
Avaliação do potencial de redução do consumo de água potável por meio da implantação de sistemas de aproveitamento de água de chuva em edificações unifamiliares

Assessment of the potential to reduce drinking water consumption by implementation of rainwater harvesting systems in single-family residential buildings

Erick Brizon Chaib¹; Felipe C. Rodrigues²; Brenner H. Maia³ e Nilo De Oliveira Nascimento⁴

^{1,3,4} Departamento de Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais Belo Horizonte, MG, Brasil

erickbrizon@gmail.com

² Empresa de Processamento de Dados de Belo Horizonte (PRODABEL), Belo Horizonte, MG, Brasil

Recebido: 26/09/14 - Revisado: 12/11/14 - Aceito: 11/03/15

RESUMO

Em um cenário de relativa escassez hídrica, torna-se recomendável a implementação de políticas públicas objetivando a manutenção de níveis adequados de abastecimento de água potável. Uma possibilidade importante é o uso de água de chuva captada em edificações residenciais com o propósito de suprir as demandas não potáveis de água em domicílios. O presente trabalho propõe uma metodologia de avaliação do potencial de economia de água potável por meio de sua substituição por água de chuva para fins não potáveis em edificações residenciais unifamiliares (casas). Para tanto, foram realizadas análises hidráulicas e financeiras, tomando como estudo de caso o município de Belo Horizonte, MG. Verificou-se que, em um cenário de uso generalizado do sistema de aproveitamento de água de chuva em residências unifamiliares, pode-se obter uma economia anual equivalente a 2 meses de abastecimento de água potável para residências. Por outro lado, para o cenário adotado, os resultados econômicos apresentam viabilidade do sistema, mas com elevado payback e taxa interna de retorno (TIR) muito próxima à taxa mínima de atratividade (TMA), sugerindo a necessidade de avaliação de modelos de financiamento e incentivo à disseminação do sistema.

Palavras Chave: Consumo de água. Economia de água. Aproveitamento de água de chuva

ABSTRACT

In a scenario of relative water scarcity, it is advisable to implement public policies aiming at maintaining adequate potable water supply. A relevant alternative regarding water supply policies is the use of rainwater harvesting systems in residential buildings in order to meet the households non-potable water demands. This paper suggests a methodology to evaluate the potential for drinking water savings in urban area using rainwater for non-potable purposes in single-family dwellings. Hydraulic and financial assessments were performed, taking as case study Belo Horizonte, 2.4 million-inhabitant city that is the capital of the state of Minas Gerais. Results suggest that, in a scenario of widespread use of domestic rainwater harvesting systems, one can get the equivalent of two months of drinking water supply as drinking water annual savings. On the other hand, for the adopted scenario, results suggest economic feasibility of the systems, although with a high payback and internal rate of return very close to the attractive interest rates. These results suggest that the dissemination of these systems may require funding models and other economic tools to promote them for large scale use.

Keywords: Water consumption. Drinking water saving. Rainwater harvesting.

INTRODUÇÃO

A água está intrinsecamente ligada ao desenvolvimento humano e tem sido essencial para os processos de crescimento urbano ao longo da história. Contudo, Domenech e Saurí (2011) apontam um drástico aumento na demanda de água em ambientes urbanos nos próximos anos, acompanhado por mudanças climáticas que afetarão o regime de chuvas, agravando os episódios de inundações e secas. Libânio (2006) argumenta que a ideia de abundância da água, considerada por longo tempo um recurso renovável e inesgotável, desfaz-se diante da constatação do crescimento de sua demanda, da variabilidade geográfica e sazonal da oferta hídrica e da degradação ambiental massiva e inconsequente. Nascimento e Heller (2005) também consideram que a expansão urbana nas regiões metropolitanas, frequentemente não planejada, muitas vezes ilegal, encontra-se na origem de sérios comprometimentos da qualidade da água de mananciais de abastecimento urbano.

Em um cenário de relativa escassez de água, torna-se necessária a implementação de políticas públicas relacionadas à gestão hídrica, focando a oferta e demanda de água, no sentido de manter os níveis adequados de abastecimento para os diversos fins. Sob a ótica da gestão integrada de águas urbanas, Sharma et al. (2008) indicam que um aspecto importante dos modelos de gestão é o *WSUD – Water Sensitive Urban Design* (planejamento urbano sensível à água) abrangendo o conceito de sustentabilidade, nas dimensões econômicas, sociais e ambientais.

Visando à proteção dos mananciais, de modo a aliviar a pressão sobre os mesmos, a substituição de água tratada por água de chuva pode ser uma alternativa relevante quanto à gestão de oferta para atender às demandas não potáveis residenciais, especialmente em regiões metropolitanas (GOMES et al, 2014; ROEBUCK; OLTEAN-DUMBRAVA; TAIT, 2011; VIEIRA, 2012). Outro importante aspecto referente ao aproveitamento de água de chuva em escala de lotes urbanos é na detenção de águas pluviais, acarretando no aumento do tempo de concentração, na redução do escoamento superficial e na redução dos picos de inundações (DORNELES, 2012; FENDRICH, 2002, 2005).

Alguns trabalhos analisaram o potencial de aproveitamento de água de chuva em ambientes urbanos no Brasil, visando à redução do consumo de água potável, como os propostos por Fendrich (2005), Ghisi, Bressan e Martini (2007), Ghisi, Montibeller e Schmidt (2006) e Moruzzi, Carvalho e Oliveira (2012). No contexto internacional, Gomes et al. (2014) abordam as experiências de captação de água de chuva, inclusive para consumo humano em diversos países. Domenech e Saurí (2011) concluíram que, para a região metropolitana de Barcelona, seria possível atender a várias demandas residenciais de água não potável, não obstante ser uma região de baixas precipitações pluviométricas. Belmeziti, Coutard e Gouvello (2013) e Belmeziti, Coutard e Gouvello (2014) destacam o crescimento da prática na França, onde cerca de 15% da população utiliza água de chuva principalmente para fins não potáveis. Os autores estimam, na região metropolitana de Paris, que o potencial de economia de água potável pode alcançar até 11% por meio do uso de água de chuva e avaliam que as edificações residenciais são responsáveis por até 2/3 deste potencial.

O enfoque deste trabalho é a proposição de uma metodologia para avaliar o potencial de redução do consumo de água potável através do aproveitamento de água de chuva em edificações residenciais unifamiliares.

MATERIAL E MÉTODOS

O município de Belo Horizonte, com população de cerca de 2,4 milhões de habitantes e área de 330 km², localizado na região sudeste do Brasil (Figura 1), foi escolhido como estudo de caso para esta pesquisa, tendo em vista a disponibilidade de dados cadastrais de qualidade sobre habitação e outros parâmetros. Estão descritas na tabela 1 algumas características de renda e indicadores de desenvolvimento humano e de saneamento de Belo Horizonte em comparação com grandes cidades brasileiras.

