



Avaliação energético-ambiental da produção agropecuária na bacia hidrográfica dos rios Mogi-Guaçu e Pardo, Brasil

Feni Agostinho e Enrique Ortega

Laboratório de Engenharia Ecológica, Faculdade de Engenharia de Alimentos, UNICAMP

feniagostinho@gmail.com

Fecha de recepción: 13/02/2011. Fecha de aceptación: 3/12/2011

Resumo

Dede a revolução industrial e verde, a produtividade agropecuária está aumentando exponencialmente, mas este modelo de produção é fortemente dependente de combustíveis fósseis e minérios. Na tentativa de evitar a escassez desses recursos devido à grande demanda, precisa-se urgentemente elaborar políticas públicas eficientes para o desenvolvimento sustentável. Para isso, existe a necessidade de avaliações energético-ambientais com boa qualidade para suprir importantes subsídios aos tomadores de decisão. Este trabalho aplicou as abordagens Avaliação Emergética, Análise Energética e Inventário de Emissões na produção agropecuária da bacia hidrográfica dos rios Mogi-Guaçu e Pardo, Brasil. A Avaliação Emergética mostrou que quase todos os usos da terra agropecuários presente na bacia Mogi-Pardo possuem baixa renovabilidade (de 23% a 35%), exigindo esforços para melhorar a renovabilidade da bacia que é de apenas 36%. A Análise Energética mostrou que as áreas ocupadas com cana-de-açúcar, fruticultura e café consomem $6,72 \cdot 10^{10}$ MJ.year⁻¹, correspondendo a 91% do consumo total da bacia Mogi-Pardo. O Inventário de Emissões mostrou que $5,65 \cdot 10^6$ MgCO₂-equivalente (categoria de impacto de aquecimento global) e $9,1 \cdot 10^3$ MgSO₂-equivalente (categoria de impacto de acidificação) estão sendo emitidos para a atmosfera. Considerando todos os índices obtidos, atenção especial deveria ser dada para as áreas com cana-de-açúcar, devido à sua influência nos resultados finais do desempenho para a bacia hidrográfica, e também, porque cana-de-açúcar está sendo expandida para suprir a crescente demanda por etanol.

Palavras Chave: Brasil, contabilidade emergética, análise energética, emissões gasosas, bacia hidrográfica.

Abstract

Since the industrial and green revolution, the agriculture's productivity is increasing in a very fast way, but this model of agriculture depends strongly on fossil fuels and minerals ores considered non-renewable resources. To avoid their depletion and all environmental impacts related to their use, it is urgent to elaborate efficient public policies for sustainable development. For that purpose, there is a need of good quality energy-environmental assessments to provide subsidies to decision makers. This work applies Emergy Accounting, Embodied Energy Analysis and Gas Emission Inventory on the agricultural production in Mogi-Guaçu and Pardo Watershed, Brazil. Emergy accounting showed that almost all farming systems possess low renewability (from 23% to 35%), claiming efforts to improve the watershed's renewability of 36%. Embodied Energy approach showed that sugar-cane, orchards and coffee land use consume $6.72 \cdot 10^{10}$ MJ.year⁻¹, corresponding to 91% of total watershed's consumption. Gas emission approach showed that about $5.65 \cdot 10^6$ MgCO₂-equivalent.yr⁻¹ (global warming impact) and $9.1 \cdot 10^3$ MgSO₂-equivalent.yr⁻¹ (acidification impact) are being released to biosphere. Considering all obtained indices, special attention should be done for sugar-cane production due to its influence on final watershed's performance, and because it is being expanded to supply ethanol for fuel market.

Key-words: Brazil, emergy accounting, embodied energy, gas emission, watershed.

Jel Codes: Q0, Q1, Q18, Q5, Q56

1. Introdução

Através da revolução industrial, o avanço de mecanismos e máquinas de combustão interna tem aumentado exponencialmente em muitas partes dos sistemas de produção,

sejam eles industriais ou agropecuários. Essa transição energética tem sido dirigida pelo maciço uso de combustíveis fósseis e minérios, além da substituição do trabalho humano pelas máquinas. Principalmente nos anos setenta, depois da chamada "revolução



verde” em que se considerava o argumento de que os humanos enfrentariam baixa disponibilidade de alimento no futuro, a produção agrícola está aumentando em passos largos, mas infelizmente para produzir commodities para o mercado externo. O discurso era de que, objetivando resolver os problemas relacionados à fome, é necessário aumentar a produção agropecuária através do uso de mais recursos derivados de indústrias químicas (fertilizantes, agroquímicos, etc) que são fortemente dependentes de petróleo e minerais, considerados não-renováveis por definição. Podemos acreditar que existe, de fato, alimento suficiente, e que o problema não está relacionado à produção, mas sim à distribuição; melhor ainda, existe um problema com o modelo atual de produção-consumo. Assim, o problema não é tecnológico, mas político. Simultaneamente, o etanol de cana-de-açúcar produzido atualmente está sendo reconhecido como uma alternativa aos combustíveis fósseis, em que o Brasil é considerado um dos maiores produtores mundiais. Para permanecer nesse *status*, o Brasil está expandindo suas áreas de cana-de-açúcar sobre áreas de produção de alimentos e áreas de vegetação nativa; além disso, o modelo agrícola atual para produção da cana-de-açúcar demanda grandes quantidades de recursos fósseis e minérios, tornando-se ele mesmo um recurso não-renovável.

A bacia hidrográfica dos rios Mogi-Guaçú e Pardo é economicamente uma importante região do Estado de São Paulo. Além da forte produção industrial, sua produção agropecuária é responsável, em termos monetários, por aproximadamente 30% das exportações totais Brasileiras. Atualmente, a bacia do Mogi-Pardo está enfrentando os problemas citados acima sobre a produção de commodities ao invés de alimentos. Em uma futura perspectiva em que combustíveis fósseis serão inviabilizados economicamente, a produção agropecuária terá que ser mantida por recursos renováveis. Esta situação revela incertezas sobre os limites da existência humana no planeta (MEA 2005; Wackernagel et AL. 1999; WCED 1987;

Meadows et AL. 1978), forçando sociedades a maiores reestruturações e inovações em direção à uma economia de baixo consumo energético (Odum e Odum 2001). Para esse propósito, a avaliação da sustentabilidade dos sistemas de produção é uma tarefa essencial, porque somente com ajuda de bons indicadores e uma abordagem de cenários, os tomadores de decisão poderão ter uma visão clara sobre o que está acontecendo e tomar boas decisões para melhorar a situação atual.

Existem muitas metodologias com diferentes focos e que fornecem, obviamente, diferentes índices finais; como exemplos, podem ser citadas algumas que objetivam avaliar aspectos energético-ambientais, como a Contabilidade Emergética (Odum 1996), Pegada Ecológica (Wackernagel et al. 2005), Contabilidade de Materiais (Schmidt-Bleek 1993), Análise Energética (Slesser 1974), Análise Exergética (Szargut e Morris 1998) e Inventário de Emissões Gasosas (LCA 1997). Mais recentemente, Rockstrom et al. (2009) mostraram a importância em identificar e quantificar limites ambientais do Planeta que não devem ser ultrapassados. Os autores argumentam que os seguintes aspectos são essenciais na pesquisa científica e políticas públicas: mudanças climáticas, taxa de perda da biodiversidade, ciclo do nitrogênio e do fósforo, degradação do ozônio estratosférico, acidificação dos oceanos, uso mundial de água doce, alterações no uso da terra, carga de aerossol atmosférico e poluição química. Um ponto importante é que não existe um indicador “mágico” capaz de englobar todas as variáveis envolvidas no desenvolvimento sustentável (Siche et al. 2008). Singh et al (2009) comentam que índices e taxas são subjetivos, mesmo considerando a objetividade relativa dos métodos empregados na avaliação da sustentabilidade. Ulgiati et al (2006) sugerem utilizar diferentes métodos com vários indicadores na avaliação da sustentabilidade, em que cada metodologia deveria ser utilizada de acordo com suas próprias regras específicas. Acreditamos que a Contabilidade Emergética, a Análise Energética e o Inventário de Emissões Gasosas podem ser



considerados como importantes ferramentas, em que cada estudo energético-ambiental deveria, pelo menos, utilizar essas ferramentas. Elas fornecem índices relacionados às mudanças climáticas, acidificação dos oceanos e degradação do ozônio estratosférico como aspectos importantes identificados por Rockstrom et al. (2009), e adicionalmente outros índices de eficiência energético-ambiental são obtidos em escala local e global.

