interdisciplinaridade, além de desafiante, capaz de formar profissionais que promoverão o bem-estar dos diversos públicos impactados pela sua atuação (QUELHAS et al., 2011).

## 2.4. Indicadores Ecológicos

Segundo Fang et al. (2014), ao longo das últimas duas décadas, uma lista em expansão contínua de indicadores de estilo pegada foi introduzida para a comunidade científica com o objetivo de sensibilizar a opinião pública de como a humanidade exerce pressões sobre o meio ambiente. Uma compreensão mais profunda das conexões e interações entre diferentes pegadas é necessária em uma tentativa de apoiar os decisores políticos na medição e escolha de ambientes estratégicos de minimização de impacto. Combinando uma seleção de pegadas que abordam diferentes aspectos do ambiente e questões em um sistema integrado é, por conseguinte, um passo natural. O trabalho apresenta a ideia de desenvolver uma família de pegadas e quais pegadas são mais importantes para serem comparadas e integradas.

Com base na revisão da literatura em áreas afins, o ecológico, energia, carbono e pegada de água são utilizados como indicadores selecionados para definir uma família de pegadas. Segundo algumas pesquisas, as pegadas diferem em muitos aspectos mais do que apenas os impactos que elas são abordadas. Isso permite das quatro pegadas se complementarem utilizando a avaliação de impactos ambientais associados ao uso de recursos naturais e de descarga de resíduos. Avalia-se o desempenho da família de pegadas em termos de disponibilidade de dados, a complementaridade coberta, consistência metodológica e relevância política, e propor soluções e sugestões para melhorias. As principais conclusões são que a família de pegadas, que capta um amplo espectro de questões de sustentabilidade, é capaz de oferecer uma forma de imagem mais completa da complexidade ambiental para os decisores políticos e, em particular, em estudos de nível nacional. A pesquisa fornece novas pistas sobre a distinção entre avaliação de impacto ambiental e avaliação de sustentabilidade, servindo corretamente como uma referência para os esforços multidisciplinares em estimar limites planetários para a sustentabilidade global).

## **2.5. Métodos multicritério de tomada de decisão**

A tomada de decisão pode ser entendida como o estudo de identificação e escolha de alternativas para com o intuito de encontrar a melhor solução com base em diferentes fatores. Na tomada de decisões múltiplos critérios são estabelecidos para julgar as alternativas o que torna a escolha difícil. Os objetivos são geralmente conflitantes e, na maioria dos casos. Para facilitar este tipo de análise, uma família de ferramentas referidas como métodos multicritério de tomada de decisão ganharam terreno devido à necessidade de ter um método formalizado para auxiliar a tomada de decisões em situações que envolvem vários critérios (SAN CRISTÓBAL MATEO, 2012) .

## **3. Metodologia**

Esse trabalho visa apresentar uma metodologia para cálculo e diminuição do impacto ambiental em uma instituição de ensino. Para tal foi adotado o indicador de pegada ecológica para mensurar o impacto ambiental. Em posse dos valores das pegadas ecológicas de cada dimensão, foi aplicado o método AHP com o intuito de priorizar as dimensões da PE assim norteando a execução de futuras ações mitigatórias. A descrição da metodologia para o cálculo da pegada ecológica para cada uma dessas dimensões, serão demonstrados na seção 3.1.

### **3.1. Pegada ecológica**

A análise da Pegada Ecológica é uma ferramenta de contabilidade que possibilita estimar o consumo de recursos e desperdício de requisitos de assimilação de resíduos da população ou economia humana em termos correspondentes ao uso de terras produtivas (ROSEN et al., 2011).

Assim como é utilizado o Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) como um indicador de desenvolvimento, utiliza-se a pegada ecológica como indicador de demanda humana sobre o ambiente (MORAN et al., 2008).

O cálculo da pegada ecológica é realizado o cálculo da quantidade de energia e de carbono gastos, a quantidade de carbono fixado, as emissões líquidas e reais de carbono e então as emissões reais de CO<sub>2</sub>. Também pode-se incluir na avaliação para o cálculo da pegada ecológica a energia elétrica gasta, a água, o papel e a área construída (construção civil). Para essa metodologia serão incluídos no cálculo da pegada os valores de energia elétrica, consumo de combustível e a área construída.

