

Metodologia ACV para caracterizar impactos ambientais relacionados a diferentes cenários de uso de água em edificações

Simone Fiori

Mestre em Infraestrutura e Meio Ambiente pela UPF (2005). Doutoranda em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental no Instituto de Pesquisas Hidráulicas da UFRGS; Professora da Faculdade de Engenharia e Arquitetura da UPF; sfiori@upf.br.

Luiz Fernando de Abreu Cybis

Doutor em Public Health Engineering, pela The University of Leeds (1993). Pós-doutorado em Análise de Ciclo de Vida, na Iowa State University, em Ames, Iowa, USA (2010); Professor do IPH/UFRGS; lfcybis@iph.ufrgs.br.

Vera Maria Cartana Fernandes

Doutora em Engenharia de Construção Civil e Urbana pela Universidade de São Paulo (2002); Professora da FEAR/UPF; cartana@upf.br.

Recebido: 03/02/14 - revisado: 31/05/14 - aceito: 12/06/14

RESUMO

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é uma ferramenta que considera e quantifica o consumo de recursos e os impactos ambientais associados a um produto, processo ou sistema durante o seu ciclo de vida, colaborando para uma melhor avaliação do desempenho global e das contribuições relativas para diferentes fases do ciclo de vida, permitindo assim a indicação do desempenho global dos sistemas. Sob este aspecto, este artigo realiza a caracterização e análise dos impactos ambientais através da ACV de diferentes cenários do uso da água em edificações. A análise de impactos ambientais foi realizada através do software SimaPro 7.3.2 e do método IMPACT 2002+. Através dos resultados obtidos facilitou-se a identificação dos problemas existentes relacionados sob o foco ambiental, promovendo a gestão sustentável com melhorias ambientais e na saúde humana.

Palavras Chave: Impactos ambientais. ACV. Uso da água em edificações.

INTRODUÇÃO

A conservação de água pode ser definida como qualquer ação que: reduza a sua captação nos mananciais, reduza os usos consuntivos, reduza o desperdício ou as perdas, aumente a eficiência do uso, aumente a reciclagem ou o reúso, e previna a poluição da água. Ainda, de acordo com Gonçalves et al. (2009), prevê a preservação em quantidade e em qualidade através da tomada de dois tipos de ação: gestão da demanda e gestão da oferta de água. O primeiro fica evidenciado quando se fala em redução do uso da água, ou seja, usar a água de modo racional evitando perdas e desperdícios. O segundo tipo trata da gestão da oferta da água quando se cita o uso de fontes alternativas tais como o reúso.

Muitos locais com recursos hídricos abundantes, mas insuficientes para atender a demandas excessivamente elevadas, já experimentam conflitos de usos e sofrem restrições de consumo que afetam o desenvolvimento econômico e a qualidade de vida. O Brasil, apesar da grande disponibilidade de recursos hídricos, possui diversas regiões que se encontram atualmente sob estresse hídrico. Esse desequilíbrio pode ser de origem quantitativa, decorrente de períodos de maior escassez hídrica, ou de origem qualitativa, resultante, por exemplo, de modificações da qualidade da água pelo seu uso e pela urbanização.

A poluição e o uso inadequado da água comprometem significativamente a qualidade desse recurso em várias regiões do país (MANCUSO; SANTOS, 2003), principalmente em áreas urbanizadas. A questão do saneamento básico, principalmente do esgotamento sanitário adequado, no Brasil, ainda é um problema, difícil de ser solucionado, pois, menos da metade da população brasileira, ou seja, 44% dos domicílios possui acesso a rede de coleta de esgotos e apenas 30,2% do esgoto coletado é tratado (PNSB, 2010; OLIVEIRA et al., 2011).

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é uma ferramenta que considera e quantifica o consumo de recursos e os impactos ambientais associados a um produto ou processo durante o seu ciclo de vida (BOULLAY et al., 2011), colaborando para uma melhor avaliação do desempenho global e das contribuições relativas para diferentes fases do ciclo de vida, permitindo assim a identificação de oportunidades de melhoria do ambiente e do desempenho global dos sistemas (BENETTO et al., 2009).

Sob este aspecto, este artigo identifica o ciclo de vida do uso da água em edificação, como estudo de caso, e determina seu inventário. Com isso o estudo realiza a caracterização e análise dos impactos ambientais através da ACV e compara os resultados dos impactos em diferentes cenários de uso da água. Assim sendo, facilita a identificação dos problemas existentes relacionados sob o foco ambiental.

MATERIAL E MÉTODOS

Problemas de uso ineficiente da água nas edificações, de maneira geral, são a causa para desperdícios ou perdas de água no sistema hidráulico, muitas vezes decorrentes de concepções inadequadas de projeto, de procedimentos incorretos de manutenção e/ou maus hábitos dos usuários. Também, após o uso, quando há a disposição final inadequada do esgoto, gera significativos impactos ao meio ambiente, e, consequentemente, afeta a qualidade de vida da população.

Logo, os programas de conservação da água e de gestão sustentável constituem-se em importantes ferramentas para assegurar a oferta de água potável, por evitar o desperdício e racionalizar o uso, e cada vez mais, os gestores têm pela frente o desafio de criar condições que lhes possibilitem enfrentar a dinâmica da oferta de água com a demanda, minimizando impactos relacionados.

A metodologia da pesquisa se divide em quatro etapas. Iniciando pela identificação e definição do diagnóstico do uso da água em edificações de ensino superior, como estudo de caso, através de adaptação da metodologia apresentada por Oliveira (1999) e manual FIESP/ANA/SINDUCON-SP (2005). Para o estudo de caso, analisou-se uma edificação no Campus Universitário I da UPF, identificada como a edificação piloto do estudo. Os dados históricos disponibilizados foram desde o ano de 2006 até 2012. Na edificação foram instalados hidrômetros e equipamentos para a obtenção dos dados quantitativos de uso da água. Os dados de qualidade foram obtidos junto ao setor de saneamento da Universidade. Assim foram obtidos os dados primários para o levantamento dos indicadores de uso da água. Nesta etapa, foi realizada também a aplicação de questionários, entrevistas e análises de documentos, buscando os indicadores ambientais, utilizados no desenvolvimento da pesquisa.