Este trabalho aplica a Contabilidade Energética, a Análise Energética e o Inventário de Emissões Gasosas na produção agropecuária presente na bacia do Mogi-Pardo, objetivando calcular diferentes índices que representem seu desempenho energético-ambiental.

2. Metodologia

2.1. Área de estudo

A bacia hidrográfica dos rios Mogi-Guaçu e Pardo (Figura 1) foi escolhida como estudo de caso devido a três principais razões: (1) Sua importância econômica para o Brasil; em 2006, a produção agropecuária do Estado de São Paulo exportou aproximadamente 45,6 bilhões de USD (33,4% do total Brasileiro) e importou 37,1 bilhões de USD (40,6% do total Brasileiro), representando um superávit de 8,86 bilhões de USD (IEA 2007). (2) Existem muitos problemas ambientais e sociais na bacia relacionados à produção agropecuária e industrial.

(3) Existia um projeto chamado de “ECOAGRI¹” em que pesquisadores de diferentes campos de trabalho, avaliaram os problemas sociais e ambientais presentes na bacia, sugerindo algumas ações para evitá-los. Muitas informações sobre a bacia estão disponibilizadas pelo projeto ECOAGRI.

A bacia Mogi-Pardo possui uma área de 3.165.207 hectares, onde prevalecem as culturas de cana-de-açúcar e pastagem (Tabela 1).

Tabela 1. Uso da terra na bacia hidrográfica Mogi-Pardo em 2002.

Uso da terra	Área (ha)	Porcentagem (%)
Cana-de-açúcar	1.629.027	51,5
Floresta + Vegetação Ripária	464.160	14,7
Pastagem	392.621	12,4
Fruticultura	236.288	7,5
Silvicultura	109.710	3,5
NIPC cultura anual ^A	80.862	2,6
Áreas urbanas	75.502	2,4
Cerrado	62.778	2,0
Rios, lagos e reservatórios	49.773	1,6
IPC cultura anual ^B	33.354	1,1
Café	22.588	0,7
Seringueira	3.401	0,1
Outros	4.481	0,1
Áreas de mineração	655	< 0,0
Total:	3.165.207	100,0

Fonte: Projeto ECOAGRI (relatório não-publicado).
^A Cultura anual não irrigada por pivô central (NIPC). Entretanto, ela pode ser irrigada por outro tipo de tecnologia.
^B Cultura anual irrigada por pivô central (IPC).

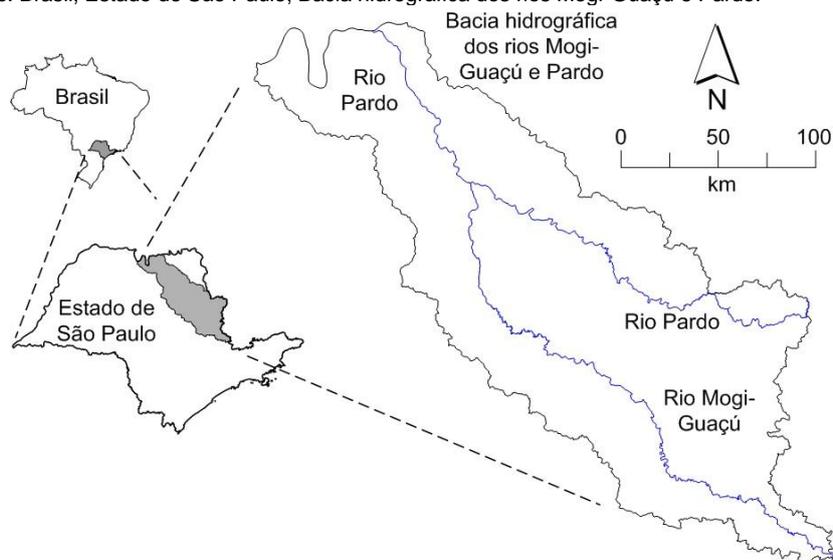
2.2. Metodologias de avaliação de impactos energético-ambientais

De acordo com Ulgiati et al. (2006), todos os métodos de avaliação de impactos ambientais podem ser divididos em duas categorias gerais: aquelas que focam sobre a quantidade de recursos utilizados por unidade de produto (chamada de métodos a “montante”), e aquelas que se preocupam com as consequências das emissões do sistema (chamada de métodos a “jusante”). Enquanto os métodos a montante fornecem valiosas informações sobre os custos ambientais escondidos, os métodos a jusante estão frequentemente relacionados aos impactos imediatamente percebidos sobre o ecossistema local. Neste presente trabalho, foi considerada a abordagem a montante através das metodologias Contabilidade Energética, Análise Energética e Inventário

¹ Informações sobre o projeto ECOAGRI podem ser obtidas em <http://ecoagri.cnptia.embrapa.br>



Figura 1. Área de estudo: Brasil, Estado de São Paulo, Bacia hidrográfica dos rios Mogi-Guaçu e Pardo.



de Emissões Gasosas (essa última contabilizando apenas CO_2 e SO_2 equivalentes). Além disso, o diesel queimado nos tratores e colheitadeiras agrícolas foi contabilizado no Inventário de Emissões Gasosas como um impacto a jusante (Figura 2).

Energia é definida por Odum (1996, p.7) como “a energia disponível de um tipo previamente utilizada diretamente ou indiretamente para fazer um serviço ou produto”. Contabilidade Emergética preocupa-se com o desempenho ambiental do sistema sobre uma escala global, contabilizando toda a energia considerada gratuita da natureza como radiação solar, vento, chuva, assim como o suporte ambiental incorporado no trabalho e serviço humano, que usualmente não são contabilizados em análises energéticas tradicionais. Além disso, a contabilidade é estendida para trás no tempo para incluir o trabalho ambiental necessário na formação do recurso. A quantidade de energia que foi originalmente requerida para fornecer uma unidade de cada entrada (recurso utilizado pelo sistema) é referida como sua intensidade emergética (usualmente em $\text{seJ}\cdot\text{J}^{-1}$ ou $\text{seJ}\cdot\text{kg}^{-1}$), que pode ser considerada como um fator de qualidade que funciona como uma medida

da intensidade do suporte fornecido pela biosfera à entrada sobre estudo (Ulgiati et al. 2006). A intensidade emergética de um produto ou processo é calculada como a soma da energia total utilizada pelo sistema dividida pela sua energia ou massa produzida. Além da intensidade emergética, existem outros índices emergéticos que podem ser calculados para avaliar a sustentabilidade de um sistema (veja Tabela 2). O procedimento de cálculo para obtenção dos índices emergéticos é basicamente a multiplicação de cada quantidade bruta das entradas do sistema pelas suas respectivas intensidades emergéticas (Figura 2), depois disso, uma agregação dos fluxos é realizada e os índices emergéticos podem ser calculados. Maiores informações sobre a Metodologia Emergética podem ser encontradas em Odum (1996) e Brown e Ulgiati (2004).