### 3.1.1. Determinação da pegada ecológica do combustível

O cálculo da pegada ecológica em relação ao consumo de combustível foi feito conforme descrito em aplicação da metodologia Top-Down (DA SILVA et al., 2015) para cálculo da Pegada Ecológica dos veículos de uma Instituição de Ensino. A descrição da metodologia para o cálculo é demonstrada a seguir.

O primeiro passo é o cálculo do consumo de energia, equação 1, onde:

CC = consumo de energia (TJ)

CA = consumo aparente do combustível (m<sup>3</sup>)

Fconv = fator de conversão conforme tabela divulgada pelo Ministério de Minas e Energia (MME, 1999), sendo os valores 0,771 para a gasolina e 0,848 para o diesel.

Fcorr = fator de correção (adimensional) de poder calorífico superior (PCS) para poder calorífico inferior (PCI). Os fatores de correção para transformar o PCS em PCI, que são usados pela Comunicação Nacional, são 0,95 para os combustíveis sólidos e líquidos e 0,90 para os combustíveis gasosos.

$$CC = CA * Fconv * 45,2 * 10^{-3} * Fcorr$$

O segundo passo é o cálculo da quantidade de carbono, equação 2, onde:

QC = quantidade de carbono (GgC);

CC = consumo de energia (TJ);

Femiss = fator de emissão de carbono (tC/TJ) segundo tabela fornecida pelo

IPCC (1996c) e MCT (1999b), sendo os valores 18,9 para a gasolina e 20,2 para o diesel;

$10^{-3}$  = conversão de toneladas de carbono (tC) para gigagramas de carbono (GgC) .

$$QC = CC*Femiss*10^{-3}$$

O terceiro passo é o cálculo da quantidade de carbono fixado, equação 3, onde:

QCF = quantidade de carbono fixado;

(GgC) QC = quantidade de carbono no combustível (GgC);

FCFix = fração de carbono fixado (adimensional), que segundo MCT (1996b) é 0 para diesel e gasolina.

$$QCF = QC*FCFix$$

O quarto passo é o cálculo da quantidade das emissões líquidas de carbono, equação 4, onde:

ELC = emissões líquidas de carbono (GgC);

QC = quantidade de carbono no combustível (GgC);

QCF = quantidade de carbono fixado (GgC).

$$ELC = QC-QCF$$

O quinto passo é o cálculo das emissões reais de carbono, equação 5, onde:

ERC = emissões reais de carbono (GgC);

ELC = emissões líquidas de carbono (GgC);

FCO = fração de carbono oxidada (adimensional), que de acordo com tabela divulgada pelo IPCC (1996b) e MCT (1999) tem o valor de 0,99 tanto para diesel quanto para gasolina.

$$ERC = ELC*FCO$$

O sexto e último passo é o cálculo das emissões reais de carbono, equação 6, onde:

$ERCO_2$  = emissões reais de  $CO_2$  (Gg $CO_2$ );

ERC = emissões reais de carbono (GgC);

1 Gg $CO_2$  = [44/12] GgC.

$$ERCO_2 = ERC * \frac{44}{12}$$

### 3.1.2. Energia elétrica

Para calcular as emissões de  $CO_2$  ocasionadas pelo consumo de energia elétrica deve se usar a equação 7 (Rodríguez et al., 2008). Onde:

E = emissão (kg $CO_2$ );

C = consumo (unidade);

F = fator de emissão de  $CO_2$  (kg $CO_2$ /unidade).

$$E = C * F$$

Os fatores de emissão de  $CO_2$  associado a geração de energia elétrica no Brasil para cada mês no ano de 2014 divulgado pelo ministério de ciência, tecnologia e inovação (MCTi) pode ser conferido na tabela 2 no item 4.1.1.

### 3.1.3. Área construída

De acordo com Rodríguez et al. (2008), multiplica-se a área total construída ( $m^2$ ) e multiplica-se por um fator de emissão. O fator de emissão para área construída é de 520 kg $CO_2/m^2$  e o fator de emissão para área construída por ano, 10,4 kg $CO_2/m^2/ano$ . Considerando que a vida útil de um prédio é de 50 anos. Portanto, para uma análise de um ano apenas o valor obtido deve ser dividido por 50, resultando num fator de emissão de emissão da área construída/ano =  $m^2 \times 10,4$ .

