

A PEGADA ECOLÓGICA DOS INCIDENTES RODOVIÁRIOS

Letícia Dexheimer

Luis Antonio Lindau

Christine Nodari

João Fortini Albano

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Transportes

Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Márcia Valle Real

Engenharia de Produção

Universidade Federal Fluminense

RESUMO

Este estudo tem por finalidade medir o impacto de incidentes rodoviários que interrompem o fluxo normal de circulação através da modelagem da pegada ecológica. O método proposto neste trabalho proporciona a identificação dos impactos dos incidentes, particularmente acidentes viários e obras de manutenção viária. O estudo de caso compreende a operação em uma rodovia de pista simples onde as emissões foram estimadas com a utilização de simulação de tráfego. Como resultado obteve-se uma pegada ecológica de cerca de 2.180 hectares decorrente dos incidentes ao longo de um ano de operação da via. Este valor corresponde a 4% da pegada ecológica da via em condições normais de operação.

ABSTRACT

The purpose of this study is to measure the impact of road incidents that interrupt the normal flow of vehicles using the ecological footprint model. The method proposed in this work enables identifying the impact of incidents, basically road accidents and maintenance works, on the transportation ecological footprint. The case study comprises the operation along a single lane highway and emissions were estimated with the use of traffic simulation. We obtained an ecological footprint of 2,180 ha due to road incidents over a period of one year. This corresponds to 4% of the ecological footprint of normal road operations.

1. INTRODUÇÃO

No final do século passado, Wackernagel e Rees (1996) desenvolveram um método que permite medir o impacto das atividades humanas sobre a natureza, a Pegada Ecológica. Este método parte do princípio que cada pessoa necessita de uma quantidade de área de terra, água e energia para produzir o que consome ao longo de um ano. A Pegada Ecológica está relacionada com o conceito de capacidade de carga que é a capacidade de regeneração dos recursos da natureza de forma a sustentar uma população em determinada região.

O aumento da população mundial e o desenvolvimento da economia em nível global provocaram o crescimento da utilização de materiais e de energia para suprir as necessidades de consumo. Como consequência, houve um aumento na concentração de poluentes e na geração de resíduos lançados no meio ambiente. Essa demanda crescente por recursos para manter o padrão de vida de uma população vem se manifestando de forma mais intensa na questão do uso de energia. Essa energia pode ser representada por uma área hipotética, que deveria ser reservada para a absorção de CO₂. Essa área hipotética é chamada de área de energia ou de área de carbono. A área de energia é uma das principais componentes da pegada ecológica do setor de transportes.

Desde os primeiros cálculos, o setor de transportes teve contribuição significativa na pegada ecológica. Importante para o desenvolvimento econômico das regiões urbanas, o setor está

entre os que mais consomem energia e mais contribuem para as emissões de gases de efeito estufa. Com o aumento das viagens motorizadas houve também um aumento na ocorrência de incidentes rodoviários. Há incidentes que podem ser previstos, como as obras para manutenção da via e adequação da capacidade. Outros são de caráter aleatório, como os acidentes e os desastres naturais. Em ambos os casos os incidentes são eventos que interrompem o fluxo e reduzem a capacidade da via, causando atrasos, filas extensas, maior consumo de combustível e aumento no número de emissões.

A literatura é abrangente no desenvolvimento de trabalhos que analisam a ocorrência de incidentes rodoviários. Alguns temas considerados são redução de capacidade das vias, análise do comportamento dos motoristas quanto à mudança de faixa e aceitação de gap, mudança de rota a partir de informações fornecidas por sistemas de informação de tráfego, avaliação de riscos de acidentes através de auditorias de segurança viária, identificação de pontos críticos nas vias para priorizar ações que reduzam a taxa de acidentes e sua gravidade, entre outros (Alvarez e Hadi, 2010). No caso dos acidentes, um ponto bastante abordado é a questão do custo econômico ou financeiro. Alguns autores propõem métodos para quantificar os custos considerando itens como perda de produção associada à morte das pessoas ou a interrupção temporária de suas atividades custos médicos e reparação dos veículos acidentados (IPEA, 2003). No entanto, estudos sobre o impacto dos incidentes na pegada ecológica do setor de transportes não foram identificados.

No caso de obras de implantação de rodovias, ou mesmo de ampliação da capacidade, crescem as exigências ambientais requeridas por agências multilaterais internacionais para a concessão de financiamentos. Já, os impactos ambientais causados por incidentes afetam a via quando da sua operação. Esses impactos são gerados pelo trânsito parado em congestionamento ou durante o período em que as vias ficam bloqueadas tanto para obras quanto para remoção de vítimas e de veículos envolvidos em acidentes.