Análise Energética é definida pela *International Federation of Institutes for Advanced Study* (IFIAS) como o processo de determinar a energia requerida diretamente e indiretamente para permitir um sistema a produzir determinado bem ou serviço. De acordo com Franzese et al. (2009), a Análise Energética está sendo aplicada de acordo com as convenções da IFIAS, que objetivam



Figura 2. Esquema de aplicação dos métodos de avaliação dos impactos ambientais empregados. Adaptado de Ulgiati et al, 2006

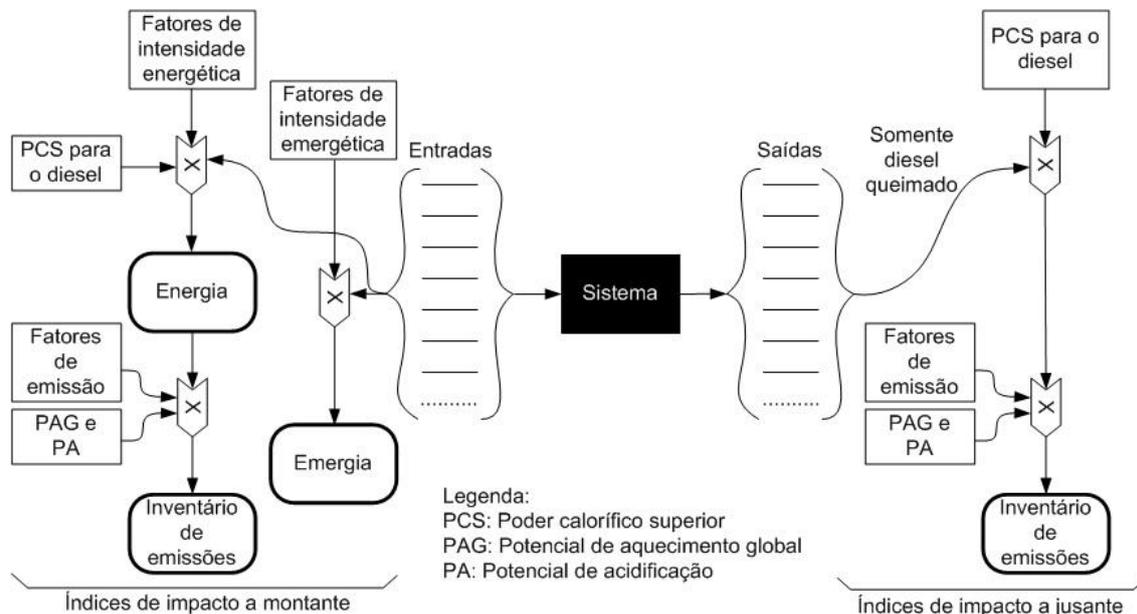


Tabela 2. Índices emergéticos

Índices tradicionais	Expressão	Significado
Transformidade (Tr)	Y/E_p	Razão entre a energia total pela energia produzida.
Razão de rendimento emergético (EYR)	Y/F	Razão entre a energia total pela energia da economia.
Razão de investimento emergético (EIR)	F/I	Razão da energia da economia pela da natureza.
Razão de intercâmbio emergético (EER)	Y/Em_{USD}	Verifica se toda energia utilizada foi recebida em troca durante o comércio
Índices modificados	Expressão	Significado
Renovabilidade (%R)	$100x(R+M_R+S_R)/Y$	Razão entre a energia renovável pela energia total.
Razão de carga ambiental (ELR)	$(N+M_N+S_N)/(R+M_R+S_R)$	Razão entre a energia não-renovável pela energia renovável.

Fonte: Ortega et al. (2002) baseado em Odum (1996) e Brown e Ulgiati (2004).

Legenda: I = contribuição da natureza (R+N); R = recursos renováveis da natureza; N = recursos não-renováveis da natureza; F = recursos da economia (M+S); M = materiais (M_R+M_N); M_R = energia e material renováveis; M_N = energia e material não-renováveis; S = serviços (S_R+S_N); S_R = serviços renováveis; S_N = serviços não-renováveis; Y = energia total (I+F); E_p = energia ou massa produzida; Em_{USD} = Emdollar.

principalmente a quantificação do uso e da disponibilidade de estoques de combustíveis fósseis, algumas vezes também conhecida energia comercial, isto é, energia fóssil e fóssil-equivalente. Essa metodologia foca sobre combustíveis e eletricidade, fertilizantes e outros químicos, maquinaria e outros bens fornecidos a processos em termos de óleo equivalente utilizados para produzi-los. A energia incorporada em um produto ou processo é calculada pela soma de todas as entradas no sistema multiplicada pelos seus

respectivos fatores de intensidade energética², e multiplicados pelo poder calorífico superior do diesel de 45 Joules por quilograma (Figura 2). Os principais índices da Análise Energética são (i) a quantidade total de energia comercial utilizada pelo sistema, e (ii) sua eficiência energética expressada pelo índice EROI (*Energy Return*

² Neste trabalho foram considerados os fatores de intensidade energéticos publicados por Jarach (1985) devido à falta desses fatores atualizados para sistemas agropecuários e publicados em literatura científica.



on Investment), um tipo de relação entre a energia que sai pela energia que entra. Para maior entendimento sobre a Análise Energética, consulte Slesser (1974). Uma comparação detalhada entre Contabilidade Energética e Análise Energética pode ser vista em Franzese et al. (2009), Herendeen (2004) e Brown e Herendeen (1996).

O Inventário de Emissões Gasosas é geralmente utilizado em estudos de impactos à montante. Considerando que, na produção agropecuária, o CO₂-equivalente diretamente liberado para a atmosfera possui altos valores quando comparados com as emissões indiretas, decidimos considerar ambos. Somente o diesel queimado pelas máquinas agrícolas foi contabilizado nas emissões diretas, enquanto nas emissões indiretas, toda a energia incorporada consumida pelo sistema foi considerada. Este trabalho considera a abordagem LCA (1997) e seus fatores de equivalência para estimar as categorias de impacto aquecimento global (expresso como CO₂-equivalente) e acidificação (expresso como SO₂-equivalente). Após o procedimento de cálculo da energia incorporada (veja Figura 2), os fatores de emissão fornecidos pela *Environmental Protection Agency* (EPA, 2008 – Tabela 3) são utilizados para obter a quantidade de Hidrocarbonetos, CO, CH₄, N₂O, CO₂, NO_x e SO₂ liberados na atmosfera devido à queima de diesel em algum momento na cadeia de produção da matéria-prima. Assim, o Inventário de Emissões Gasosas é obtido pela multiplicação de todas as emissões pelos seus respectivos potenciais de aquecimento global e de acidificação fornecidos por LCA (1997, p.83 e 91), e somando os resultados. Para a categoria de aquecimento global, os fatores de potenciais utilizados neste trabalho foram: CO = 1,6 vezes CO₂; CH₄ = 62 vezes CO₂; N₂O = 290

vezes CO₂; Hidrocarbonetos (considerando CH₂ como um típico hidrocarboneto) = 3,1 vezes CO₂. Para a categoria de acidificação foi considerado que NO_x é equivalente a 0,88 vezes SO₂. Na avaliação à montante, mesmo que o CO₂-equivalente e o SO₂-equivalente não foram diretamente emitidos pela bacia do Mogi-Pardo, eles foram emitidos em algum lugar do Planeta para produzir a matéria-prima e energia utilizada pela bacia. Devido a isso, e considerando os conceitos da Análise do Ciclo de Vida, aquelas emissões devem ser contabilizadas na avaliação dos impactos ambientais da bacia Mogi-Pardo. Na avaliação à jusante, a quantidade de diesel queimado localmente pelas máquinas agrícolas foi inicialmente convertida em unidades de energia, e depois convertida em categorias de impacto utilizando o mesmo procedimento anterior à montante.

3. Resultados e discussão

O diagrama sistêmico da bacia Mogi-Pardo pode ser visto na Figura 3. Existem três subsistemas representados pelo capital natural, produção agropecuária e áreas urbanas, em que energia e material flui de um sistema para outro. O estoque de capital natural depende de recursos renováveis para produzir biomassa vegetal e animal através da interação entre solo, água, animais (incluindo micro-organismos) e vegetação. Além da biomassa, outro produto dessas interações são os serviços ambientais fornecidos aos outros subsistemas. A produção agropecuária depende fortemente dos serviços ambientais, energia renovável do ambiente externo e energia das fontes externas da economia, como fertilizantes, combustível, minerais e trabalho humano. A biomassa animal e vegetal produzida pelas áreas agropecuárias fornece energia e material para as áreas urbanas, que também