### 3.1.4. Pegada Ecológica

A equação 8 apresenta o cálculo da Pegada Ecológica total, onde:

PE = Pegada Ecológica (ha);

E = Soma das emissões de CO<sub>2</sub> (MgCO<sub>2</sub>);

TAMC = Taxa de absorção média de carbono (MgCO<sub>2</sub>/ha/ano).

$$PE = \frac{ERCO_2}{TAMC}$$

## 4. Estudo de caso

A metodologia descrita no item 3 foi aplicada no polo de inovação tecnológica de Campos dos Goytacazes e o estudo de caso será apresentado a seguir em duas etapas:

- Cálculo da pegada ecológica atual;
- Definição de medidas para diminuir o impacto calculado.

### 4.1. Determinação de Pegada Ecológica do Polo de Inovação de Campos dos Goytacazes

Primeiramente, consultou-se as bases de dados estatísticos existentes no Polo de Inovação de Campos dos Goytacazes. Para analisar-se os gastos de consumo de energia, verifica-se as contas de luz do polo. Houve acesso aos dados relativos a 2013 e 2014, sendo assim considera-se com o período anual completo mais recente, 2014, valores apresentados na tabela 2. O passo seguinte foi, na mesma base de dados, verificar os dados referentes ao combustível consumido no polo no mesmo período de 2014, sendo o combustível dividido em dois grupos: Gasolina consumida pela frota automotiva e diesel consumida pela frota e pelos geradores. Os valores obtidos podem ser conferidos na tabela 3.

Em seguida através de uma consulta à planta do polo de inovação foi obtido o valor

da área construída que é de 900m<sup>2</sup>. Em posse desses dados foram aplicados os cálculos apresentados na metodologia.

#### 4.1.1. Impacto da energia elétrica

O cálculo da pegada ecológica para a energia elétrica pode ser visto na tabela 2.

Tabela 2. Cálculo da pegada ecológica para a energia elétrica.

| Mês       |     | Consumo<br>(KWh) |   | Fator de Emissão<br>(KgCO <sub>2</sub> /KWh) |   | Emissões<br>(KgCO <sub>2</sub> ) |
|-----------|-----|------------------|---|--|---|----------------------------------|
| Janeiro   | E = | 19355            | X | 0,0911                                       | = | 1.763,2405                       |
| Fevereiro | E = | 5200             | X | 0,1169                                       | = | 607,8800                         |
| Março     | E = | 7762             | X | 0,1238                                       | = | 960,9356                         |
| Abril     | E = | 6863             | X | 0,1310                                       | = | 899,0530                         |
| Maiο      | E = | 5704             | X | 0,1422                                       | = | 811,1088                         |
| Junho     | E = | 4922             | X | 0,1440                                       | = | 708,7680                         |
| Julho     | E = | 5426             | X | 0,1464                                       | = | 794,3664                         |
| Agosto    | E = | 5216             | X | 0,1578                                       | = | 823,0848                         |
| Setembro  | E = | 4855             | X | 0,1431                                       | = | 694,7505                         |
| Outubro   | E = | 7022             | X | 0,1413                                       | = | 992,2086                         |
| Novembro  | E = | 8056             | X | 0,1514                                       | = | 1.219,6784                       |
| Dezembro  | E = | 7148             | X | 0,1368                                       | = | 977,8464                         |
| Total     |     |                  |   |  | = | 11.252,9210                      |

#### 4.1.2. Impacto do combustível consumido

O cálculo da pegada ecológica para o combustível é apresentado na tabela 3.

Tabela 3. Cálculo da pegada ecológica para o combustível.