Como segunda etapa, após a validação dos indicadores, empregou-se a ACV atribucional para caracterizar e avaliar os impactos do uso da água na edificação piloto – cenário atual. Para isso, foi definido o escopo e a função do modelo, a unidade funcional, os fluxos de referência e o inventário dos dados, conforme metodologia da NBR 14040 (ABNT, 2009a). Nesta etapa, selecionou-se o método para a Análise de Impactos do Ciclo de Vida (AICV), o IMPACT 2002+, e o software para a obtenção dos resultados, o SimaPro 7.3.2.

A terceira etapa foi a análise dos impactos do uso da água nos outros cenários da edificação piloto: cenário aproveitamento das águas pluviais e cenário reúso de águas.

A quarta e última etapa consistiu em comparar os resultados obtidos entre os cenários, bem como identificar as áreas e os cenários com maiores impactos.

Levantamento de dados

A análise considerou o consumo de água, de energia, de produtos e as emissões (atmosféricas, no solo e nos recursos hídricos) de todo o ciclo de vida do uso de água na edificação da pesquisa. Desta forma é possível mensurar os impactos ambientais gerados, o quantitativo de recursos e outros valores ambientais, como pelas ações de conservação de água, por exemplo. Para

a consolidação dos indicadores de impactos ambientais de uso da água na edificação foi realizada uma investigação detalhada quantitativa e qualitativa do uso da água, desde a entrada de água (captação) até a disposição final como efluente, a qual gerou um fluxograma de vazões de referência para o cálculo das cargas ambientais de cada subsistema.

O processo de hidrometração foi realizado no sistema hidráulico da edificação piloto, com o intuito de monitorar o consumo, além de identificar os horários de consumo de pico. O sistema de medição é remota, no qual os medidores, ao realizarem a leitura de consumo, emitem pulsos, lidos e transmitidos por um Cyble Pulsado a um Data Logger, modelo LOGBOX-AA IP65, este por sua vez armazena os dados de vazão em intervalos de tempo predefinidos, e são recolhidos de tempos em tempos, com o auxílio de uma Interface de Comunicação Ótica, modelo IrLink3-USB, transferem-se estas informações ao computador (notebook), possibilitando a criação de um perfil de consumo para o local. Após a instalação dos hidrômetros é acoplado o leitor de pulsos e o Data Logger, responsáveis pela leitura e armazenagem dos dados.

Os dados qualitativos disponíveis de água potável e esgoto sanitário da ETE foram disponibilizados pelo setor de saneamento da Universidade. As análises qualitativas complementares realizadas foram feitas no LACE (laboratório de análise e controle de efluentes), Laboratório de águas, no Laboratório de microbiologia e no Laboratório de saneamento ambiental da Universidade. Todas as análises são realizadas de acordo com o *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA; AWWA; WEF, 1999).

Para completar o diagnóstico de uso da água, foi verificada a quantidade de energia gasta ciclo de vida do uso da água na edificação, como por exemplo, no sistema elevatório para a captação da água, nas bombas e na aeração da ETE, entre outros.

Por fim, para sistemas de aproveitamento de água pluvial (cenário aproveitamento de águas pluviais), foram consideradas análises quali-quantitativas da água nos reservatórios de armazenamento de águas pluviais já existentes no Centro de Convivência da Universidade, que é um sistema novo, implantado no ano de 2011. Os dados foram comparados com parâmetros da NBR 15527 (ABNT, 2007) para fins não potáveis. E para os elementos quali-quantitativos de esgoto (cenário reúso de águas), foram utilizados os parâmetros de operação da ETE da Universidade, e também as normas NBR 9649 (ABNT, 1986) e NBR 12209 (ABNT, 2011).

Decidiu-se analisar os materiais que, por sua quantidade presente nos sistemas, fossem relevantes para o resultado final da pesquisa. Utilizando-se critérios de corte, foi verificado que alguns parâmetros qualitativos do uso da água contribuem com menos de 1% para a alocação dos sistemas, não representativos, ou não foram detectados nos métodos analíticos e, por esse motivo, não foram consideradas neste estudo.

Considerações sobre a aplicação da ACV

Para analisar os impactos ambientais do ciclo de vida do uso da água nos cenários da pesquisa, foi realizada a ACV de todo o processo de uso da água, desde a entrada de água no

sistema (extração da água da natureza) até o destino final da água (lançamento do esgoto tratado no corpo hídrico receptor).

O escopo, a função do modelo, a unidade funcional, os fluxos de referência, o inventário do ciclo de vida (ICV) e análise (ACV), foram realizados com base na NBR 14040 (ABNT, 2009a) e NBR 14044 (ABNT 2009b), e todos os dados utilizados na aplicação da ACV foram relacionados à unidade funcional (o valor médio de uso da água na edificação em um ano ($\text{m}^3 \cdot \text{ano}^{-1}$)).

Para consolidar o inventário final do uso da água, foi necessário relacionar os valores encontrados em cada etapa com a unidade de referência do ciclo de vida, ou seja, o volume médio anual de cada cenário. Isso significa que todos os fluxos do uso da água foram transformados para esse valor de entrada (unidade funcional) e o valor de geração de esgotos. Levou-se em consideração a concentração média das principais substâncias presentes na água ou efluente, em $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, e seu volume anual, e com isso pode-se obter as entradas e saídas de cargas ambientais, em $\text{kg} \cdot \text{ano}^{-1}$.