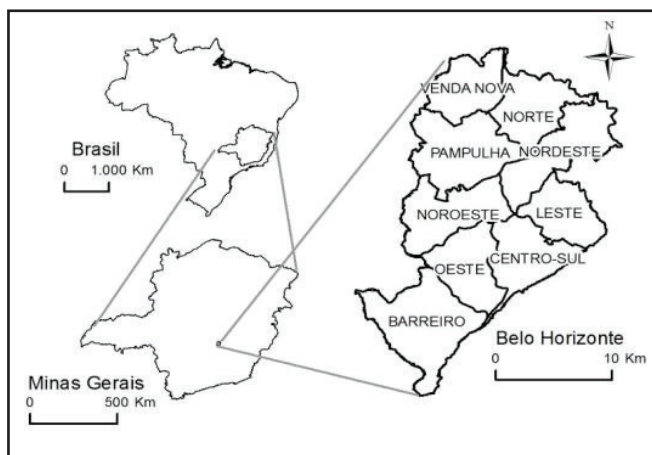


Figura 1. Mapa do Brasil, Estado de Minas Gerais, Belo Horizonte e suas regiões administrativas

Tabela 1. Indicadores de saneamento, IDH e Índice de GINI para Belo Horizonte e outras capitais brasileiras

Município	Cobertura por rede de água (%)	Cobertura por rede de esgoto (%)	Consumo per capita de água (litros/hab x dia)	IDH	Índice de Gini
Belo Horizonte	100,0	100,0	170,6	0,81	0,61
São Paulo	100,0	96,1	184,6	0,81	0,65
Rio de Janeiro	91,2	70,1	294,1	0,80	0,64
Curitiba	100,0	93,0	157,9	0,82	0,57
Porto Alegre	100,0	87,7	208,7	0,81	0,61
Salvador	92,2	76,0	153,3	0,75	0,65
Fortaleza	87,1	48,3	163,2	0,75	0,63

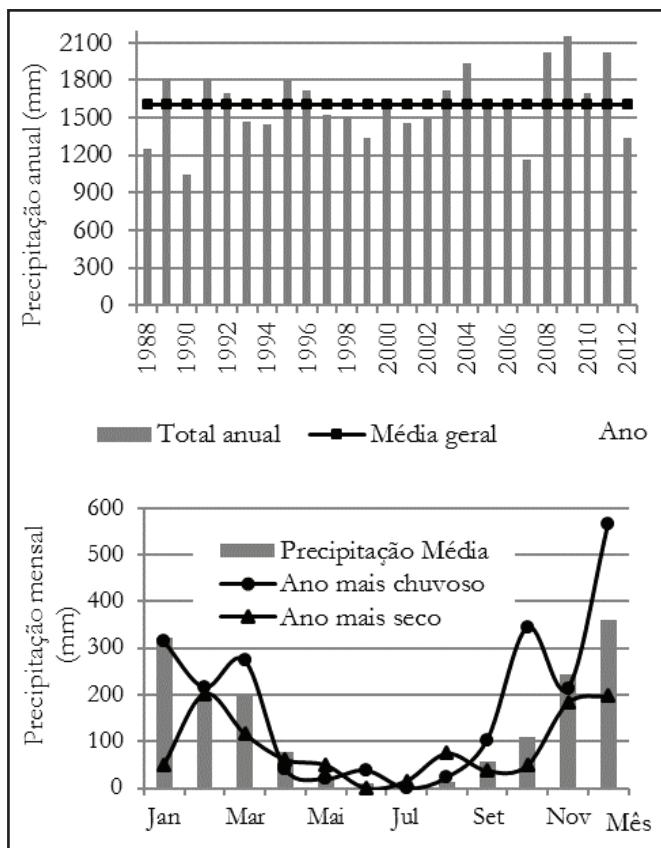
Fonte: <http://www.atlasbrasil.org.br/2013/>; Brasil, 2012

Pretende-se avaliar o potencial de economia de água potável por meio de sua substituição por água de chuva para fins não potáveis em edificações residenciais unifamiliares, tomando como estudo de caso o município de Belo Horizonte. Para tanto, organizou-se a metodologia segundo os procedimentos enumerados a seguir:

- a- Levantamento e análise da série histórica de chuvas, a partir da qual serão realizadas as simulações hidrológicas.
- b- Determinação de projetos-padrão de edificações residenciais unifamiliares para os quais serão quantificadas as demandas de água não potável e sobre os quais serão realizadas simulações hidrológicas e econômicas para uso de água de chuva. Por meio dos projetos-padrão pretende-se reduzir a variabilidade das características das construções existentes a um conjunto de cinco modelos. Para tal, as edificações residenciais unifamiliares existentes no município foram organizadas por meio de distribuições de suas características, como áreas de cobertura e padrões construtivos. As distribuições foram quantitativamente correlacionadas com os projetos-padrão, oriundos em grande parte de ABNT (2006).
- c- Extrapolação dos resultados obtidos nas simulações individuais dos projetos-padrão para estimar, em escala municipal, o potencial de economia de água potável por meio do uso de água de chuva.

Regime pluviométrico em Belo Horizonte

O município de Belo Horizonte conta com rede de estações pluviométricas e climatológicas instaladas, em sua maioria, a partir de 2010. Duas estações dispõem de séries longas de precipitação diária, tendo-se optado, neste estudo, pela Estação Pluviométrica Caixa de Areia, operada pela Agência Nacional das Águas, localizada no Parque das Mangabeiras, latitude $-19,93^\circ$,



Figuras 2a e 2b – Precipitações médias mensais e precipitações no ano mais chuvoso e mais seco em Belo Horizonte

Longitude $-43,93^\circ$ e altitude 915 m. A série temporal compreende o período de 02/01/1988 a 31/12/2012, totalizando 25 anos (9115 dias) e foi obtida via site hidroweb.ana.gov.br (Figuras 2a e 2b). A precipitação anual média é de 1.608 mm.

As simulações hidrológicas foram realizadas a partir do registro diário das precipitações no período.