Visto que a parcela dos deslocamentos que corresponde aos incidentes até agora não foi considerada diretamente no cálculo da pegada ecológica do setor transportes, este trabalho desenvolve um método que permite estimar a pegada ecológica dos incidentes rodoviários. A estimativa do impacto que os incidentes causam no meio ambiente pode ser utilizada para justificar investimentos, como por exemplo, em segurança viária, em recursos para o atendimento às ocorrências ou em ampliação de capacidade da rodovias.

Este artigo está organizado em cinco seções. Após esta introdução, é feita a revisão da literatura acerca do conceito de pegada ecológica e sua relação com transportes. A seção 3 apresenta o método proposto para estimar a pegada ecológica dos incidentes rodoviários. A seção 4 apresenta uma aplicação do método e, por fim, a seção 5 apresenta as considerações finais.

2. A PEGADA ECOLÓGICA E O SETOR DE TRANSPORTES

A pegada ecológica é um indicador resultante de um método proposto na década de 90 com objetivo de medir a relação entre a natureza e o consumo humano (Rees, 1992). Esta relação se baseia no fato de que cada indivíduo necessita de uma área na superfície terrestre que forneça bens e serviços essenciais à vida (Chambers et al., 2000). O conceito de capacidade de suporte está associado à Pegada Ecológica. A capacidade de suporte considera que a terra é

um sistema praticamente fechado e que os recursos dos quais dependem as atividades humanas são finitos (Arrow et al., 1995).

O cálculo da pegada ecológica propõe mostrar, em termos de uma unidade de área, o quanto uma determinada população está utilizando dos recursos da natureza para manter o seu padrão de vida. A visualização é possível quando comparada com a biocapacidade que é a taxa teórica máxima de oferta regenerativa de recursos proporcionada pela natureza. Como resultado final, tem-se o saldo ecológico, que segundo Monfreda et al. (2004), permite avaliar a sustentabilidade ambiental de uma região. O saldo ecológico é a diferença entre a biocapacidade e a pegada ecológica. Um resultado positivo indica que a região pode ser considerada ambientalmente sustentável, pois tem uma pegada menor do que a biocapacidade. Do contrário, um resultado negativo indica que a pegada de uma população excede a capacidade regenerativa do capital natural existente nesta região, considerando-a ambientalmente insustentável.

O foco do método da pegada ecológica está na avaliação do uso de áreas bioprodutivas para fornecer recursos, produtos e assimilar as emissões de CO₂. Estas áreas abrangem os ecossistemas globais que abastecem a economia humana com a maior parte de seus recursos biológicos renováveis. As áreas bioprodutivas são classificadas em seis: (a) áreas de cultivo (para produção de frutas, vegetais, cereais e derivados); (b) áreas de pasto (para fornecer carne e derivados); (c) áreas de florestas (para a produção de papel e lenha); (d) áreas de pesca (para a produção de peixes para consumo humano); (e) áreas construídas (para moradia, transportes e atividades comerciais e industriais) e (f) área de energia (área hipotética que deveria ser reservada para a absorção de CO₂) (Wackernagel et al., 2005). De modo a possibilitar comparações em escala global de diferentes países, os quais têm qualidades e características diferentes de áreas para cultivos, pastagem, florestas e pesca, são utilizados os fatores de equivalência que ponderam a produtividade de cada tipo de área com a produtividade média mundial. Assim, a pegada ecológica, expressa em hectares globais, é estimada pela Equação (1), que relaciona a quantidade de recursos consumidos (em toneladas) com a produtividade do recurso (em toneladas por hectare) para cada tipo de área (A_i) ponderando pelo fator de equivalência correspondente (em hectares globais por hectare):

$$PE (gha) = \sum_{Ai=1}^6 \frac{\text{Consumo (ton)}}{\text{Produtividade} \left(\frac{\text{ton}}{\text{ha}}\right)} \times \text{Fator de Equivalência} \left(\frac{\text{gha}}{\text{ha}}\right) \quad (1)$$

Os fatores de equivalência estão listados na Tabela 1. Um fator de equivalência de área de cultivo igual a 2,51 significa que cada hectare real cultivado equivale a 2,51 hectares globais e indica que a produtividade média mundial de áreas de cultivo é mais que o dobro da produtividade média mundial para todas as áreas. Áreas de pasto tem fator de equivalência de 0,46 significando menos da metade da produtividade média mundial de hectares bioprodutivos (Ewing et al., 2010).