Foi utilizada no estudo a alocação, e como critério de alocação do sistema, o volume de água que abastece somente a edificação piloto (vazão em $\text{m}^3 \cdot \text{ano}^{-1}$) e que vai ser distribuído para o uso nesta edificação. Da mesma forma, foi considerado para o tratamento na ETE somente a parcela referente às contribuições da edificação do estudo, realizando alocação com o critério volume.

2.3 Caracterização e análise dos impactos ambientais

Para análise dos impactos ambientais utilizou-se o software SimaPro versão 7.3.2, desenvolvido pela empresa holandesa PRé Consultants. O SimaPro é uma ferramenta profissional que contém vários métodos de avaliação de impacto ambiental e diversas bases de dados de inventários, que podem ser editados e expandidos sem limitação. O software permite a análise com-

parativa entre produtos e estudos com ciclos de vida complexos (PRÉ CONSULTANTS, 2010). O SimaPro é flexível para coletar, analisar e acompanhar o desempenho ambiental dos produtos e serviços, e contabilizar os impactos para a atmosfera, água e solo. Realiza a gestão de dados, o armazenamento (cadastro) de inventários, executa cálculos e verifica a credibilidade (análise de incertezas). Neste estudo, utilizou-se, em alguns fluxos, a biblioteca de inventários Ecoinvent v2.1 do SimaPro. o

O método de avaliação de impactos selecionado foi o IMPACT 2002 +, por ser um método já bastante utilizado no mundo, mas principalmente por permitir resultados em nível midpoint e endpoint, por realizar a normalização e ponderação dos impactos, e por conter as categorias de danos: saúde humana, qualidade do ecossistema, mudanças climáticas e esgotamento de recursos naturais. O método IMPACT 2002+ é uma metodologia de avaliação de impactos, originalmente desenvolvida no Instituto Federal de Tecnologia da Suíça (EPFL), é a junção dos métodos clássicos com os orientados ao dano, a fim de absorver suas respectivas limitações e agrupar os pontos positivos dos métodos mais utilizados mundialmente em estudos de ACV.

O conjunto de dados do IMPACT 2002+ abrange uma ampla variedade de efeitos sobre o meio ambiente. As entradas referentes ao uso da água foram quantificadas, por exemplo, em metros cúbicos (m^3) e as entradas referentes aos produtos em quilogramas (kg) de material. Para o consumo de energia, as entradas foram quantificadas em (kWh). As saídas relativas às emissões atmosféricas ao longo do ciclo de vida foram quantificadas em kg de gás emitido para a atmosfera. Já as saídas relativas às emissões aquáticas foram quantificadas em kg de substância emitida nos cursos d'água, e às emissões no solo, em kg de substância despejada no solo. Todos como média anual.

Seguindo o método selecionado, para caracterização dos impactos foram escolhidas as seguintes categorias de impactos ambientais: potencial de aquecimento global, potencial de depleção do ozônio estratosférico, potencial de acidificação,

Inventário	Categoria de Impacto (Midpoints)	Unidade	Categoria de dano correspondente (Endpoints)	Unidade
Resultados do ICV	Cancerígeno (toxicidade humana)	Kg $\text{C}_2\text{H}_3\text{Cl}$ eq.	Saúde Humana	DALY
	Não cancerígeno	Kg $\text{C}_2\text{H}_3\text{Cl}$ eq.		
	Efeitos respiratórios	Kg C_2H_4 eq.		
	Radiação iônica	Bq C-14 eq.		
	Depleção da camada de ozônio	Kg CFC-11 eq.	Qualidade do ecossistema	PDF.m ² .yr
	Ecotoxicidade aquática	Kg TEG water eq.		
	Ecotoxicidade terrestre	Kg TEG soil eq.		
	Ocupação terrestre	m ² organic arable eq.	n/a	n/a
	Acidificação aquática	Kg SO_2 eq.		
	Eutrofização aquática	Kg PO_4 eq.		
	Aquecimento global	Kg CO_2 eq.	Mudança climática	Kg CO_2 eq.
	Energia não renovável	MJ primary eq.	Recursos naturais	MJ energia
	Extração mineral	MJ surplus eq.		

Figura 1 - Categorias de impactos, de danos e unidades correspondentes no Impact2002+

Fonte: Elaborado a partir de Jolliet et al. (2003) e PRé Consultants (2010)

de eutrofização, ecotoxicidade aquática e terrestre, e carcinogênicos, por serem considerados mais significativas para este estudo. Portanto, sua aplicação e análise foram realizadas de acordo com os passos realizados pelo programa, conforme seu manual (PRÉ CONSULTANTS, 2010).

A Figura 1 apresenta as categorias de impacto, de danos e as unidades correspondentes. Todos os resultados do ICV são ligados às categorias de impactos de ponto médio (*Midpoints*), e estas por sua vez, são ligadas às quatro categorias de danos (*Endpoints*). A publicação original deste método (JOLLIET et al., 2003) pode ser útil para a compreensão da metodologia de impacto, para as caracterizações de fluxos, e para os procedimentos de cálculos envolvidos.

Os resultados são posteriormente normalizados e ponderados, de modo a perceber a magnitude do impacto na globalidade do problema ambiental. Assim, o fator de dano é normalizado dividindo-se o impacto por unidade de emissão pelo impacto total de todas as substâncias da categoria específica para a qual existem fatores de caracterização, por pessoa por ano. Esta informação é agrupada para a formação de um escore final que será o valor do indicador em pontuação única (Fator de Ponderação) em uma unidade chamada Ecopontos (Pt) ou quando o resultado em Pt é multiplicado por 1000 (mPt). A magnitude deste valor numérico expressa a magnitude do impacto ambiental global. Quanto maior for o valor do indicador, maior será o impacto ambiental do produto, atividade ou exploração.