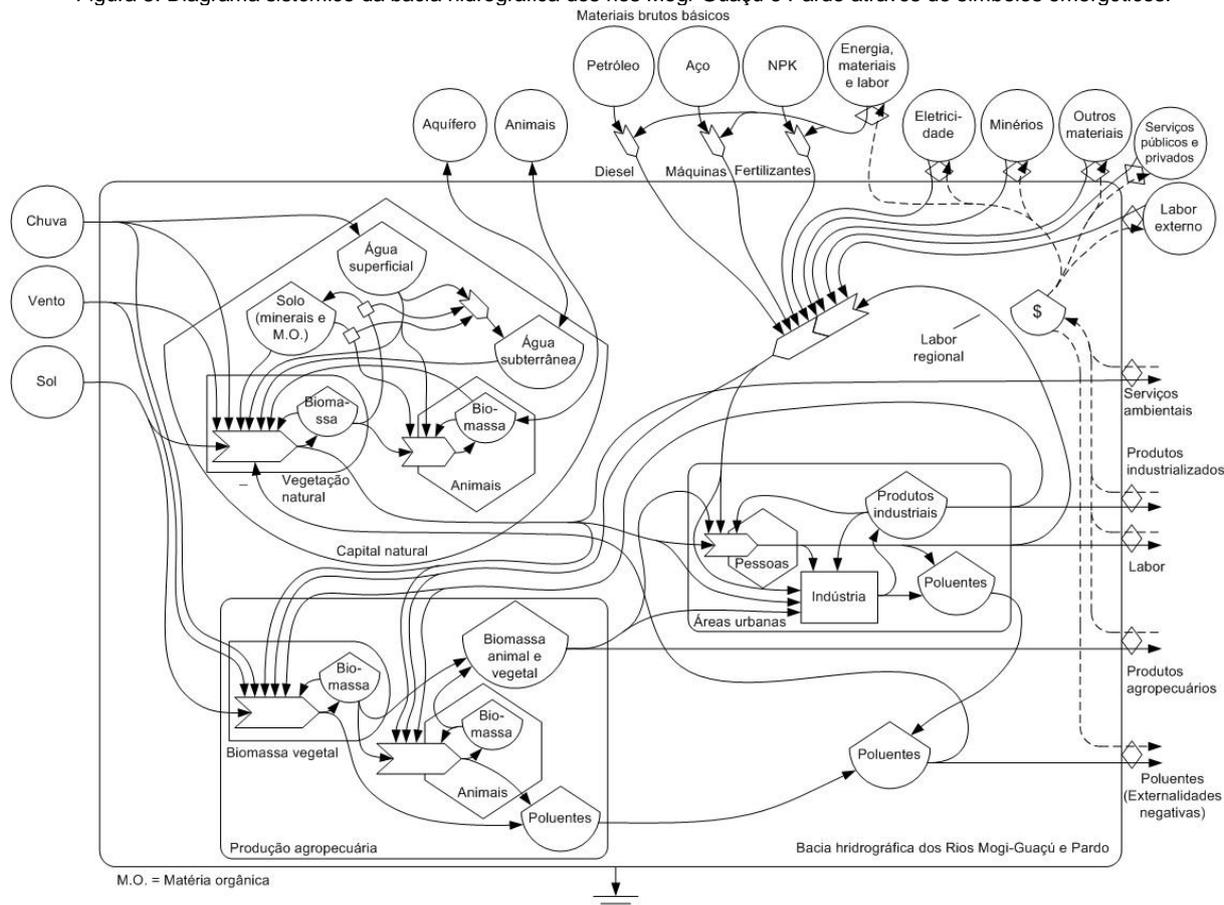
Tabela 3. Fatores de emissão para a combustão do diesel (em g.MJ⁻¹ de diesel queimado).

	Hidrocarbonetos	CO	CH ₄	N ₂ O	CO ₂	NO _x	SO ₂
Caldeira industrial	0.00067	0.017	0.000083	0.00037	76.2	0.020	0.0065
Trator agrícola	0.085	0.32	0.0042	0.0019	75.5	0.89	0.12

Fonte: EPA (2008)



Figura 3. Diagrama sistêmico da bacia hidrográfica dos rios Mogi-Guaçu e Pardo através de símbolos emergéticos.



dependem fortemente de energia e material de fontes externas da economia. As áreas urbanas e agropecuárias produzem subprodutos, que em elevada concentração podem ser considerados poluentes e interagem negativamente com o capital natural resultando em uma redução da produção de serviços ambientais.

Depois de conhecer o funcionamento do sistema sob estudo, quantificar sua dependência de energia, material, trabalho e serviços, as três metodologias consideradas neste trabalho puderam ser aplicadas. A seguir, os resultados são apresentados de maneira separada pelas metodologias aplicadas.

3.1. Avaliação Emergética³

³ Devido ao limitado espaço do jornal, todos os dados brutos, intensidades energéticas e emergéticas utilizados neste trabalho não foram incluídos no artigo, mas eles estão disponíveis em Agostinho (2009).

A Tabela 4 mostra os índices emergéticos obtidos para a bacia Mogi-Pardo e os diferentes usos da terra presentes nela. A Transformidade (Tr) das áreas de vegetação natural (aproximadamente 10.000 seJ/J) é parecida ao valor estimado por Odum (1996), e este valor foi considerado como referência para efeito de comparação com os valores obtidos para os diferentes usos da terra. As áreas de Silvicultura possuem uma Tr de aproximadamente 1,7 vezes maior do que a referência (17.000 seJ/J); cana-de-açúcar é 4,7 vezes maior (47.000 seJ.J⁻¹); e os outros usos da terra possuem Tr variando de 20 a 172 vezes maior do que as áreas de vegetação natural (de 200.000 a 1.723.000 seJ/J). Para uma simples comparação, a Transformidade de combustíveis fósseis é de aproximadamente 29.000 seJ/J, legumes,



Tabela 4. Índices emergéticos para o uso da terra agropecuário da bacia Mogi-Pardo.

Uso da terra	Tr	%R	EYR	EIR	ELR	EER
	seJ.J ⁻¹	%	-	-	-	-
Cana-de-açúcar	47.000	35	1,58	1,72	1,83	2,71
Café	722.000	27	1,29	3,43	2,76	1,86
Cultura anual IPC	200.000	23	1,22	4,56	3,27	1,18
Cultura anual NIPC	227.000	29	2,20	0,83	2,45	1,22
Fruticultura	321.000	30	1,23	4,37	2,30	1,73
Pastagem	1.723.000	30	1,59	1,69	2,29	1,64
Silvicultura	17.000	35	2,61	0,62	1,81	2,14
Seringueira	393.000	51	1,30	3,34	0,96	3,44
Bacia Mogi-Pardo ^A	56.000	36	1,95	1,05	1,78	2,20

^A Considerando o uso da terra listado na Tabela 1, excluindo áreas urbanas, rios e áreas de mineração.

Tr = Transformidade (considerando *Labor* e Serviços para os sistemas dominados pelo homem); %R = Renovabilidade; EYR = Razão de rendimento emergético; EIR = Razão de investimento emergético; ELR = Razão de carga ambiental; IPC = Irrigado por pivô central; NIPC = Não-irrigado por pivô central.

vegetais e frutas com 112.000 seJ/J e alimentos protéicos com 2.500.000 seJ/J (Odum 1987). A produção agropecuária na bacia do Mogi-Pardo possui uma elevada posição na hierarquia de energia da biosfera, pois ela concentra energia de elevada qualidade; isso ocorre porque a produção agropecuária utiliza grandes quantidades de energia com elevada intensidade emergética. Devido à extensa área ocupada com cana-de-açúcar (51% da área total da bacia), sua influência no desempenho geral da bacia Mogi-Pardo é elevado, resultando em um valor de 56.000 seJ/J. É importante ter em mente que somente as áreas agropecuárias e com vegetação natural foram consideradas neste trabalho, excluindo as áreas urbanas que potencialmente possuem elevada Transformidade e que poderiam influenciar do desempenho geral da bacia.

Excluindo as áreas com vegetação natural que são renováveis por definição, as áreas de Seringueira obtiveram um excelente desempenho para o índice Renovabilidade de 51%. Todos os outros usos da terra possuem Renovabilidade (%R) variando de 23 a 35%, sendo considerados insustentáveis a médios e longos períodos de tempo. Essa faixa de variação está perto dos valores obtidos pela agropecuária tradicional (química) Brasileira (de 20 to 42%; Ortega et al. 2005; Cavalett et al. 2006; Pereira e Ortega 2010; Cavalett e Ortega 2009). Poderia ser argumentado que, mesmo possuindo baixa %R, esses sistemas conseguem sustentar-se atualmente, mas entendemos que sustentabilidade está

relacionada à auto-suficiência (auto-sustentação) a longos períodos de tempo. Os sistemas com baixa %R estão recebendo fortes subsídios (suporte financeiro e tecnológico, não são cobrados pelas externalidades negativas produzidas, pagam preço muito baixo pelos agroquímicos e maquinaria produzidos a partir do petróleo, etc), dessa forma eles não podem ser considerados sistemas auto-suficientes agora e nem no futuro. O baixo desempenho desses sistemas em relação à %R é realçado quando é realizada uma comparação com o desempenho dos sistemas ecológicos de produção agropecuária Brasileira (de 56 a 73%; Francescato et al. 2008; Ortega et al. 2005). A bacia do Mogi-Pardo utiliza grandes quantidades de recursos não-renováveis e pouca quantidade de renováveis, isso resultou em uma %R de 36%. Desde que recursos não-renováveis (basicamente derivados de petróleo e minérios) são os *drivers* da atual produção agropecuária na bacia, a redução de sua disponibilidade nas próximas décadas será um grande desafio aos sistemas agropecuários que atualmente possuem baixa %R. A adoção de manejo ecológico (como por exemplo a diversificação na produção, a reciclagem de nutrientes, o planejamento da produção considerando também a produção de água, a conservação do solo e o controle biológico de pragas) poderiam reduzir a dependência de fertilizantes e agroquímicos e contribuir para uma maior %R (Agostinho et al 2008).