A pegada ecológica supõe que a infraestrutura e os estabelecimentos humanos estão localizados ao longo das regiões mais férteis do país. Portanto o fator de equivalência para

área construída é o mesmo das áreas de cultivo. É importante ressaltar que os fatores de equivalência reportados são os mesmos para todos os países.

Tabela 1: Fatores de Equivalência

<i>Tipo de área bioprodutiva</i>	<i>Fator de equivalência (gha/ha)</i>
Área de cultivo	2,51
Área de florestas	1,26
Área de pasto	0,46
Área de pesca	0,37
Área construída	2,51

Fonte: Ewing et al. (2010)

No caso da área de energia, a produtividade é dada pela taxa de sequestro de CO₂, que é a capacidade que as florestas do mundo têm de absorver o CO₂ resultante das emissões. A proporção do carbono absorvido pelas florestas está relacionada ao tipo de floresta, ao crescimento e à idade. Diferentes tipos de florestas armazenam diferentes quantidades de carbono em sua biomassa. Da mesma forma, removem carbono em maiores proporções quando jovens e em fase de crescimento. À medida que atingem a maturidade e o crescimento estabiliza, a absorção de carbono é reduzida. Na pegada ecológica convencional, este valor é calculado a partir do modelo da Global Fibre Supply Model – FAO (FAO, 2000) e é igual à 1,09 tC/ha/ano (Scotti et al., 2009). Considerando a relação entre o peso molecular do CO₂ e o do carbono tem-se que essa taxa equivale ao sequestro de 3,9966t CO₂/ha/ano. Assim, a pegada ecológica de uma tonelada de CO₂ emitida pelos deslocamentos realizados ao longo de um ano é de 0,92 hectares de florestas ou 1,16 hectares globais. Isso significa que são necessários 0,92 hectares de florestas para absorver a cada tonelada de CO₂ emitido.

Contribuições específicas para transportes foram apresentadas em alguns trabalhos como o de Barrett (2003) e Muñiz (2005) para o transporte urbano de passageiros. Com ênfase em carga urbana são importantes as contribuições de Holden (2004) que analisa a influência da localização de atividades comerciais na pegada ecológica de entregas urbanas de mercadorias, e Muñuzuri et al. (2010) que estabelecem um método específico para estimar a pegada ecológica do transporte de carga urbana. Visando contribuir com o planejamento de transportes, Chi e Stone Jr (2005) apresentam uma metodologia para avaliar a pegada ecológica de redes de transporte atuais e futuras com aplicação para o condado de Houghton em Michigan.

3. MÉTODO PARA CÁLCULO DE PEGADA ECOLÓGICA DE INCIDENTES VIÁRIOS

O método proposto de cálculo da pegada ecológica dos incidentes consta de quatro etapas. (i) delimitação da área de estudo; (ii) identificação e classificação dos incidentes; (iii) avaliação dos impactos dos incidentes; (iv) cálculo da pegada ecológica. Estas etapas, resumidas a seguir, encontram-se detalhadas em Dexheimer (2012).

3.1. Delimitação da área de estudo

Para calcular o valor da pegada ecológica de incidentes viários devem ser identificados os locais que apresentam alto índice de incidentes que requeiram o bloqueio da pista, ou de parte dela. Esse procedimento visa garantir que são analisados aqueles locais onde os impactos

decorrentes de incidentes são mais expressivos. Entende-se por incidentes todos os eventos que interrompem o fluxo normal de operação causando uma redução na capacidade viária, como por exemplo, os acidentes e as obras para manutenção da via.

3.2. Identificação e classificação dos incidentes

Esta etapa compreende a identificação dos incidentes que interromperam o fluxo normal de operação da rodovia no período de um ano de operação e que são incluídos no estudo. Adicionalmente, os incidentes são caracterizados conforme a sua natureza em acidentes e obras. Os acidentes são classificados quanto à gravidade (leve, médio e grave), ao tipo de bloqueio que provocam na pista (parcial e total), ao projeto de circulação necessário após a ocorrência (circulação alternada ou desvio com redução de velocidade), ao tempo que a pista ficou obstruída (curto, médio e longo) e se houve vazamento de produto perigoso (se contaminou ou não áreas de cultivo, pasto e pesca). Da mesma forma as obras são classificadas quanto ao tipo de reparo realizado, ao tipo de bloqueio que provocam na pista (parcial e total), ao projeto de circulação necessário durante a ocorrência (circulação alternada ou desvio com redução de velocidade) e o tempo que a pista ficou obstruída (curto, médio e longo).