A Figura 2 apresenta o fluxograma do uso da água na edificação do estudo com os limites da ACV e os subsistemas considerados do cenário atual.

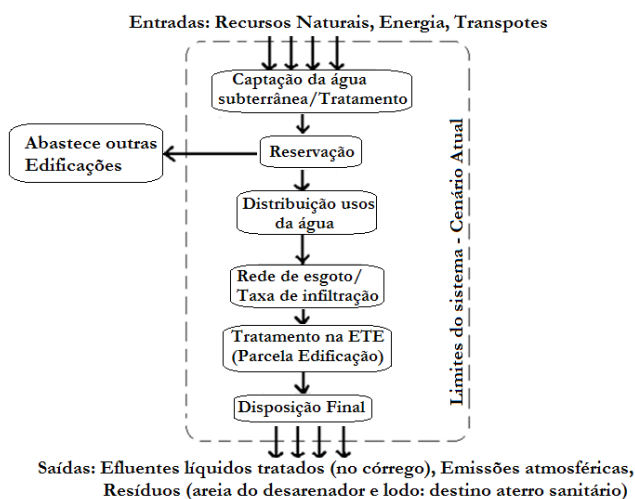


Figura 2 - Limites do sistema da ACV - Cenário Atual

Além do cenário Atual, na mesma edificação da pesquisa foram analisados o cenário Aproveitamento de águas pluviais e o cenário Reuso de águas.

Tendo por objetivo respaldar e validar os resultados da ACV, foi aplicada a análise de incerteza e qualidade dos dados. Assim, para analisar as incertezas associadas com a análise do inventário, avaliação do impacto e os processos de normalização e ponderação, utilizou-se a análise de Monte Carlo, realizada pelo próprio software SimaPro 7.3.2. O método de Monte

Carlo, também chamado de amostragem estocástica, envolve a amostragem aleatória de cada distribuição de probabilidade de acordo com o modelo, para produzir milhares de cenários. Cada distribuição de probabilidade dos dados de entrada é relacionada a uma grandeza de saída (SALLABERRY, 2009). O método simula a variação dos parâmetros por meio do desvio-padrão e das probabilidades fornecidas, retornando uma nova média e desvio-padrão para cada parâmetro solicitado.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A distribuição de volumes do ciclo de vida da água na edificação, nos três cenários do estudo, pode ser observada na Figura 3.

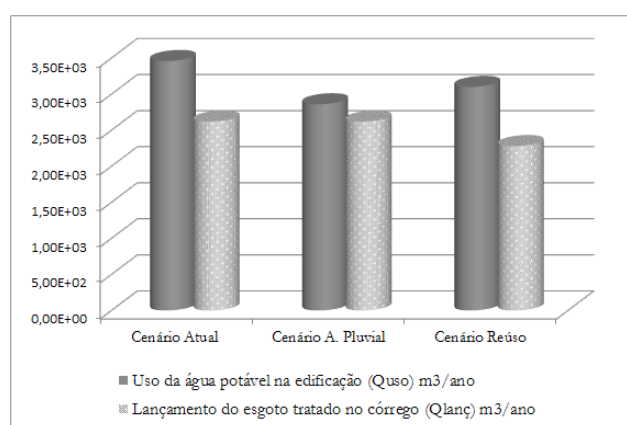


Figura 3 - Comparação dos resultados quantitativos de uso da água nos diferentes cenários

Os resultados do estudo apontam que a menor retirada da água subterrânea da natureza está no cenário Aproveitamento de águas pluviais, cuja relação foi 0,83 comparando-se ao cenário atual, ou seja, 17% menor. Já em relação o esgoto da edificação, tratado na ETE e com destino final o córrego, a menor relação foi estabelecida no cenário Reuso de águas, 13% menor que o valor do cenário atual. O índice per capita de captação da água subterrânea (q) de cada cenário foi 49,6 L/hab.dia para o cenário atual; 40,98 L/hab.dia para o cenário aproveitamento de águas pluviais; e 44,41 L/hab.dia para o cenário reuso de águas.

Os resultados da análise dos impactos do estudo foram obtidos com a utilização do software SimaPro 7.3.2, e a análise foi realizada pelo método IMPACT 2002+. Na Tabela 1 pode-se observar a comparação dos resultados das categorias de impactos ambientais para os cenários analisados.

A maioria das categorias de impactos ambientais apresentadas na Tabela 1 tem relação com a fase de tratamento do esgoto na ETE e sua disposição final no corpo hídrico receptor, principalmente a eutrofização, ecotoxicidade e acidificação. O uso do hipoclorito de sódio está relacionado principalmente às categorias cancerígenos, não cancerígenos e depleção da camada de ozônio. As categorias de impactos: aquecimento global, acidificação, energia não renovável e efeitos respiratórios, estão associadas, principalmente, com a energia elétrica consumida nos processos e o consumo de combustível fóssil em transportes, e

também pelo tratamento do esgoto. Os resultados da caracterização dos impactos, na Tabela 1, indicam que o cenário reúso de águas é o mais impactante negativamente, pois apresenta os maiores valores em todas as categorias.