A distribuição espacial do índice de Renovabilidade sobre a bacia Mogi-Pardo pode ser vista na Figura 4, que mostra a predominância de valores na faixa de 27 a 35% e indica baixa sustentabilidade para a bacia; desempenhos menores que 27% são observados em áreas fragmentadas, principalmente nas regiões a montante e a jusante. Outro importante aspecto que deve ser realçado é que as áreas de vegetação natural, que possuem Renovabilidade maior que 80%, estão totalmente fragmentadas e ocupam somente 17% da área total da bacia. A região central da bacia, que possui principalmente cana-de-açúcar, tem a mais baixa densidade de vegetação natural. Isto ocorre devido à importância econômica da produção de cana-de-açúcar, que ocupa os melhores solos da bacia (baixa declividade, elevado nível de matéria orgânica e nutriente, recursos hídricos abundantes e já instalada infra-estrutura). Considerando moderados e longos períodos de tempo, a monocultura poderá resultar em muitos problemas relacionados à produção de serviços ambientais (por exemplo a produção de água) em escalas local e regional. As áreas a montante são principalmente utilizadas para pastagem, cultura anual não irrigada por pivô central, café e fruticultura, enquanto as áreas a jusante são principalmente utilizadas para silvicultura, seringueira e pastagem. Em geral, esses usos da terra ocorrem em médias e pequenas escalas, estão localizadas em áreas com elevada declividade e são predominantemente familiares; devido a essas características, níveis de preservação da vegetação natural são maiores nessas regiões quando comparadas às regiões com predominância de monoculturas baseadas em agroquímicos.

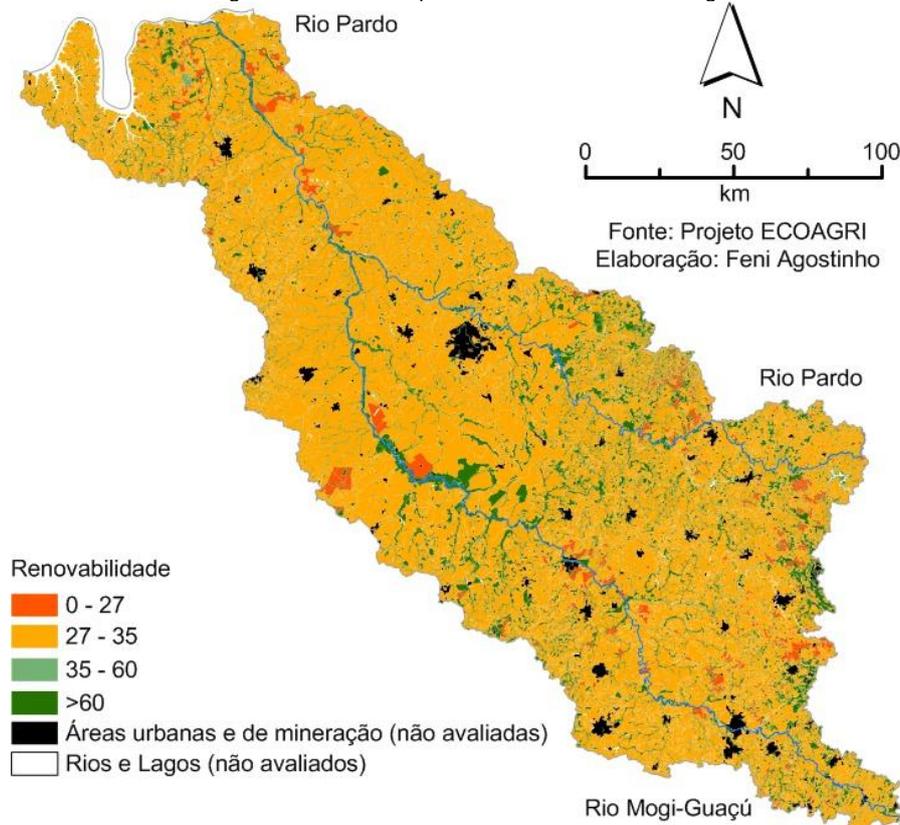
A Razão de Rendimento Emergético (EYR) para a silvicultura e cultura anual não irrigada mostrou bom desempenho (2,61 e 2,20 respectivamente), enquanto o EYR para todos os outros sistemas manejados pelo homem indica baixo desempenho, variando de 1,22 a 1,59; essa porcentagem indica baixo rendimento emergético, em que de 0,22 a 0,59 emjoules solares da natureza são utilizados por solar emjoule provindo da

economia. Esses valores são típicos da agricultura agroquímica Brasileira (variando de 1,34 a 2,17; Ortega et al. 2005; Cavalett et al. 2006; Pereira e Ortega 2010; Cavalett e Ortega 2009). Considerando o aumento do mercado global de etanol, cana-de-açúcar demanda atenção especial porque ocupa aproximadamente 51% da área total da bacia Mogi-Pardo e utiliza grande quantidade de energia derivada de recursos da economia (EYR de 1,58, indicando que 63% de sua energia total provém de recursos da economia), que são basicamente derivados de petróleo. O aumento no consumo de energia e material renovável é extremamente importante porque quanta mais alta sua, mais vantagem o sistema terá em uma futura perspectiva de menos petróleo disponível do que hoje em dia. Este aumento poderia ser alcançado através do manejo ecológico da produção agropecuária, objetivando os valores de EYR obtidos pelos sistemas ecológicos Brasileiros (variando de 2,24 a 3,69; Francescatto et al. 2008; Ortega et al. 2005); Esses números indicam uma dependência de recursos da economia variando de 45 a 27% sobre a energia total utilizada.

Os valores da Razão de Intercâmbio Emergético (EIR) indicam que as áreas de silvicultura e culturas anuais não irrigadas utilizam mais recursos da natureza do que da economia, alcançando valores de 0,62 a 0,83. Esses valores mostram um bom desempenho porque para cada solar emjoule investido pela natureza, são necessários de 0,62 a 0,83 emjoules solares da economia. Para todos os outros sistemas presentes na bacia e manejados pelo homem, baixo desempenho foi obtido: EIR variando de 1,69 a 4,56. Esses valores são próximos aos EIRs da agricultura agroquímica Brasileira (de 0,85 a 2,95, Ortega et al. 2005; Cavalett et al. 2006; Pereira e Ortega 2010; Cavalett e Ortega 2009). O desempenho da bacia Mogi-Pardo como um todo foi de 1,05, indicando um equilíbrio entre a energia provinda da natureza e da economia; para efeito de comparação, sistemas naturais possuem EIR igual a zero. A adoção de manejo ecológico é



Figura 4. Índice de renovabilidade emergético distribuído espacialmente sobre a bacia Mogi-Pardo.



urgente para aumentar a habilidade dos sistemas de produção agropecuários convencionais em utilizar recursos locais renováveis, objetivando obter valores de EIR da agricultura ecológica Brasileira, que varia entre 0,37 a 0,80 (Francescato et al. 2008; Ortega et al. 2005).