|          |          |                   |   |                               |   |                    |   |                 |   |           |   |      |   |                                  |
|----------|----------|-------------------|---|-------------------------------|---|--------------------|---|-----------------|---|-----------|---|------|---|----------------------------------|
| Gasolina | 5183l    | CC                | = | $\frac{5,183}{0} \text{ m}^3$ | * | 0,7710             | * | $\frac{45,}{2}$ | * | $10^{-3}$ | * | 0,95 | = | $\frac{0,171}{6} \text{ TJ}$     |
|          |          | QC                | = | $\frac{0,171}{6} \text{ TJ}$  | * | $\frac{18,900}{0}$ | * | $10^{-3}$       |   |           |   |      | = | $\frac{0,003}{2} \text{ GgC}$    |
|          |          | QCG               | = | $\frac{0,003}{2} \text{ GgC}$ | * | 0                  |   |                 |   |           |   |      | = | $\frac{0,000}{0} \text{ GgC}$    |
|          |          | ELC               | = | $\frac{0,003}{2} \text{ GgC}$ | - | 0                  |   |                 |   |           |   |      | = | $\frac{0,003}{2} \text{ GgC}$    |
|          |          | ERC               | = | $\frac{0,003}{2} \text{ GgC}$ | * | 0,9900             |   |                 |   |           |   |      | = | $\frac{0,003}{2} \text{ GgC}$    |
|          |          | ERCO <sub>2</sub> | = | $\frac{0,003}{2} \text{ GgC}$ | * | 44/12              |   |                 |   |           |   |      | = | $\frac{0,011}{8} \text{ GgCO}_2$ |
| Diesel   | 5535,15l | CC                | = | $\frac{5,535}{2} \text{ m}^3$ | * | 0,8480             | * | $\frac{45,}{2}$ | * | $10^{-3}$ | * | 0,95 | = | $\frac{0,201}{6} \text{ TJ}$     |
|          |          | QC                | = | $\frac{0,201}{6} \text{ TJ}$  | * | $\frac{20,200}{0}$ | * | $10^{-3}$       |   |           |   |      | = | $\frac{0,004}{1} \text{ GgC}$    |
|          |          | QCG               | = | $\frac{0,004}{1} \text{ GgC}$ | * | 0                  |   |                 |   |           |   |      | = | $\frac{0,000}{0} \text{ GgC}$    |
|          |          | ELC               | = | $\frac{0,004}{1} \text{ GgC}$ | - | 0                  |   |                 |   |           |   |      | = | $\frac{0,004}{1} \text{ GgC}$    |
|          |          | ERC               | = | $\frac{0,004}{1} \text{ GgC}$ | * | 0,9900             |   |                 |   |           |   |      | = | $\frac{0,004}{0} \text{ GgC}$    |
|          |          | ERCO <sub>2</sub> | = | $\frac{0,004}{0} \text{ GgC}$ | * | 44/12              |   |                 |   |           |   |      | = | $\frac{0,014}{8} \text{ GgCO}_2$ |

### 4.1.3. Impacto da área construída

O cálculo da pegada ecológica para a área construída pode se visto na tabela 4.

Tabela 4. Cálculo da pegada ecológica para área construída.

|     | Área (m <sup>2</sup> ) |          | Emissões (KgCO <sub>2</sub> ) |
|-----|------------------------|----------|-------------------------------|
| E = | 719,52                 | X 10,4 = | 7.483,01                      |

### 4.1.4. Impacto da pegada ecológica completa

A soma de todas as pegadas calculadas implica no impacto total das áreas avaliadas. Para tal todas as emissões foram convertidas para sempre considerando a taxa de absorção média da cana de açúcar, amplamente cultivada na região. Sendo assim a Pegada Ecológica completa calculada foi de 6,13ha.

## 4.2. Mitigação da pegada ecológica do polo

Para priorização do esforço de mitigação das pegadas ecológicas foi utilizado o método de análise multicritério AHP. Foram analisados os seguintes critérios: Potencial de diminuição da pegada ecológica, potencial de geração de conhecimento tecnológico, valor da atual pegada ecológica, custo para a redução e facilidade de redução.

### 4.2.1. Análise Multicritério

Foi utilizado o método AHP para a atribuição dos pesos dos critérios anteriormente levantados. A distribuição dos pesos é expressa na tabela 5.

Tabela 5. Distribuição dos pesos dos critérios.

| Critério | Prioridade |
|----------|------------|
|----------|------------|

|  |        |
|--|--------|
| Potencial de diminuição da pegada ecológica      | 45,92% |
| Potencial de geração de conhecimento tecnológico | 29,93% |
| Valor da atual pegada ecológica                  | 12,87% |
| Custo para a redução                             | 7,01%  |
| Facilidade de redução                            | 4,27%  |

A distribuição dos pesos apresentou uma relação de consistência de 8,75%, que segundo Saaty (2008) é um valor aceitável. A Tabela 6 apresenta a principal Matriz de pesos do problema. A partir dos pesos dos critérios estabelecidos foi feita a análise das diferentes dimensões da pegada ecológica.