Tabela 1 - Comparação dos resultados das categorias de impactos para os cenários analisados

Categorias de impactos ambientais	Unidade	Cenário		
		Atual	A. Pluvial	Reúso
Cancerígenos (toxicidade humana)	kg C ₂ H ₃ Cl eq	0,221	0,175	0,24
Não cancerígenos	kg C ₂ H ₃ Cl eq	2,08	1,72	2,18
Depleção da camada de ozônio	kg CF C-11 eq	1,1E-6	7,6E-7	1,2E-6
Efeitos respiratórios	kg C ₂ H ₄ eq	1,1E-2	7,0E-3	1,1E-2
Ecotoxicidade aquática	kg TEG water	3,39E6	3,7E6	3,74E6
Acidificação aquática	kg SO ₂ eq	1,2E4	1,32E4	1,33E4
Eutrofização aquática	kg PO ₄ eq	1,78E4	1,94E4	1,96E4
Aquecimento global	kg CO ₂ eq	225	182	246
Energia não renovável	MJ primary	318	210	320

Fonte: Elaborado a partir de SIMAPRO: método Impact 2002+

Na Tabela 2 pode-se observar a comparação dos resultados das categorias de danos para os cenários analisados. A categoria de dano Saúde Humana do Impact 2002+ envolve a ciência de que qualquer indivíduo pode ser prejudicado tanto pela diminuição do tempo de vida por uma morte precoce, quanto pela redução, temporária ou permanente, de alguma das funções vitais do organismo. É expressa em DALY (*Disability Adjusted Life Years*), que em português seria Deficiência Ajustada de Anos de Vida, comparando tempo vivido com incapacidade e o tempo perdido devido à mortalidade prematura, em relação a uma esperança de vida ideal cujo padrão utilizado foi o do Japão, país com maior esperança de vida ao nascer do mundo (80 anos para homens e 82,5 anos para mulheres). O DALY é uma escala de pesos que foi desenvolvida para a OMS e para o Banco Mundial para diversas inaptidões causadas por doenças, cuja pontuação da escala varia de zero a um (PRÉ CONSULTANTS, 2010). O valor zero indica saúde perfeita, enquanto o valor um significa a morte.

Na categoria de dano Qualidade do Ecossistema da Tabela 2 é utilizada a unidade PDF.m².yr (*Potentially Disappeared Fraction – PDF*) ou Potencial de Desaparecimento de Espécies, por área por ano. Baseia-se no cálculo da fração potencial afetada (PAF) de espécies em relação à concentração de substâncias tóxicas. A PAF expressa a porcentagem de espécies que é exposta para uma concentração acima do limite no qual não se

observa nenhum efeito. Para o caso de ocupação terrestre, os danos podem ser causados pelo aumento no tamanho da área ocupada, ou no tempo de ocupação de restauração para uma área anteriormente convertida (PRÉ CONSULTANTS, 2010).

Tabela 2 - Comparação dos resultados das categorias de danos para os cenários analisados

Impactos por Categorias de danos	Unidade	Cenário		
		Atual	A. Pluvial	Reúso
Saúde humana	DALY	2,7E-5	1,9E-5	2,8E-5
Qualidade do ecossistema	PDF.m ² .yr	195	206	215
Mudanças climáticas	kg CO ₂ eq	225	182	246
Esgotamento dos recursos naturais	MJ	319	211	321

Fonte: elaborado a partir de SIMAPRO: método Impact 2002+

Na Tabela 2 a categoria de danos Recursos Naturais relaciona-se aos recursos naturais e aos combustíveis fósseis. Não renovável diz respeito ao estoque finito de matéria-prima. A base para análise dos danos aos recursos é feita em função da necessidade adicional de energia para extração desses recursos à medida que sua concentração decresce. Isto é, quanto mais recursos são extraídos, tanto maiores serão as necessidades de energia para sua extração no futuro. É expressa em MJ de energia. E a categoria Mudanças Climáticas, expressa o aquecimento global causado pelos gases do efeito estufa e é expressa em kg de CO₂ equivalentes. Como exemplo, na Tabela 2, o cenário aproveitamento de águas pluviais apresentou o menor valor dos cenários, de 182 Kg de dióxido de carbono equivalentes, contribuintes para o impacto aquecimento global. Aquecimento global refere-se ao aumento da temperatura média da Terra, que, por sua vez, causa alterações no clima terrestre. Estando o clima mais quente, isso leva a mudanças no regime de chuvas, aumento do nível do mar e diversos outros impactos no ambiente natural e no homem.

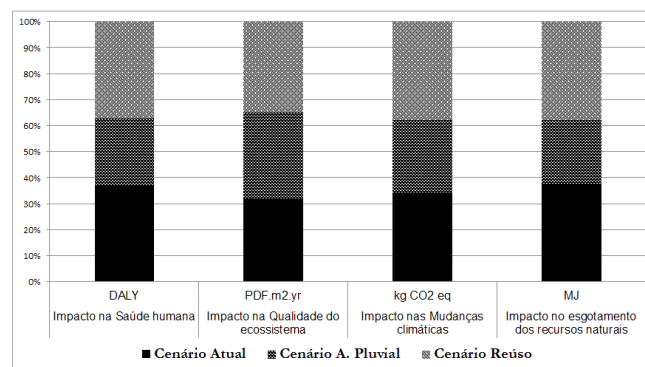


Figura 4 - Comparação dos diferentes cenários analisados, por categoria de danos

A Figura 4 apresenta a comparação dos resultados da análise de impactos ambientais em nível de danos, dos três cenários considerados na pesquisa – Cenário Aproveitamento de Águas Pluviais; Cenário Atual de uso da água; e Cenário Reúso de Águas.

De maneira geral, os resultados apresentados na Figura 4, nos três cenários analisados, tiveram comportamentos que confirmaram as expectativas iniciais da pesquisa. Observa-se que o cenário Aproveitamento de águas pluviais se apresenta com reduções dos valores de impactos em relação aos outros cenários, o que já era esperado, devido, principalmente, à redução na vazão de captação de água subterrânea, quando comparado ao cenário atual da edificação, e devido à redução de cargas ambientais, quando comparado ao cenário reúso de águas. Na categoria Qualidade do ecossistema os valores se apresentaram maiores no cenário Aproveitamento de águas pluviais em relação ao cenário Atual, devido ao aumento de cargas ambientais causadas pela água do sistema de águas pluviais não ser potável.