Considerando a faixa de valores estabelecida por Brown e Ulgiati (2004) sobre a interpretação do Índice de Carga Ambiental (ELR), a Tabela 4 mostra que somente seringueira, silvicultura e cana-de-açúcar causam baixa carga ambiental por possuírem ELR de 0,96, 1,81 e 1,83 respectivamente. Os outros usos da terra na bacia e manejados pelo homem causam moderada carga sobre o meio ambiente, com ELR variando de 2,29 a 3,27. O valor obtido pela bacia Mogi-Pardo (ELR de 1,78) indica que ela causa baixo impacto sobre o meio ambiente. Valores encontrados para a agricultura agroquímica Brasileira variam de 1,40 a 4,18 (Ortega et al. 2005; Cavalett et al. 2006; Pereira e Ortega 2010; Cavalett e Ortega 2009), enquanto para a agricultura

ecológica Brasileira variam de 0,37 a 0,84 (Francescato et al. 2008; Ortega et al. 2005).

A partir de uma abordagem econômica biofísica, o índice de Intercâmbio Emergético (EER) mostra que nenhum uso da terra é capaz de receber, na venda de seus produtos, toda a emergência empregada em sua produção. O melhor desempenho foi obtido pelas áreas de culturas anuais não irrigadas (EER de 1,22), mesmo assim esse uso da terra está entregando aproximadamente 22% mais emergência ao comprador do que recebendo em troca em termos monetários. Seringueira mostrou pior desempenho (EER de 3,44) entre todos os usos da terra, em que o preço de mercado do látex deveria ser, pelo menos, 3,44 vezes maior que seu preço atual; dessa forma, o produtor receberia na venda do látex, toda a emergência utilizada para produzi-lo. A bacia do Mogi-Pardo possui baixo desempenho para o índice EER (2,20), indicando que ela está entregando mais emergência (através da produção agropecuária) do que recebendo em troca no comércio



(preço de mercado dos produtos agropecuários).

3.2. Análise Energética

Através da quantidade total de material e energia utilizados pelos sistemas, e utilizando apropriados fatores de intensidade energética, foi possível calcular o consumo total de energia pela produção agropecuária da bacia Mogi-Pardo (Tabela 5). Cana-de-açúcar é responsável por aproximadamente 47% do total de energia utilizada na bacia, seguida pela fruticultura com 31% e pastagem com 12%; isto significa que somente estes três usos da terra são responsáveis por 90% do total de energia consumida pela bacia. Esses valores são diferentes aqueles obtidos pela Avaliação Energética, em que as porcentagens foram 57%, 16% e 13% para os mesmos usos da terra respectivamente; esta diferença existe porque a avaliação energética contabiliza o trabalho humano, serviços e todos os recursos provindos da natureza que não são contabilizados nas análises energéticas. Novamente, deve ser ressaltado que a Avaliação Energética e a Análise Energética são metodologias diferentes e elas não podem ser comparadas; maiores informações sobre essa questão estão em Franzese et al. (2009), Ulgiati et al (2006), Herendeen (2004) e Brown e Herendeen (1996).

A energia total consumida pela bacia Mogi-Pardo é de aproximadamente $7,39 \cdot 10^{10}$

$\text{MJ}\cdot\text{ano}^{-1}$, correspondente a 0,92% do petróleo total equivalente consumido pelo Brasil em 2002 ($8,01 \cdot 10^{12} \text{ MJ}\cdot\text{ano}^{-1}$; MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA 2009). Considerando que a energia contida (poder calorífico) nos produtos agropecuários da bacia é de $39,95 \cdot 10^{10} \text{ MJ}\cdot\text{ano}^{-1}$ (Agostinho 2009), o EROI (*Energy Return on Investment*) da bacia como um todo foi estimado como sendo 5,4; este número indica que para cada Joule de energia consumida são “produzidos” 5,4 Joules de energia. Essa razão de energia vai contra a primeira lei da termodinâmica, pois energia não pode ser criada, mas a Análise Energética permite uma relação saída/entrada maior que um. Isso é explicado pelo fato de que somente a energia “comercial”, isto é, aquela que possui valor de mercado, é contabilizada na Análise Energética, enquanto toda a energia provinda da natureza ou mesmo a antrópica, mas que não possui valor de mercado, não é considerado; soma-se a isso a mão-de-obra. Dessa forma, os custos energéticos “não-comerciais” de determinado bem ou serviço não são contabilizados, resultando em valor de energia maior na saída do sistema do que na entrada. Para uma simples comparação, etanol de cana-de-açúcar produzida no Brasil possui um EROI variando de 1,23 a 4,35; milho em grão possui um EROI de 0,78 a 1,36; a produção de petróleo mundial possuía um EROI de 100 em 1934, mas em 2000 seu valor foi reduzido para 14 (Agostinho 2009).

Tabela 5. Energia direta e indireta^A utilizada pela produção agropecuária da bacia Mogi-Pardo.

Uso da terra	Total	Indireta	Direta	Total	%
	$10^4 \text{ MJ}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{yr}^{-1}$	$10^7 \text{ MJ}\cdot\text{yr}^{-1}$	$10^7 \text{ MJ}\cdot\text{yr}^{-1}$	$10^7 \text{ MJ}\cdot\text{yr}^{-1}$	
Cana-de-açúcar	10,83	3.128,74	362,10	3.490,84	47,25
Fruticultura	9,79	1.994,91	318,99	2.313,90	31,32
Pastagem	2,19	785,14	73,03	858,17	11,61
Cultura anual IPC	9,61	293,35	27,12	320,47	4,34
Café	32,54	148,13	24,01	172,13	2,33
Cultura anual NIPC	1,78	130,66	13,26	143,93	1,95
Silvicultura	0,78	66,82	18,32	85,14	1,15
Seringueira	1,23	2,26	1,92	4,18	0,06
Bacia Mogi-Pardo	-	6.550,02	838,74	7.388,77	100,0

^A Energia direta considera somente o diesel queimado pelos tratores agrícolas (poder calorífico do combustível), enquanto energia indireta considera toda a energia comercial utilizada indiretamente para produzir as matérias-primas utilizadas pela bacia.



3.3. Inventário de Emissões Gasosas

Considerando a energia total consumida pela bacia Mogi-Pardo descrito na Tabela 5, foi possível estimar a quantidade em massa de alguns gases emitidos para a atmosfera que influenciam nas categorias de impacto de aquecimento global e acidificação (Tabela 6). Quantitativamente, CO₂ é o gás mais emitido pela bacia, seguido por NO_x, CO e SO₂. CH₄, N₂O e Hidrocarbonetos correspondem a uma inexpressiva quantidade em massa, mas por outro lado, eles devem ser contabilizados porque seus potenciais de aquecimento global são respectivamente 62, 290 e 3,1 vezes maior que CO₂.

A categoria de impacto de aquecimento global da bacia alcançou o valor de 5,65 10⁶ Mg CO₂-equivalente.ano⁻¹, em que somente o CO₂ é responsável por 99,6% desse total. Esse número certamente está subestimado, porque alguns manejos agropecuários como, por exemplo, a queima da biomassa vegetal antes da colheita e o metano emitido pela produção de gado, não foram contabilizados neste presente trabalho.

Não existe um padrão ou métodos para estimar qual seria o impacto na temperatura da atmosfera devido ao CO₂-equivalente emitido, isto é, em quantos graus a temperatura da atmosfera irá aumentar devido a uma tonelada de CO₂-equivalente emitido. Assim, o valor da categoria de impacto aquecimento global poderia ser utilizado para fazer comparações entre sistemas similares e/ou ser utilizado como um ponto chave a ser

gerenciado, objetivando sua redução através de melhor gerenciamento do sistema. Não foi possível encontrar em literatura científica, valores do impacto de aquecimento global para grandes bacias hidrográficas como a considerada neste presente trabalho, e devido a isso, comparações não foram realizadas.

Deve ser ressaltada a importância em contabilizar ambas as emissões, diretas e indiretas, porque mesmo que em termos energéticos a abordagem indireta consome 88,6% da energia total utilizada pela bacia, as emissões diretas são responsáveis por 94,2% do total de hidrocarbonetos, 70,7% do CO, 86,6% do CH₄, 85,1% do NO_x e 70,3% do SO₂ emitidos pela bacia. Isso acontece porque os fatores de emissão da queima direta do diesel, ou seja, seu uso em um motor de combustão interna são expressivamente maiores comparados aos fatores de emissão oriundos da queima de diesel em uma caldeira industrial (veja Tabela 3), que possui maior controle, filtros e catalisadores. Políticas públicas deveriam considerar as emissões diretas e indiretas, pois enquanto a primeira está influenciando em escala local e regional, a segunda está influenciando em escalas nacionais e globais.