Projetos-padrão

A pesquisa propõe o agrupamento das edificações residenciais unifamiliares existentes no município conforme a equivalência com projetos-padrão que, por meio de suas áreas de projeção e características arquitetônicas, permitam a realização de simulações de cálculo de aproveitamento de água de chuva coletada em telhados, considerando as demandas de água não potável. A NBR 12721:2006 (ABNT, 2006) estabelece

Tabela 2 – Projetos-Padrão residenciais unifamiliares

Nomenclatura e descrição dos projetos-padrão	
RP1-Q	(Residência unifamiliar popular): 1 dormitório, sala, banheiro e cozinha
R1-B	(Residência unifamiliar padrão baixo): 2 dormitórios, sala, banheiro, cozinha e área para tanque
R1-N	(Residência unifamiliar padrão normal): 2 dormitórios, uma suíte, banheiro social, sala, circulação, cozinha, área de serviço com banheiro e varanda (garagem)
R1-A	(Residência unifamiliar padrão alto): 4 dormitórios, com 1 suíte com banheiro e closet, outro com banheiro, banheiro social, sala de estar, sala de jantar e sala íntima, circulação, cozinha, área de serviço completa e varanda (abrigo para automóvel)
R1-X	(Residência unifamiliar padrão alto): 2 pavimentos (parcial), 6 dormitórios, com 2 suítes com banheiro e closet, e outras 2 com banheiro, banheiro social, salas de estar, de jantar e íntima, circulação, cozinha, área de serviço completa, varanda e garagem

Fonte: ABNT (2006), exceto o projeto-padrão R1-X (elaboração própria)

Tabela 3 – Projetos-Padrão residenciais unifamiliares (áreas)

Projetos-Padrão	Descrição das áreas ⁽¹⁾ (m ²)					
	Lote	Cobertura ⁽²⁾ (telhado)	Internas		Externas ⁽³⁾	
			Banheiros	Outros cômodos	Permeáveis	Impermeáveis
RP1-Q	80,0	39,56	2,5	35,3	11,9	8,6
R1-B	80,0	58,64	2,5	37,8	17,6	3,8
R1-N	150,0	106,44	8,3	88,6	31,9	11,7
R1-A	320,0	224,82	15,9	180,0	67,5	27,7
R1-X	600,0	450,00	38,5	394,5	95,0	55,0

1. Áreas obtidas em ABNT (2006), exceto o projeto-padrão R1-X (elaboração própria).
2. Utilizada como referência para as simulações de captação de água de chuva.
3. Áreas externas arbitradas, ressalvando a possibilidade de haver construções em diferentes tipos de lotes.

diferentes tipologias de projetos-padrão residenciais em função de parâmetros, tais como: área de projeção, número de cômodos e padrão de acabamento (B– Baixo / N– Normal / A– Alto).

Adotaram-se os projetos-padrão residenciais definidos pelo referida norma, considerando 4 projetos de edificações unifamiliares (casas), cujas características estão descritas nas tabelas 2 e 3. A área externa a ser lavada com água de chuva (sistema de aproveitamento) foi arbitrada ressaltando-se as diferentes possibilidades de áreas de lotes. A inclusão de um 5º projeto-padrão, denominado R1-X e área coberta de 450 m², tornou-se necessária para obtenção de melhor correlação com a base cadastral de edificações existentes em Belo Horizonte, conforme será verificado na figura 4.

Cadastro de residências unifamiliares na Prefeitura Municipal de Belo Horizonte

A base de dados utilizada na pesquisa foi fornecida pela Prefeitura Municipal de Belo Horizonte (PMBH) e é composta pela restituição aerofotogramétrica realizada em 2008 e base cadastral do Imposto Predial e Territorial Urbano (IPTU) atualizada em 2013. Os dados foram processados nos programas Microsoft Excel 2007 e MapInfo 11.0, da Geograph. A partir do índice cadastral e da codificação dos setores censitários do IBGE, foram selecionados os dados referentes às edificações residenciais unifamiliares e seus padrões de acabamento, definidos pela PMBH como P1– Popular, P2– Baixo, P3– Normal, P4– Alto e P5– Luxo. Visando à compatibilização com os padrões definidos pela NBR 12.721 (ABNT, 2006), as edificações foram classificadas em: Casas P1P2, Casas P3 e Casas P4P5, equivalentes aos padrões baixo, normal e alto, respectivamente.

Demandas de água não potável nos projetos-padrão

Foram quantificados, para cada projeto-padrão, os usos residenciais de água não potável, conforme indicado em ABNT (2007): (i) descarga de vasos sanitários; (ii) irrigação de jardins e (iii) lavagem de piso em geral.

Descarga de vasos sanitários

O volume de água em descargas em vasos sanitários é dado pela equação 1:

$$V_{\text{banheiro}} = N_{\text{moradores}} \times N_{\text{uso banheiro}} \times V_{\text{descarga}} \quad (1)$$

Onde:

$N_{\text{moradores}}$: Número de moradores por residência, cuja média é igual a 3 para Belo Horizonte (IBGE, 2010);

$N_{\text{uso banheiro}}$: Número de usos diários do vaso sanitário, variando de acordo com fatores como permanência dos moradores na residência, hábitos pessoais e condições de saúde, sendo considerados 4 usos por dia durante a semana e 6 vezes por dia durante fins de semana, conforme média estimada por Reiber (2012) e Roebuck, Oltean-Dumbrava e Tait (2011). Tais

frequências convergem com a média utilizada por Ghisi, Bressan e Martini (2007) e Moruzzi, Carvalho e Oliveira et al. (2012);

V_{descarga} : Considerou-se o uso de válvula de descarga, com vazão de 9 litros por acionamento (TOMAZ, 2011).

A aplicação dos critérios descritos na equação 1 resultou em consumos diários de 36 em litros/hab em dias de semana e de 54 em litros/hab em fins de semana.

Irrigação de áreas verdes (jardins)

Utilizou-se o parâmetro definido no âmbito do PRO-SAB 5 (GONÇALVES, 2009), que indica um volume médio de 3 litros/m² x dia para irrigação de áreas verdes. Considerou-se o uso de água para irrigação nos dias com precipitações inferiores a 2 mm (REIBER, 2012).

Lavagem de áreas internas e externas

A água de chuva também pode ser usada na lavagem de pisos da residência. Duquesnoy (2009) indica que a água utilizada para limpeza depende principalmente do material e da área da superfície. Utilizaram-se os seguintes valores nos cálculos de demanda de água para limpeza da edificação, com periodicidade semanal:

- Lavagem de banheiros: 10,0 litros/m²;
- Lavagem dos demais cômodos internos: 1,5 litros/m²;
- Lavagem da área impermeável externa: 2,0 litros/m².

Especificações técnicas, dimensionamento e parâmetros financeiros de sistemas de aproveitamento de água de chuva

A pesquisa considerou o sistema em que a água de chuva é captada no telhado da edificação, conduzida ao reservatório inferior, bombeada ao reservatório superior de água não potável e distribuída aos pontos de consumo.

A metodologia ora proposta busca otimizar o processo de dimensionamento do reservatório inferior (RI) por meio de critérios hidrológicos e econômicos. O critério hidrológico foi aplicado por meio de simulações, a partir do modelo comportamental (FEWKES, 2000), utilizando-se o programa computacional Netuno (GHISI; CORDOVA, 2014), tomando-se por base a equação 2.

$$V = \frac{P}{1000} \times A \times C \quad (2)$$

Onde:

V: Volume captado, m³/dia;

P: Precipitação diária, em mm (base de dados de 25 anos);

A: Área de coleta de água, em m² (Tabela 3);

C: Coeficiente de aproveitamento de água de chuva, número adimensional que incorpora: (i) o coeficiente de escoamento superficial (coeficiente runoff), variável de acordo com o tipo de material que constitui o telhado e (ii) o coeficiente de filtro, referente aos dispositivos de descarte do escoamento inicial

(first flush) e de retenção de materiais sólidos. Considerou-se igual a 0,8, correspondente a telhado de fibrocimento, conforme indicado por Tomaz (2011) e Ghisi, Bressan e Martini (2007).