Tabela 6. Matriz de pesos dos critérios à luz do foco principal.

|                          | Custo de implantação | Valor atual da pegada | Potencial tecnológico | Facilidade de diminuição | Potencial de diminuição |
|--------------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|--------------------------|-------------------------|
| Custo de implantação     | 1                    | 1/2                   | 1/5                   | 2                        | 1/6                     |
| Valor atual da pegada    | 2                    | 1                     | 1/3                   | 4                        | 1/4                     |
| Potencial tecnológico    | 5                    | 3                     | 1                     | 6                        | 1/2                     |
| Facilidade de diminuição | 1/2                  | 1/4                   | 1/6                   | 1                        | 1/8                     |
| Potencial de diminuição  | 6                    | 4                     | 2                     | 8                        | 1                       |

As matrizes de Subcritérios à luz de cada critério podem ser vistas nas tabelas 7 a 11. Já o resultado final ordenado pela prioridade está presente na tabela 12.

Tabela 7. Matriz de pesos dos subcritérios à luz do critério custo de implantação.

|                  | Energia elétrica | Combustível | Área construída |
|------------------|------------------|-------------|-----------------|
| Energia elétrica | 1                | 1/5         | 1               |
| Combustível      | 5                | 1           | 1               |
| Área construída  | 1                | 1           | 1               |

Tabela 8. Matriz de pesos dos subcritérios à luz do critério valor atual da pegada.

|                  | Energia elétrica | Combustível | Área construída |
|------------------|------------------|-------------|-----------------|
| Energia elétrica | 1                | 1/6         | 2               |
| Combustível      | 6                | 1           | 7               |
| Área construída  | 1/2              | 1/7         | 1               |

Tabela 9. Matriz de pesos dos subcritérios à luz do critério potencial tecnológico.

|                  | Energia elétrica | Combustível | Área construída |
|------------------|------------------|-------------|-----------------|
| Energia elétrica | 1                | 3           | 9               |
| Combustível      | 1/3              | 1           | 9               |
| Área construída  | 1/9              | 1/9         | 1               |

Tabela 10. Matriz de pesos dos subcritérios à luz do critério facilidade de diminuição.

|                  | Energia elétrica | Combustível | Área construída |
|------------------|------------------|-------------|-----------------|
| Energia elétrica | 1                | 1/4         | 9               |
| Combustível      | 4                | 1           | 9               |
| Área construída  | 1/9              | 1/9         | 1               |

Tabela 11. Matriz de pesos dos subcritérios à luz do critério potencial de diminuição.

|                  | Energia elétrica | Combustível | Área construída |
|------------------|------------------|-------------|-----------------|
| Energia elétrica | 1                | 6           | 9               |
| Combustível      | 1/6              | 1           | 9               |
| Área construída  | 1/9              | 1/9         | 1               |

Tabela 12. Análise de priorização das pegadas ecológicas.

| Pegada ecológica | Prioridade |
|------------------|------------|
| Energia elétrica | 57,22%     |
| Combustível      | 35,74%     |
| Área construída  | 7,04%      |

## 5. Conclusão

O resultado dos cálculos da pegada ecológica do Polo de Inovação foi de 6,13 hectares, o que representa que para se manter sustentável o Polo necessita de uma área deste tamanho com plantio de cana-de-açúcar. A cana foi escolhida por ser uma cultura já praticada pelas usinas de açúcar no entorno do polo. O que poderia tornar possível uma parceria junto às usinas produtoras de açúcar em forma de convênio, onde o polo prestaria consultorias as empresas em troca da absorção de carbono realizada pela a atividade de plantio das mesmas. Os valores encontrados para a pegada ecológica podem ser conferidos na tabela 13.

Além disso o trabalho apresenta uma priorização das diferentes dimensões da pegada ecológica. Como apresentado, as emissões devido a utilização da energia elétrica figuram como prioritárias à adoção de medidas que possam mitigá-las. Em contrapartida as emissões devido a área construída seriam menos relevantes devido a impossibilidade de se adotar medidas que as reduzam uma vez que as mesmas já foram consumadas. Ainda se faz necessário o cálculo de outras dimensões da pegada ecológica, bem como análise e medidas que possam mitigá-las.