A categoria de impacto de acidificação da bacia é de 9.10 10³ Mg SO₂-equivalente.ano⁻¹, em que NO_x é responsável por 84,3% desse total. Uma avaliação mais profunda sobre esse resultado não foi possível devido às mesmas razões descritas anteriormente para a categoria de aquecimento global.

Tabela 6. Emissões gasosas totais da bacia Mogi-Pardo relacionadas às categorias de impacto aquecimento global e acidificação.

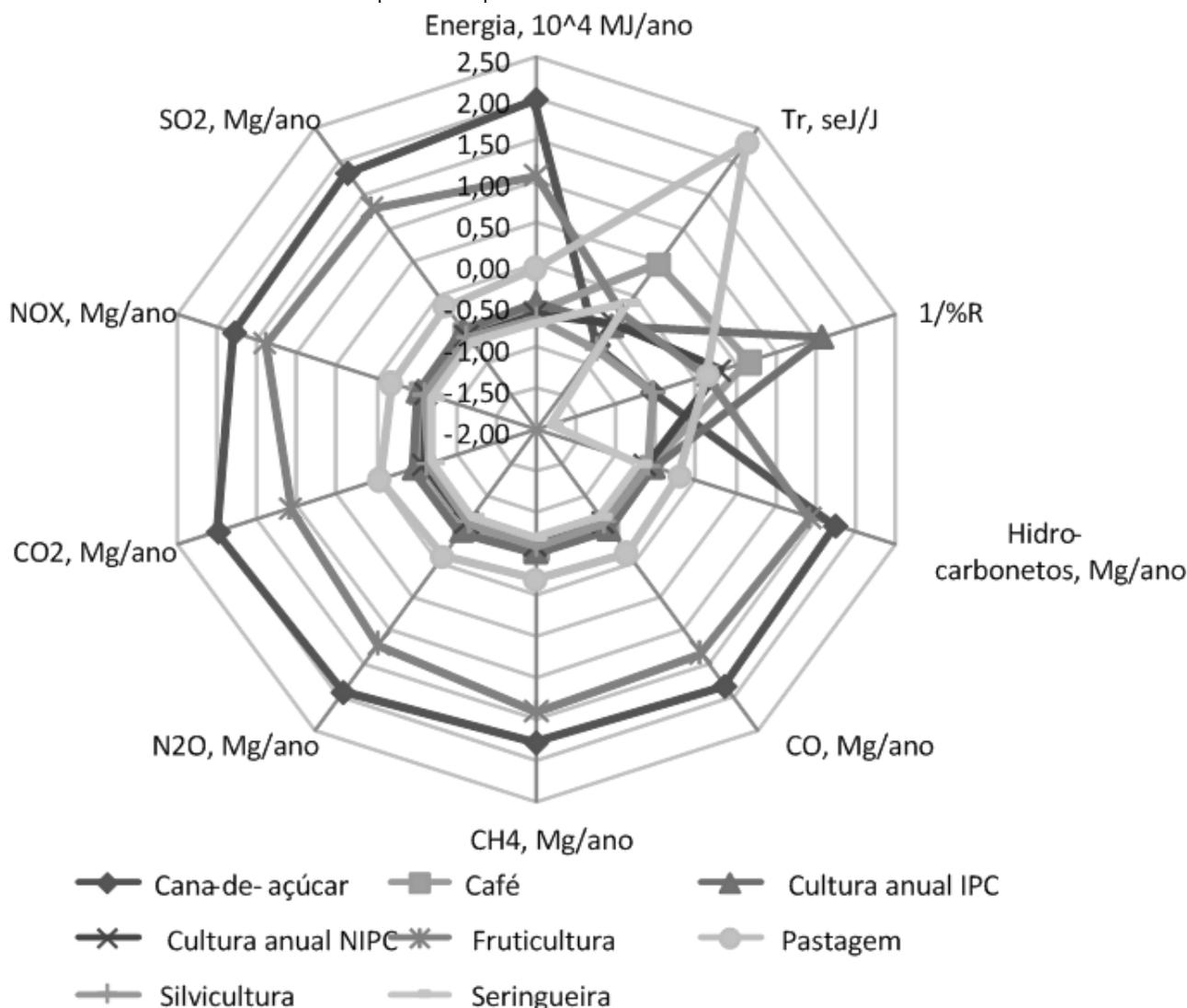
Uso da terra	Hidro-carbonetos	CO	CH ₄	N ₂ O	CO ₂	NO _x	SO ₂
	Mg.yr ⁻¹						
Cana-de-açúcar	328,7	1.690,6	17,8	18,5	2.657.483,7	3.848,5	637,9
Café	21,4	102,0	1,1	1,0	130.998,3	243,3	38,4
Cultura anual IPC	25,0	136,6	1,4	1,6	244.009,2	300,0	51,6
Cultura anual NIPC	12,1	64,6	0,7	0,7	109.578,6	144,2	24,4
Fruticultura	284,5	1.359,9	15,1	13,4	1.760.962,4	3.238,0	512,5
Pastagem	67,3	367,2	3,7	4,3	653.414,3	807,0	138,7
Silvicultura	16,0	70,0	0,8	0,6	64.750,4	176,4	26,3
Seringueira	1,6	6,5	0,1	0,0	3.172,7	17,5	2,4
Bacia Mogi-Pardo	756,8	3.797,5	40,7	40,2	5.624.369,6	8.774,8	1.432,2
Emissões diretas %	94,2	70,7	86,6	39,7	11,3	85,1	70,3
Emissões indiretas %	5,8	29,3	13,4	60,3	88,7	14,9	29,7



Como não existe um indicador capaz de juntar todos os outros indicadores calculados em apenas um, o diagrama de radar da Figura 5 é uma tentativa de fornecer de forma visual uma idéia sobre qual uso da terra possui pior, ou melhor, desempenho de uma maneira geral, onde maior área na Figura 5 representa pior desempenho. Pode-se observar que a cana-de-açúcar é o uso que possui pior desempenho, pois demanda grande quantidade de energia e emite grande

quantidade de gases poluentes para a atmosfera; em seguida tem-se área de fruticultura e pastagem; seringueira é a que possui melhor desempenho. É importante ressaltar que os valores diagramados correspondem à totalidade de cada uso da terra na bacia, e não em hectares de cada uso, assim, como a cana-de-açúcar ocupa mais do que 50% da área da bacia, era esperado um baixo desempenho para essa cultura.

Figura 5. Diagrama de radar mostrando índices selecionados para os usos da terra na bacia hidrográfica. O valor de cada índice foi subtraído da média aritmética e dividido pelo desvio padrão.





4. Conclusão

Considerando as metodologias e considerações realizadas nesse trabalho, as seguintes conclusões puderam ser realizadas:

- (a) **Avaliação Emergética** – A bacia hidrográfica dos rios Mogi-Guaçu e Pardo possui baixa renovabilidade (%R=36%), indicando ser insustentável de médios a longos períodos de tempo; para curtos períodos, ela poderia ser considerada sustentável, mas somente porque está recebendo fortes subsídios do governo, como comentado no texto principal. Adicionalmente, a bacia possui baixo rendimento emergético (EYR=1,95) e baixa taxa de intercâmbio emergético (EER=2,20). Por outro lado, a bacia possui bom desempenho para o índice de carga ambiental (ELR=1,78) e bom investimento emergético (EIR=1,05), mesmo que o EIR não mostre se a energia derivada da natureza é renovável ou não-renovável. Intensa redução do uso de recursos não-renováveis (derivados de petróleo e minérios) deve ser objetivada, focando sobre as áreas com baixa renovabilidade (regiões à montante e jusante da bacia). Para isso, práticas ecológicas deveriam ser aplicadas na produção agropecuária.
- (b) **Análise Energética** – O consumo energético da bacia Mogi-Pardo é $7,39 \cdot 10^{10}$ MJ.ano⁻¹, onde as áreas de cana-de-açúcar, fruticultura e café são responsáveis por 92% desse total. O consumo de energia direta corresponde a 11,4% do total, enquanto a energia indireta corresponde a 88,6%, mostrando a importância em contabilizar ambas. A eficiência energética da bacia, evidenciada pelo EROI, é de 5,4; isto indica que para cada Joule utilizado pela bacia, são “produzidos” 5,4 Joules na forma de produtos agropecuários.
- (c) **Inventário de Emissões gasosas** – O consumo de energia e de material da bacia Mogi-Pardo resultou em um total de $5,65 \cdot 10^6$ MgCO₂-equivalente.ano⁻¹ emitidos para a atmosfera (indicador do impacto de acidificação). As emissões

diretas são responsáveis pela maior quantidade de emissões (94,2% dos hidrocarbonetos totais; 70,7% do CO; 86,6% do CH₄; 85,1% do NO_x; 70,3% do SO₂), mas as emissões indiretas não são irrelevantes (60,3% do N₂O e 88,7% do CO₂ totais) e devem ser considerados também nas avaliações de emissões gasosas.