O critério econômico constitui-se em analisar conjuntamente, para diferentes volumes, os custos relacionados ao sistema e baseia-se na análise econômica de projetos hidrológicos proposta por Chow, Maidment e Mays (1988).

Dentre os diversos componentes dos sistemas de aproveitamento de água de chuva, o reservatório inferior é o mais dispendioso (GOMES et al, 2010; MORUZZI; CARVALHO; OLIVEIRA, 2012). A figura 3 apresenta os custos totais de implantação do sistema de aproveitamento de água de chuva para dois tipos de reservatório inferior: (i) de concreto armado, enterrado no solo e (ii) de polietileno, sobreposto ao solo. Os parâmetros de composição de serviços e preços foram obtidos em TCPO (2008), SINAPI (2012) e em estabelecimentos comerciais na região de Belo Horizonte em 2013. Verifica-se que a opção de reservatório de polietileno apresenta custo inferior, sendo esta a adotada nas simulações de dimensionamento e econômicas.

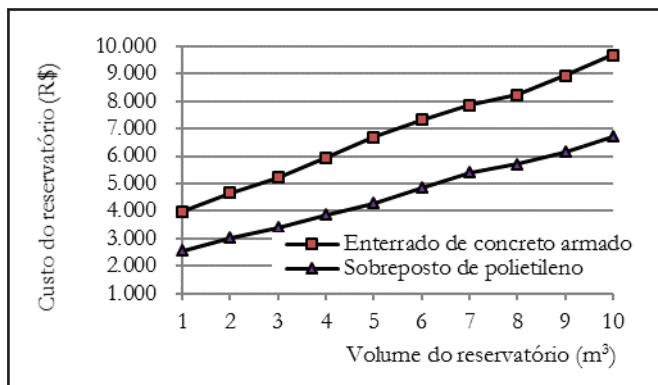


Figura 3 – Custos de implantação do sistema de aproveitamento de água de chuva para dois tipos de RI

Foram considerados nos custos de manutenção e operacionais: (i) manutenção do sistema: limpeza anual dos reservatórios e eventuais substituições de acessórios; (ii) tratamento com cloro objetivando a desinfecção básica da água contida no reservatório inferior; (iii) energia elétrica utilizada pelo conjunto motobomba, calculada através da relação entre o volume de água a ser recalçada e a tarifa correspondente (cerca de R\$0,6/kWh).

A tarifação de água representa importante aspecto nos cálculos financeiros do estudo. Corresponde à economia gerada pelo uso de água de chuva para demandas não potáveis e que, a priori, seriam atendidas pela água potável fornecida pela concessionária. Assim, é computada como “benefício” para o usuário que avalia a implantação do sistema nas análises econômicas de investimento. Algumas características da estrutura tarifária aplicável a Belo Horizonte: (i) É a soma da tarifa fixa (R\$/mês) para intervalos de consumo de 0 a 6 m³/mês e tarifa variável (R\$/m³) para os intervalos de 6 < Consumo ≤ 10, 10 < Consumo ≤ 15, 15 < Consumo ≤ 20, 20 < Consumo ≤ 40, Consumo > 40; (ii) Distingue diferentes classes de consumo e se há tratamento de esgoto.

Os reajustes inflacionários foram calculados com base no Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo (IPCA), cuja

média entre 1997 e 2013 é de cerca de 6% ao ano (PORTAL BRASIL, 2014). Os reajustes anuais nas tarifas de energia elétrica foram considerados na ordem de 5,2%, equivalente à média entre os anos 2007 e 2014, segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Sobre a tarifa de água, incidiu-se reajuste de 6,0%, equivalente à média entre os anos de 2011 a 2014, segundo a Agência Reguladora de Serviços de Abastecimento de Água e Esgotamento Sanitário do Estado de Minas Gerais (ARSAE).

O potencial máximo de aproveitamento de água de chuva para fins não potáveis foi arbitrado em 100% para que as simulações permitissem a obtenção do percentual real de aproveitamento de água de chuva para as demandas estabelecidas na tabela 5. Foram realizadas simulações para diversos volumes do reservatório inferior (RI), objetivando determinar o “volume ótimo”, calculado com os parâmetros: (i) Volume máximo; (ii) Intervalo de 1 m³ entre os volumes; (iii) Diferença entre potenciais de economia de água potável por meio do aproveitamento de água de chuva. Adotou-se o valor de 5%/m³ pois, a partir deste, as simulações resultaram pequenas variações no valor do volume ótimo.

As avaliações econômicas foram realizadas sob a ótica de análise de investimento, envolvendo técnicas que buscam verificar sua viabilidade financeira, como payback descontado, valor presente líquido (VPL), taxa interna de retorno e taxa mínima de atratividade (CASAROTTO; KOPITTE, 2000).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A figura 4 apresenta os histogramas acumulados que descrevem a distribuição das edificações unifamiliares em Belo Horizonte, em função de suas áreas de projeção (cobertura) e padrão de acabamento. Considerando os percentuais de ocorrência de edificações conforme suas áreas ilustradas no referido diagrama, descartaram-se os dados relativos às edificações com áreas superiores a 260 m² para as Casas P1P2 e P3 e superiores a 450 m² para as Casas P4P5 (ver indicações na Figura 3). Verifica-se que, de forma geral, os projetos-padrão RP1-Q, R1-B, R1-N e R1-A – possuem boa equivalência com as edificações existentes no município até a área de 260 m². Apesar de corresponderem

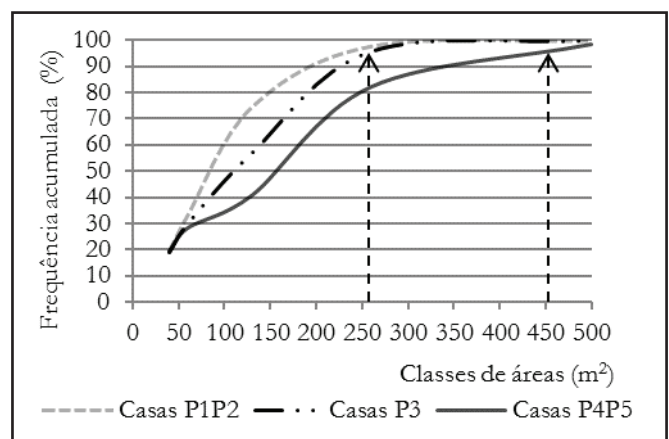


Figura 4 – Diagrama de frequências acumuladas de edificações unifamiliares em Belo Horizonte