Tabela 13. Valores da pegada ecológica encontrados.

|                  | Emissões<br>(MgCO <sub>2</sub> ) | Taxa de absorção média<br>da cana de açúcar<br>(MgCO <sub>2</sub> ) | Pegada<br>Ecológica<br>(ha) |
|------------------|----------------------------------|---|-----------------------------|
| Gasolina         | 11,7724                          | 7,1300  | 1,6511                      |
| Diesel           | 14,7790                          | 7,1300  | 2,0728                      |
| Área Construída  | 7,4830                           | 7,1300  | 1,0495                      |
| Energia Elétrica | 11,2529                          | 7,1300  | 1,5782                      |
| Total            |                                  |   | 6,3517                      |

## Referências

- CORNER, J. L.; KIRKWOOD, C. W. Decision analysis applications in the operations research literature, 1970-1989. *Operations research*, v. 39, n. 2, p. 206–219, 1991.
- DA SILVA, G. J. P. et al. Aplicação da metodologia Top-Down para cálculo da Pegada Ecológica dos veículos de uma Instituição de Ensino. 1º EINEPRO (Encontro Interestadual de Engenharia de Produção), São João da Barra, 2015.
- EDENHOFER, O. et al. IPCC, 2014: Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2014.
- FANG, K. et al. Theoretical exploration for the combination of the ecological, energy, carbon, and water footprints: Overview of a footprint family. *Ecological indicators*, v. 36, p. 508–518, jan. 2014.
- HOUGHTON, J.T. et al. IPCC, 2001: Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2001.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE IPCC. Climate change 1995 - The science of climate change. Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC Geneva, 1996b.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE IPCC. Greenhouse gas inventory reporting instructions – IPCC Guidelines for national greenhouse gas inventories. Vol 1, 2, 3. United Nations Environment Program, the Organization for Economic Co-operation and Development and the International Energy Agency, London, v.3, 1996c.
- LEFF, E. Degrowth, or deconstruction of the economy: Towards a sustainable world. Occasional Paper Series, n. 6, 2009.
- MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA MME. Balanço energético nacional 1999: ano base 1998, Brasília, DF, 1999.
- MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA MCT. Relatório das emissões de carbono derivadas do sistema energético: abordagem top-down. Ministério da Ciência e Tecnologia, Brasília, DF, 1999b.
- MORAN, D. et al. Measuring sustainable development — Nation by nation.

Ecological economics: the journal of the International Society for Ecological Economics, v. 64, n. 3, p. 470–474, 15 jan. 2008.

Nosso futuro comum. COMISSÃO MUNDIAL SOBRE MEIO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO (CMMAD). Rio de Janeiro: Fundação Getulio Vargas, 1988.

QUELHAS, O.L.G. et al. O ensino da sustentabilidade na formação do engenheiro: Proposta de Diretrizes. Congresso Nacional de Excelência em Gestão, 2011.

RODRÍGUEZ, R.L.; IGLESIAS, J. L. T; ÁLVAREZ, N. L. Impacto Ambiental en Centros da Universidade de Santiago de Compostela. Vicereitoría de Calidad e Planificación. 2008.

ROSEN M. A.; DINCER. I. EXERGY: Energy, Environment and Sustainable Development, 2011.

ROSEN M. A. et al. Role of exergy in increasing efficiency and sustainability and reducing environmental impact. Energy policy, 2008.

SAATY, T.L. 'Decision making with the analytic hierarchy process', Int. J. Services Sciences, Vol. 1, No. 1, pp.83–98, 2008.

SAN CRISTÓBAL MATEO, J. R. Multi criteria analysis in the renewable energy industry. London ; New York: Springer, 2012.

SCHWARZ, J. et al. Use sustainability metrics to guide decision-making. Chemical Engineering Progress, v. 98, n. 7, p. 58–63, 2002.

WACKERNAGEL, M. et al. National natural capital accounting with the ecological footprint concept. Ecological economics: the journal of the International Society for Ecological Economics, v. 29, n. 3, p. 375–390, 1999.

YAO C.; JIN L. Research on Eco-campus and its Evaluation Method, Advanced Materials Research, Vols. 864-867, p. 1106-1110, 2014.