3.3. Avaliação dos impactos dos incidentes

Na sequência, é realizada a avaliação dos impactos decorrentes dos incidentes quanto à geração de emissões e contaminação da terra e da água devido a acidentes com produtos perigosos em locais onde a rodovia cruze terras e águas produtivas. Para a identificação de áreas de terra e água contaminadas são necessárias coletas de informações com os órgãos ambientais locais.

As emissões são calculadas pelo seu nível de variação em comparação com a operação em fluxo normal. Para a identificação das variações nos níveis de emissões decorrentes dos incidentes rodoviários, é realizada uma simulação de tráfego de modo a verificar as emissões sem a ocorrência dos incidentes e posteriormente com sua ocorrência. A análise das emissões é feita baseada em cenários a partir dos tipos de incidentes identificados e classificados conforme 3.2. Para a criação dos cenários é necessário determinar as condições de operação da via, que incluem volume de tráfego, composição do tráfego e a dimensão física do incidente.

3.4. Cálculo da pegada ecológica

O próximo passo é calcular a pegada ecológica dos incidentes rodoviários. Este cálculo normalmente é feito para o período de um ano e é expresso na unidade hectares global por ano (gha/ano), que significa a área de recursos da natureza que foi impactada pela ocorrência dos incidentes. A parcela da pegada ecológica dos incidentes rodoviários pode ser representada pela equação dois e está composta pela soma das pegadas ecológicas correspondentes à quantidade de CO₂ equivalente emitido durante os incidentes, às áreas de cultivo e pasto e às áreas de pesca, cuja produtividade foi perdida em decorrência dos incidentes.

$$PE_{IR} = PE_{EM} + PE_C + PE_{PA} + PE_{PE} \quad (2)$$

PE_{IR} = pegada ecológica dos incidentes rodoviários (gha/ano);

PE_{EM} = parcela da pegada ecológica que corresponde às emissões (gha/ano);

PE_C = parcela da pegada ecológica que corresponde à perda de área produtiva ocupada para cultivo (gha/ano);

PE_{PA} = parcela da pegada ecológica que corresponde à perda de área produtiva ocupada para pasto (gha/ano);

PE_{PE} = parcela da pegada ecológica que corresponde à perda de área produtiva de pesca (gha/ano)

As parcelas são expressas pelas equações apresentadas na Tabela 2:

Tabela 2: Quadro síntese das parcelas da Pegada Ecológica dos incidentes rodoviários

PARCELAS	COMPONENTES DA PARCELA
<p>Referente à Área de Energia:</p> $PE_{EM} = \sum_{i=1}^N \left[\frac{(\Delta EM_i \times T_{Bi} \times O_i)}{FSC} \right]$	<p>ΔEM = Emissões de CO₂ equivalente geradas no incidente i (kg CO₂/h)</p> <p>T_B = tempo que a pista ficou bloqueada no incidente tipo i (h)</p> <p>O = Número de ocorrências do incidente tipo i por ano</p> <p>FSC = Fator de Sequestro de Carbono (kg CO₂/ano)</p> <p>i = tipo de incidente considerado;</p>
<p>Referente à Área de Cultivo:</p> $PE_C = AC \times FE_C$	<p>AC = Área de Cultivo contaminada (ha/ano)</p> <p>FE_C = Fator de Equivalência de Cultivo (gha/ha)</p>
<p>Referente à Área de Pasto:</p> $PE_{PA} = APA \times FE_{PA}$	<p>APA = Área de Pasto contaminada (ha/ano)</p> <p>FE_{PA} = Fator de Equivalência de Pasto (gha/ha)</p>
<p>Referente à Área de Pesca:</p> $PE_{PE} = APE \times FE_{PE}$	<p>APE = Área de pesca contaminada (ha/ano)</p> <p>FE_{PE} = Fator de Equivalência de Pesca (gha/ha)</p>

4. ESTUDO DE CASO

Para ilustrar a aplicação do método foi desenvolvido um estudo de caso em um trecho da BR-386, uma rodovia federal que liga a região metropolitana de Porto Alegre com o município de Iraí na divisa com o Estado de Santa Catarina.