Tabela 4 – Número de casas enquadradas nos projetos-padrão e característica construtiva

Projeto-Padrão e faixas de áreas (m²)	Casas P1P2 (padrão baixo)	Casas P3 (padrão normal)	Casas P4P5 (padrão alto)	Total
RP1-Q (Faixa 1: 10 < A ≤ 40)	53.307	23.957	3.510	80.774
R1-B (Faixa 2: 40 < A ≤ 60)	37.217	13.694	1.601	52.512
R1-N (Faixa 3: 60 < A ≤ 130)	112.713	33.994	2.240	148.947
R1-A (Faixa 4: 130 < A ≤ 260)	63.422	48.842	7.474	119.738
R1-X (Faixa 5: 260 < A ≤ 450)	-	-	2.930	2.930
	Total:			404.901

aos padrões de acabamento normal e alto, respectivamente, os projetos-padrão R1-N e R1-A, devido às suas áreas, também serão relacionados às Casas P1P2 e P3. Exclusivamente para as Casas P4P5 definiu-se um 5º projeto-padrão (R1-X), com área de 450 m² (Tabelas 2 e 3).

A tabela 4 apresenta a distribuição das edificações existentes em Belo Horizonte, agrupadas segundo os padrões construtivos e faixas de áreas, correlacionando-as aos projetos-padrão apropriados.

A tabela 5 sintetiza as demandas diárias médias de água não potável para cada projeto-padrão estudado, com 3 pessoas por domicílio (IBGE, 2010), ao longo de 9.115 dias, período igual à série histórica de precipitações).

Tabela 5 – Demandas médias (litros/dia) de água não potável para cada projeto-padrão

Projetos -Padrão	Demandas médias da residência (litros/dia)			Total
	Válvula de descarga	Irrigação de áreas verdes (jardins)	Lavagem de áreas internas e externas	
RP1-Q	123	28	15	166
R1-B	123	41	17	181
R1-N	123	74	37	234
R1-A	123	157	76	356
R1-X	123	221	142	486

Dimensionamento do reservatório inferior

As figuras 5a e 5b contêm os resultados com os potenciais de economia de água potável, para os cinco projetos-padrão, enfocando os percentuais de maior interesse para cada caso (30 a 70%). Conforme explicado, adotou-se como critério para a escolha do volume ótimo do reservatório inferior aquele para o qual um aumento de volume de armazenamento resulta em um aumento no potencial de economia de água igual ou inferior a 5%/m³.

As figuras 6a a 6e descrevem os gráficos relacionando o custo total e volume do reservatório inferior para os 5 projetos

-padrão. O custo total é a soma entre: (i) Custo de implantação e operação de sistemas de aproveitamento de água de chuva ao longo de 20 anos de uso do sistema, grandeza diretamente proporcional ao volume do reservatório inferior, sendo considerados os custos operacionais e de manutenção anuais, incidindo-se os reajustes anuais; (ii) Custo com água tratada (fornecida pela concessionária) para suprir a demanda de água não potável que não foi atendida pelo sistema de aproveitamento de água de chuva ao longo de 20 anos de uso do sistema: grandeza inversamente proporcional ao volume do reservatório. O critério de escolha do volume ótimo é o que corresponde ao custo total mínimo.

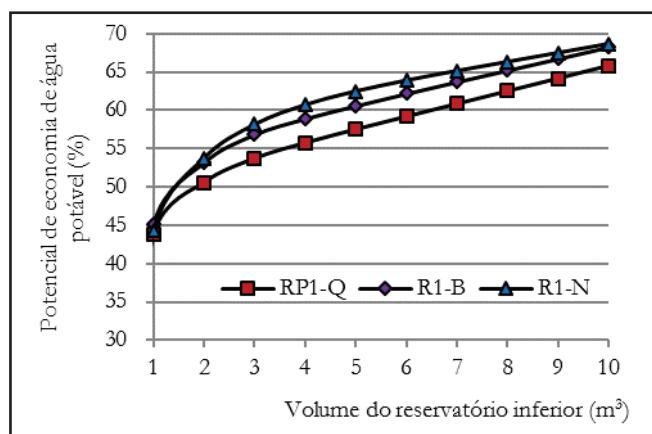


Figura 5a – Potenciais de economia de água potável para os projetos-padrão RP1-Q, R1-B e R1-N

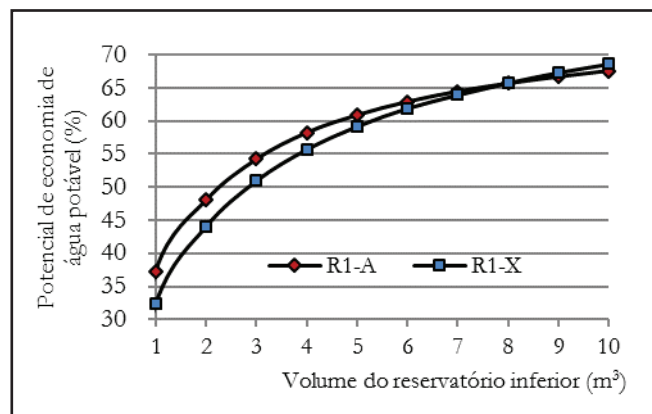
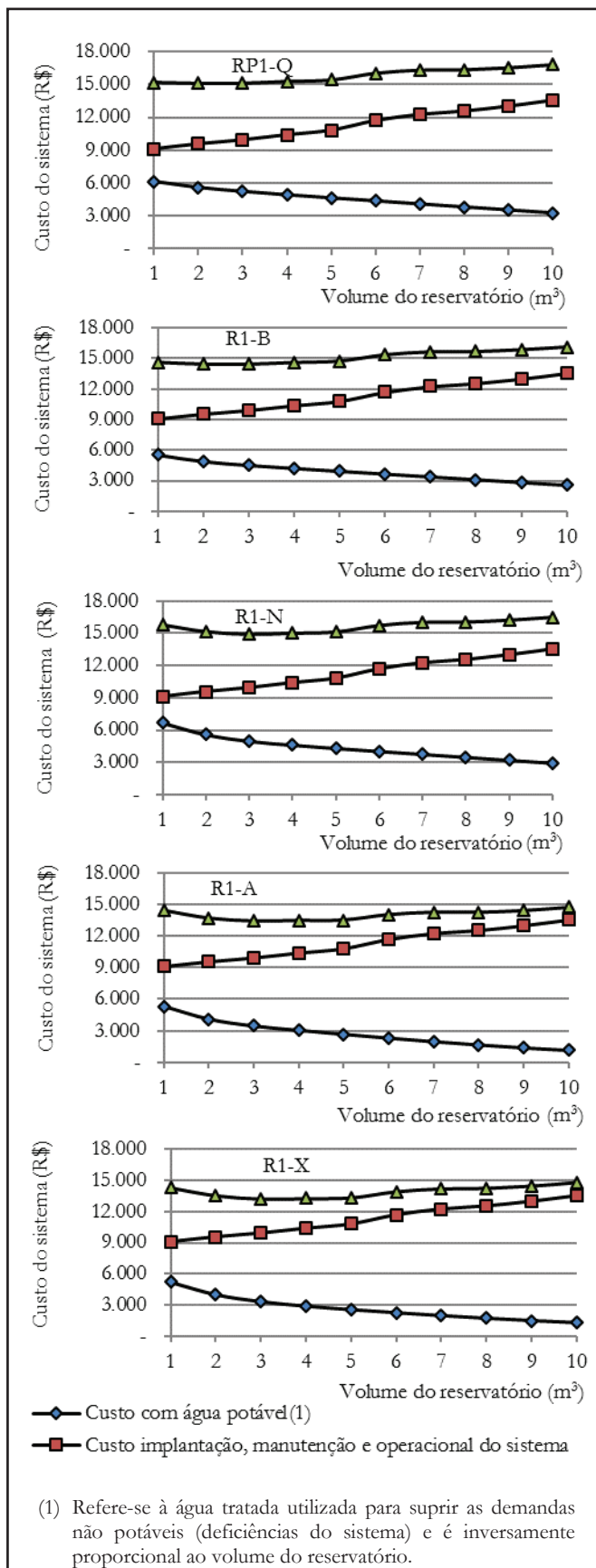