A Tabela 3 apresenta a comparação dos resultados finais normalizados da análise de impactos na dimensão ambiental dos três cenários considerados na pesquisa, e os valores do indicador ambiental global final da Pontuação única (Total) de cada cenário. Assim sendo, fornece a magnitude do impacto na globalidade do problema ambiental.

Tabela 3 - Comparação dos impactos ambientais nos diferentes cenários da ACV

Impactos	Cenário		
	Atual	A.Pluvial	Reúso
	(mPt)	(mPt)	(mPt)
Saúde Humana	3,8	2,75	3,92
Qualidade do ecossistema	14,2	15,1	15,7
Mudanças climáticas	22,7	15,7	24,8
Esgotamento dos recursos naturais	2,11	1,39	2,12
Total	46,8	37,5	46,6

Fonte: elaborado a partir de SimaPro: método Impact 2002+

Na Tabela 3 os fatores de danos foram normalizados pelo SimaPro, dividindo-se o impacto por unidade de emissão pelo impacto total de todas as substâncias da categoria específica para a qual existem fatores de caracterização, por pessoa por ano. Pode-se observar na Tabela 3 que, para os três cenários analisados, as mudanças climáticas seguidas da qualidade do ecossistema foram os problemas mais relevantes. No que se refere ao Aquecimento Global (categoria de impacto ambiental que compõe a categoria de danos mudanças climáticas), se observa que ele está associado ao processo anaeróbico da ETE, onde não foi previsto um sistema de captação e recuperação do metano, bem como está vinculado à energia elétrica consumida no processo de tratamento aeróbico (lodo ativado) da ETE

e transportes rodoviários associados aos insumos e rejeitos. Quanto aos impactos na qualidade do ecossistema está associado, principalmente, ao lançamento do esgoto tratado no rio com excesso de fósforo e nitrogênio, responsáveis pela eutrofização.

A Figura 5 apresenta a comparação dos resultados finais da análise de impactos na dimensão ambiental dos três cenários considerados na pesquisa, com a representação ambiental final da Pontuação única (total) de cada cenário.

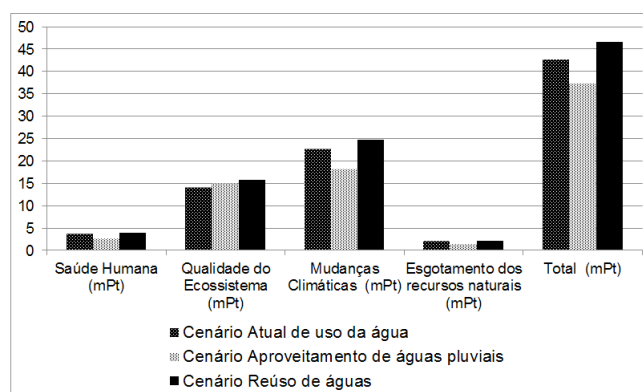


Figura 5 - Comparação dos resultados ambientais finais dos diferentes cenários analisados

Pode-se observar na análise da pontuação única (ou indicador ambiental global final) de cada cenário considerado, que o cenário Aproveitamento de águas pluviais apresenta o menor valor global de impactos ambientais (37,5 mPt); o cenário atual de uso da água apresenta valor final de 42,8 mPt; e o cenário que apresenta o maior valor global de impactos ambientais foi o cenário Reúso de águas, com 46,6 mPt. ou seja, o cenário Aproveitamento de águas pluviais apresentou impactos ambientais 12,4% menores que o cenário Atual (referência) e o cenário Reúso de águas apresentou impactos ambientais 8,9% maiores que o cenário Atual.

A consistência dos dados utilizados na pesquisa foi analisada em função do atendimento total, parcial ou não dos indicadores. O produto comparado nos cenários é de mesma função, definido no escopo como a água utilizada na edificação; assim o item diferenças na função entre produtos foi atendido totalmente. Da mesma forma o item diferenças temporais, em função de ser igual para os cenários. Já as diferenças nas fontes, precisão dos dados, tecnológicas e geográficas, foram atendidas parcialmente, em função de cada ICV que foi obtido a partir de dados coletados, banco de dados e fontes secundárias. Mas isso foi definido no escopo da pesquisa como aceito. Os itens que foram atendidos de maneira parcial foram avaliados como representativos, parcialmente representativos e não representativos.

A partir dos dados dos cenários analisados, aplicou-se uma análise de Monte Carlo através do SimaPro. Foram realizados 10.000 iterações e o coeficiente de confiança adotado foi de 95%. Cada cenário possuiu um valor médio, a mediana, desvio-padrão, o coeficiente de variação, um valor mínimo e um valor máximo que são os valores de 2,5% e 97,5%, respectivamente, e o erro padrão da média. Na Figura 6 se observa a representação da análise de incertezas no cenário atual.

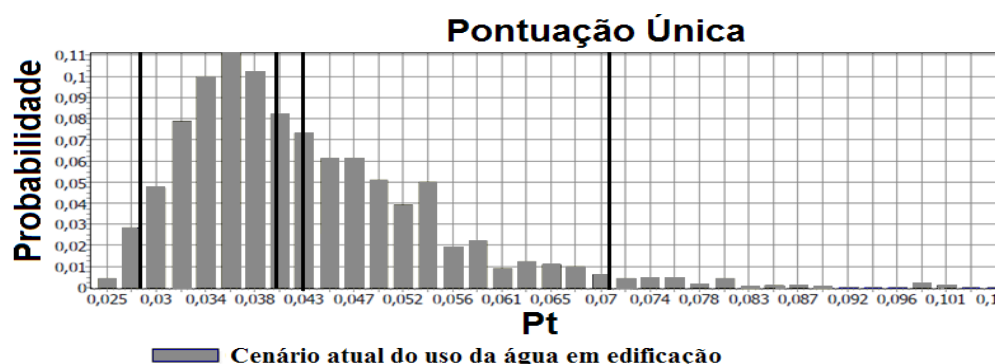


Figura 6 - Representação da análise de incertezas no cenário atual de uso da água