Neste trabalho, o diagnóstico do desempenho ambiental da bacia Mogi-Pardo foi realizado considerando três diferentes metodologias. Para um trabalho completo, outras metodologias deveriam ser utilizadas para fornecer mais índices, além disso, todos os índices deveriam ser comparados com outros obtidos de sistemas similares para verificar as possibilidades de melhoria da situação atual da bacia. Nesse sentido, a abordagem de cenários poderia ser utilizada como outra poderosa ferramenta objetivando mostrar aos tomadores de decisão os potenciais de melhoria para a bacia. Essas abordagens serão consideradas em trabalhos futuros.

Agradecimentos:

Os autores agradecem a FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – Processo número 2002/06685-0), CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) e *Alfa-Support Program (Sustainable Use of Photosynthesis Products & Optimum Resource Transformation)*.

REFERÊNCIAS

- Agostinho, F., 2009. Sustainability study of agricultural systems on Mogi-Guaçu and Pardo watershed through energy analysis. PhD thesis, Food Engineering School, State University of Campinas, Sao Paulo, Brazil. Available in Portuguese language at <http://www.unicamp.br/fea/ortega/extensao/extensao.htm>. Accessed on November 5th, 2009.
- Agostinho, F., Diniz, G., Siche, R., Ortega, E., 2008. The use of emergy assessment and the Geographical Information System in the diagnosis of small family farms in Brazil. *Ecological Modelling* Vol. 210: 37-57.
- Brown, M.T., Ulgiati, S., 2004. Emergy Analysis and Environmental Accounting. *Encyclopedia of Energy* Vol. 2: 329-354.



- Brown, M.T., Herendeen, R., 1996. Embodied energy analysis and EMERGY analysis: a comparative view. *Ecological Economics* Vol. 19: 219-235.
- Cavalett, O., Ortega, E., 2009. Emery, nutrients balance, and economic assessment of soybean production and industrialization in Brazil. *Journal of Cleaner Production* Vol. 17: 762-771.
- Cavalett, O., Queiroz, J.F. de., Ortega, E., 2006. Emery assessment of integrated production systems of grains, pig and fish in small farms in the South Brazil. *Ecological Modelling* Vol. 193: 205-224.
- EPA, 2008. U.S. Environmental Protection Agency, Technology Transfer Network Clearinghouse for Inventories & Emissions Factors. Available at <http://www.epa.gov/ttn/chief/ap42/index.html>. Accessed on December 19th, 2008.
- Francescato, G., Agostinho, F., Nachtigall, G.R., Nobre Jr., A. de A., Ortega, E., 2008. Emery and economic diagnosis of apple production system in south of Brazil. In: *Proceedings of 5th Biennial Emery Conference*, Gainesville, Florida, USA.
- Franzese, P.P., Rydberg, T., Russo, G.F., Ulgiati, S., 2009. Sustainable biomass production: a comparison between gross energy requirement and emery synthesis methods. *Ecological Indicators* Vol. 9: 959-970.
- Herendeen, R.A., 2004. Energy analysis and EMERGY analysis: a comparison. *Ecological Modelling* Vol. 178: 227-237.
- IEA, 2007. Brazilian Institute of Agricultural Economy. Available at <http://www.iea.sp.gov.br/out/comex/balanca-1206.php>. Accessed on January 22nd, 2007.
- Jarach, M., 1985. Sui valori di equivalenza per l'analisi e il bilancio energetici in agricoltura. *Riv. Di Ing. Agr.* Vol. 2: 102-114.
- LCA, 1997. Life Cycle Assessment: a guide to approaches, experiences and information sources. European Environment Agency, Environmental Issues Series, n° 6. Available at <http://www.eea.europa.eu/publications/GH-07-97-595-EN-C>. Accessed on November 4th, 2009.
- MEA, 2005. Millennium Ecosystem Assessment. Available at <http://www.maweb.org>. Accessed on January 17th, 2006.
- Meadows, D.H., Meadows, D.L., Randers, J., Behrens III, W.W., 1978. *Limits to Growth*. Editora Perspectiva, 2nd edition. Book in Portuguese.
- MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2009. Brazil's Energy National Accounting. Available at <http://www.mme.gov.br>. Accessed on January 30th, 2009.
- Odum H.T. Living with complexity. The Crafoord Prize in the Biosciences 1987. The Royal Swedish Academy of Sciences.
- Odum, H.T., Odum, E.C., 2001. *A prosperous way down: principles and polices*. Boulder, University Press of Colorado, 326 pp.
- Odum, H.T., 1996. *Environmental Accounting, Emery and Decision Making*. J. Wiley, NY.
- Ortega, E., Cavalett, O., Bonifácio, R., Watanabe, M., 2005. Brazilian Soybean Production: emery analysis with an expanded scope. *Bulletin of Science, Technology & Society* Vol. 25: 323-334.
- Ortega, E., Anami, M., Diniz, G., 2002. Certification of food products using emery analysis. In: *Proceedings of 3rd International Workshop Advances in Energy Studies*, Porto Venere, Italy, 227-237.
- Pereira, C.L.F., Ortega, E., 2010. Sustainability assessment of large-scale ethanol production from sugarcane. *Journal of Cleaner Production* Vol. 18: 77-82.
- Rockstrom, J., Steffen, W., Noone, K., Persson, A., Chapin, F.S., Lambin, E.F., Lenton, T.M., Scheffer, M., Folke, C., Schellnhuber, H.J., Nykvist, B., Wit, C.A., Hughes, T., van der Leeuw, S., Rodhe, H., Sorlin, S., Snyder, P.K., Costanza, R., Svedin, U., Falkenmark, M., Karlberg, L., Corell, R.W., Fabry, V.J., Hansen, J., Walker, B., Liverman, D., Richardson, K., Crutzen, P., Foley, J.A., 2009. A safe operating space for humanity. *Nature* Vol. 461: 472-475.
- Schmidt-Bleek, F., 1993. MIPS re-visited. *Fresenius Environ. Bull.* 2, 407-412.
- Siche, J.R., Ortega, E., Romeiro, A., Agostinho, F.D.R., 2008. Sustainability of nations: comparative study between the Environmental Sustainability Index, Ecological Footprint and the Emery Performance Indices. *Ecological Economics* Vol. 66: 628-637.
- Singh, R.K., Murty, H.R., Gupta, S.K., Dikshit, A.K., 2009. An overview of sustainability assessment methodologies. *Ecological Indicators* Vol. 9:189-212.
- Slesser, M. (Ed.), 1974. *Energy Analysis Workshop on Methodology and Conventions*. IFIAS, Stockholm, Sweden, 89pp.
- Szargut, J., Morris, D.R., 1998. In: Steward, F.R. (Ed.), *Exergy Analysis of Thermal, Chemical, and Metallurgical Processes*. Hemisphere, New York, NY, USA, 332pp.
- Ulgiati, S., Raugei, M., Bargigli, S., 2006. Overcoming the inadequacy of single-criterion approaches to Life Cycle Assessment. *Ecological Modelling* Vol. 190: 432-442.
- 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*. 33pp.
- Wackernagel, M., Onisto, L., Bello, P., Linares, A.C., Falfán, I.S.L., García, J.M., Guerrero, A.I.S., Guerrero, Ma.G.S., 1999. National natural capital accounting with



the ecological footprint concept. *Ecological Economics*
Vol. 29: 375-390.

WCED, 1987. *World Commission on Environment and
Development, Our Common Future*. Oxford University
Press, Oxford.