Figura 5b – Potenciais de economia de água potável para os projetos-padrão R1-A e R1-X

Refere-se à água tratada utilizada para suprir as demandas não potáveis (deficiências do sistema) e é inversamente proporcional ao volume do reservatório.

Ao serem aplicados os métodos hidrológicos e econômicos obtiveram-se resultados semelhantes quanto ao volume ótimo do reservatório inferior, sendo que o critério econômico resultou em uma faixa de volumes com custos totais próximos entre si. A tabela 6 sintetiza os resultados de determinação do volume ótimo do reservatório inferior para os cinco projetos-padrão conforme critérios hidráulicos e econômicos estipulados.



Figuras 6a a 6e – Custo do sistema x volume do reservatório inferior (RI) para os 5 projetos-padrão

Tabela 6 – Volume ótimo do reservatório inferior para os diferentes projetos-padrão

Projetos-Padrão	Volume ótimo do reservatório inferior (RI)	
	Critério hidrológico	Critério econômico
RP1-Q	RI: 3 m ³ RS ⁽¹⁾ : 250 litros	Faixa de 2 a 5 m ³
R1-B	RI: 3 m ³ RS: 250 litros	Faixa de 2 a 5 m ³
R1-N	RI: 3 m ³ RS: 500 litros	Faixa de 2 a 5 m ³
R1-A	RI: 4 m ³ RS: 500 litros	Faixa de 3 a 5 m ³
R1-X	RI: 4 m ³ RS: 500 litros	Faixa de 3 a 5 m ³

Reservatório superior (RS) para água de chuva

A partir dos resultados expostos na Tabela 6, considerando-se a convergência dos resultados entre os critérios, optou-se por escolher, para cada projeto-padrão, os volumes ótimos obtidos por meio do critério hidrológico para desenvolver os demais cálculos e análises.

Para cada projeto-padrão, calcularam-se os respectivos potenciais de economia de água potável (PEC) e volumes consumidos de água de chuva (VC), entendendo-se que tais volumes foram gerados pelo sistema e efetivamente aproveitados na residência. As simulações foram realizadas para todos os dias da série histórica utilizada, abrangendo o total de 25 anos. A tabela 7 apresenta, para cada projeto-padrão, as médias diárias do PEC e VC ao longo dos meses do ano, podendo ser verificadas as características pluviométricas de Belo Horizonte no período de escassez de chuvas. A referida tabela torna possível um melhor planejamento quanto às demandas em função da disponibilidade de água de chuva, percebendo-se a necessidade de complementação de água potável (fornecida pela concessionária) para atender às demandas de água não potável quantificadas na tabela 5. Entretanto, apesar da necessidade de tal complementação, é possível constatar que há um potencial relevante de economia de água potável.

Objetivando a verificação do potencial de redução do consumo de água potável através do aproveitamento de água de chuva, foi elaborada a tabela 8, considerando o cenário de uso generalizado do sistema em todas as residências unifamiliares (casas) do município de Belo Horizonte. Para tanto, os resultados expostos na tabela 7 foram extrapolados através da multiplicação entre (i) a média diária do volume consumido de água de chuva para cada projeto-padrão e (ii) o número de residências agregadas por tipologia e padrão construtivo, conforme base cadastral da PMBH descrita na tabela 4.

Foi registrado pela COPASA, nos anos 2012 e 2013, um consumo domiciliar médio de água em Belo Horizonte na ordem de 10.002.806 m³/mês (COPASA, 2013), ressaltando que tal média refere-se ao consumo em edificações residenciais unifamiliares e multifamiliares.

Os resultados permitem verificar que, para o cenário considerado e as simulações realizadas, a economia anual de água potável decorrente do aproveitamento de água de chuva em edificações unifamiliares é de aproximadamente 21,4 x 10⁶ m³.

Tabela 7 – Potencial de economia de água potável (PEC, em %) e volume consumido de água de chuva (VC, em litros/dia)

Mês	Projetos-Padrão									
	RP1-Q		R1-B		R1-N		R1-A		R1-X	
	PEC	VC	PEC	VC	PEC	VC	PEC	VC	PEC	VC
Janeiro	95,3	158,2	93,9	169,9	94,3	220,7	88,2	314,1	82,7	402,1
Fevereiro	90,4	150,0	90,9	164,5	89,6	209,5	84,5	300,7	77,8	378,3
Março	90,8	150,7	91,7	165,9	92,4	216,2	88,0	313,2	81,8	397,6
Abril	61,5	102,1	66,1	119,7	70,0	163,8	66,4	236,2	59,8	290,5
Maió	12,8	21,2	19,7	35,7	29,5	69,0	31,2	111,2	31,6	153,3
Junho	6,2	10,3	7,2	13,0	11,2	26,1	12,5	44,4	15,7	76,4
Julho	3,2	5,2	4,6	8,3	7,0	16,4	7,3	26,0	9,9	48,1
Agosto	8,9	14,7	11,6	21,0	16,3	38,1	16,2	57,5	16,2	78,8
Setembro	31,6	52,4	37,5	67,9	46,4	108,5	45,5	162,1	42,0	204,0
Outubro	57,2	95,0	66,5	120,4	72,5	169,7	70,6	251,3	67,1	325,9
Novembro	89,4	148,4	94,2	170,4	97,6	228,5	93,1	331,3	91,0	442,4
Dezembro	97,8	162,3	98,4	178,1	99,8	233,6	95,4	339,6	93,3	453,2
Média diária	53,7	89,2	56,9	102,9	60,5	141,7	58,2	207,3	55,7	270,9