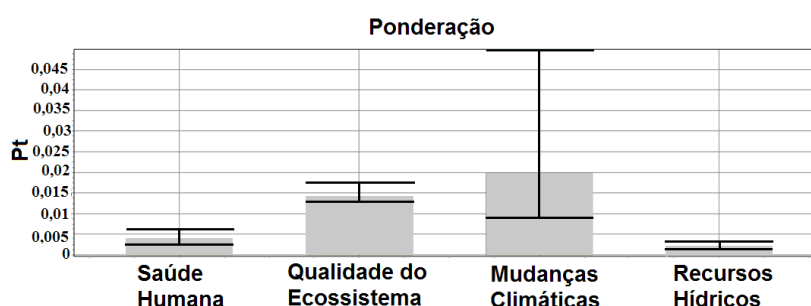


Figura 7 - Análise de incerteza dos impactos de danos

Ao se analisar os resultados dos três cenários, o cenário que apresentou melhor resultado na análise de incerteza foi o cenário atual do uso da água. Isso se deve ao fato de que a maioria dos dados utilizados foram coletados *in loco* (primários) e do banco de dados Ecoinvent, avaliados na análise como completamente representativos. Já nos cenários aproveitamento de águas pluviais e reúso de águas, foram utilizados mais dados secundários (da literatura), considerados parcialmente representativos na análise, e por isso apresentaram distribuição aleatória mais dispersa que o cenário atual.

A Figura 7 apresenta a representação da análise de incertezas das categorias de danos dos impactos ambientais.

No estudo de caso foram analisados os requisitos de qualidade dos dados e observou-se que a maioria dos dados é completamente ou parcialmente representativa. A análise de Monte Carlo apresentou uma análise aleatória consistente e foi considerada aceita. Observa-se nos resultados da Figura 7 que na categoria de danos Mudanças climáticas o coeficiente de variação foi maior quando comparado às outras categorias, e isso se apresenta em todos os cenários analisados. Também o erro padrão dessa categoria foi o mais elevado, maior que 1%, porém menor que 5%. Entretanto, ao se analisar os resultados finais (pontuação única) do erro padrão, em todos os cenários os valores foram menores que 1%. Com isso, considerou-se que a análise de incerteza dos dados é aceita, dentro do limite esperado, e o estudo de caso demonstrou que a ACV pode ser uma ferramenta para a caracterização e avaliação de impactos do uso da água.

CONCLUSÕES

Neste artigo se avaliou os impactos ambientais associados ao uso da água em diferentes cenários de edificações, em um estudo de caso. Quanto ao impacto ambiental final (ou indicador ambiental global final) o melhor cenário é o do aproveitamento de águas pluviais, pois apresentou o menor valor global de impactos ambientais e o cenário que apresentou o maior valor global de impactos ambientais foi o cenário reúso de águas. Ressalta-se que, mesmo que seja utilizada uma fonte alternativa de água, ainda há muitas ações e melhorias a serem feitas para que os impactos do uso da água sejam minimizados de maneira satisfatória, reduzindo danos ao ambiente e a sociedade. Observou-se que quanto menor o consumo de água na edificação, menores os impactos relacionados.

A partir dos resultados obtidos e identificação de etapas críticas, foi possível sugerir melhorias nos sistemas para minimizar os impactos ambientais mais significativos e sugestões que contribuirão no estabelecimento de procedimentos para a gestão sustentável da água, e opções de intervenções e melhorias para a redução do consumo da água em edificações, como por exemplo, para o caso da categoria qualidade do ecossistema, principalmente o efluente tratado e lançado no rio, devem ser revistos os processos e eficiências na ETE a fim de melhorar os parâmetros nitrogênio e fósforo, especialmente, pois são os maiores problemas ambientais relacionados à eutrofização aquática, entre outros. Para melhorar na categoria de impactos mudanças climáticas, uma recuperação energética do metano

produzido pelo processo anaeróbico (reator anaeróbico da ETE), apresentaria melhores condições ambientais resultando, assim, em uma diminuição nas cargas e emissões atmosféricas geradas no processo, reduzindo gases do efeito estufa, e tornando possível uma redução na energia elétrica gasta na própria ETE.

Em relação ao uso da metodologia ACV destaca-se que, apesar da importância da água, os impactos sobre seu uso têm sido pouco representados desde o início da metodologia da ACV. Até o momento, os poucos métodos de AICV (análise de impactos do ciclo de vida) que possuem a categoria “uso da água” não incluem as significativas consequências ambientais da redução da qualidade e disponibilidade local da água. Nesse aspecto, os métodos de AICV necessitam ainda avançar, como por exemplo, na disponibilidade hídrica local, oferta e demanda de água dos usos, dados qualitativos, entre outros.

Outro aspecto na aplicação da ACV, é que no Brasil, a utilização de metodologias já desenvolvidas em outros países é prática comum, visto que não há ainda nenhuma metodologia desenvolvida especificamente para o país. Há uma enorme necessidade de se adaptar ou criar novas metodologias de impactos com a finalidade de levar em consideração categorias de impactos inerentes ao contexto brasileiro, como por exemplo, erosão/assoreamento, impactos nos recursos hídricos, fauna e flora, etc. Contudo, a contribuição do método ACV não se esgota apenas na sua aplicação plena. Encontra-se razoavelmente difundida a compreensão de que enseja um modo de pensar que amplia a percepção dos impactos e contribui significativamente com a construção da sustentabilidade.