4.1. Delimitação da área de estudo

O trecho em análise está apresentado na Figura 1. Foram analisados 40 km de pista simples da rodovia BR-386 entre Lajeado e o entroncamento com a RS 287. A seleção deste trecho se deu devido à incidência de acidentes e obras. Os incidentes foram analisados no período de um ano. Para os acidentes, foi utilizado o valor médio dos últimos três anos e, para as obras, foram considerados dois tipos de intervenções que são realizadas em todos os quilômetros durante um ano e, em alguns casos, até mais de uma vez por ano. Foram considerados 200 acidentes, 400 reparos localizados e 40 aplicações de micro-revestimento neste trecho, totalizando 640 incidentes no período de análise.

4.2. Identificação dos Incidentes (acidentes e obras)

Os 200 acidentes do trecho em análise foram classificados conforme a Tabela 3.

Tabela 3: Classificação dos acidentes para o cálculo da pegada ecológica

CRITÉRIO DE CLASSIFICAÇÃO	NIVEIS	VALORES	METODO DE OBTENÇÃO
Gravidade	Alto (com vítima fatal)	3%	A Unidade Padrão de Severidade - UPS conforme a metodologia do DENATRAN (1987) foi adotada para o cálculo do número médio de acidentes que ocorreram dos anos de 2008 a 2010. Fonte: Histórico de acidentes da BR 386 (UNIVIAS, 2011).
	Médio (com feridos)	40%	
	Baixo (apenas danos materiais)	57%	
Tipo de bloqueio que provocam na pista	Total	33,3%	Foram aplicados ao número total de acidentes, os percentuais que relacionam a gravidade ao tipo de bloqueio da seguinte forma: a pista fica totalmente bloqueada em 90% dos casos de acidentes com vítimas fatais (UPS 13), em 50% dos casos de acidentes com feridos (UPS 5) e em 20% dos casos de acidentes em somente ocorrem danos materiais (UPS 1), no restante dos casos a pista fica parcialmente bloqueada com circulação alternada
	Parcial (com circulação alternada)	66,7%	
Projeto de circulação necessário após a ocorrência	Circulação alternada	100%	No Manual de Sinalização de Obras e Emergências do DNIT (2010) são previstos projetos-tipo para sinalização de emergências e desvio de tráfego quando da ocorrência de acidentes. Na rodovia em estudo não são utilizados desvios de tráfego.
	Desvio com redução de velocidade	-	
Tempo que a pista ficou obstruída	Bloqueio Total	10 min	Foram adotados 4 tempos de bloqueio para o cálculo da pegada: (i) Bloqueio Total de 10 min, pois foi identificado que seria o tempo máximo que um motorista deixaria o veículo ligado esperando a liberação da pista; (ii) Bloqueio Parcial 1 de 15 min, o tempo mínimo necessário para a solução de pequenos conflitos; (iii) Bloqueio Parcial 2 de 40 min, o valor intermediário onde se enquadra a maior quantidade dos casos; (iv) Bloqueio Parcial 3 de 1h e 50 min, valor intermediário entre uma hora e quinze minutos e duas horas e trinta minutos em que há pouca variação na frequência de ocorrência, conforme histograma da figura 3. Foi considerado que após bloqueio total a pista é liberada parcialmente antes de voltar à operação normal.
	Bloqueio Parcial 1	15 min	
	Bloqueio Parcial 2	40 min	
	Bloqueio Parcial 3	1 h 50 min	
Ocorrência de vazamento de produto perigoso	SIM ou NÃO	NÃO	Os registros dos acidentes não indicaram ocorrência de acidente com produtos perigosos.

Para análise do tempo que a pista ficou obstruída para o atendimento de acidentes foi utilizado o histograma da Figura 1, elaborado a partir dos dados da concessionária responsável pela operação da via. Observa-se que 80% das ocorrências bloquearam a pista, ou parte dela por até três horas, sendo que em grande parte casos, 47% das ocorrências, por até uma hora. Acidentes com até cinco horas e meia de bloqueio perfazem 90% dos casos.