Tabela 8 – Potencial de economia de água potável para o município de Belo Horizonte

Projeto Padrão	Potencial de economia de água potável (m ³ /dia)				
	Casas P1P2	Casas P3	Casas P4P5	Total	%
RP1-Q	4.734	2.128	312	7.174	12,3
R1-B	3.833	1.410	165	5.409	9,2
R1-N	15.353	4.630	305	20.288	34,7
R1-A	13.161	10.135	1.551	24.847	42,4
R1-X	-	-	795	795	1,4
	Total diário (m ³ /dia):			58.512	100,0
	Total anual (m ³ /ano):			21.356.818	

Tabela 9 – Índices econômicos de análise de investimentos para os projetos-padrão

Projetos-Padrão	Resultados econômicos		
	Payback (meses / anos)	VPL (R\$)	TIR (%)
RP1-Q	234 (19,5)	30,00	0,42
R1-B	220 (18,3)	300,00	0,48
R1-N	211 (17,6)	410,00	0,51
R1-A	220 (18,3)	400,00	0,49
R1-X	198 (16,5)	900,00	0,58

Comparando-se com os registros da COPASA, tal economia equivale a cerca de 2,1 meses de consumo residencial de água potável no município de Belo Horizonte.

Outro aspecto a ser analisado é que, em escala municí-

pal, do potencial total de economia de água, em m³/dia, 77,1% está concentrado nos projetos-padrão R1-N (34,7%) e R1-A (42,4%), ou seja, nas casas cujas áreas estão nas faixas entre 60 e 130 m² e 130 a 260 m² respectivamente. Verifica-se também que as casas com área superior a 260 m² (projeto-padrão R1-X) apresentam baixo impacto no potencial de economia de água potável. Tais constatações podem ser relevantes para definição de prioridades na implementação de políticas relacionadas à redução do consumo de água potável.

Sob a ótica econômica, calcularam-se os resultados referentes à análise de investimentos – payback, valor presente líquido (VPL) e taxa interna de retorno (TIR). A tabela 9 descreve os resultados para as simulações realizadas nos projetos-padrão, considerando os índices de reajuste explicitados anteriormente. Optou-se por definir, para os cálculos econômicos, parâmetros conservadores do ponto de vista de análise de investimentos, descritos a seguir: (i) tempo de análise: 20 anos e (ii) taxa mínima de atratividade: 5% ao ano (cerca de 0,41% ao mês). Observa-se que admitiram-se elevado tempo para retorno do capital investido e baixa taxa de retorno.

Observou-se que o payback decresceu à medida que a área da edificação aumentou (RP1-Q a R1-N). Devido ao aumento do volume ótimo do reservatório inferior para R1-A e R1-X (Tabela 6) e consequente aumento do custo total, o payback de R1-A igualou ao de R1-B. Perceberam-se elevados prazos de payback, a partir de 198 meses (16,5 anos) para R1-X, alcançando 234 meses para o caso do RP1-Q. A TIR apresentou resultado inverso, ou seja, R1-X gerou maior taxa de retorno, enquanto o RP1-Q, a menor taxa.

Os casos analisados apresentaram taxas internas de retorno (TIR) semelhantes entre si e superiores à taxa mínima de atratividade (TMA), tornando os projetos viáveis do ponto de vista econômico, não obstante a adoção de parâmetros conservadores.

CONCLUSÕES

A metodologia aplicada no estudo apresentou-se útil na avaliação do potencial de economia de água potável através do aproveitamento de água de chuva em edificações residenciais.

Nos aspectos hidrológicos e hidráulicos, a média diária do potencial de economia de água potável e do volume consumido de água de chuva permite concluir que a implantação do sistema de aproveitamento é uma alternativa importante e pode ser levada em consideração no estabelecimento de políticas públicas relacionadas à redução do consumo de água potável em ambientes urbanos. O volume total de chuva, apesar de elevado, concentra-se em alguns meses, fato que conduz a um baixo potencial de utilização do sistema no período seco, reduzindo sua atratividade econômica.

Cabe ressaltar que o perfil pluviométrico em Belo Horizonte é, nos aspectos referentes ao aproveitamento de água de chuva, relativamente desfavorável devido ao longo período seco, conforme já mencionado. Pode-se inferir que, em locais cujas precipitações apresentem maior constância ao longo do ano, sejam obtidos melhores resultados hidráulicos e econômicos.

Considerando as análises econômicas – elevado payback e taxas de retorno de investimento (TIR) muito próximas das taxas mínimas de atratividade (TMA) – recomenda-se avaliar a possibilidade de se adotarem modelos de financiamento ou outros mecanismos econômicos que incentivem a disseminação do sistema. A despeito dos resultados relacionados à análise de investimento, devem-se ressaltar as questões referentes à manutenção do abastecimento de água potável à população e à necessidade de aprimorar os instrumentos de gestão dos recursos hídricos, aliviando a pressão exercida sobre os mesmos.

Salienta-se que algumas incertezas metodológicas devem ser analisadas, principalmente em relação aos aspectos: (i) uso do sistema, em que as demandas de água não potável estimadas na pesquisa dependem fundamentalmente do usuário do sistema; (ii) parâmetros de custo do sistema, que interferem diretamente nos resultados econômicos.

Um importante aspecto é que a possibilidade de transferência da metodologia ora proposta para outras regiões é viável, mas é requerida uma base de dados cadastrais de qualidade. Um parâmetro a ser avaliado é o estabelecimento de correlação entre os projetos-padrão estudados e a distribuição das edificações de acordo com seus padrões construtivos e áreas. Conforme mencionado anteriormente, a hipótese da presente metodologia ser aplicada em regiões com disponibilidade de informações de qualidade e com perfil pluviométrico de maior constância ao longo do ano pode gerar resultados hidráulicos e econômicos satisfatórios.

A pesquisa objeto do presente artigo terá continuidade abordando-se a avaliação do potencial de economia de água potável através do aproveitamento de água de chuva e medição individualizada de água em edifícios de apartamentos, além de uso de equipamentos hidráulicos economizadores em residências.

AGRADECIMENTOS

Os autores do artigo agradecem ao Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), à Companhia de Saneamento de Minas Gerais (COPASA), à Prefeitura Municipal de Belo Horizonte e à Empresa de Informática e Informação do Município de Belo Horizonte (PRODABEL) pelo fornecimento dos dados utilizados na pesquisa. Agradecem também ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG), à Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais (FAPEMIG), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ) e à Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo suporte financeiro para o desenvolvimento da pesquisa.

REFERÊNCIAS

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 12.721:2006*: Avaliação de custos de construção para incorporação imobiliária e outras disposições para condomínios edilícios. Rio de Janeiro: ABNT, 2006.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 15.527:2007*: Aproveitamento de água de chuva de coberturas de áreas urbanas para fins não potáveis. Rio de Janeiro: ABNT, 2007.