REFERÊNCIAS

- APHA, AWWA, WEF. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 21. ed. Washington, DC: APHA, AWWA, WEF, 1999.
- ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9649: Projeto de redes coletoras de esgoto sanitário. Rio de Janeiro: ABNT, 1986.
- ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12209: Projeto hidro sanitário de estações de tratamento de esgotos sanitários. Rio de Janeiro, ABNT, 2011.
- ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 14040: Gestão Ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura. Rio de Janeiro: ABNT, 2009a.
- ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 14044: Gestão Ambiental: Avaliação do ciclo de vida: Requisitos e Orientações. Rio de Janeiro: ABNT, 2009b.
- ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15527: Água de Chuva – Aproveitamento de coberturas em áreas urbanas para fins não potáveis – Rio de Janeiro: ABNT, 2007.
- BARBOSA JR, A. F.; MORAIS, R. M.; EMERENCIANO, S. V.; PIMENTA, H. C. D.; GOUVINHAS, R. P. Conceitos e aplicações de ACV no Brasil. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 27., 2007, Foz do Iguaçu. *Anais...* Foz do Iguaçu: [S.L.], 2007.
- BENETTO, E.; NGUYEN, D.; LOHMANN, T.; SCHMITT, B.; SCHOSSELER, P. Life Cycle Assessment of Ecological Sanitation System for Small-scale Wastewater Treatment. *Science of the Total Environment*, v. 407, n. 5, p. 1506-1516, Feb. 2009.
- BOULLAY, A. et al. Categorizing water for LCA inventory. *International Journal of Life Cycle Assessment*, v. 16, n. 7, p. 639-651, Aug. 2011.
- CONAMA. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução N° 357, de 17 de março de 2005. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, n. 53, 2005. p. 58-63. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res05/res35705.pdf>. Acesso em: 23 set. 2013.
- CONAMA. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução N° 375, de 29 de agosto de 2006. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 2006. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res06/res37506.pdf>. Acesso em: 23 set. 2013.
- FIESP/ANA/SINDUSCON-SP. *Conservação e reúso da água em edificações – Manual*. São Paulo: [s.n.], 2005. 151 p.
- FINNVEDEN, G.; HAUSCHILD, M. Z.; EKVALL, M.; GUINÉE, J.; HEIJUNGS, R.; HELLWEG, S.; KOEHLER, A.; PENNINGTON, D.; SUH, S. Recent developments in life cycle assessment. *Journal of Environmental Management*, v. 91, n. 1. p. 1-21, Oct. 2009.
- GONÇALVES, R. F. (Coord.). *Conservação de água e energia em sistemas prediais e públicos de abastecimento de água*. Rio de Janeiro: ABES, 2009. Projeto PROSAB.
- JOLLIET, O.; MARGNI, M.; CHARLES, R.; HUMBERT, S.; PAYET, J.; REBITZER, G.; ROSENBAUM, R. Impact 2002+: a new life cycle impact assessment methodology. *International Journal of Life Cycle Assessment*, v. 8, n. 6, p. 324-330, Nov. 2003.
- MANCUSO, P. C. S.; SANTOS, H. F. (Editor). *Reúso de água*. Barueri, SP: Manole, 2003.
- OLIVEIRA, L. H. *Metodologia para Implantação de Programa de Uso Racional da Água em Edifícios*. 1999. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.

OLIVEIRA, G.; SCAZUFCA, P.; MARCATO, F. S. *Cenários e Condições para a Universalização do Saneamento no Brasil* – Parte 1. Informações FIPE. (Temas de economia aplicada, n. 18). Disponível em: <www.fipe.org.br/publicacoes/downloads/bif/2011/1_18-24-gesn.pdf> Acesso em: 23 ago. 2011.

PNSB. *Pesquisa Nacional de Saneamento Básico* – 2000 a 2008. Brasília: IBGE, 2008. Disponível em: <www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/.../PNSB_2008.pdf>. Acesso em: 15 ago. 2011.

PRé Consultants. *Introduction to LCA with SimaPro 7*. Netherlands: [s.n.], Nov. 2010.

SIMAPRO. *About SimaPro*: The world's leading LCA software chosen by industry, research institutes, and consultants in more than 80 countries. Disponível em: <http://www.pre-ustainability.com/content/simapro-lca-software?gclid=CMvLr_GM-a0CFQtZ7AodqGxKtA> Acesso em: 17 out. 2011.

SOUZA, D. M.; SOARES, S.R.; SOUSA, S. R. A Life Cycle Impact Assessment Method for the Brazilian Context. In: CONFERÊNCIA INTERNACIONAL CICLO DE VIDA, 2007. *Anais...* São Paulo, 2007.

UNEP. United Nations Global Compact. The CEO Water Institute. *Corporate water accounting: an analysis of methods and tools for measuring water use and its impacts*. Oakland: UNEP, 2010.

WEIDEMA, B.; FREES, N.; NIELSEN, A.-M. Marginal production technologies for life cycle inventories. *International Journal of Life Cycle Assessment*, v. 4, n. 1, p. 48-56, Jan. 1999.

LCA methodology to characterize environmental impacts involved in different scenarios of water use in buildings

ABSTRACT

Life Cycle Assessment (LCA) is a tool that considers and quantifies the consumption of resources and the environmental impacts associated with a product, process or system during its life cycle, contributing to a better assessment of the overall performance and providing contributions relating to different stages of the life cycle, thereby allowing an indication of the overall performance of the systems. From this perspective, the article characterizes and analyses environmental impacts of different scenarios of water use in buildings by LCA. The analysis of environmental impacts was performed using SimaPro7.3.2 software and the IMPAC2002 + method. The results obtained made it easier to identify existing problems from the environmental perspective, promoting sustainable management with environmental and human health improvements.

Keywords: *Environmental impacts. LCA. Water use in buildings*