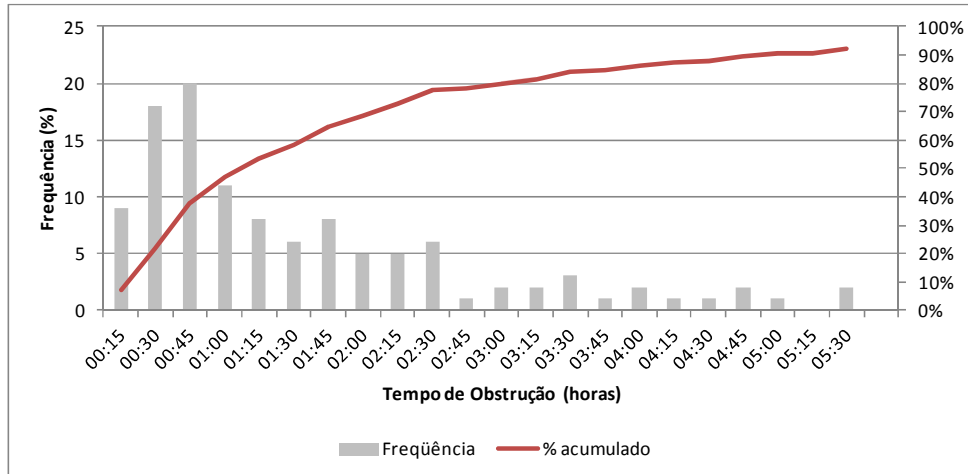


Figura 1: Frequência de Ocorrência do Tempo de Obstrução da Pista

4.2.2. Obras

São muitas as obras necessárias à manutenção da rodovia ao longo de sua vida útil. Para este trabalho são considerados apenas dois incidentes tipo obras: (i) reparos localizados e (ii) aplicação de micro-revestimento asfáltico. Esses incidentes foram escolhidos por representarem a maior incidência ao longo do ano e também por ocorrerem necessariamente ao longo da pista de rolamento, causando a necessidade de interrupção do fluxo. Os reparos localizados são “remendos” feitos na superfície do pavimento e podem ser realizados de forma pontual ou em grandes áreas. O reparo localizado é rápido, dura em torno de uma hora e a extensão de obra varia de 100 a 500m. O micro-revestimento é uma mistura de agregado, emulsão asfáltica, água e aditivos que é aplicado na superfície da rodovia para a selagem de fissuras e trincas. Para aplicação se faz necessário interromper 1 a 3 km de via e entre o tempo de cura e de execução, a faixa fica interrompida aproximadamente meio turno do dia. Ambos têm a função de melhorar as condições de conforto do rolamento. A tabela 4 apresenta a classificação.

Tabela 4: Classificação das obras para o cálculo da pegada ecológica

CRITÉRIO DE CLASSIFICAÇÃO	TIPO DE OBRA	VALORES	METODO DE OBTENÇÃO
Projeto de circulação	Reparos localizados	Circulação Alternada	Valores médios obtidos junto a concessionária que opera o trecho estudado.
	Micro-revestimento	Circulação Alternada	
Tipo de bloqueio que provocam	Reparo localizado	Parcial de 100 m	
	Micro-revestimento	Parcial de 1 km	
Tempo que a pista ficou obstruída	Reparo localizado	1 hora	
	Micro-revestimento	6 horas	

4.3. Avaliação dos Impactos

A avaliação das variações nos níveis de emissões decorrentes dos incidentes rodoviários foi realizada utilizando-se o modelo de simulação de tráfego CORSIM – CORridor SIMulation. O CORSIM é um modelo de micro-simulação desenvolvido pela Federal Highway Administration - FHWA para análise de vias expressas, vias urbanas e corredores ou redes de tráfego (Moreira, 2005). Para analisar a ocorrência de incidentes em condições reais de operação foram criados cenários que representassem a melhor combinação entre os fluxos de veículos e a ocorrência dos incidentes.

Foram definidos cinco cenários de estudo:

→ Cenário 1: Operação em fluxo livre - ON

Operação normal do sistema, com todas as classes de veículos circulando sem obstrução na pista.

→ Cenário 2: Acidente com bloqueio total da pista – AC1

Ocorrência de um incidente do tipo acidente com bloqueio total da pista. Quando ocorre um incidente deste tipo, a liberação da pista é feita gradualmente, passando primeiro para circulação alternada em meia pista e depois a liberação total. É utilizado um tempo para bloqueio total e mais três tempos com bloqueio de meia pista e circulação alternada.

→ Cenário 3: Acidente com bloqueio parcial da pista e circulação alternada – AC2

Ocorrência de um incidente do tipo acidente com bloqueio parcial da pista, que neste caso de estudo é de uma faixa de rolamento. A circulação dos veículos é alternada em meia pista e são utilizados três tempos de bloqueio.

→ Cenário 4: Obra 1 com bloqueio parcial da pista e circulação alternada – OB1

Ocorrência de um incidente tipo obra, para a execução de reparo localizado, com bloqueio de uma faixa de rolamento. O tempo utilizado é fixo (1 hora) e durante este período a circulação dos veículos é alternada em meia pista.