BELMEZITI, A.; COUTARD, O., de GOUELLO, B. How much drinking water can be saved by using rainwater harvesting on a large urban area? Application to Paris Agglomeration. *Water Sci. Technol.*, v. 70, n. 11, p. 1782-1788, 2014.

BELMEZITI, A.; COUTARD, O., de GOUELLO, B. A New Methodology for Evaluating Potential for Potable Water Savings (PPWS) by Using Rainwater Harvesting at the Urban Level: The Case of the Municipality of Colombes (Paris Region). *Water*, v. 5, n. 1, p. 312-326, 2013.

BRASIL. Ministério das Cidades. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental – SNSA. *Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento*: diagnóstico dos serviços de água e esgoto – 2010. Brasília: SNSA, 2012.

CASAROTTO, F.; KOPITTKKE, N. *Análise de investimentos*. 9. ed. São Paulo: Atlas, 2000.

CHOW, V. T.; MAIDMENT, D. R.; MAYS, L. W. *Applied hydrology*. New York: McGrawHill, 1988.

COPASA – Companhia de Saneamento de Minas Gerais. *Relatórios Operacionais*. Belo Horizonte: COPASA, 2013.

DOMENECH, L.; SAURÍ, D. A comparative appraisal of the use of rainwater harvesting in single and multi-family buildings of the Metropolitan Area of Barcelona: social experience, drinking water savings and economic costs. *J. Cleaner Prod.*, v. 19, n. 6-7,

p. 598-608, Apr.-May 2011.

DORNELLES, F. *Aproveitamento de água de chuva no meio urbano e seu efeito na drenagem pluvial*. 2012. 138 f. Tese (Doutorado) – IPH, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

DUQUESNOY, S. Evaluation de la possibilité de récupération et d'utilisation de l'eau de pluie pour une école de Belo Horizonte (Minas Gerais, Brésil). Paris: Ecole des Ponts Paris Tech, 2009.

FENDRICH, R. *Coleta, Armazenamento, Utilização e Infiltração das Águas Pluviais na Drenagem Urbana*. 2002. 499 f. Tese (Doutorado) – Departamento de Geologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2002.

FENDRICH, R. Economy of drinking water by the use of detention and rainwater utilization systems. In: SAVIC, D. A.; BERTONI, J. C.; MARINO, M. A.; SAVENIJE, H. H. G. (Org.). Sustainable water management solutions for large cities. Wallingford, England, UK: LAHS Press, 2005. v. 293, p. 155-163.

FEWKES, A. Modelling the performance of rainwater collection systems: towards a generalized approach. *Urban Water*, v. 1, n. 4, p. 323-333, Dec. 2000.

GHISI, E.; BRESSAN, D.; MARTINI, M. Rainwater tank capacity and potential for potable water savings by using rainwater in the residential sector of southeastern Brazil. *Building Environ.*, v. 42, n. 4, p. 1654-1666, Apr. 2007.

GHISI, E.; CORDOVA, M. M. *Netuno 4*. Programa computacional. Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Civil. [S.l. s.n.]. Disponível em: <<http://www.labee.ufsc.br/>>. Acesso em: 23 mar. 2014.

GHISI, E.; MONTIBELLER, A.; SCHMIDT, R.W. Potential for potable water savings by using rainwater: an analysis over 62 cities in southern Brazil. *Building Environ.*, v. 41, n. 2, p. 204-210, Feb. 2006.

GOMES, J.; WEBER, D. C.; DELONG, C. M. Dimensionamento de Reservatórios de Armazenamento de Águas Pluviais, usando um Critério Financeiro. *RBRH: revista brasileira de recursos hídricos*, v. 15, n. 1, p. 89-100, jan.-mar. 2010.

GOMES, U. A. F., DOMENECH, L. PENA, J. L., HELLER, L., PALMIER, L. R. A captação de água de chuva no Brasil: novos aportes a partir de um olhar internacional. *RBRH: revista brasileira de recursos hídricos*, Porto Alegre, v. 19, n. 1, p. 7-16, jan. 2014.

GONÇALVES, R. F. (Coord.). *Racionalização do uso de água e conservação de energia em sistemas de abastecimento públicos e em edificações, por meio de redução no consumo, reaproveitamento de fontes alternativas e outras formas de uso racional da água*. Projeto PROSAB. Rio de Janeiro: ABES, 2009.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. [S.l.]: IBGE, 2010. <<http://www.ibge.gov.br/home>> Acesso: 06/08/2013.

LIBÂNIO, P. A. C. *Avaliação qualitativa do modelo de gestão da Política Nacional de Recursos Hídricos: interfaces com o Sistema Ambiental e com o Setor de Saneamento*. 2006. 318 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.

MORUZZI, R. B.; CARVALHO, G., OLIVEIRA, C. Procedimentos para o dimensionamento de reservatório de água pluvial para residências unifamiliares: viabilidade e aprimoramento metodológico. *Teoria Prática Eng. Civil*, v. 19, p. 89-99, maio 2012.

NASCIMENTO, N. O.; HELLER, L. Ciência, Tecnologia e Inovação na Interface entre as Áreas de Recursos Hídricos e Saneamento. *Revista Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 10, p. 36-48, jan-mar, Belo Horizonte, 2005.

PORTAL BRASIL. 2014. Disponível em: <<http://www.portalbrasil.net/ipca.htm>>. Acesso em: 8 jul. 2014.

REIBER, M. *Social-Economic influences on the rainfall harvesting potential on large-city scale: assessments for the municipality of Belo Horizonte, Brazil*. 2012. 112 f. Master (thesis) - Universidade de Munique e Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012.

ROEBUCK, R. M., OLTEAN-DUMBRAVA, C., TAIT, S. Whole life cost performance of domestic rainwater harvesting systems in the United Kingdom. *Water Environ. J.*, v. 25, n. 3, p. 355-365, Sept. 2011.

SHARMA, A.; GRAY, S.; DIAPER, C.; LISTON, P.; HOWE, C. Assessing integrated Water Management Options for Urban Developments – Canberra Case Study. *Urban Water J.*, v. 5, n. 2, p. 147-159, 2008.

SINAPI. 2012. *Custo de Composições – Sintético*. Belo Horizonte: SINAPI, 2012. Disponível em: <http://www1.caixa.gov.br/gov/gov_social/municipal/programa_des_urbano/SINAPI>. Acesso em: 1 maio 2014.

TCPO. *Tabelas de Composição de Preços para Orçamentos*. 13. Ed. São Paulo: Pini, 2008.

TOMAZ, P. Previsão de consumo de água: interface das instalações prediais de água e esgoto com os serviços públicos. 4. ed. São Paulo: Navegar, 2011.

VIEIRA, S. A. Uso racional de água em habitações de interesse social como estratégia para a conservação de energia em Florianópolis. 2012. 172 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012.