→ Cenário 5: Obra 2 com bloqueio parcial da pista e circulação alternada - OB2

Ocorrência de um incidente tipo obra, para aplicação do micro revestimento, com bloqueio de uma faixa de rolamento. O tempo utilizado é fixo (6 horas) e durante este período a circulação dos veículos é alternada em meia pista.

Para os cenários 2 a 5 foi simulada a ocorrência de um incidente, sendo que o mesmo inicia após uma hora de operação normal. Após o incidente, a rodovia volta a operar normalmente por mais uma hora para que o sistema se estabilize novamente. Foram realizadas cinco rodadas para cada combinação de tempo e fluxo em todos os cenários, totalizando 115 rodadas. A cada rodada o modelo utiliza um valor diferente (semente) para a geração dos veículos e comportamento do motorista, de modo a verificar a consistência dos resultados. Em todos os cenários simulados os resultados apresentaram um desvio padrão em torno de 2%, portanto foram utilizadas as médias dos valores de emissões das cinco rodadas. As emissões de CO foram transformados em CO₂ equivalente a um GWP – Potencial de Aquecimento Global igual a 3,0 (IPCC, 2007). As parcelas referentes à contaminação da terra e da água não foram contempladas, pois não houve acidente com contaminação.

4.4. Cálculo da pegada ecológica

O cálculo da pegada ecológica foi realizado utilizando-se a equação 2. Para o cálculo foram utilizadas as variações das emissões dentro de cada cenário em comparação com a operação normal, o tempo que a pista ficou interrompida e o número de ocorrências para cada cenário. O fator de sequestro de carbono utilizado foi de 1,09 tC/ha.ano (Scotti et al. 2009). Para o cálculo da pegada ecológica da operação normal, foi utilizada a equação referente a parcela das emissões da Tabela 2, porém não foi considerado o tempo em que a pista ficou interrompida, já que neste caso não há bloqueio. Os valores da pegada ecológica para todos os cenários ao longo de um ano de operação bem como os valores utilizados para cada variável são apresentados na tabela 6.

Tabela 2: Pegada Ecológica Calculada para Todos os Cenários

Cenário	Nome	Tempo de Bloqueio Total	Tempo de Bloqueio Parcial	Fluxos (Veículos/h)	Pegada Ecológica (ha)	Pegada Ecológica total por Cenário(ha)
1	ON	-	-	900	20.312,32	49.892,04
				700	15.830,56	
				300	13,749,17	
2	AC1	10 min	15 min	900	366,86	611,54
			40 min	700	154,39	
			01 h 50 min	300	90,30	
3	AC2	-	15 min	900	143,12	251,85
			40 min	700	63,44	
			01 h 50 min	300	45,30	
4	OB1	-	1 h	700	600,25	600,25
5	OB2	-	6 h	700	717,07	717,07

A pegada ecológica anual de todos os incidentes rodoviários (acidentes e obras) para os 40 km de via em estudo (cenários 2 a 5) totaliza 2.180,72 ha ou 2.747,71. Este valor representa a área fictícia que seria necessária para a absorção das emissões de CO₂ decorrentes dos incidentes rodoviários durante um ano de operação. Esse valor corresponde a 4% da pegada ecológica da rodovia em condições normais de operação (49.892,04 ha ou 62.863,97 gha).

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo teve como objetivo modelar a pegada ecológica dos incidentes rodoviários. Foi realizado um estudo em um trecho de 40 km da rodovia BR 386 entre Lajeado e o entroncamento com a RS 287 permitindo o cálculo da pegada ecológica de dois tipos de incidentes: incidentes tipo obras, de reparo localizado e aplicação de micro-revestimento, ambos provocando uma interrupção parcial da pista, e incidentes tipo acidentes que bloqueiam total ou parcialmente a pista. Através da simulação de tráfego foi possível obter os valores de emissões de CO₂ equivalentes da rodovia em operação normal e durante os incidentes para utilização no cálculo. Os resultados permitiram identificar a pegada ecológica anual dos incidentes rodoviários como sendo 2.180,72 ha, representando a quantidade de área

de floresta necessária para absorver as emissões oriundas desses incidentes. Este valor corresponde a 4% da pegada ecológica total da rodovia em operação normal, sem a ocorrência de incidentes.

O método proposto possibilita a avaliação dos impactos dos incidentes no meio ambiente, permitindo visualizar esta informação em termos de área necessária para neutralizar as emissões extras geradas pelos incidentes. No caso avaliado, a área de energia representa a área fictícia necessária para assimilar as emissões de CO₂ de todos os incidentes que ocorrem em um ano de operação da via. Os resultados apoiam o processo de tomada de decisão para investimentos em rodovia na medida em que os impactos ambientais somados aos demais impactos causados por incidentes rodoviários causam inúmeros prejuízos sociais, impedindo assim, a promoção da sustentabilidade.

Agradecimentos:

Os autores agradecem a CAPES e ao CNPq pela concessão de auxílio financeiro para a realização desta pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVAREZ, P.; HADI, M. (2010). Use of ITS Data to Calibrate Microscopic Simulation Models for Incident Conditions. Traffic Flow Theory Committee Summer Meeting and Conference. Annecy, France..
- ARROW, K.; BOLIN, B.; COSTANZA, R.; DASGUPTA, P.; FOLKE, C.; HOLLING, C.S.; JANSSON, B.; LEVIN, S.; MALER, K.; PERRINGS, C.; PIMENTEL, D. (1995). Economic Growth, Carrying Capacity, and the Environment. *Ecological Applications*, Vol. 6, No. 1. pp. 13-15.
- BARRETT, J., SCOTT, A. (2003). The application of the ecological footprint: a case of passenger transport in Merseyside. *Local Environment*, 8 (2), 167-183.
- CHAMBERS, N., SIMMONS, C., WACKERNAGEL, M. (2000). Sharing nature's interest – ecological footprints as an indicator of sustainability. Earthscan publication Ltd, London, UK.
- CHI, G., STONE JR, B. (2005). Sustainable transport planning: estimating the ecological footprint of vehicle travel in future years. *Journal of Urban Planning and Development*. 170 – 180.
- COMMISSION FOR GLOBAL ROAD SAFETY. (2011). Make Roads Safety. FIA Foundation. London, UK.
- DENATRAN (1987) - Departamento Nacional de Trânsito. Manual de identificação, análise e tratamento de pontos negros. 2ª edição, Brasília, DF.
- DNIT (2010). Manual de Sinalização e Obras de Emergências em Rodovias. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Rio de Janeiro.
- DEXHEIMER L. (2012). A Pegada Ecológica dos Incidentes Rodoviários. **Tese de Doutorado**. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre.
- EWING B., REED, A. GALLI, A., KITZES, J. and WACKERNAGEL, M. (2010). Calculation Methodology for the National Footprint Accounts, 2010 Edition. Oakland: Global Footprint Network.
- FAO. (2000). Global Fibre Supply Model. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Tech. rep.
- HOLDEN, E. (2004). Ecological footprints and sustainable urban form. *Journal of Housing and the Built Environment*, 19, 91-109.
- IPCC. (2007). Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change 2007. Cambridge University Press, UK.
- IPEA e ANTP (2003) - Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada e Associação Nacional de Transportes Públicos. Impactos sociais e econômicos dos acidentes de trânsito nas aglomerações urbanas brasileiras. Relatório Executivo. Brasília, Brasil.
- MOREIRA, R.B. (2005). Uma Contribuição para Avaliação do Modelo “CORSIM” em Simulações de Tráfego Urbano do Rio de Janeiro. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE. Rio de Janeiro.
- MUÑIZ, I., GALINDO, A. (2005). Urban form and the ecological footprint of commuting. The case of Barcelona. *Ecological Economics*, 55, 499-514.
- MUÑUZURI, J., DUIN, J.H.R., ESCUDERO, A. (2010). How efficient is city logistics? Estimating ecological footprints for urban freight deliveries. *Social and Behavioral Sciences* 2, 6165 - 6176.

- REES, W.E. (1992). Ecological footprints and appropriated carrying capacity: what urban economics leaves out. *Environment and Urbanization* 4/2, 121–130.
- SCOTTI, M., BONDAVALLI, C., BODINI, A. (2009). Ecological footprint as a tool for local sustainability: The municipality of Piacenza (Italy) as a case study. **Environmental Impact Assessment Review**. Vol 29, pp 39-50.
- WACKERNAGEL, M., REES, W.E. (1996). *Our Ecological Footprint: Reducing Human Impact on the Earth*. Gabriola Press New Society Publishing, B.C.
- WACKERNAGEL, M.; MONFREDA, C.; MORAN, D.; WERMER, P.; GOLDFINGER, S.; DEUMLING, D.; MURRAY, M. (2005). *National Footprint and Biocapacity Accounts 2005: The Underlying Calculation Method*. Global Footprint Network. Oakland. California.
- WORLD BANK. (2009). *Global Road Safety Facility Strategic Plan 2006-2015*. World Bank Transport Division. Washinton DC.